

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES
Photonics Research Labs



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**Diseño, fabricación y caracterización
de sensores basados en fibras ópticas
de múltiples núcleos.**

TESIS DOCTORAL

JAVIER MADRIGAL MADRIGAL

Directores:
SALVADOR SALES MAICAS
DAVID BARRERA VILAR

Valencia, diciembre 2021

*“La imaginación de la naturaleza supera con mucho la
nuestra”*

Richard Feynman

Agradecimientos

Esta tesis no hubiera sido posible sin el inestimable apoyo recibido por parte de mis directores. En primer lugar, debo agradecer a Salva toda la confianza que ha depositado en mí durante estos años y todas las oportunidades y buenos consejos que me ha dado para prosperar en mi carrera investigadora. Por otra parte, nunca hubiera llegado a este punto sin David. Si no hubiera sido por su infinita paciencia, sus explicaciones, sus buenos consejos y sus ánimos en los peores momentos, esta tesis no hubiera sido posible.

Por otro lado, debo agradecer el apoyo recibido para llevar a cabo esta tesis por parte de José Capmany, Ivana Gasulla y José Miguel Adam. Así mismo, quiero dar las gracias a todos los compañeros del PRL y a todas las personas que de forma directa o indirecta se vean reflejados en esta tesis.

También debo agradecer a la Universitat Politècnica de València la beca FPI (PAID-01-18) que me fue concedida para realizar esta tesis.

Para finalizar me gustaría agradecer a mi familia y amigos todo el cariño y apoyo recibido durante estos años, especialmente a mis padres Roque y María.

A todos vosotros va dirigido este trabajo.

Resumen

La fibra óptica ha supuesto una gran revolución en el mundo de las telecomunicaciones debido a su alta capacidad de transmisión y sus bajas pérdidas. Hoy en día no sería posible transportar la cantidad de tráfico que se genera en internet si no fuera por sistemas de comunicaciones basados en fibras ópticas. Sin embargo, el número de dispositivos conectados a internet es cada vez mayor, por lo que la capacidad de la fibra óptica estándar de un solo núcleo se puede ver limitada en un futuro no muy lejano. Una forma de aumentar dicha capacidad es utilizar fibras ópticas con varios núcleos. Actualmente existe un gran interés sobre la investigación en este tipo de fibras para aplicaciones de telecomunicaciones, por lo que no es difícil encontrar fibras multinúcleo comerciales.

Aunque el uso más común de la fibra óptica es para telecomunicaciones, también se puede utilizar como sensor. Uno de los métodos más comunes para la implementación de sensores es la inscripción de redes de difracción en fibras ópticas de un solo núcleo. Sin embargo, la inscripción de redes de dirección en fibras de múltiples núcleos abre nuevas líneas de investigación para el desarrollo de sensores avanzados.

En esta tesis se ha estudiado distintos tipos de redes de difracción inscritas en una fibra de siete núcleos para su aplicación en la implementación de sensores. En primer lugar, se describe el sistema de fabricación que permite inscribir distintos tipos de redes de difracción en la fibra multinúcleo de forma selectiva, es decir, permite seleccionar en qué núcleos se va a inscribir la red. Mediante este sistema se han inscrito redes de periodo largo y posteriormente se han caracterizado como sensor de deformación, torsión y curvatura. Después, se han inscrito redes de Bragg inclinadas para aumentar de forma intencionada la diafonía entre los núcleos de la fibra mediante el acoplo de luz entre ellos. Además, se ha demostrado experimentalmente que esta diafonía es sensible a la deformación de la fibra, a la curvatura, a la temperatura y al índice de refracción que rodea la fibra. Por otro lado, se ha demostrado que las redes de Bragg inscritas en fibras multinúcleo se pueden utilizar para implementar sensores de curvatura capaces de operar en entornos radioactivos. Finalmente se han fabricado redes de Bragg regeneradas capaces de operar a altas temperaturas, estas redes se han caracterizado como sensor de temperatura, deformación y curvatura.

Abstract

Optical fiber has been a great revolution in the world of telecommunications due to its high transmission capacity and low attenuation. Today it would not be possible to transport the amount of traffic that is generated on the Internet without communication systems based on optical fibers. However, the number of devices connected to the Internet is increasing, so the capacity of standard single-core fiber optics may be limited so far in the future. One way to increase this capacity is to use multi-core optical fibers. Nowadays is a great interest in research in this type of fibers for telecommunications applications, so it is not difficult to find commercial multicore fibers.

Although the most common use of fiber optics is for telecommunications, it can also be used as a sensor. One of the most common methods for sensor implementation is the inscription of diffraction gratings on single-core optical fibers. However, the enrollment of steering networks in multi-core fibers opens new lines of research for the development of advanced sensors.

In this thesis, different types of diffraction gratings inscribed in a seven-core fiber have been studied for their application in the implementation of sensors. In the first place, the diffraction grating manufacturing system is described that allows to inscribe different types of diffraction gratings in the multicore fiber selectively, that is, it allows to select in which cores the grating is going to be inscribed. By means of this system, long-period networks have been inscribed and subsequently they have been characterized as a deformation, torsion, and curvature sensor. Then, slanted Bragg gratings have been inscribed to intentionally increase the crosstalk between the fiber cores by coupling light between them. Furthermore, this crosstalk has been experimentally shown to be sensitive to fiber deformation, curvature, temperature, and the index of refraction surrounding the fiber. On the other hand, it has been shown that Bragg networks inscribed in multicore fibers can be used to implement curvature sensors capable of operating in radioactive environments. Finally, regenerated Bragg nets capable of operating at high temperatures have been manufactured. These nets have been characterized as a temperature, deformation, and curvature sensor.

Resum

La fibra òptica ha suposat una gran revolució en el món de les telecomunicacions a causa de la seua alta capacitat de transmissió i les seues baixes pèrdues. Hui en dia no seria possible transportar la quantitat d'informació que es genera en internet si no fos pels sistemes de comunicacions basats en fibres òptiques. No obstant això, el nombre de dispositius connectats a internet es cada vegada més gran, per la qual cosa la capacitat de la fibra òptica estàndard d'un sol nucli es pot veure limitada en un futur no gaire llunyà. Una manera d'augmentar aquesta capacitat es utilitzar fibres òptiques amb diversos nuclis. Actualment existeix un gran interès sobre la investigació en aquesta mena de fibres per a aplicacions de telecomunicacions, per la qual cosa no es difícil trobar fibres de múltiples nuclis comercials.

Encara que l'ús més comú de la fibra òptica es per a telecomunicacions, també es pot utilitzar com a sensor. Un dels mètodes més comuns per a la implementació de sensors es la inscripció de xarxes de difracció en fibres òptiques d'un sol nucli. No obstant això, la inscripció de xarxes de difracció en fibres de múltiples nuclis obri noves línies d'investigació per al desenvolupament de sensors més complexos.

En aquesta tesi s'ha estudiat diferents tipus de xarxes de difracció inscrites en una fibra de set nuclis per a la seua aplicació en la implementació de sensors en fibra òptica. En primer lloc, es descriu el sistema de fabricació de xarxes de difracció que permet inscriure diferents tipus de xarxes de difracció en la fibra de múltiples nuclis de manera selectiva, es a dir, permet seleccionar en que nuclis s'inscriurà la xarxa. Mitjançant aquest sistema s'han inscrit xarxes de període llarg i posteriorment s'han caracteritzat com a sensor de deformació, torsió i curvatura. Després, s'han inscrit xarxes de Bragg inclinades per a augmentar de manera intencionada la diafonia entre els nuclis de la fibra mitjançant l'acoblament de llum entre ells. A més d'això, s'ha demostrat experimentalment que aquesta diafonia es sensible a la deformació de la fibra, a la curvatura, a la temperatura i a l'índex de refracció que envolta la fibra. D'altra banda, s'ha demostrat que les xarxes de Bragg inscrites en fibres múltiples nuclis es poden utilitzar per a implementar sensors de curvatura que poden operar en entorns radioactius. Finalment s'han fabricat xarxes de Bragg regenerades que suporten altes temperatures, aquestes xarxes s'han caracteritzat com a sensor de temperatura, deformació i curvatura.

Índice

| | |
|---|-------------|
| LISTA DE FIGURAS | XI |
| LISTA DE TABLAS | XVII |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN | 2 |
| 1.2. INTRODUCCIÓN A LOS SENSORES BASADOS EN REDES DE DIFRACCIÓN EN FIBRA ÓPTICA. | 3 |
| 1.2.1. Fiber Bragg Gratings (FBGs)..... | 3 |
| 1.2.2. Tilted Fiber Bragg Gratings (TFBGs)..... | 4 |
| 1.2.3. Long Period Gratings (LPGs) | 6 |
| 1.3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS | 7 |
| 1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS..... | 8 |
| CAPÍTULO 2. SISTEMA DE FABRICACIÓN..... | 11 |
| 2.1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA..... | 13 |
| 2.3. INSCRIPCIÓN SELECTIVA | 15 |
| CAPITULO 3. SENSOR DE CURVATURA BASADO EN REDES DE PERIODO LARGO EN FIBRA MULTINÚCLEO. | 25 |
| 3.1. INTRODUCCIÓN | 26 |
| 3.2. IMPLEMENTACIÓN DEL SENSOR | 27 |
| 3.3. CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR..... | 30 |
| 3.3.1. Deformación | 32 |
| 3.3.2. Torsión..... | 33 |
| 3.3.3. Curvatura..... | 35 |
| 3.4. CONCLUSIONES | 38 |
| CAPÍTULO 4. SENSORES BASADOS EN LA DIAFONÍA INDUCIDA POR REDES DE BRAGG INCLINADAS EN FIBRAS MULTINÚCLEO. | 41 |
| 4.1. INTRODUCCIÓN | 42 |
| 4.2. DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO | 43 |
| 4.3. CARACTERIZACIÓN DEL DISPOSITIVO COMO SENSOR DE DEFORMACIÓN Y CURVATURA. | 49 |
| 4.4. IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN Y TEMPERATURA. | 54 |
| 4.5. CONCLUSIONES | 67 |
| CAPÍTULO 5. SENSORES DE FORMA EN FIBRA ÓPTICA MULTINÚCLEO PARA ENTORNOS RADIACTIVOS..... | 71 |

| | | |
|---|--|------------|
| 5.1. | INTRODUCCIÓN | 72 |
| 5.2. | FABRICACIÓN DEL SENSOR..... | 74 |
| 5.3. | IRRADIACIÓN..... | 76 |
| 5.4. | RESULTADOS EXPERIMENTALES..... | 77 |
| 5.5. | CONCLUSIONES | 82 |
| CAPÍTULO 6. REDES DE BRAGG REGENERADAS EN FIBRA ÓPTICA MULTINÚCLEO. | | 85 |
| 6.1. | INTRODUCCIÓN | 86 |
| 6.2. | FABRICACIÓN DE LAS RFBGs | 87 |
| 6.3. | CARACTERIZACIÓN EN TEMPERATURA Y DEFORMACIÓN | 91 |
| 6.4. | CARACTERIZACIÓN EN CURVATURA. | 94 |
| 6.5. | CONCLUSIONES | 99 |
| CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS ABIERTAS | | 103 |
| 7.1. | CONCLUSIONES | 104 |
| 7.2. | LÍNEAS ABIERTAS..... | 106 |
| ANEXO 1. PUBLICACIONES CIENTÍFICAS DEL AUTOR..... | | 109 |
| 1. | PUBLICACIONES EN REVISTAS INTERNACIONALES. | 109 |
| 2. | PUBLICACIONES EN CONGRESOS INTERNACIONALES..... | 111 |
| 3. | PUBLICACIONES EN CONGRESOS NACIONALES | 113 |
| 4. | PATENTES..... | 113 |
| 5. | PARTICIPACIÓN EN PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN..... | 114 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1. Esquema del funcionamiento de una FBG..... | 3 |
| Figura 1.2. Esquema de funcionamiento de una TFBG. | 5 |
| Figura 1.3. Esquema de funcionamiento de una LPG | 6 |
| Figura 2.1. Esquema del sistema de inscripción en fibra óptica multinúcleo..... | 14 |
| Figura 2.2. Esquema de inscripción de FBGs por el método de máscara de fase en una fibra multinúcleo. Izquierda, inscripción en todos los núcleos. Derecha, inscripción selectiva en un conjunto de tres núcleos. | 15 |
| Figura 2.3. Vista 3D de la inscripción de una FBG en una fibra MCF y vista en planta 2D. | 16 |
| Figura 2.4. Simulación por trazado de rayos del haz que incide en una fibra en el caso de inscripción en todos los núcleos [12]..... | 18 |
| Figura 2.5. Simulación por trazado de rayos del haz que incide en una fibra en el caso de inscripción selectiva en un plano de tres núcleos [12]..... | 18 |
| Figura 2.6. Espectro medido en los núcleos de una MCF donde se han inscrito tres FBGs distintas de manera selectiva. | 19 |
| Figura 2.7. Ejemplo de los espectros medidos en los núcleos de una MCF donde se ha inscrito una FBG en todos los núcleos. | 20 |
| Figura 2.8. Esquema de la vista frontal de la máscara de fase en la inscripción de una TFBG..... | 21 |
| Figura 2.9. Esquema de inscripción de una LPG mediante punto a punto. | 21 |
| Figura 3.1. (a) Sección transversal de la MCF incluyendo la numeración de los núcleos y los planos. (b) Esquema de las LPGs inscritas en cada uno de los planos [28]. | 28 |
| Figura 3.2. Esquema de la distribución de estiramiento en una fibra multinúcleo curvada [25]..... | 29 |
| Figura 3.3. Espectro de las LPGs en los núcleos 1,4 y 7, después de la primera inscripción. La figura interior muestra el espectro del núcleo 1 después de la inscripción de las 3 LPGs [28]. | 30 |
| Figura 3.4. Montaje para la caracterización del sensor. (a) Caracterización del estiramiento. (b) Caracterización de la torsión (c) Caracterización de la curvatura [28]. | 31 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.5. Desplazamiento en longitud de onda en el núcleo central y dos núcleos exteriores [28]. | 33 |
| Figura 3.6. Evolución de la banda de atenuación de las LPGs en los núcleos 3 y 6 [28]. | 34 |
| Figura 3.7. Atenuación máxima en la longitud de onda de Bragg en los núcleos 1, 3 y 6 y su correspondiente ajuste polinomial de segundo grado [28]. | 34 |
| Figura 3.8. Desplazamiento en longitud de onda de las LPGs en cada núcleo en función de la curvatura aplicada a la fibra [28]. | 36 |
| Figura 3.9. Desplazamiento en longitud de onda de las LPGs en cada núcleo en función de la dirección de curvatura [28]. | 37 |
| Figura 4.1. Vista longitudinal de los tres núcleos con TFBGs y diagrama de la interacción entre ellos [26]. | 44 |
| Figura 4.2. Reflectividad y transmisividad de la TFBG inscrita en el núcleo 1 [26]. | 44 |
| Figura 4.3. Reflectividad y transmisividad de la TFBG inscrita en el núcleo 3. La figura interior corresponde a la vista completa de la transmisividad [26]. | 45 |
| Figura 4.4. Reflectividad y transmisividad de la TFBG grabada en el núcleo 6. La figura interior corresponde a la vista completa de la transmisividad [26]. | 45 |
| Figura 4.5. Espectro en transmisión del núcleo 1, diafonía (XT) y diafonía hacia atrás (BXT) medidas en el núcleo 3 e inyectando luz por el núcleo 1 [26]. | 47 |
| Figura 4.6. Espectro en transmisión del núcleo 3, diafonía (XT) y diafonía hacia atrás (BXT) medidas en el núcleo 6 e inyectando luz por el núcleo 3 [26]. | 47 |
| Figura 4.7. Espectro en transmisión del núcleo 1, diafonía (XT) y diafonía hacia atrás (BXT) medidas en el núcleo 1 e inyectando luz por el núcleo 7 [26]. | 48 |
| Figura 4.8. Espectro en transmisión del núcleo 3, diafonía (XT) y diafonía hacia atrás (BXT) medidas en el núcleo 4 e inyectando luz por el núcleo 3 [26]. | 49 |
| Figura 4.9. Montaje utilizado para las medidas de deformación y curvatura. | 50 |
| Figura 4.10. Desplazamiento de la longitud de onda de Bragg de la TFBG inscrita en el núcleo 1 y de los modos de cubierta frente a la deformación aplicada a la fibra [26]. | 51 |
| Figura 4.11. Máximo nivel de diafonía (XT) entre los núcleos 1,3 y 6 frente a la curvatura aplicada a la fibra [26]. | 52 |
| Figura 4.12. Desplazamiento en longitud de onda del XT entre los núcleos 1,3 y 6 [26]. | 53 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.13. Espectrograma del XT entre los núcleos 1, 3 y 6 para distintas direcciones de curvatura [26]. | 53 |
| Figura 4.14. Espectros de las TFBGs de 2° en los núcleos 1, 2 y 5. El resto de los núcleos sin TFBG tienen un espectro similar al del núcleo 4 [28]. | 55 |
| Figura 4.15. Espectros de las TFBGs de 7° en los núcleos 1, 2 y 5. El resto de los núcleos sin TFBG tienen un espectro similar al del núcleo 4 [28]. | 55 |
| Figura 4.16. Esquema de la orientación de la MCF durante la inscripción de las TFBGs de 2° y 7°. | 56 |
| Figura 4.17. XT 5→1, XT 5→2 y XT5→4 para las TFBGs de 2° [28]. | 57 |
| Figura 4.18. XT 5→1, XT 5→2 y XT5→4 para las TFBGs de 7° [28]. | 57 |
| Figura 4.19. Esquema del montaje utilizado para sumergir la fibra en una disolución líquida a temperatura controlada. | 58 |
| Figura 4.20. Fotografías del montaje: (a) Plataforma de translación, (b) rotador de fibra, (c) plataforma elevadora, (d) (f) cubeta, (e) fibra óptica con las TFBGs y (g) célula Peltier [28]. | 59 |
| Figura 4.21. Espectro del XT1→2 a diferentes temperaturas. La flecha indica la dirección del incremento de temperatura [28]. | 60 |
| Figura 4.22. Correlación cruzada del X1→2 a 10° con el XT1→2 calculada a diferentes temperaturas [28]. | 61 |
| Figura 4.23. Desplazamiento en longitud de onda con la temperatura para todas las combinaciones de XT medidas [28]. | 62 |
| Figura. 4.24. XT1→2, medido con el sensor fabricado con TFBGs de 2° [28]. | 63 |
| Figura 4.25. XT5→2, medido con el sensor fabricado con TFBGs de 2° [28]. | 63 |
| Figura 4.26. XT2→5, medido con el sensor fabricado con TFBGs de 7° [28]. | 64 |
| Figura 4.27. XT1→5, medido con el sensor fabricado con TFBGs de 7° [28]. | 65 |
| Figura 4.28. Potencia normalizada para todas las combinaciones de diafonía en el sensor fabricado con TFBGs de 2°. Las curvas representadas corresponden al ajuste polinomial de segundo orden aplicado [28]. | 66 |
| Figure 4.29. Potencia normalizada para todas las combinaciones de diafonía en el sensor fabricado con TFBGs de 7°. Las curvas representadas corresponden al ajuste polinomial de segundo orden aplicado [28]. | 66 |
| Figura 5.1. (Izquierda)Vista de transversal de la MCF y numeración de los núcleos. (Derecha) Vista longitudinal de la MCF y distribución de las FBGs [16]. | 74 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.2. Espectros en reflexión de las FBGs inscritas en los núcleos de la fibra MCF sin hidrogenar [16]. | 75 |
| Figura 5.3. Espectros en reflexión de las FBGs inscritas en los núcleos de la fibra MCF hidrogenada [16]. | 75 |
| Figura 5.4. Esquema de las fibras montadas sobre el soporte cilíndrico y posición de las FBGs [16]. | 76 |
| Figura 5.5. Foto de la cámara de irradiación IRMA (izquierda) [17]. Plano de la posición de la fuente radioactiva y el soporte los sensores dentro de la cámara (derecha). | 77 |
| Figura 5.6. Espectros de una FBG en el núcleo 3 y núcleo 6, con la fibra no hidrogenada recta, colocada en el soporte y después de recibir la radiación [16]. | 78 |
| Figura 5.7. Espectros de una FBG en el núcleo 5 y núcleo 2, con la fibra hidrogenada recta, colocada en el soporte y después de recibir la radiación [16]. | 78 |
| Figura 5.8. Esquema de la geometría de la MCF y parámetros para determinar la curvatura. | 81 |
| Figura 5.9. Curvatura calculada antes y después de irradiar las fibras para cada posición donde se encuentran las FBGs [16]. | 81 |
| Figura 6.1. Esquema del montaje del sistema de recocido. | 88 |
| Figura 6.2. Potencia óptica reflejada normalizada en las FBGs de los núcleos números 1, 2, 4 y 6 durante el proceso de recocido [21]. | 89 |
| Figura 6.3. Espectro de las RFBGs en el núcleo central (núcleo 1) y en algunos de los núcleos exteriores (núcleos 2, 4 y 6) [21]. | 90 |
| Figura 6.4. Desplazamiento en longitud de onda de la RFBG en el núcleo 1 con la temperatura. Los puntos rojos indican el valor de desplazamiento para cara temperatura y la línea azul representa el ajuste polinómico aplicado [21]. | 92 |
| Figura 6.5. Desplazamiento en longitud de onda de la RFBG en el núcleo número 1 para distintos valores de estiramiento. La línea representa el ajuste lineal aplicado [21]. | 93 |
| Figura 6.6 Montaje utilizado para la caracterización en curvatura de las RFBGs [21]. | 94 |
| Figura 6.7. Desplazamiento en longitud de onda de las RFGs en todos los núcleos para cada valor de curvatura. Las líneas corresponden al ajuste lineal aplicado [21]. | 95 |

| | |
|--|----|
| Figura 6.8. Desplazamiento en longitud de onda con la dirección de curvatura. Las líneas representan el ajuste aplicado [21]...... | 97 |
| Figura 6.9. Desplazamiento en longitud de onda de las RFBGs en los núcleos 4 y 7 con la curvatura para temperaturas elevadas [21]..... | 98 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1. Sensibilidades al estiramiento medidas en cada núcleo [28]..... | 33 |
| Tabla 3.2. Coeficientes del ajuste polinomial de segundo grado aplicado a las medidas de torsión en cada núcleo [28]..... | 35 |
| Tabla 3.3. Sensibilidades a la curvatura medidas en cada núcleo [28]..... | 37 |
| Tabla 4.1 Sensibilidad a la deformación de los modos de cubierta de la TFBG inscrita en núcleo central de la MCF [26]. | 51 |
| Tabla 5.1. Fibra sin hidrogenar. Longitud de onda de Bragg de las FBGs con la fibra recta (nm), su desplazamiento (en pm) cuando la fibra esta curvada (C) y el desplazamiento adicional después de la irradiación (R) [16]. | 79 |
| Tabla 5.2. Fibra hidrogenada. Longitud de onda de Bragg de las FBGs con la fibra recta (nm), su desplazamiento (en pm) cuando la fibra esta curvada (C) y el desplazamiento adicional después de la irradiación (R) [16]. | 80 |
| Tabla 6.1. Ecuación, coeficientes del ajuste lineal aplicado al desplazamiento en longitud de onda con la curvatura [21]. | 96 |
| Tabla 6.2 Ecuación y coeficientes del ajuste aplicado para el desplazamiento en longitud de onda con la dirección de curvatura [21]. | 97 |

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Actualmente los sistemas de comunicaciones modernos no se podrían concebir sin la existencia de la fibra óptica, ya que debido a su alta capacidad y su baja atenuación permite transmitir grandes cantidades de información a largas distancias. Los antecedentes de la fibra óptica se remontan al año 1841 cuando el físico suizo Daniel Colladon y el físico francés Jacques Babinet demostraron que un chorro de agua era capaz de guiar la luz por su interior. Sin embargo, fue el físico irlandés Jhon Tyndall el que difundió esta demostración en la década de 1850, y es por esto por lo que a lo a menudo se le asocia a él esta demostración. Años más tarde, en la década de 1950 el físico indio Narinder Singh Kapany desarrolló un material para guiar la luz. Pero este material presentaba una gran atenuación y limitaba la transmisión de la luz a unos cuantos metros. No fue hasta la invención del láser en 1960 por el físico norteamericano Theodore Harold Maiman cuando los científicos empezaron a preocuparse por encontrar un medio eficaz para guiar la luz láser. Un punto clave en el desarrollo de la fibra óptica se alcanzó cuando los físicos Kao y Hockman demostraron en 1966 que las pérdidas de la fibra se debían a las impurezas del cristal y no al material en sí. En 1970 la compañía Corning Glass Work consiguió, gracias a los trabajos de los investigadores Kapron, Keck y Maures, mejorar la calidad del material y obtener una fibra con pérdidas de 20 dB/Km. A partir de este momento se inició una competición entre grupos de investigación para reducir las pérdidas de la fibra hasta que en 1979 se consiguió alcanzar los 0.2 dB/Km transmitiendo longitudes de onda en la ventana de 1550 nm [1].

A partir de que se consiguiera mejorar su atenuación, las fibras ópticas se han utilizado ampliamente para el desarrollo e implementación de sistemas de comunicaciones ópticas. Sin embargo, el potencial de las fibras ópticas no se limita a las aplicaciones de comunicaciones si no que se puede utilizar también para la implementación de distintos dispositivos, y entre ellos los sensores en fibra óptica [2]–[4]. Existen distintos tipos de sensores basados en fibras ópticas utilizados comúnmente para medir temperatura, deformación, humedad o índice de refracción entre otras magnitudes. Estos sensores se pueden implementar utilizando distintas tecnologías. Dentro de las más comunes podemos encontrar: por un lado, los sensores implementados con interferómetros [5], y otro lado los sensores basados en la dispersión (*scattering*) Rayleigh, Raman y Brillouin [6]–[9]. Y por último los sensores basados en la inscripción de redes de difracción en la fibra óptica, tales como los basados en *Fiber Bragg Gratings* (FBGs), *Tilted Fiber Bragg Grating* (TFBGs) o *Long Period Gratings* (LPGs) [3]. En esta tesis está centrada en los sensores basados en este tipo de redes. En la siguiente sección, se describe su principio de funcionamiento.

1.2. Introducción a los sensores basados en redes de difracción en fibra óptica.

Las redes de difracción en fibras ópticas son microestructuras formadas por cambios de índice de refracción periódicos o cuasi periódicos a lo largo del núcleo de la fibra óptica. Estas redes de difracción pueden ser de varios tipos y son la base de multitud de dispositivos usados tanto en comunicaciones como en sensores. A continuación, se describen las redes de difracción en fibra que se han utilizado para el desarrollo de los sensores presentados en los posteriores capítulos de esta tesis.

1.2.1. Fiber Bragg Gratings (FBGs)

Las FBGs son uno de los dispositivos fotónicos más utilizados para implementar sensores en fibras ópticas [10]. Estas redes de Bragg actúan como espejos semireflectivos selectivos en longitud de onda. En una FBG, parte de la luz que viaja por el núcleo de la fibra se refleja en los múltiples cambios de índice de refracción, para ciertas longitudes de onda, estas reflexiones se suman en fase, lo que provoca que parte de la luz del modo incidente se acople al modo que se propaga en sentido opuesto [11]. La figura 1.1 muestra un esquema de funcionamiento de una FBG inscrita en una fibra de un solo núcleo.

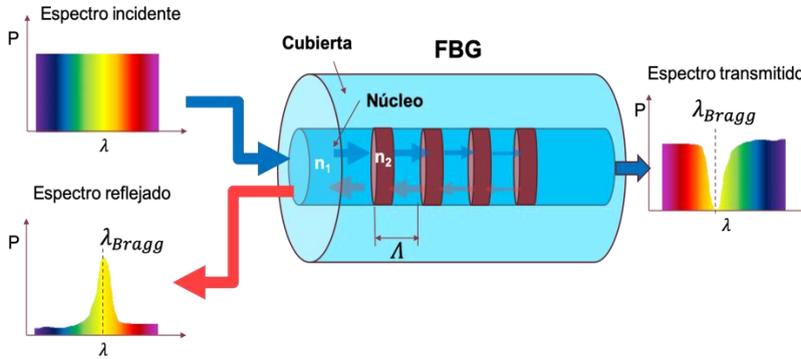


Figura 1.1. Esquema del funcionamiento de una FBG.

La longitud de onda para la cual se produce el mayor acoplo se denomina longitud de onda de Bragg y viene determinada por la ecuación,

$$\lambda_{Bragg} = 2 n_{eff} \Lambda, \quad (1)$$

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica y Λ es el periodo de las franjas correspondientes a los cambios en el índice de refracción.

Las características intrínsecas de una FBG permiten utilizarla como sensor de deformación o temperatura. Si la fibra se estira o se encoje el periodo de las franjas de la FBG se modifica y por lo tanto también la longitud de onda de Bragg. Por otro lado, los cambios de temperatura provocan, por un lado, un cambio en la longitud física de la fibra óptica debido al coeficiente de dilatación térmica del material, y por otro lado, cambios en el índice de refracción de la fibra debido al efecto termo-óptico. Ambos efectos producen un cambio en la longitud de onda de Bragg.

Teniendo en cuenta los efectos anteriores, el desplazamiento en longitud de onda de la longitud de onda de Bragg debido a la deformación y la temperatura se puede expresar mediante la siguiente ecuación [4], [10].

$$\Delta\lambda = \lambda_{Bragg} [(1 - P_e) \varepsilon + ((1 - P_e) \alpha + \xi) \Delta T], \quad (2)$$

donde P_e es coeficiente foto-elástico de la fibra óptica, α es el coeficiente de dilatación, ξ es el coeficiente termo-óptico y ΔT es la variación de temperatura.

1.2.2. Tilted Fiber Bragg Gratings (TFBGs)

Un TFBG es una variante de las FBG, con la particularidad de que sus franjas tienen una inclinación con respecto al eje perpendicular a la fibra. El resultado de la interacción de la luz que se propaga por el núcleo con las perturbaciones inclinadas adquiere propiedades muy diferentes a las que se obtienen en una FBG. Parte de la luz incidente se puede acoplar a un modo guiado que se propaga en sentido contrario al igual que ocurre en las FBGs, pero además también se puede acoplar parte de la luz desde el modo guiado por el núcleo de la fibra óptica a un conjunto de modos que se propagan por la cubierta, modos fugados por la cubierta o modos radiados fuera de la fibra. [11], [12]. La figura 1.2 muestra un esquema del funcionamiento de una TFBG. En el espectro transmitido la longitud de onda de la resonancia de Bragg es siempre la más alta, ya que el índice de refracción efectivo del núcleo es el mayor. Además de la resonancia de Bragg, para longitudes de ondas menores, el espectro muestra multitud de resonancias más débiles correspondientes a los modos de cubierta.

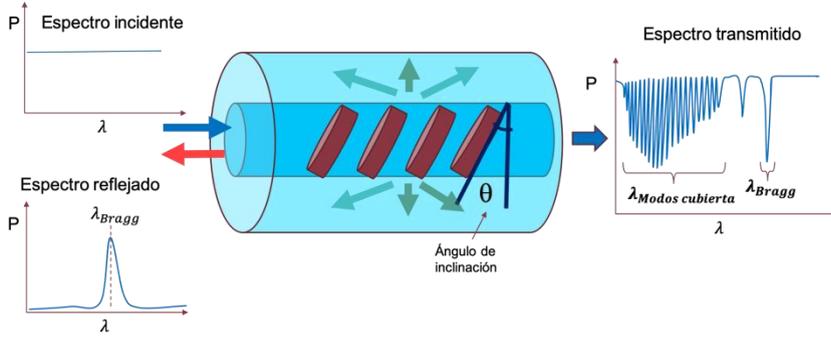


Figura 1.2. Esquema de funcionamiento de una TFBG.

En el caso de las TFBGs la longitud de onda de las resonancias de cada modo se pueden calcular con la siguiente ecuación [12],

$$\lambda_r = \frac{N_{eff}^{core}(\lambda_r) + N_{eff}^r(\lambda_r)}{\cos(\theta)} \Lambda \quad (3)$$

donde λ_r es la longitud de onda donde se observa la resonancia, N_{eff}^{core} y N_{eff}^r son los índices de refracción efectivos del modo que se propaga por el núcleo y del modo de cubierta r o r -ésimo.

En cuanto a las propiedades de las TFBG como sensores, cabe destacar que la sensibilidad a la deformación y a la temperatura es dependiente de la resonancia. Para la resonancia de Bragg, la sensibilidad a la temperatura y a la deformación es igual que el caso de una FBG. Sin embargo, las resonancias de los modos de cubierta presentan sensibilidades diferentes. El desplazamiento en longitud de onda de la resonancia de cada modo se puede expresar mediante la siguiente ecuación [12],

$$\Delta\lambda^r = \left(\frac{(N_{eff}^{core} + N_{eff}^r)}{\cos(\theta)} \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} + \frac{\Lambda}{\cos(\theta)} \frac{d(N_{eff}^{core} + N_{eff}^r)}{d\varepsilon} \right) \Delta\varepsilon + \left(\frac{(N_{eff}^{core} + N_{eff}^r)}{\cos(\theta)} \frac{d\Lambda}{dT} + \frac{\Lambda}{\cos(\theta)} \frac{d(N_{eff}^{core} + N_{eff}^r)}{dT} \right) \Delta T \quad (4)$$

Aparte de que las TFBG sean sensibles a la deformación y la temperatura, el número de resonancias de los modos de cubierta depende del índice de refracción del medio exterior que rodea la fibra, a medida que este aumenta, el número de modos de cubierta es menor. Esto dota a las TFBG de un enorme potencial para desarrollar, refractómetros, sensores químicos y biológicos [13]. En el capítulo 4 de esta tesis se describe un sensor del índice de refracción del medio que rodea la fibra, desarrollado mediante la inscripción de TFBG en una fibra óptica de múltiples núcleos

1.2.3. Long Period Gratings (LPGs)

Otro tipo de redes de difracción utilizado para la implementación de sensores en fibra óptica son las redes de periodo largo (LPGs). Estas redes están formadas por cambios periódicos en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica al igual que las FBGs y las TFBGs. Sin embargo, las LPGs tienen un periodo más grande. Las LPGs acoplan parte de la luz que se propaga por el núcleo a modos de cubierta que se propagan en la misma dirección que el modo del núcleo, a diferencia de las FBGs y TFBGs no hay modos reflejados [11]. En la figura 1.3 se puede ver un esquema del funcionamiento de una LPG.

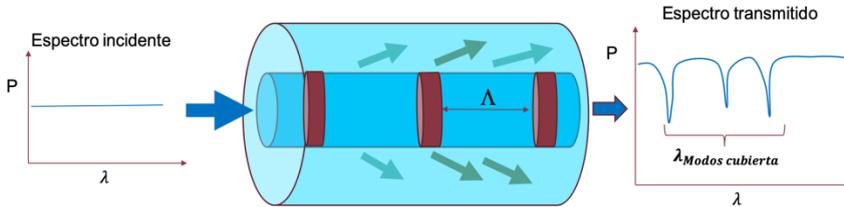


Figura 1.3. Esquema de funcionamiento de una LPG

El espectro en transmisión de una LPG presenta una serie de bandas de atenuación que corresponde a las longitudes de onda de resonancia de los modos que se propagan por la cubierta de la fibra óptica. La longitud de onda de la resonancia del modo de cubierta i -ésimo se puede obtener con la siguiente ecuación [14],

$$\lambda^i = (n_{core} - n_{cladd}^i) \Lambda \quad (5)$$

donde n_{core} es el índice de refracción efectivo del modo que se propaga por el núcleo de la fibra, n_{cladd}^i el índice de refracción efectivo del i -ésimo modo de simetría axial y de polarización lineal LP_{0i} que se propaga por la cubierta.

En una LPG el desplazamiento en longitud de onda de las resonancias es sensible a la deformación y la temperatura de la fibra. Su sensibilidad depende del periodo de la LPG y del orden de la resonancia, por lo que es posible alcanzar valores de sensibilidad más altos que con una FBG [15]. Además, mediante la inscripción de LPGs con el periodo adecuado, se pueden conseguir sensores sensibles solamente a una de las dos magnitudes, o bien, se pueden utilizar las distintas resonancias de una misma LPG para eliminar la sensibilidad cruzada entre deformación y temperatura [16]. En el capítulo 3 de esta tesis se estudia de manera experimental las posibilidades que ofrecen como sensores las LPGs inscritas en fibras de múltiples núcleos

1.3. Motivación y objetivos

La mayoría de los sensores citados anteriormente se fabrican en las fibras ópticas estándar de un solo núcleo que se utilizan en los sistemas de comunicaciones ópticas. En los próximos años se espera que el número de dispositivos conectados a internet sea tres veces mayor que la población mundial [17], lo que supone un aumento considerable en el tráfico de datos. Esto implica que la capacidad de transmisión de las fibras ópticas de un solo núcleo se puede ver limitada para satisfacer las necesidades futuras. Una forma de aumentar la capacidad de la fibra es utilizar sistemas basados en multiplexación espacial, *Space División Multiplexing* (SDM) [18], donde diferentes señales se transmiten por diferentes caminos ópticos simultáneamente. Una forma eficiente de implementar estos sistemas es aprovechar la diversidad espacial de los núcleos en una fibra óptica *Multicore Fiber* (MCF) [19]. La mayor tasa de transmisión obtenida hasta la fecha es de 172 Tb/s sobre 2040 km de una MCF de tres núcleos con varios modos [20].

Además de permitir obtener altas tasas de transmisión en sistemas SDM, la distribución espacial de los núcleos en una MCF se puede utilizar para el desarrollo de novedosos dispositivos fotónicos de comunicaciones [21] y sensores avanzados capaces de medir magnitudes que no es posible, o es mucho más complejo, con fibras de un solo núcleo. Por ejemplo, sensores de curvatura o de forma [22], [23].

Como se ha visto anteriormente, la distribución espacial de los núcleos en una MCF tiene un gran potencial para el desarrollo de sensores y dispositivos fotónicos basados en redes de difracción en fibra. Sin embargo, para exprimir al máximo las posibilidades que ofrecen estas fibras, es necesario contar con un sistema de fabricación de redes de difracción en fibra que sea versátil, es decir que permita inscribir todo tipo de redes de difracción en una fibra MCF, como FBGs, TFBGs y LPGs. Además, es fundamental que la inscripción sea selectiva o, dicho de otra manera, que en cada núcleo se pueda inscribir distintos tipos de redes. De esta manera se pueden aprovechar al máximo la diversidad espacial de los núcleos para el desarrollo novedosos sensores.

Uno de los objetivos de esta tesis es el diseño y montaje de un sistema de fabricación que permita la inscripción de distintos tipos de redes de difracción en fibra MCF de manera selectiva. Una vez conseguido, se pretende diseñar y fabricar distintos dispositivos fotónicos basados en FBGs, TFBGs y LPGs en fibras MCF y caracterizarlos como sensores.

1.4. Estructura de la tesis

Esta tesis está dividida por capítulos de la siguiente manera:

- En el capítulo 2 se describe la técnica y el sistema de fabricación utilizado para la inscripción de FBGs, LPGs y TFBGs en una fibra comercial de siete núcleos.
- En el capítulo 3 se estudia las posibilidades que ofrece como sensor de deformación, curvatura y torsión, un dispositivo fabricado mediante la inscripción de LPGs en una fibra de siete núcleos.
- En el capítulo 4 se inscriben TFBGs en una fibra de siete núcleos para incrementar la diafonía entre los núcleos de forma localizada y controlada. Después se caracteriza la diafonía ante distintitos estímulos de deformación, curvatura, temperatura e índice de refracción del medio que rodea la fibra.
- En el capítulo 5 se estudia la implementación de un sensor de curvatura capaz de operar en entornos radioactivos basado en FBGs inscritas en una fibra óptica de siete núcleos.
- En el capítulo 6, se implementa un sensor de curvatura para entornos de altas temperaturas basados en *Regenerated Fiber Bragg Gratings* (RFBGs) en una fibra de siete núcleos. En este capítulo se describe el proceso de creación de las RFBGs y la caracterización en curvatura del sensor.

REFERENCIAS

- [1] J. Ballato y P. Dragic, «Glass: The Carrier of Light - A Brief History of Optical Fiber», *Int J Appl Glass Sci*, vol. 7, no. 4, pp. 413-422, dic. 2016, doi: 10.1111/ijag.12239.
- [2] Y.-J. Rao, «Fiber Bragg grating sensors: principles and applications», en *Optical Fiber Sensor Technology*, K. T. V. Grattan y B. T. Meggitt, Eds. Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 355-379. doi: 10.1007/978-1-4615-5787-6_11.
- [3] B. Lee, «Review of the present status of optical fiber sensors», *Optical Fiber Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 57-79, abr. 2003, doi: 10.1016/S1068-5200(02)00527-8.
- [4] R. Correia, S. James, S.-W. Lee, S. P. Morgan, y S. Korposh, «Biomedical application of optical fibre sensors», *J. Opt.*, vol. 20, no. 7, p. 073003, jul. 2018, doi: 10.1088/2040-8986/aac68d.
- [5] B. H. Lee et al., «Interferometric Fiber Optic Sensors», *Sensors*, vol. 12, no. 3, pp. 2467-2486, feb. 2012, doi: 10.3390/s120302467.
- [6] A. Loayssa, «Structural Health Monitoring Using Distributed Fibre-Optic Sensors», en *Optical Fibre Sensors*, 1.a ed., I. Villar y I. R. Matias, Eds. Wiley, 2020, pp. 125-149. doi: 10.1002/9781119534730.ch5.

- [7] M. Froggatt y J. Moore, «High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter», *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 10, p. 1735, abr. 1998, doi: 10.1364/AO.37.001735.
- [8] G. Bolognini y A. Hartog, «Raman-based fibre sensors: Trends and applications», *Optical Fiber Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 678-688, dic. 2013, doi: 10.1016/j.yofte.2013.08.003.
- [9] A. Dominguez-Lopez, M. A. Soto, S. Martin-Lopez, L. Thevenaz, y M. Gonzalez-Herraez, «Resolving 1 million sensing points in an optimized differential time-domain Brillouin sensor», *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 10, p. 1903, may 2017, doi: 10.1364/OL.42.001903.
- [10] Raman Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*. Elsevier, 2010. doi: 10.1016/C2009-0-16830-7.
- [11] T. Erdogan, «Fiber grating spectra», *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294, ago. 1997, doi: 10.1109/50.618322.
- [12] J. Albert, L.-Y. Shao, y C. Caucheteur, «Tilted fiber Bragg grating sensors: Tilted fiber Bragg grating sensors», *Laser & Photonics Reviews*, vol. 7, no. 1, pp. 83-108, ene. 2013, doi: 10.1002/lpor.201100039.
- [13] T. Guo, F. Liu, B.-O. Guan, y J. Albert, «[INVITED] Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors», *Optics & Laser Technology*, vol. 78, pp. 19-33, abr. 2016, doi: 10.1016/j.optlastec.2015.10.007.
- [14] S. W. James y R. P. Tatam, «Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. R49-R61, may 2003, doi: 10.1088/0957-0233/14/5/201.
- [15] Xuewen Shu, Lin Zhang, y I. Bennion, «Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings», *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 255-266, feb. 2002, doi: 10.1109/50.983240.
- [16] V. Bhatia, «Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing», *Opt. Express*, vol. 4, no. 11, p. 457, may 1999, doi: 10.1364/OE.4.000457.
- [17] Cisco, San Jose, CA, USA, «The Zettabyte Era: Trends and Analysis.» jun. 2017.
- [18] B. J. Puttnam, G. Rademacher, y R. S. Luís, «Space-division multiplexing for optical fiber communications», *Optica*, vol. 8, no. 9, p. 1186, sep. 2021, doi: 10.1364/OPTICA.427631.
- [19] K. Saitoh y S. Matsuo, «Multicore Fiber Technology», *J. Lightwave Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 55-66, ene. 2016, doi: 10.1109/JLT.2015.2466444.
- [20] G. Rademacher et al., «High Capacity Transmission in a Coupled-Core Three-Core Multi-Core Fiber», *J. Lightwave Technol.*, vol. 39, no. 3, pp. 757-762, feb. 2021, doi: 10.1109/JLT.2020.3013966.
- [21] I. Gasulla, D. Barrera, J. Hervás, y S. Sales, «Spatial Division Multiplexed Microwave Signal processing by selective grating inscription in homogeneous multicore fibers», *Sci Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 41727, mar. 2017, doi: 10.1038/srep41727.
- [22] J. P. Moore y M. D. Rogge, «Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions», *Opt. Express*, vol. 20, no. 3, p. 2967, ene. 2012, doi: 10.1364/OE.20.002967.
- [23] M. Amanzadeh, S. M. Aminossadati, M. S. Kizil, y A. D. Rakić, «Recent developments in fibre optic shape sensing», *Measurement*, vol. 128, pp. 119-137, nov. 2018, doi: 10.1016/j.measurement.2018.06.034.

Capítulo 2

Sistema de fabricación

Resumen: En este capítulo se describe el sistema de fabricación de redes de difracción en fibra óptica multinúcleo mediante el cual se han fabricado todos los dispositivos presentados en esta tesis. Primero se describen los componentes del sistema de fabricación. Después, se describe la técnica empleada para la inscripción selectiva en los núcleos de la fibra óptica.

2.1. Introducción

Uno de los dispositivos fotónicos más utilizados para implementar sensores en fibra óptica son las FBGs. En 1977 K. O. Hill y Y. Fujii observaron que el núcleo de una fibra óptica dopado con germanio era fotosensible, es decir, que se puede modificar su índice de refracción mediante la acción de la luz. Al mismo tiempo, mostraron que era posible crear redes de difracción de Bragg en una fibra óptica mediante la interferencia de la luz que se propaga por la fibra en un sentido y la luz reflejada al final de la fibra que se propaga en sentido opuesto [1]. Utilizando este método, la FBG se inscribe a lo largo de toda la fibra y además su periodo no se puede modificar. En 1989 G. Meltz et al. propusieron un método holográfico mediante el cual era posible inscribir FBGs iluminando la fibra óptica transversalmente con luz coherente UV [2]. El método consiste en irradiar desde un lado la fibra óptica con el patrón de interferencia creado por dos haces de luz láser a 244 nm. Este método es mucho más versátil que el anterior ya que, por un lado, se puede seleccionar la zona de la fibra óptica donde se inscribe la FBG y, por otro lado, el periodo de la FBG inscrita se puede controlar mediante el ángulo de interferencia entre los dos haces. Más adelante, en 1992, K. O. Hill et al. presentaron un nuevo método para inscribir FBGs utilizando una máscara de fase [3]. Este método consiste en hacer pasar un haz láser UV por una máscara de fase que provoca que el haz incidente se difracte en varios haces que tienen ángulos distintos dependiendo del orden de difracción. Estas máscaras de fase se diseñan normalmente para maximizar los órdenes +1 y -1. La interferencia entre estos haces crea un patrón de interferencia con un periodo proporcional al periodo de la máscara de fase. Exponiendo la fibra óptica a este patrón de interferencia se crea la FBG.

Actualmente, el método holográfico y el método de la máscara de fase son los más utilizados para la fabricación de FBGs. Estos métodos se pueden utilizar para inscribir FBGs tanto en fibras de un solo núcleo como en fibras multinúcleo. En el caso de fibras ópticas multinúcleo, utilizando el mismo método usado en las fibras de un solo núcleo, podemos fabricar dispositivos donde la misma FBG se inscriba en todos los núcleos a la vez [4]–[6]. Sin embargo, el potencial que ofrece las fibras multinúcleo para el desarrollo de nuevos dispositivos fotónicos para comunicaciones o sensores se puede aprovechar todavía más si se utilizan técnicas de inscripción selectiva que permitan inscribir FBGs [7], o cualquier otro tipo de red de difracción en fibra óptica, como TFBGs o LPGS, solamente en un núcleo o en un grupo de núcleos.

En este capítulo se describe un sistema de fabricación de redes de difracción en fibra que permite la inscripción selectiva de FBGs, TFBGs y LPGs en fibras multi-núcleo. El sistema se ha desarrollado a partir del sistema de fabricación de FBGs en fibras de un solo núcleo disponible en el *Photonics Research Labs* dentro de las instalaciones del ITEAM en la Universidad Politécnica de Valencia [8]. Este sistema se ha utilizado para la fabricación de todos los sensores presentados en esta tesis.

2.2. Descripción del sistema

El sistema de fabricación está compuesto por cuatro componentes básicos: una fuente láser UV, un obturador electromecánico, una plataforma de translación de precisión y un conjunto de lentes. Todos estos componentes están instalados sobre una mesa óptica de grandes dimensiones equipada con un sistema neumático de amortiguación para eliminar las posibles vibraciones procedentes del suelo.

El láser UV empleado es un láser de iones de Argón modelo Innova 300C FreD de Coherent. El tubo del láser emite luz a 488 nm y esta se dobla en frecuencia por medio de un cristal BBO (*Beta Barium Borate*) situado dentro de la cavidad del láser. A la salida del láser se emite luz a 244 nm con polarización horizontal y una potencia máxima de 100 mW.

Tras la abertura del láser se encuentra el obturador electromecánico. Este dispositivo se utiliza para bloquear el haz mientras se mueve la plataforma de translación. Se controla por ordenador y puede trabajar a una frecuencia máxima de 200 Hz.

El haz que sale del obturador se guía mediante una serie de espejos hasta la plataforma de translación. La plataforma de translación se utiliza para mover el haz UV a lo largo de la fibra óptica. El movimiento de la plataforma se controla mediante un ordenador y tiene una precisión de 5 nm. Sobre la plataforma de translación están colocados el conjunto de lentes, los espejos y los posicionadores que permiten el conformado y posicionado del haz que incide sobre la fibra. La figura 2.1 muestra un esquema de estos componentes. En primer lugar, el haz UV proveniente de la salida del obturador (1) se refleja en un espejo de 90° (2). Este espejo está adherido a un actuador piezoeléctrico controlado por ordenador que permite deflectar el haz y variar su inclinación. El conjunto del espejo y el piezoeléctrico está montado sobre un soporte que permite ajustar manualmente su posición horizontal y vertical. Después del espejo se encuentra el conjunto de lentes utilizadas para conformar el haz. El conjunto se compone de dos lentes, una para conformar el haz en horizontal (3) y otra en vertical (5). Estas lentes están montadas sobre una plataforma de translación

(4) que permite enfocar el haz de forma manual. Por último, tras las lentes se encuentra la máscara de fase (6). Mientras que todos estos componentes se mueven junto con la plataforma de traslación de precisión (10) la fibra óptica (7) se mantiene estática durante todo el proceso de inscripción. La posición de la fibra óptica se controla mediante dos plataformas de traslación de tres ejes (9). Sobre estas plataformas se han colocado dos rotadores (9) que permiten sujetar la fibra y a su vez girarla para modificar la posición espacial de los núcleos dentro de la fibra óptica. Estos rotadores permiten girar la fibra 360° con una precisión de 2°.

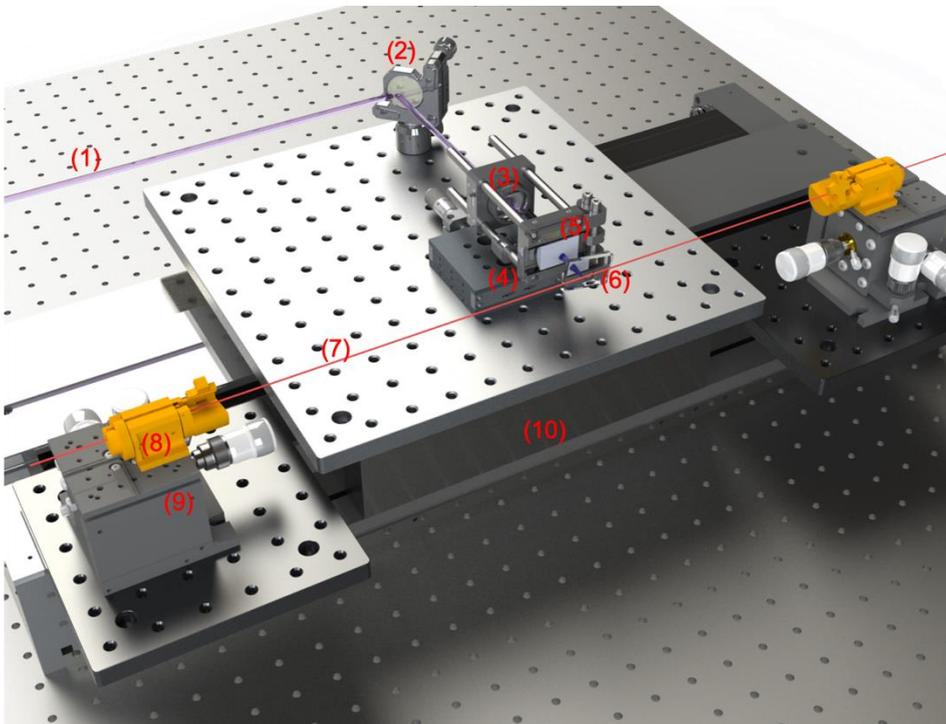


Figura 2.1. Esquema del sistema de inscripción en fibra óptica multinúcleo.

La fibra óptica utilizada en todos los dispositivos que se describen en esta tesis es una fibra MCF comercial modelo SM7C1500 fabricada por FIBERCORE. Esta fibra óptica tiene un núcleo en el centro (núcleo número 1) y seis núcleos exteriores distribuidos en forma de hexágono (numerados del 2 al 6). Los núcleos están separados una distancia de $35\mu\text{m}$ y la cubierta tiene un diámetro de $125\mu\text{m}$. La apertura numérica es de 0.2.

Como paso previo a la inscripción de las redes de difracción en este tipo de fibras ópticas. La fibra se somete a un proceso de hidrogenación para aumentar su fotosensibilidad. En este proceso la fibra se introduce en una cámara con hidrogeno a 50 bar de presión y temperatura ambiente durante al menos 15 días.

2.3. Inscripción selectiva

El sistema de fabricación descrito anteriormente se puede utilizar para inscribir FBGs por el método de la máscara de fase en todos o en un conjunto de núcleos de una fibra multinúcleo. La inscripción en todos los núcleos es sencilla, simplemente hay que hacer el haz lo suficientemente grande en vertical para que cubra toda la fibra y después el haz se alinea con el centro de la fibra. Sin embargo, la inscripción selectiva es mucho más compleja ya que, por un lado, se debe hacer el haz lo suficientemente estrecho para iluminar solo los núcleos de interés y no afectar al resto, y por otro lado, es necesario conocer la posición relativa de los de los núcleos dentro de la fibra óptica respecto del haz. La figura 2.2 muestra un esquema de estos dos tipos de inscripciones. Ajustando adecuadamente estos dos parámetros se consigue inscribir FBGs es un plano de tres núcleos alineados. Sin embargo, si ajusta la distancia máxima que alcanza el patrón de interferencia, se puede conseguir inscribir solamente en uno o dos núcleos.

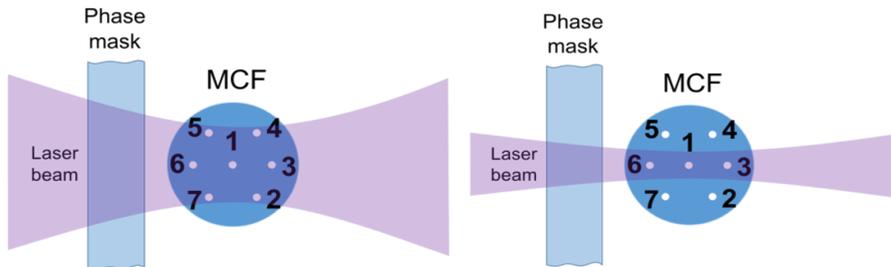


Figura 2.2. Esquema de inscripción de FBGs por el método de máscara de fase en una fibra multinúcleo. Izquierda, inscripción en todos los núcleos. Derecha, inscripción selectiva en un conjunto de tres núcleos.

La figura 2.3 muestra una vista en 3D de la inscripción de una FBG en una fibra MCF y una vista en planta de las franjas de interferencia entre los dos órdenes +1 y -1. La distancia máxima que alcanza el patrón de interferencia se puede calcular con la siguiente ecuación,

$$D_{max} = \frac{W}{2 \tan(\theta)} \quad (6)$$

donde W es el ancho del haz que incide sobre la máscara de fase y θ es el ángulo de los órdenes de difracción ± 1 .

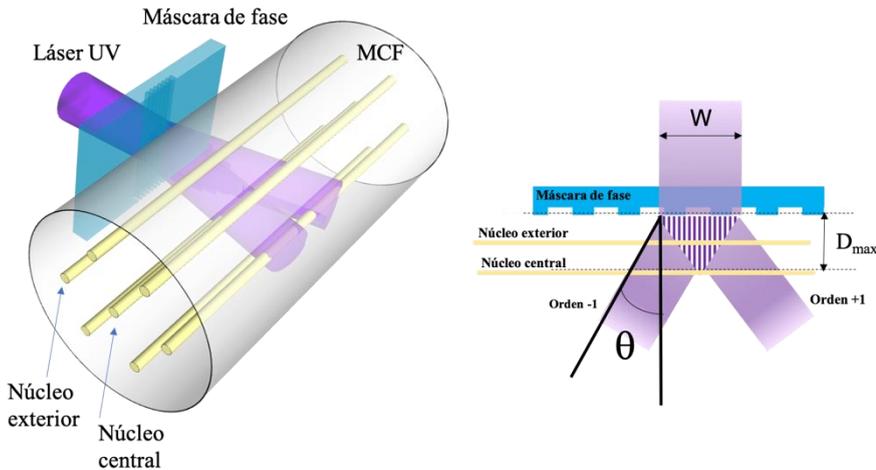


Figura 2.3. Vista 3D de la inscripción de una FBG en una fibra MCF y vista en planta 2D.

Para la inscripción selectiva, primero se reduce la altura del haz utilizando las lentes cilíndricas. Una vez que el haz es lo suficientemente estrecho para irradiar solo un núcleo se procede al alineamiento de los núcleos la fibra. Para conocer la posición relativa de los núcleos se utiliza un sistema de seguimiento basado en la fluorescencia que provoca la radiación UV en la fibra óptica [9], [10]. La fibra se conecta a un puerto de entrada/salida (*fan-in/out*) que permite acceder a los núcleos dentro de la fibra óptica multinúcleo de manera independiente. Las salidas del *fan-in/out* se conectan a un fotodiodo de alta sensibilidad para medir la potencia de la luz generada por la fluorescencia en cada núcleo al ser irradiados por el haz UV. Los núcleos de la fibra óptica multinúcleo se alinean siguiendo el siguiente procedimiento:

1. Se irradia la fibra sin la máscara de fase y se apunta el haz al núcleo central. El apuntamiento se realiza modificando la inclinación del haz mediante el conjunto formado por el espejo y el piezoeléctrico hasta que la fluorescencia

en el núcleo central es máxima. La inclinación en este punto se toma como referencia.

2. Siguiendo el mismo procedimiento anterior se apunta el haz al resto de núcleos y se obtiene la diferencia de inclinación de cada uno de ellos respecto del central. Con esta información se obtiene la posición relativa de todos los núcleos.
3. Se modifica la posición de núcleos girando la fibra mediante los rotadores para colocarlos en la posición deseada.
4. Los pasos del 1 al 3 repiten en varios puntos a lo largo de la fibra para evitar la torsión de la fibra óptica en la zona donde se van a inscribir las redes de difracción.

Una vez que los núcleos de la fibra se han alineado se coloca la máscara de fase y se procede a la inscripción de las FBGs. Cabe destacar que mediante esta técnica se pueden escribir FBGs en un plano, que en el caso de fibras ópticas de siete núcleos está compuesto por el núcleo central y dos núcleos exteriores. Existe la posibilidad de escribir en un solo núcleo, para ello es necesario primero, alinear el núcleo con el haz siguiendo el procedimiento anterior, y después separar la fibra de la máscara de fase la distancia suficiente para que la zona donde se crean las franjas de la interferencia solo irradie al núcleo donde se desea inscribir la FBG.

Cuando se fabrican FBGs en fibras multinúcleo hay que tener en cuenta que la fibra, al tener una geometría cilíndrica, produce un efecto lente que provoca que el haz que irradia los núcleos no sea uniforme en toda la sección transversal de la fibra. En la figura 2.4 se muestra una simulación realizada por trazado de rayos del comportamiento del haz para un caso de inscripción en todos los núcleos de la fibra a la vez. Se puede ver que los núcleos más cercanos al plano de incidencia reciben una radiación más uniforme, mientras que la radiación que reciben los núcleos más alejados se ve alterada por el efecto lente de la cubierta de la fibra y de los propios núcleos. Esto provoca que, por un lado, que la reflectividad de las FBGs inscritas en los núcleos más alejados sea menor y que, por otro lado, aunque el periodo de las FBGs es el mismo, su longitud de onda de Bragg puede ser ligeramente diferente en cada núcleo por efecto del índice medio [11].

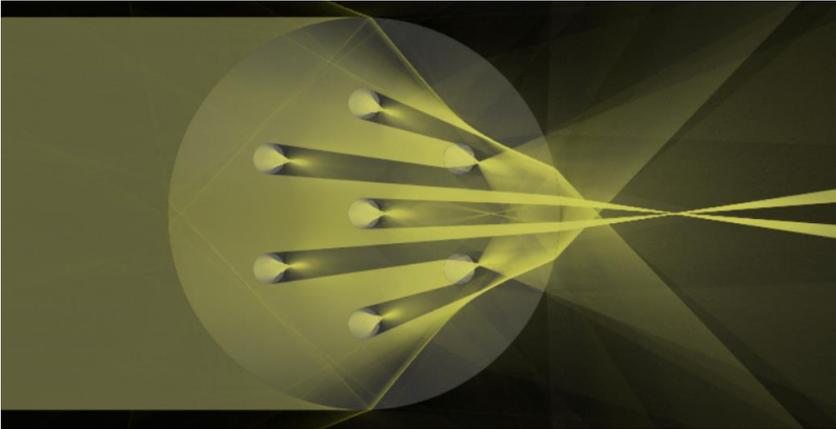


Figura 2.4. Simulación por trazado de rayos del haz que incide en una fibra en el caso de inscripción en todos los núcleos [12].

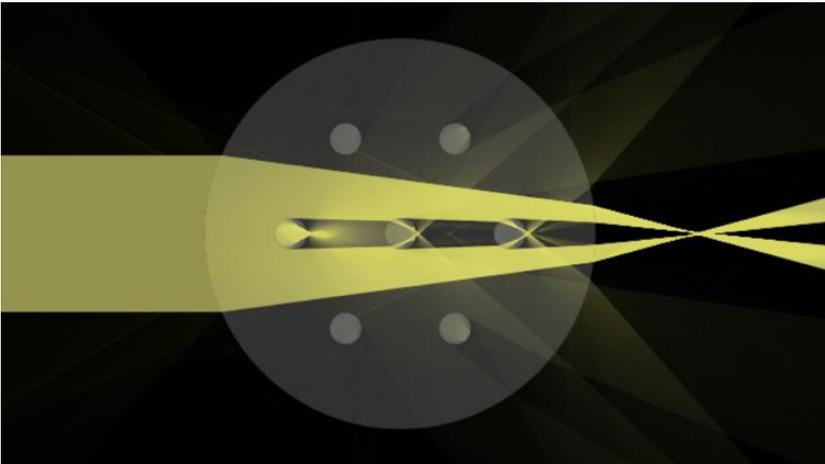


Figura 2.5. Simulación por trazado de rayos del haz que incide en una fibra en el caso de inscripción selectiva en un plano de tres núcleos [12].

El comportamiento del haz láser en el caso de una inscripción selectiva lo podemos ver en la figura 2.5. En este caso, al igual que en caso anterior, los núcleos más alejados del plano de incidencia del haz reciben menos radiación y ésta es menos uniforme por lo que las FBGs en estos núcleos serán más débiles y con una longitud de onda de Bragg ligeramente diferente. Por otro lado, se puede apreciar que, aunque el haz es lo suficientemente estrecho para irradiar solo a los tres núcleos alineados con él, debido al efecto lente, parte del haz se desvía e irradia a los demás núcleos. Esto puede provocar que se inscriban FBGs muy débiles en los núcleos no deseados.

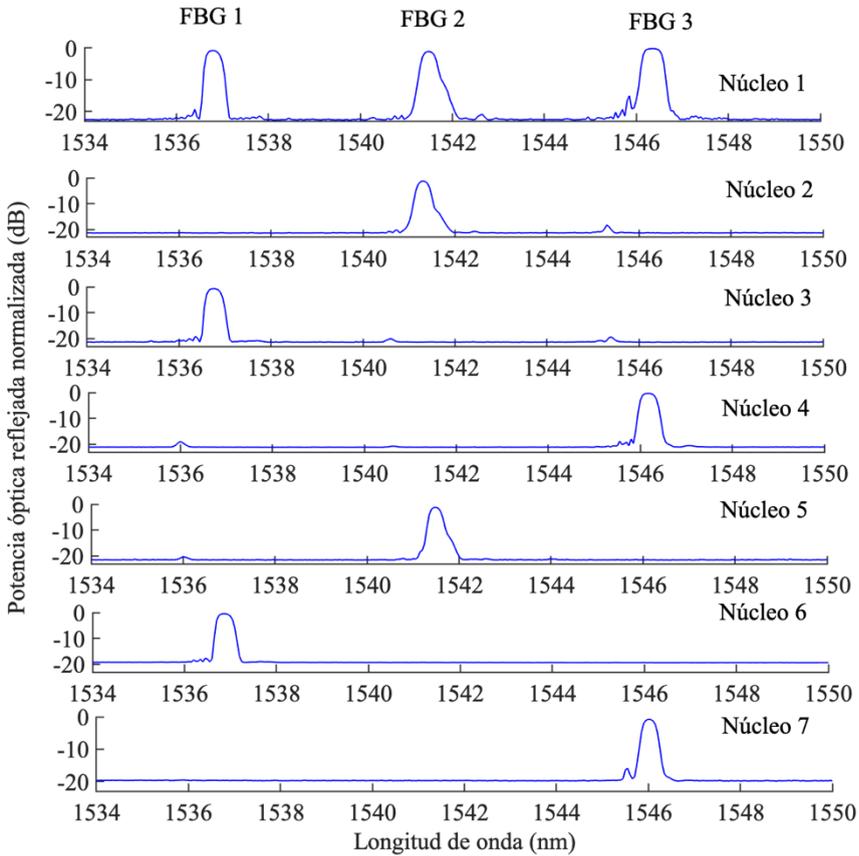


Figura 2.6. Espectro medido en los núcleos de una MCF donde se han inscrito tres FBGs distintas de manera selectiva.

En la figura 2.6 se puede ver un ejemplo de un dispositivo que está formado por tres FBGs inscritas en una MFC de manera selectiva en planos de tres núcleos. Para inscribir cada FBG en este dispositivo se ha seguido el procedimiento de inscripción selectiva descrito anteriormente. Primero se ha inscrito la FBG 1 solamente en el plano formado por los núcleos 1, 3 y 6. Después, en otro punto de la fibra y con una máscara de fase diferente se ha inscrito la FBG 2 solamente en plano de los núcleos 1, 2 y 5. Finalmente, siguiendo el mismo procedimiento se ha inscrito la FBG 3 en los núcleos 1, 4 y 7. Se puede comprobar que las FBG con más reflectividad aparecen únicamente en los núcleos deseados. No obstante, en algunos núcleos cercanos al plano donde se desea inscribir, se aprecia en el espectro óptico la aparición de pequeñas FBGs con una reflectividad despreciable si se comparan con el resto. Esto es debido a que las franjas de interferencia llegan a alcanzar estos núcleos de manera

muy débil, bien por un pequeño error en la alineación de la fibra o bien por el efecto lente descrito anteriormente.

A continuación, se muestra en la figura 2.7 un ejemplo de un dispositivo formado por la misma FBG inscrita en todos los núcleos a la vez. En este espectro se puede ver que, en todos los núcleos las FBGs tienen reflectividades similares. Las variaciones en la reflectividad son debidas a que el haz no ilumina a todos los núcleos por igual debido al efecto lente, y las variaciones en la longitud de onda de Bragg en cada FBG son causadas por las diferencias del valor medio en su modulación de índice de refracción.

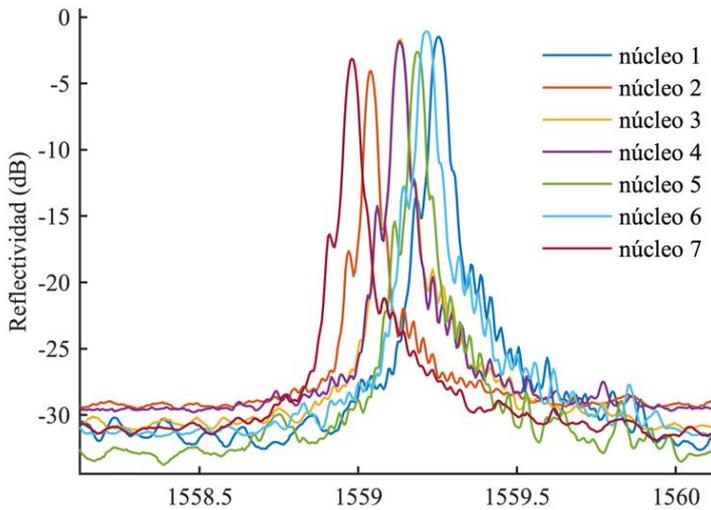


Figura 2.7. Ejemplo de los espectros medidos en los núcleos de una MCF donde se ha inscrito una FBG en todos los núcleos.

Hasta ahora se ha descrito el sistema de fabricación y la técnica de inscripción selectiva para realizar la inscripción de FBGs en fibras multinúcleo. Sin embargo, dada la versatilidad del sistema de fabricación diseñado se pueden inscribir otros tipos de dispositivos de manera selectiva en fibras MCF tales como TFBGs y LPGS. Para ello es necesario cambiar algunos elementos del sistema de fabricación dependiendo del tipo de red que necesite inscribir.

Para la inscripción de TFBGs es necesario emplear una técnica de barrido que también se utiliza para inscribir FBGs [13]. Esta técnica consiste en mantener la máscara de fase y la fibra en una posición fija, mientras que el haz láser se puede desplazar mediante la plataforma de translación controlada por ordenador. La FBG se forma durante el recorrido del haz por la máscara. En el caso concreto de la inscripción de

una TFBG se coloca un soporte para la máscara de fase que permita girarla los grados necesarios en función de la TFBG que se necesite inscribir. En el esquema de la figura 2.8 se puede ver la colocación de la máscara durante la fabricación de una TFBG de θ grados.

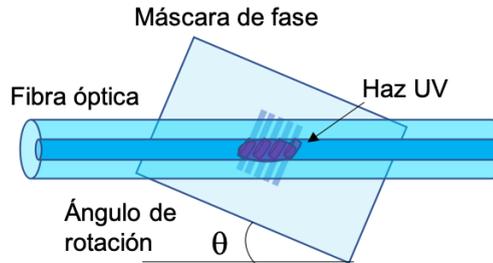


Figura 2.8. Esquema de la vista frontal de la máscara de fase en la inscripción de una TFBG

En el caso concreto de las LPGs, al tener una modulación del cambio de índice con periodo mucho más grande que una FBG, no se pueden inscribir por barrido utilizando las mismas máscaras de fase para se usan en la inscripción de FBGs. En el sistema de fabricación se pueden inscribir utilizando la técnica punto a punto [14]. La técnica de punto a punto consiste en realizar varias exposiciones separadas una distancia concreta. En la figura 2.9 se puede ver un esquema de la inscripción de una LPG utilizando esta técnica. Para la inscripción punto a punto no es necesario ningún soporte adicional, simplemente hay que quitar la máscara de fase. El ancho de cada exposición se controla modificando el ancho del haz con una lente cilíndrica horizontal y el periodo se controla mediante la distancia entre exposiciones. La longitud de la LPG dependerá del número de exposiciones y de su periodo.

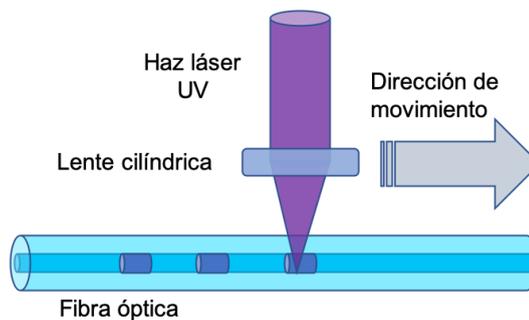


Figura 2.9. Esquema de inscripción de una LPG mediante punto a punto.

REFERENCIAS

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, y B. S. Kawasaki, «Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 647-649, may 1978, doi: 10.1063/1.89881.
- [2] G. Meltz, W. W. Morey, y W. H. Glenn, «Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method», *Opt. Lett.*, vol. 14, no. 15, p. 823, ago. 1989, doi: 10.1364/OL.14.000823.
- [3] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, y J. Albert, «Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037, mar. 1993, doi: 10.1063/1.108786.
- [4] D. Barrera, I. Gasulla, y S. Sales, «Multipoint Two-Dimensional Curvature Optical Fiber Sensor Based on a Nontwisted Homogeneous Four-Core Fiber», *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 12, pp. 2445-2450, jun. 2015, doi: 10.1109/JLT.2014.2366556.
- [5] G. M. H. Flockhart, W. N. MacPherson, J. S. Barton, J. D. C. Jones, L. Zhang, y I. Bennion, «Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber», *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 6, p. 387, mar. 2003, doi: 10.1364/OL.28.000387.
- [6] E. Lindley *et al.*, «Demonstration of uniform multicore fiber Bragg gratings», *Opt. Express*, vol. 22, no. 25, p. 31575, dic. 2014, doi: 10.1364/OE.22.031575.
- [7] I. Gasulla, D. Barrera, J. Hervás, y S. Sales, «Spatial Division Multiplexed Microwave Signal processing by selective grating inscription in homogeneous multicore fibers», *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 41727, mar. 2017, doi: 10.1038/srep41727.
- [8] R. García Olcina, «Sistema de fabricación de altas prestaciones de redes de difracción de bragg en fibra y aplicaciones al campo de los sensores ópticos y a los sistemas de comunicaciones ópticas.», Universitat Politècnica de València, Valencia (Spain), 2008. doi: 10.4995/Thesis/10251/4323.
- [9] M. Gallagher y U. Österberg, «Time resolved 3.10 eV luminescence in germanium-doped silica glass», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 63, no. 22, pp. 2987-2989, nov. 1993, doi: 10.1063/1.110290.
- [10] T. Komukai y M. Nakazawa, «Fabrication of high-quality long-fiber Bragg grating by monitoring 3.1-eV radiation (400 nm) from GeO defects», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 8, no. 11, pp. 1495-1497, nov. 1996, doi: 10.1109/68.541561.
- [11] T. Erdogan, «Fiber grating spectra», *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294, ago. 1997, doi: 10.1109/50.618322.
- [12] Ray Optics Simulation, <https://ricktu288.github.io/ray-optics/simulator/>
- [13] K. O. Hill, B. Malo, F. Bilodeau, D. C. Johnson, y J. Albert, «Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, no. 10, pp. 1035-1037, mar. 1993, doi: 10.1063/1.108786.

- [14] F. Ahmed, Md. S. Ahsan, M. S. Lee, y M. B. G. Jun, «Femtosecond laser based in-fiber long period grating fabrication for improved solution sensing», San Francisco, California, USA, mar. 2013, p. 86071L. doi: 10.1117/12.2005731.

Capítulo 3

Sensor de curvatura basado en redes de periodo largo en fibra multinúcleo

Resumen: Las fibras ópticas multinúcleo son especialmente atractivas para la fabricación de sensores de curvatura y forma debido a la distribución espacial de los diferentes núcleos. Las redes de Bragg se han utilizado en el pasado para la implementación de estos sensores, sin embargo, a pesar de sus propiedades inherentes, tienen una sensibilidad muy limitada. En este capítulo, se estudia el uso de redes de Bragg de periodo largo en fibra óptica (LPGs) para la implementación de un sensor direccional de curvatura. Para ello se ha inscrito un conjunto de tres LPGs diferentes en una fibra óptica de siete núcleos utilizando una técnica de inscripción selectiva. Inscrimos una sola LPG en los núcleos externos y una serie de tres LPGs en el núcleo central. Posteriormente el sensor se ha caracterizado para medir la magnitud y dirección de la curvatura aplicada a la fibra. Además, se ha medido el efecto de la deformación y la torsión sobre este dispositivo. El sensor muestra una respuesta lineal para magnitudes de curvatura de 0 a $1,77 \text{ m}^{-1}$ con una sensibilidad de curvatura máxima de $-4,85 \text{ nm/m}^{-1}$ y muestra un comportamiento sinusoidal en todos los núcleos con direcciones de curvatura de 0 a 360° . El sensor muestra una buena insensibilidad a la deformación. Sin embargo, la torsión en las fibras ópticas multinúcleo se puede detectar y medir utilizando la atenuación máxima de las LPGs en los núcleos externos.

3.1. Introducción

La medida de la curvatura tiene una especial importancia en multitud de aplicaciones dentro de diversos campos tales como ingeniería civil, industria aeroespacial, robótica o el control de instrumentación médica entre otros [1]–[7]. Los sensores basados en fibra óptica juegan un papel fundamental en estas aplicaciones, ya que debido al su reducido tamaño se pueden incrustar en cualquier tipo de estructura o instrumento. Para la implementación de sensores de curvatura mediante la utilización de fibra óptica de un solo núcleo se han propuesto diversos métodos. Yu et al. propusieron un sensor de curvatura con una FBG incrustada en una estructura flexible. Por otra parte, también se ha demostrado la posibilidad de utilizar fibras con una geometría especial no simétrica. Chen et al. y Patrick et al utilizaron FBGs y LPGs en fibras con el núcleo excéntrico [8], [9]. Allsop et al. demostraron la posibilidad de utilizar LPGs en fibras con forma de D [10]. La principal desventaja de utilizar este tipo de fibras es que, debido a que no tienen una aplicación concreta en comunicaciones, su disponibilidad es muy reducida y su precio muy elevado. Otra solución es utilizar, cavidades interferométricas construidas mediante la combinación de fibras monomodo, multimodo y multinúcleo especiales [11]–[14]. En este caso la fabricación del sensor es mucho más compleja y por lo tanto el sensor también sería más costoso.

Una alternativa a estas soluciones es utilizar las fibras multinúcleo MCF comerciales. Estas fibras además de ser un componente clave para aumentar la capacidad de los sistemas de comunicaciones ópticas, han mostrado un gran potencial para el desarrollo de novedosos dispositivos de instrumentación aplicables en nuevas disciplinas dentro de las ciencias aplicadas, como la astrofónica [15]–[17].

La distribución espacial de los núcleos en las fibras MCF las dota de un enorme potencial para el desarrollo de sensores. En los últimos años, ha surgido un creciente interés por la utilización de este tipo de fibras para la implementación de sensores de curvatura y de forma. Gander et al. propusieron en el año 2000 la inscripción de FBGs en dos núcleos de una MCF de cuatro núcleos [18]. Posteriormente, Flockhart et al. implementaron un sensor de curvatura capaz de distinguir el plano de esta, mediante la inscripción de FBG en tres de los cuatro núcleos de una MCF [19]. Cranck et al. propusieron un interferómetro Fabry-Perot mediante FBGs en un MCF de cuatro núcleos para crear un sensor de curvatura con mayor sensibilidad [20]. Fender et al. crearon un acelerómetro basado en la medida de la curvatura de una fibra MCF de cuatro núcleos mediante FBGs [21]. Safari et al. inscribieron una LPG en una MCF de 120 núcleos para implementar un sensor de curvatura ultrasensible [22]. En

estos trabajos se ha demostrado la posibilidad de utilizar fibras de varios núcleos con FBGs y LPGs para medir curvatura y en algunos casos obtener el plano de curvatura en 2D. Sin embargo, existe la posibilidad de crear sensores de forma capaces de obtener la curvatura de la fibra y su dirección de curvatura en 3D si se obtiene la información de al menos 3 núcleos no alineados. Moore and Rogge propusieron un método basado en las ecuaciones de Frenet-Serret para calcular la forma que adopta una fibra MCF de tres núcleos con FBGs inscritas en cada uno de ellos [23]. Barrera et al. propusieron un método alternativo para obtener, mediante FBGs, la curvatura y su dirección en una MCF homogénea de cuatro núcleos [24]. Zhang et al. utilizaron una MCF heterogénea de 7 núcleos con FBGs para medir su curvatura y dirección [7]. Por último, Floris et al propusieron un sensor de forma basado en FBGs en una MCF homogénea de 7 núcleos y estudiaron la precisión con la que se puede obtener la curvatura de la fibra [25].

Como se ha comentado anteriormente, una forma muy común de implementar sensores de curvatura direccionales es la inscripción de FBGs en fibras MCF. Sin embargo, el estiramiento inducido en los núcleos exteriores, y por tanto la sensibilidad a la curvatura, es directamente proporcional a la separación de estos respecto del centro de la fibra. En el caso de las MCF esta distancia es muy pequeña (decenas de micras) por lo que la sensibilidad a la curvatura no es muy grande. Una forma de abordar este problema es sustituir las FBGs por LPGs. La sensibilidad de las LPGs depende de su periodo [26], [27], por lo que puede conseguir una mayor sensibilidad a la curvatura. En este capítulo se pretende demostrar la posibilidad de inscribir varias LPGs en una fibra MCF para implementar un sensor de curvatura que sea capaz de obtener tanto su magnitud como su dirección con una sensibilidad superior a las implementaciones previas con FBGs.

3.2. Implementación del sensor

La inscripción de las LPGs se ha realizado de manera selectiva utilizando el sistema descrito en el capítulo 2. Para implementar el sensor se han inscrito tres LPGs de 30 mm de longitud con diferentes periodos; 300 μm , 300.95 μm y 298.63 μm . Cada una se ha inscrito en un plano de tres núcleos que incluye dos núcleos exteriores y el núcleo central. En la figura 3.1 se muestra un esquema con la sección transversal de la MCF y la numeración de los núcleos y los planos, así como la distribución de las distintas LPGs inscritas. Se puede observar que el núcleo 1 contiene las tres LPGs, mientras que cada pareja de núcleos exteriores contiene cada uno una LPG distinta.

Al curvar la fibra óptica, la parte interna de la fibra óptica se comprime mientras que la parte externa a la curvatura se expande. Esto se refleja en una distribución de deformaciones en el interior de la fibra, tal y como se puede ver en la figura 3.2. En su punto central, la deformación es nula y por tanto el núcleo central sería insensible a la curvatura en esta situación. De esta forma se pueden utilizar las LPGs de los núcleos exteriores para obtener la curvatura en cada posición y el núcleo 1, que no es sensible a la curvatura, se podría utilizar para compensar, por ejemplo, las variaciones de longitud de onda debidas a la temperatura.

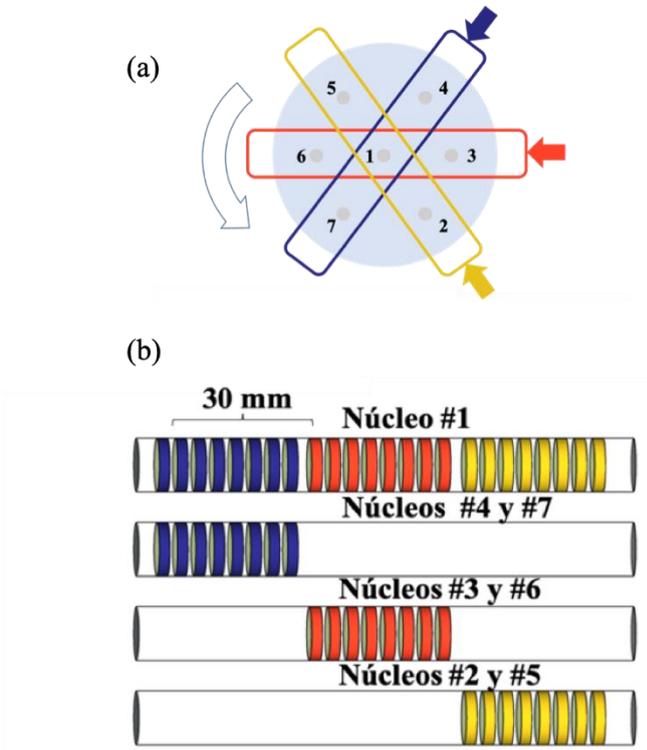


Figura 3.1. (a) Sección transversal de la MCF incluyendo la numeración de los núcleos y los planos. (b) Esquema de las LPGs inscritas en cada uno de los planos [28].

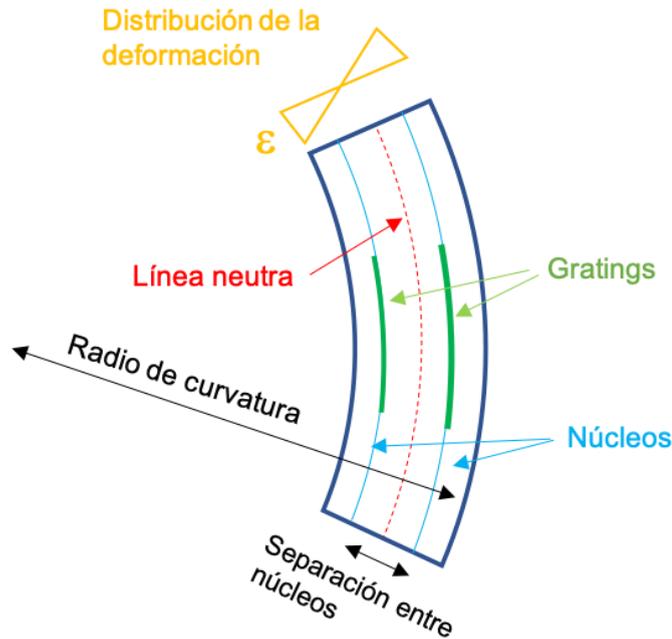


Figura 3.2. Esquema de la distribución de estiramiento en una fibra multinúcleo curvada [25].

La figura 3.3 muestra el espectro de las LPGs inscritas en el núcleo central y en dos núcleos alineados exteriores. El núcleo central muestra dos bandas de atenuación centradas en 1483 nm y 1557.08 nm mientras que en los núcleos exteriores están centradas en 1560.1 nm y 1569.4 nm como se puede observar en la figura 3.3. Al final del proceso de inscripción de las LPGs, todos los espectros correspondientes a los núcleos exteriores son similares entre sí. Todos ellos presentan una única banda de atenuación centrada entre 1552 nm y 1576 nm, mientras que el núcleo central muestra 3 bandas de atenuación centradas en 1555.7 nm, 1557.08 nm y 1569.9 nm. Estas diferencias entre el núcleo central y los exteriores son debidas a la distribución espacial de los núcleos. En las MCF los modos de cubierta excitados por el modo guiado en el núcleo central son similares a los de una fibra monomodo, mientras que los modos de cubierta excitados por el modo guiado en los núcleos exteriores se ven alterados por la asimetría de la fibra. Por otra parte, durante el proceso de inscripción, aunque el periodo es el mismo, la longitud de onda de Bragg de la LPG no coincide en los núcleos opuestos ya que se irradian de forma diferente debido a la geometría de la fibra.

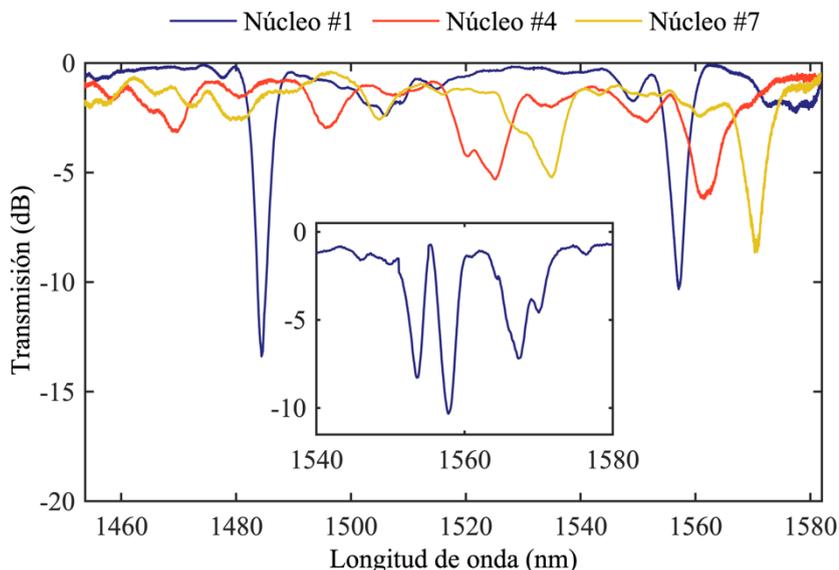


Figura 3.3. Espectro de las LPGs en los núcleos 1,4 y 7, después de la primera inscripción. La figura interior muestra el espectro del núcleo 1 después de la inscripción de las 3 LPGs [28].

3.3. Caracterización del sensor

Para estudiar las posibilidades de las LPGs inscritas en la MCF como sensor, estas se han sometido a distintos estímulos mecánicos; deformación, torsión y finalmente curvatura. La caracterización del sensor se ha llevado a cabo mediante un montaje que permite estirar, rotar y curvar la fibra según sea necesario. Este montaje se compone de dos plataformas de translación de tres ejes que, mediante tornillos micrométricos, permiten controlar con exactitud la posición de la fibra en horizontal (eje y), vertical (eje y) y altura (eje z). Sobre estas plataformas se han colocado dos rotadores que permiten sujetar la fibra mediante abrazaderas y variar su orientación. La fibra se ha colocado con la zona de las LPGs en el centro de las dos plataformas y posteriormente se ha ajustado el eje z para igualar la altura en ambas plataformas. La figura 3.4 muestra un esquema del montaje con las tres configuraciones posibles.

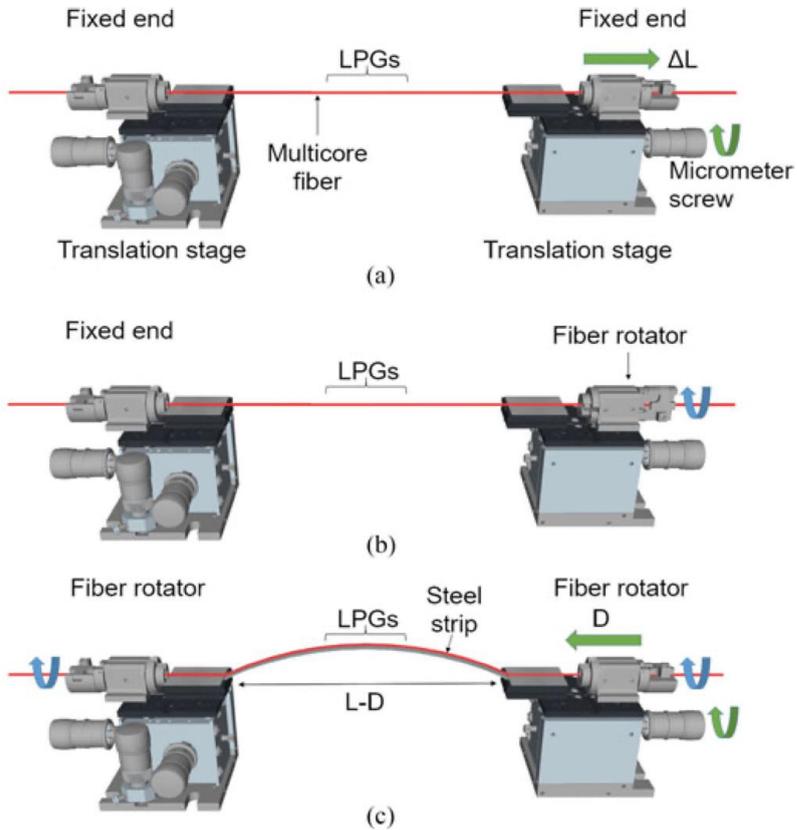


Figura 3.4. Montaje para la caracterización del sensor. (a) Caracterización del estiramiento. (b) Caracterización de la torsión (c) Caracterización de la curvatura [28].

En primer lugar, para caracterizar las LPGs como sensor de deformación, se ha utilizado el esquema de la figura 3.4 (a). La fibra se sujeta mediante ambos rotadores y se mantiene en una posición recta. La plataforma de la izquierda se mantiene fija mientras que la de la derecha se puede mover horizontalmente en el eje x para estirar la fibra óptica. En segundo lugar, se han caracterizado las LPGs como sensor de torsión, para ello se ha utilizado el montaje mostrado en la figura 3.4 (b). En este caso las dos plataformas se mantienen fijas y se genera una torsión en la fibra mediante el giro del rotador de uno de los extremos. Por último, para caracterizar las LPGs como sensor de curvatura se utiliza el montaje de la figura 3.4 (c). En este caso, la fibra descansa sin tensión sobre un fleje de espesor calibrado colocado entre las dos plataformas. Una de las dos plataformas se mantiene fija y la otra se puede mover a lo

largo del eje x lo que permite que se curve el fleje. La orientación de la fibra se puede modificar girando a la vez ambos rotadores.

A continuación, se describe el proceso de caracterización del sensor para cada y los resultados obtenidos para cada una de las magnitudes estudiadas. La caracterización se ha realizado en un entorno de laboratorio en el cual los cambios de temperatura no son significativos, por lo que no se han tenido en cuenta las variaciones de temperatura. Sin embargo, en un entorno fuera del laboratorio habría que tener en cuenta estos efectos. En el caso de las LPGs, el desplazamiento en longitud de onda de las bandas de atenuación inducido por estímulos externos depende del periodo de la LPG y del orden del modo de cubierta, por lo que se puede medir simultáneamente deformación y temperatura o incluso, mediante la elección del periodo adecuado eliminar la sensibilidad a la temperatura [29], [30].

3.3.1. Deformación

Para caracterizar las LPGs como sensor de deformación se ha utilizado la plataforma móvil descrita anteriormente. La deformación se define como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

Donde L es la longitud entre los dos puntos de sujeción de la fibra y ΔL el desplazamiento de la plataforma móvil. La deformación es una magnitud adimensional aunque se utiliza comúnmente como unidades el *microstrain* ($\mu\varepsilon$), siendo $1 \mu\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6} m/m$, para referirse a esta magnitud.

Se han aplicado deformaciones desde $0 \mu\varepsilon$ hasta $1400 \mu\varepsilon$ sobre la fibra óptica y se ha medido el desplazamiento en longitud de onda de cada LPG respecto a cuando la fibra esta sin tensión. Se ha utilizado un analizador de espectros óptico (ANDO AQ6317C) junto con un láser sintonizable (ANDO AQ4321D) para obtener las medidas con una mayor resolución. La figura 3.5 muestra el desplazamiento de longitud de onda en el núcleo central y dos núcleos opuestos (4 y 7). En todos los núcleos se ha observado un desplazamiento en longitud de onda lineal con el estiramiento aplicado. Se puede observar que la pendiente, y por tanto la sensibilidad, es ligeramente superior en los núcleos exteriores que en núcleo central. Esto es debido a que la variación del índice efectivo de los modos de cubierta excitados por los núcleos exteriores es ligeramente diferente al estar más cerca del exterior de la fibra que los modos de cubierta excitados por el núcleo central, por lo tanto, la variación de longitud

de onda que experimenta una LPG cuando se estira es distinta en cada caso. Las sensibilidades obtenidas para cada núcleo se resumen en la tabla 3.1.

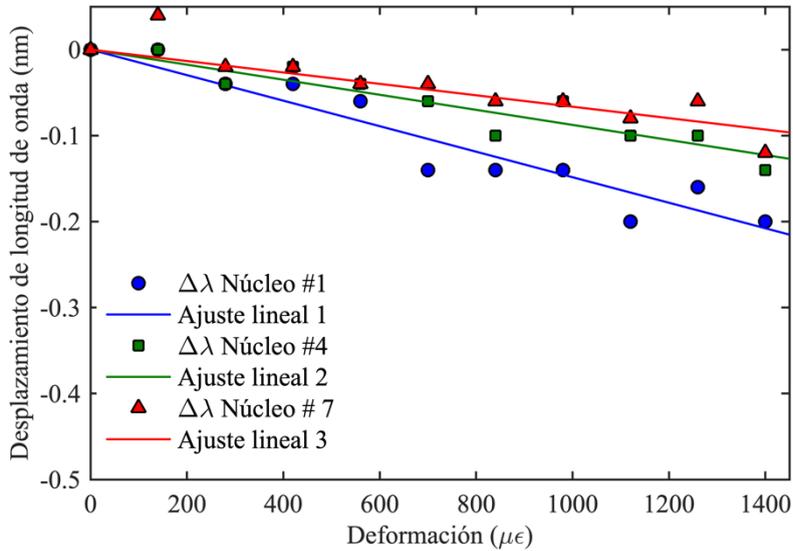


Figura 3.5. Desplazamiento en longitud de onda en el núcleo central y dos núcleos exteriores [28].

| Núcleo | Sensibilidad (pm/ $\mu\epsilon$) |
|--------|-----------------------------------|
| 1 | -0.14 |
| 2 | -0.077 |
| 3 | -0.11 |
| 4 | -0.066 |
| 5 | 0.092 |
| 6 | 0.103 |
| 7 | -0.087 |

Tabla 3.1. Sensibilidades al estiramiento medidas en cada núcleo [28].

3.3.2. Torsión

Para la caracterización del efecto de la torsión en el sensor se ha utilizado el montaje de la figura 3.4 (b). Un extremo de la fibra se ha mantenido fijo y el otro se ha rotado desde 0° a 360° con un paso de 90° produciendo una torsión máxima de

26.18 rad/m. La figura 3.6 muestra el espectro de la banda de atenuación en los núcleos 3 y 6 para cada ángulo de rotación.

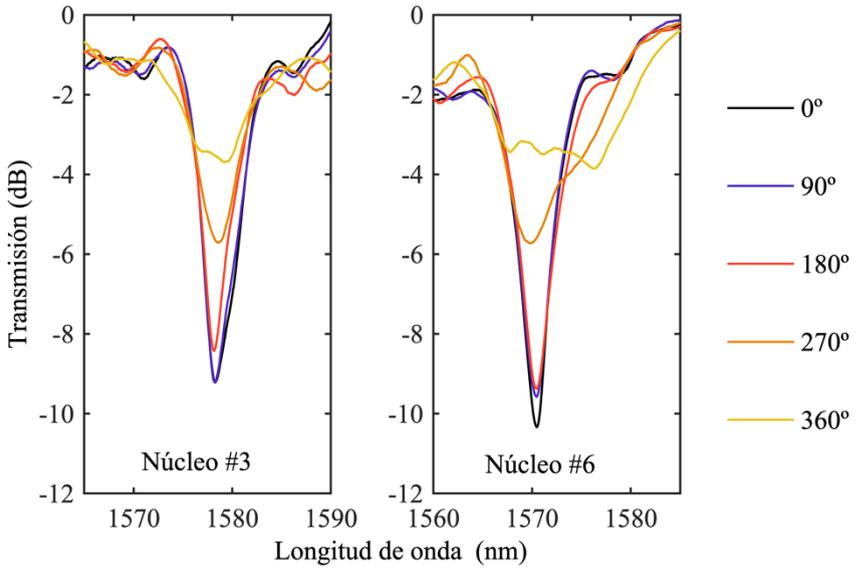


Figura 3.6. Evolución de la banda de atenuación de las LPGs en los núcleos 3 y 6 [28].

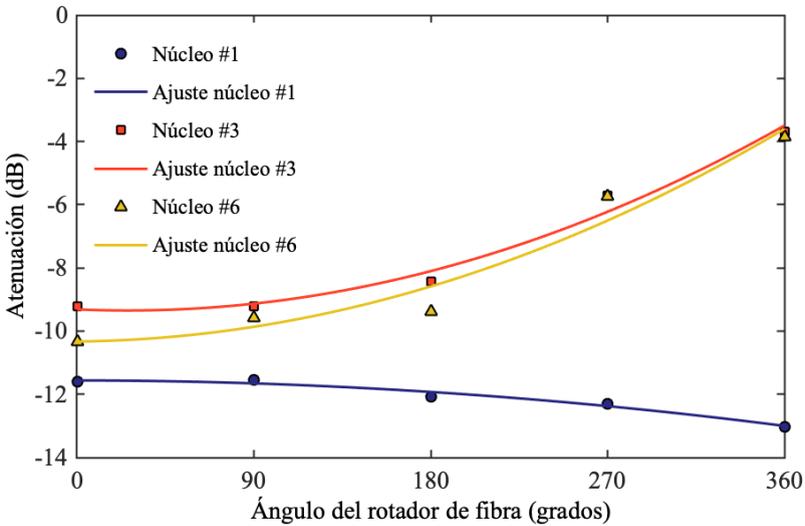


Figura 3.7. Atenuación máxima en la longitud de onda de Bragg en los núcleos 1, 3 y 6 y su correspondiente ajuste polinomial de segundo grado [28].

Se puede observar que la torsión produce un cambio en la atenuación de cada LPG. Además, se observa un comportamiento opuesto entre los núcleos exteriores y el central. Las LPGs de los núcleos exteriores disminuyen su atenuación cuando el ángulo aumenta mientras que las LPG del núcleo central la incrementa ligeramente.

Para estudiar con más detalle la atenuación en función del ángulo de rotación, se ha realizado un ajuste polinomial de segundo orden en los datos medidos en todos los núcleos. La figura 3.7 muestra una gráfica de dicho ajuste en núcleo central y los núcleos 3 y 6. Los coeficientes del polinomio para cada núcleo están incluidos en la tabla 3.2. Por otra parte, se ha observado un pequeño desplazamiento en longitud de onda con la torsión como máximo de 0.2 nm. Este desplazamiento es muy bajo debido a que el desplazamiento producido por el incremento del periodo de la LPG se ve compensado por el cambio relativo de índices de refracción entre el núcleo y los modos que se propagan por la cubierta.

| $P(\theta) = A \theta^2 + B \theta + C$ | | | |
|---|-----------------------|-----------------------|--------|
| Núcleo | A | B | C |
| 1 | $-1.09 \cdot 10^{-5}$ | $-6.35 \cdot 10^{-5}$ | -11.56 |
| 2 | $5.02 \cdot 10^{-6}$ | $8.36 \cdot 10^{-3}$ | -6.23 |
| 3 | $5.24 \cdot 10^{-5}$ | $-2.7 \cdot 10^{-3}$ | -9.3 |
| 4 | $1.29 \cdot 10^{-5}$ | $8.25 \cdot 10^{-3}$ | -7.33 |
| 5 | $-5.38 \cdot 10^{-6}$ | $1.63 \cdot 10^{-2}$ | -8.49 |
| 6 | $5 \cdot 10^{-5}$ | $6.78 \cdot 10^{-4}$ | -10.33 |
| 7 | $-2.2 \cdot 10^{-5}$ | $1.53 \cdot 10^{-2}$ | -5.75 |

Tabla 3.2. Coeficientes del ajuste polinomial de segundo grado aplicado a las medidas de torsión en cada núcleo [28].

3.3.3. Curvatura

Para la caracterización del sensor en curvatura se ha utilizado el montaje de la figura 3.4 (c). En este caso la fibra está colocada sobre un fleje calibrado de acero de 0.3 mm de espesor. Una plataforma de traslación se mantiene fija mientras que la otra se puede mover para cambiar la distancia de separación entre las dos. Cuando la distancia entre las dos plataformas se reduce provoca la curvatura del fleje. Si esta curvatura es pequeña se puede calcular en función del desplazamiento de la plataforma utilizando la ecuación (8). Donde C es la curvatura del fleje, L es la longitud del fleje y D es el decremento de distancia entre las dos plataformas.

$$\text{sen}\left(\frac{L}{C}\right) = \frac{(L-D)C}{2} \quad (8)$$

En el montaje de caracterización de este sensor se ha utilizado una longitud de fleje de 197 mm. La distancia entre las dos plataformas se ha variado entre 0 mm y 13 mm, con un paso de 0.01 mm para provocar la curvatura del fleje.

La caracterización de curvatura se ha realizado mediante dos experimentos independientes. Por una parte, se ha caracterizado la magnitud de curvatura y por otra la dirección.

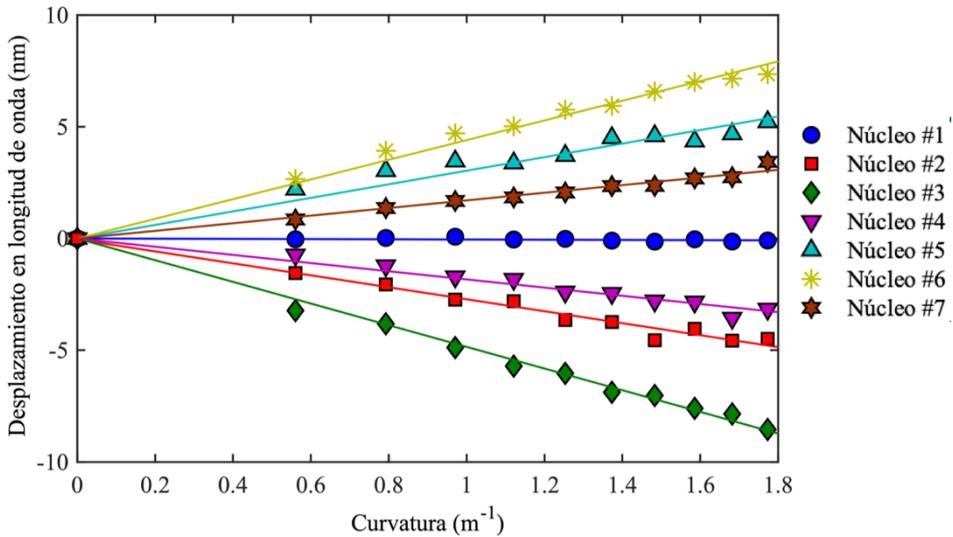


Figura 3.8. Desplazamiento en longitud de onda de las LPGs en cada núcleo en función de la curvatura aplicada a la fibra [28].

Para la magnitud, se han fijado ambos rotadores en la misma posición para mantener inmutable la orientación de la fibra óptica, es decir, la posición de los núcleos respecto a la curvatura. Para cada curvatura se ha medido el desplazamiento en longitud de onda de las LPGs en cada núcleo. La figura 3.8 muestra los resultados obtenidos. Se puede observar que el desplazamiento en longitud de onda sigue una tendencia lineal y su sensibilidad es distinta en cada núcleo debido a que esta depende de la posición en la que se encuentre cada núcleo. Se puede comprobar que los núcleos opuestos tienen la misma sensibilidad, pero de signos opuestos debido a la distribución de estiramiento que sufre una fibra cuando se curva (figura 3.2). Las sensibilidades obtenidas para cada núcleo están recogidas en la tabla 3.3. Se puede comprobar que la mayor sensibilidad se obtiene para las LPGs de los núcleos 3 y 6 ya que, en este caso, son los núcleos que están más alejados del plano de curvatura. Por el contrario, en el resto de los núcleos al estar más cerca se puede ver que tienen

una sensibilidad menor. Por otro lado, se puede comprobar que el signo de la sensibilidad a la curvatura depende de la posición de los núcleos respecto de la línea neutra de la fibra. Los núcleos que están por encima de la línea neutra de la fibra (núcleos 2, 3 y 4) sufren un estiramiento cuando se curva la fibra, por lo que presentan una sensibilidad positiva, mientras que los núcleos opuestos (núcleos 5, 6 y 7) presentan una sensibilidad negativa, ya que estos están por debajo de la línea neutra y se encogen cuando se curva la fibra.

| Núcleo | Sensibilidad (nm/m^{-1}) |
|--------|--|
| 1 | -0.05 |
| 2 | -2.68 |
| 3 | -4.85 |
| 4 | -1.83 |
| 5 | 3.03 |
| 6 | 4.40 |
| 7 | 1.70 |

Tabla 3.3. Sensibilidades a la curvatura medidas en cada núcleo [28].

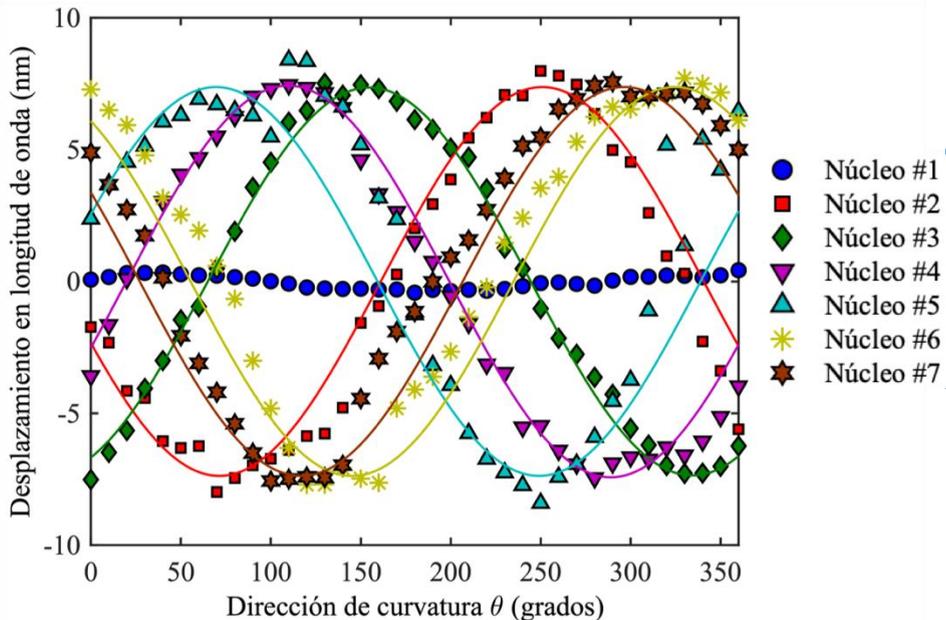


Figura 3.9. Desplazamiento en longitud de onda de las LPGs en cada núcleo en función de la dirección de curvatura [28].

Para la caracterización de la dirección de curvatura, la fibra se ha mantenido con una curvatura constante de 1.25 m^{-1} durante todo el experimento. Posteriormente, mediante los rotadores de ambas plataformas se ha rotado la fibra para cambiar la dirección de curvatura desde 0° a 360° . La figura 3.9 muestra el desplazamiento en longitud de onda de cada núcleo. En este caso, debido a que al inicio del experimento cada núcleo está en una posición diferente, el desplazamiento en longitud de onda se ha calculado tomando como referencia el punto medio entre la máxima y la mínima longitud de onda que alcanza por cada LPG en todo el rango de direcciones. Se observa que el desplazamiento en longitud de onda tiene un comportamiento sinusoidal. Por otra parte, cuando el desplazamiento de longitud de onda alcanza su punto máximo se puede observar un error mayor provocado por un efecto de desdoblamiento de la banda de atenuación [31]. En la figura 3.9 se puede observar que, para cada dirección, la relación de entre los desplazamientos de longitud de onda en cada núcleo es única, lo que permite obtener directamente la dirección de curvatura. Una vez determinada la dirección de curvatura, la magnitud se puede obtener a partir de la sensibilidad en cada núcleo para esa dirección concreta.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se ha demostrado la posibilidad de inscribir LPGs de forma selectiva en los núcleos de una MCF de 7 núcleos, y se ha observado que el espectro óptico de las LPGs en el núcleo central es distinto al medido en los núcleos exteriores debido a la geometría de la fibra. Se ha demostrado que estas LPGs se pueden utilizar como sensor de deformación, de torsión y para la medida de la magnitud y dirección de la curvatura. Con los datos experimentales obtenidos de la caracterización del sensor se ha demostrado que tiene una baja sensibilidad al estiramiento comparado con una FBG. Por otra parte, se ha observado que la torsión provoca una disminución del nivel de la banda atenuación de la LPG en los núcleos exteriores mientras que en el núcleo central este comportamiento es opuesto, lo que permite utilizar este dispositivo para conocer la torsión de la fibra. Finalmente, se ha observado que el desplazamiento en longitud de onda de las LPGs con la curvatura es despreciable en el núcleo central y que en los núcleos exteriores el comportamiento es lineal por lo que se pueden utilizar para determinar la magnitud de curvatura. Además, los resultados muestran que el desplazamiento en longitud de onda en cada núcleo y en cada dirección tiene un comportamiento sinusoidal siendo la relación entre ellos única, lo que permite obtener la dirección de curvatura. Por último, se ha demostrado que la sensibilidad depende

de la posición de cada núcleo obteniendo una sensibilidad máxima de 4.85 nm/m^{-1} que se alcanza cuando un núcleo esta alineado con la dirección de la curvatura.

REFERENCIAS.

- [1] C. K. Y. Leung *et al.*, «Review: optical fiber sensors for civil engineering applications», *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 4, pp. 871-906, abr. 2015, doi: 10.1617/s11527-013-0201-7.
- [2] H.-N. Li, D.-S. Li, y G.-B. Song, «Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering», *Eng. Struct.*, vol. 26, no. 11, pp. 1647-1657, sep. 2004, doi: 10.1016/j.engstruct.2004.05.018.
- [3] Z. Ma y X. Chen, «Fiber Bragg Gratings Sensors for Aircraft Wing Shape Measurement: Recent Applications and Technical Analysis», *Sensors*, vol. 19, no. 1, p. 55, dic. 2018, doi: 10.3390/s19010055.
- [4] A. T. Asbeck, S. M. M. De Rossi, I. Galiana, Y. Ding, y C. J. Walsh, «Stronger, Smarter, Softer: Next-Generation Wearable Robots», *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 21, no. 4, pp. 22-33, dic. 2014, doi: 10.1109/MRA.2014.2360283.
- [5] F. Khan, A. Denasi, D. Barrera, J. Madrigal, S. Sales, y S. Misra, «Multi-Core Optical Fibers With Bragg Gratings as Shape Sensor for Flexible Medical Instruments», *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 14, pp. 5878-5884, jul. 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2905010.
- [6] I. Floris, J. M. Adam, P. A. Calderón, y S. Sales, «Fiber Optic Shape Sensors: A comprehensive review», *Opt. Lasers Eng.*, vol. 139, p. 106508, abr. 2021, doi: 10.1016/j.optlas-eng.2020.106508.
- [7] H. Zhang *et al.*, «Fiber Bragg gratings in heterogeneous multicore fiber for directional bending sensing», *J. Opt.*, vol. 18, no. 8, p. 085705, ago. 2016, doi: 10.1088/2040-8978/18/8/085705.
- [8] X. Chen, C. Zhang, D. J. Webb, K. Kalli, y G.-D. Peng, «Highly Sensitive Bend Sensor Based on Bragg Grating in Eccentric Core Polymer Fiber», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 22, no. 11, pp. 850-852, jun. 2010, doi: 10.1109/LPT.2010.2046482.
- [9] H. J. Patrick, «Self-aligning, bipolar bend transducer based on long period grating written in eccentric core fiber», en *Fourteenth International Conference on Optical Fiber Sensors*, Venice, Italy, nov. 2000, p. 204. doi: 10.1117/12.2302348.
- [10] T. Allsop *et al.*, «Bending and Orientational Characteristics of Long Period Gratings Written in D-Shaped Optical Fiber», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, no. 1, pp. 130-135, feb. 2004, doi: 10.1109/TIM.2003.821508.
- [11] C. Li *et al.*, «All-fiber multipath Mach Zehnder interferometer based on a four-core fiber for sensing applications», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 248, pp. 148-154, sep. 2016, doi: 10.1016/j.sna.2016.07.031.
- [12] S. Wang *et al.*, «Bending Vector Sensor Based on the Multimode-2-Core-Multimode Fiber Structure», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, pp. 1-1, 2016, doi: 10.1109/LPT.2016.2582758.
- [13] O. Arrizabalaga *et al.*, «High-performance vector bending and orientation distinguishing curvature sensor based on asymmetric coupled multi-core fibre», *Sci. Rep.*, vol. 10, no. 1, p. 14058, dic. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-70999-8.
- [14] J. Villatoro, A. Van Newkirk, E. Antonio-Lopez, J. Zubia, A. Schülzgen, y R. Amezcua-Correa, «Ultrasensitive vector bending sensor based on multicore optical fiber», *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 4, p. 832, feb. 2016, doi: 10.1364/OL.41.000832.

- [15] J. Bland-Hawthorn y S. G. Leon-Saval, «Astrophotonics: molding the flow of light in astronomical instruments [Invited]», *Opt. Express*, vol. 25, no. 13, p. 15549, jun. 2017, doi: 10.1364/OE.25.015549.
- [16] S. G. Leon-Saval *et al.*, «Divide and conquer: an efficient solution to highly multimoded photonic lanterns from multicore fibres», *Opt. Express*, vol. 25, no. 15, p. 17530, jul. 2017, doi: 10.1364/OE.25.017530.
- [17] S. Min *et al.*, «Multicore fibre Bragg grating developments for OH suppression», Amsterdam, Netherlands, sep. 2012, p. 84503L. doi: 10.1117/12.925791.
- [18] M. J. Gander *et al.*, «Bend measurement using Bragg gratings in multicore fibre», *Electron. Lett.*, vol. 36, no. 2, p. 120, 2000, doi: 10.1049/el:20000157.
- [19] G. M. H. Flockhart, W. N. MacPherson, J. S. Barton, J. D. C. Jones, L. Zhang, y I. Bennion, «Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber», *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 6, p. 387, mar. 2003, doi: 10.1364/OL.28.000387.
- [20] G. A. Cranch, G. M. H. Flockhart, W. N. MacPherson, J. S. Barton, y C. K. Kirkendall, «Ultra-high-sensitivity two-dimensional bend sensor», *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 9, p. 520, 2006, doi: 10.1049/el:20060731.
- [21] A. Fender *et al.*, «Two-Axis Temperature-Insensitive Accelerometer Based on Multicore Fiber Bragg Gratings», *IEEE Sens. J.*, vol. 8, no. 7, pp. 1292-1298, jul. 2008, doi: 10.1109/JSEN.2008.926878.
- [22] P. Saffari, T. Allsop, A. Adebayo, D. Webb, R. Haynes, y M. M. Roth, «Long period grating in multicore optical fiber: an ultra-sensitive vector bending sensor for low curvatures», *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 12, p. 3508, jun. 2014, doi: 10.1364/OL.39.003508.
- [23] J. P. Moore y M. D. Rogge, «Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions», *Opt. Express*, vol. 20, no. 3, p. 2967, ene. 2012, doi: 10.1364/OE.20.002967.
- [24] D. Barrera, I. Gasulla, y S. Sales, «Multipoint Two-Dimensional Curvature Optical Fiber Sensor Based on a Nontwisted Homogeneous Four-Core Fiber», *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 12, pp. 2445-2450, jun. 2015, doi: 10.1109/JLT.2014.2366556.
- [25] I. Floris, S. Sales, P. A. Calderón, y J. M. Adam, «Measurement uncertainty of multicore optical fiber sensors used to sense curvature and bending direction», *Measurement*, vol. 132, pp. 35-46, ene. 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.09.033.
- [26] Xuewen Shu, Lin Zhang, y I. Bennion, «Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings», *J. Light. Technol.*, vol. 20, no. 2, pp. 255-266, feb. 2002, doi: 10.1109/50.983240.
- [27] V. Bhatia, «Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing», *Opt. Express*, vol. 4, no. 11, p. 457, may 1999, doi: 10.1364/OE.4.000457.
- [28] D. Barrera, J. Madrigal, y S. Sales, «Long Period Gratings in Multicore Optical Fibers for Directional Curvature Sensor Implementation», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 1063-1068, 2018, doi: 10.1109/JLT.2017.2764951.
- [29] V. Bhatia, D. Campbell, R. O. Claus, y A. M. Vengsarkar, «Simultaneous strain and temperature measurement with long-period gratings», *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 9, p. 648, may 1997, doi: 10.1364/OL.22.000648.
- [30] V. Bhatia, «Temperature-insensitive and strain-insensitive long-period grating sensors for smart structures», *Opt. Eng.*, vol. 36, no. 7, p. 1872, jul. 1997, doi: 10.1117/1.601379.
- [31] U. L. Block, V. Dangui, M. J. F. Digonnet, y M. M. Fejer, «Origin of apparent resonance mode splitting in bent long-period fiber gratings», *J. Light. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 1027-1034, feb. 2006, doi: 10.1109/JLT.2005.862430.

Capítulo 4

Sensores basados en la diafonía inducida por redes de Bragg inclinadas en fibras multinúcleo

Resumen: En este capítulo se demuestra la posibilidad de inscribir redes de Bragg inclinadas (TFBGs) de manera selectiva sobre tres de los siete núcleos de una fibra multinúcleo. Se demuestra que mediante estas redes es posible aumentar el nivel de diafonía entre los núcleos, es decir acoplar luz entre ellos. Este acoplo es sensible a distintos estímulos externos, por lo que se estudia la posibilidad de implementar sensores basados en la diafonía inducida por las TFBGs. Se demuestra que la diafonía es sensible al estiramiento de la fibra y también a la dirección y magnitud de la curvatura. Por otro lado, se estudia la influencia de la temperatura y el índice de refracción del medio externo que rodea a las TFBGs. Se demuestra que la diafonía se desplaza en longitud de onda con la temperatura y el nivel de diafonía decae a medida que aumenta el índice de refracción del medio externo.

4.1. Introducción

Los primeros estudios sobre redes de Bragg inclinadas (TFBGs) surgieron en la década de los 90. Hill et al. propusieron la inscripción de TFBGs punto a punto utilizando un láser UV pulsado [1]. Morey et al. estudiaron las TFBGs inscritas mediante la interferencia de dos haces procedentes de un láser UV de onda continua [2]. Posteriormente, Erdogan y Sipe aplicaron la teoría de los modos acoplados para estudiar el espectro de las TFBGs y el acoplamiento que producen entre los modos guiados, modos que se propagan por la cubierta y modos radiados [3]. Debido a que estos modos responden de manera diferente ante distintos estímulos, las TFBGs han permitido el desarrollo de nuevos sensores de fibra óptica que mejoran las características y amplían las posibilidades de sus predecesores basados en FBGs. Chen et al. presentaron un estudio sobre la sensibilidad al estiramiento y temperatura de los modos de cubierta acoplados por una TFBG [4]. Basándose en estos modos, Guo et al. implementaron, un sensor de vibración insensible a las variaciones de temperatura [5] y Caucheteur et al. desarrollaron un sensor de curvatura y temperatura [6].

Por otra parte, los modos que se propagan por la cubierta son más sensibles al medio que rodea la fibra, por lo que las TFBG permiten la implementación de sensores de índice de refracción. La medida de forma rápida y precisa del índice de refracción de un medio material es un factor fundamental en la medida de concentraciones, análisis químicos, monitorización de la contaminación y detección de adulteraciones [7]. En la literatura se han publicado varios trabajos sobre sensores químicos o biológicos basados en la medida del índice de refracción del medio que rodea la fibra óptica. La mayoría de estos sensores se han implementado mediante distintos tipos de redes de Bragg. En el caso de las FBGs normales es necesario eliminar parte de la cubierta para incrementar la interacción de los campos evanescentes con el medio que rodea la fibra. La cubierta se puede reducir, bien mediante atacado con ácido [8]–[12], o bien utilizando fibras con una cara pulida o con forma de D [13], [14]. Sin embargo, en ambos casos se requiere modificar la estructura de la fibra, lo cual disminuye su resistencia y durabilidad y, por otro lado, aumenta la complejidad y coste de fabricación del sensor. También se ha implementado sensores de índice de refracción utilizando redes de Bragg de periodo largo (LPGs) basados en la excitación de los modos de cubierta en una fibra de un solo núcleo [15], [16]. Sin embargo, aunque estos sensores son más sensibles, su longitud es limitante para implementar sensores puntuales muy pequeños. Las TFBGs ofrecen una alternativa interesante a las LPGs ya que combinan las ventajas de las FBGs y las LPGs. Varios trabajos publicados proponen el uso de TFBGs en fibra de un solo núcleo para implementar sensores de

índice de refracción, presión, curvatura y sensores capaces de distinguir entre deformación y temperatura [17]–[21].

Las fibras MCF generalmente se utilizan para aplicaciones de telecomunicaciones, por lo que se diseñan para conseguir una diafonía muy baja entre sus núcleos [22], [23], esto dificulta la interacción entre los núcleos y el medio exterior que rodea la fibra. Sin embargo, puede ser interesante aumentar el nivel diafonía para un gran número de aplicaciones tanto en comunicaciones como en sensores [24], [25]. El uso de TFBGs permite el acoplo de parte de la luz del modo guiado a modos que se propagan por la cubierta. Estos modos son más sensibles a los cambios externos sin alterar las propiedades físicas de la fibra. Además, una TFBG inscrita en una fibra MCF permite que la luz que se propaga por un núcleo se acople a cualquiera de los otros núcleos y por lo tanto aumentar la diafonía. Estas propiedades hacen que este dispositivo sea interesante objeto de estudio para aplicaciones de monitorización. El objetivo de este capítulo es estudiar experimentalmente el acoplo de luz que se produce al inscribir una TFBG en una MCF de 7 núcleos. Posteriormente, primero se analiza como se ve afectado el acoplo ante estímulos externos de estiramiento y curvatura. Por último, se estudia la implementación de un sensor multiparamétrico de índice de refracción y temperatura.

4.2. Descripción del dispositivo

Se han fabricado tres TFBGs de 3° de inclinación y una longitud de 5mm en una fibra MCF de 7 núcleos. La inscripción de las TFBGs se ha realizado en una fibra multinúcleo comercial (Fibercore SM7C1500) mediante la técnica de inscripción selectiva descrita en el capítulo 2. Solamente se han inscrito TFBGs en el núcleo central y en dos de los núcleos externos de forma simultánea sin alterar el resto de los núcleos. De esta forma, se puede estudiar la interacción entre núcleos que tienen una TFBG y los que no. La figura 4.1 describe la interacción entre los modos guiados incidentes por el núcleo que se inyecta la luz y los modos guiados que se acoplan en los núcleos adyacentes. La diafonía se referirá a la luz que se acopla a cualquier núcleo y tiene el mismo sentido que la luz inyectada. A lo largo de este capítulo designaremos a la diafonía por las letras XT por el término en inglés *Crosstalk*. De igual forma, la diafonía hacia atrás corresponderá con la luz que se acopla en sentido contrario, y la designaremos con las letras BXT del término *Back-Crosstalk*. Los núcleos medidos se indicarán con su numeración y una flecha que indicara el sentido por el cual se ha inyectado la luz y por cual se ha tomado la medida. Por ejemplo, XT 1→2 se refiere a la diafonía medida en el núcleo 2 cuando se inyecta luz por el núcleo 1.

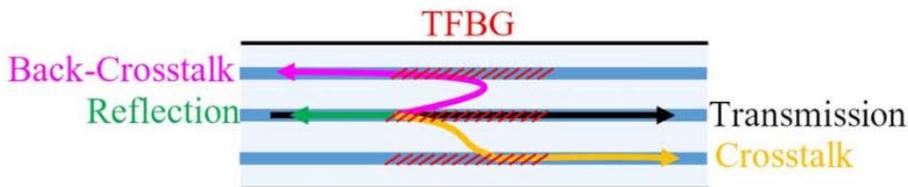


Figura 4.1. Vista longitudinal de los tres núcleos con TFBGs y diagrama de la interacción entre ellos [26].

Las medidas se han obtenido mediante un analizador de espectros óptico ANDO AQ6317C sincronizado con un láser sintonizable ANDO AQ4321D. A continuación, las figuras 4.2, 4.3 y 4.4 muestran los espectros de la reflectividad y transmisividad de las TBGS en los núcleos 1, 3, 6 y respectivamente.

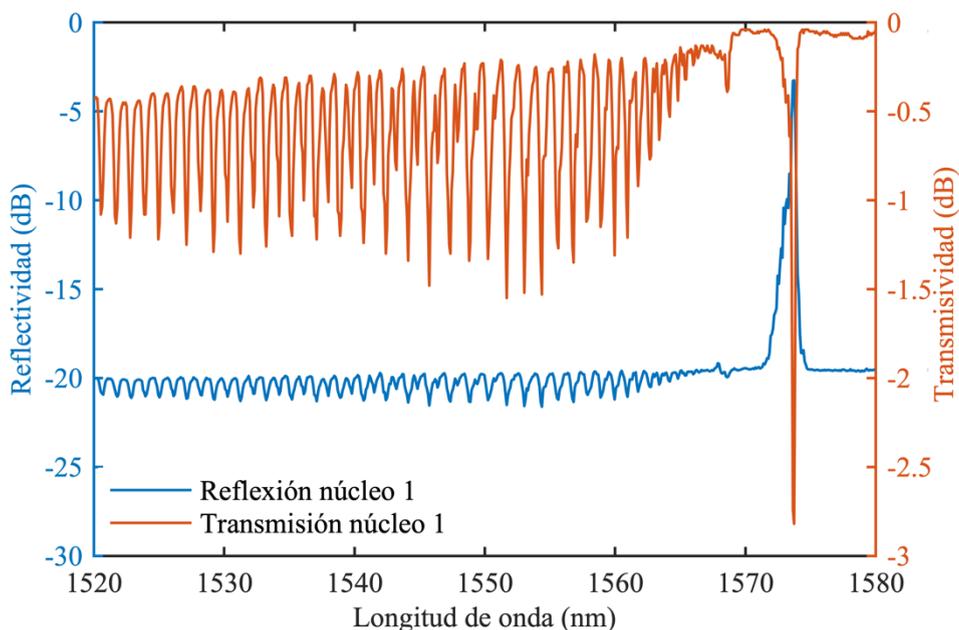


Figura 4.2. Reflectividad y transmisividad de la TFBG inscrita en el núcleo 1 [26].

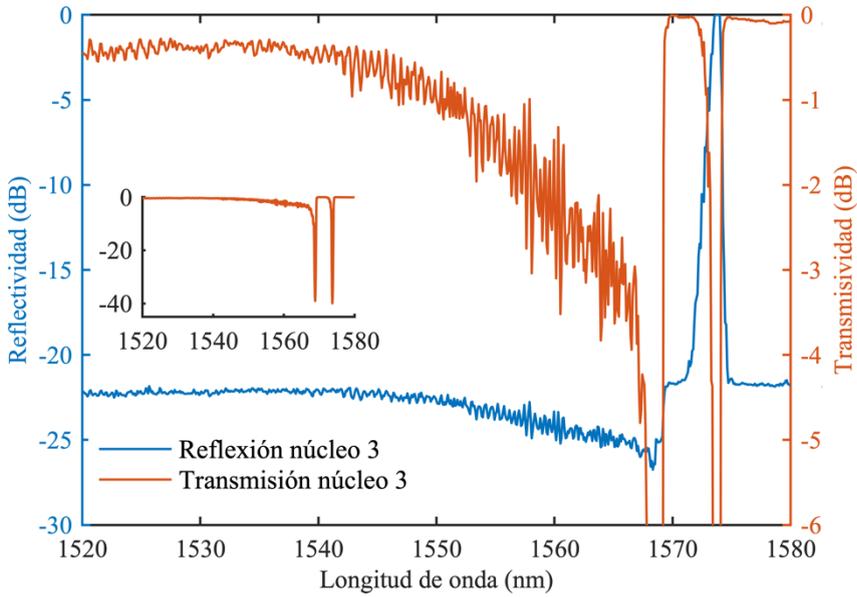


Figura 4.3. Reflectividad y transmisividad de la TFBR inscrita en el núcleo 3. La figura interior corresponde a la vista completa de la transmisividad [26].

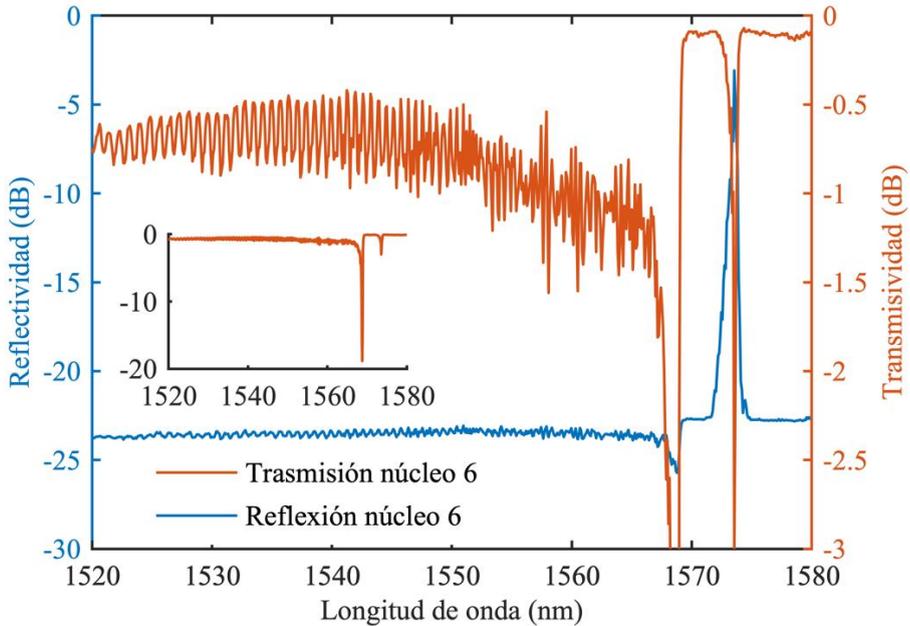


Figura 4.4. Reflectividad y transmisividad de la TFBR grabada en el núcleo 6. La figura interior corresponde a la vista completa de la transmisividad [26].

En los espectros en reflexión se puede apreciar que las longitudes de onda de Bragg de las TFBGs están centradas alrededor de 1573 nm. Sin embargo, a pesar de que las TFBGs han sido inscritas con la misma máscara de fase y de manera simultánea, se puede observar que la longitud de onda de Bragg y la reflectividad en cada una de ellas es distinta, debido al efecto lente de la propia fibra explicado en el capítulo 2. Se puede apreciar que la reflectividad de la TFBG en el núcleo número 3 es mayor que en el resto de los núcleos, debido a que, durante la inscripción, estaba colocado más cerca del punto de incidencia del haz láser sobre la fibra. Las oscilaciones y desvanecimientos observados en el nivel de ruido del espectro en reflexión se deben a que, la luz reflejada en los conectores se vuelve a filtrar por la TFBG. Por otra parte, las resonancias que se observan en los espectros en transmisión desde 1520 nm hasta 1570 nm corresponden a los modos de cubierta excitados por las TFBGs. Alrededor de 1568 nm se encuentra la resonancia del modo fantasma. El modo fantasma es un conjunto de modos de cubierta cuyas resonancias son adyacentes al modo del núcleo, que se agrupan formando una resonancia única. Estos modos interactúan fuertemente con la interfaz entre el núcleo y la cubierta de la fibra. Sin embargo, la interacción con el exterior de la fibra es mucho menor. [5], [18].

Una vez medidos los espectros en reflexión y transmisión de las TFBGs fabricadas, se ha medido la diafonía entre los núcleos de la MCF. El nivel de diafonía obtenido se ha normalizado con la potencia óptica del modo guiado incidente. Las figuras 4.5 y 4.6 muestran la diafonía entre dos núcleos que tienen grabada una TFBG mientras que en las figuras 4.7 y 4.8 la muestran entre un núcleo con TFBG y otro sin nada inscrito.

En lo que respecta a la diafonía entre núcleos que tienen una TFBG inscrita, se muestran dos casos dependiendo de la posición de los núcleos: la diafonía entre el núcleo central y un núcleo exterior (XT 1→3), y la diafonía entre núcleos exteriores (XT 3→6). En ambos casos, se produce un acoplo de los modos de cubierta ya que las bandas de atenuación en el espectro transmisión coinciden con los máximos en los espectros de XT y BXT. Al mismo tiempo, se observa que el modo fantasma se acopla a los núcleos exteriores tanto en el XT como en BXT. Se observa además que, el BXT 3→6 es ligeramente mayor que el BXT 1→3, ya que la resonancia del modo fantasma de la TFBG en el núcleo número 3 es mayor que la del núcleo número 1.

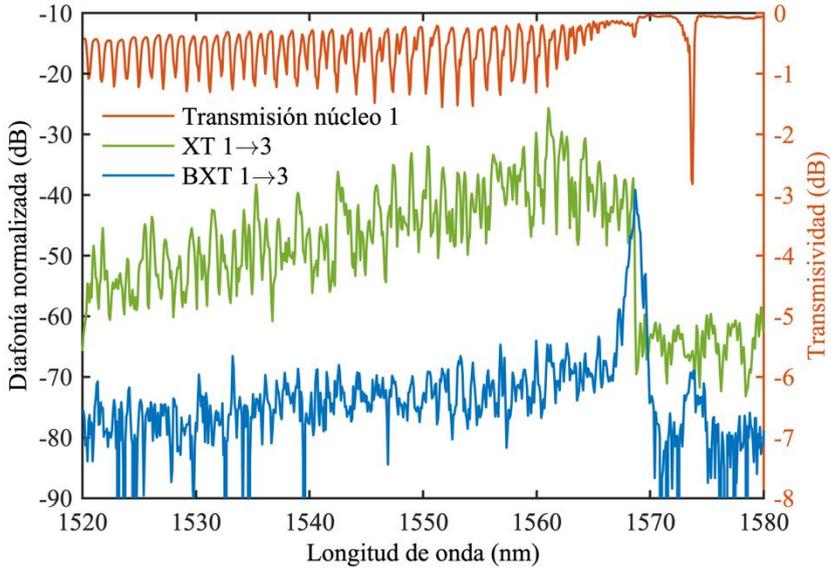


Figura 4.5. Espectro en transmisión del núcleo 1, diafonía (XT) y diafonía hacia atrás (BXT) medidas en el núcleo 3 e inyectando luz por el núcleo 1 [26].

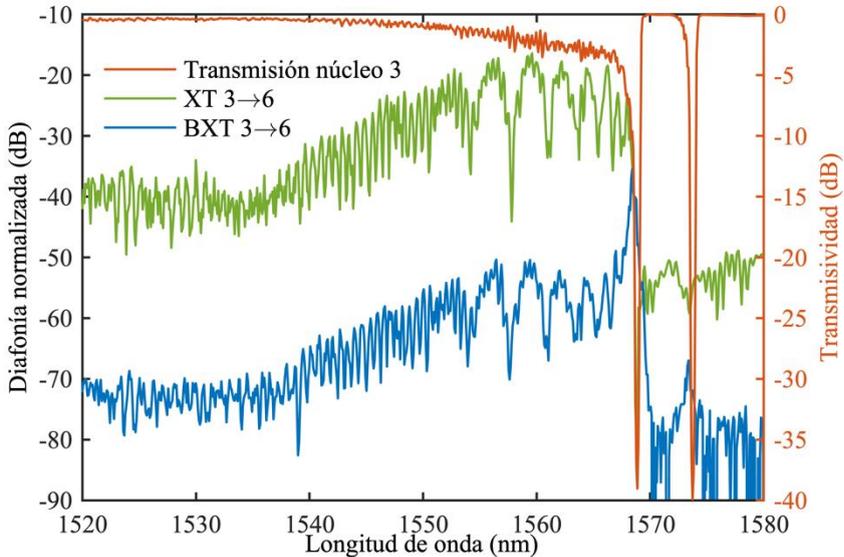


Figura 4.6. Espectro en transmisión del núcleo 3, diafonía (XT) y diafonía hacia atrás (BXT) medidas en el núcleo 6 e inyectando luz por el núcleo 3 [26].

Por otra parte, si comparamos el espectro del XT 3→6 con el del XT 1→3 en la zona cercana al modo fantasma podemos ver que hay un número menor de modos de

cubierta acoplados con una separación mayor en longitud de onda y sobre estos hay superpuestos otros de menor nivel y con una separación en longitud de onda menor. Esto es debido a la asimetría en el índice de refracción efectivo alrededor de los núcleos más cercanos al exterior de la fibra. Por una parte están muy cerca del exterior de la fibra y esto provoca que se exciten menos modos de cubierta con una separación mayor, tal y como muestran los resultados previamente publicados sobre los efectos de la reducción de la cubierta en TFBGs grabadas en fibras de un solo núcleo [4], [17]. Pero a su vez, también están muy alejados del centro de la fibra, es decir ven una cubierta más grande, lo que provoca la aparición de modos de cubierta con una separación mayor en longitud de onda.

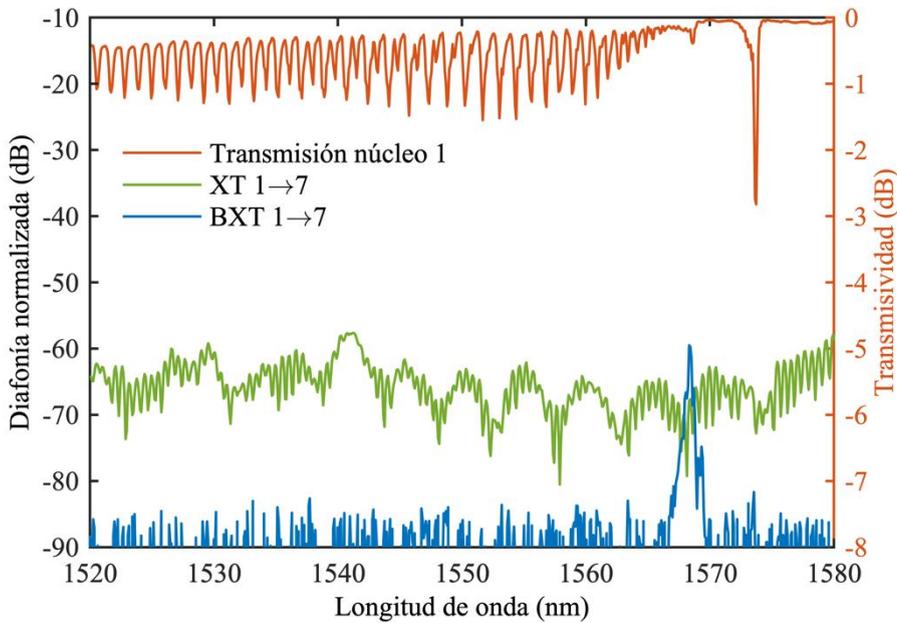


Figura 4.7. Espectro en transmisión del núcleo 1, diafonía (XT) y diafonía hacia atrás (BXT) medidas en el núcleo 1 e inyectando luz por el núcleo 7 [26].

Si se observa la diafonía medida en un núcleo sin TFBG cuando se inyecta luz por otro núcleo con TFBG (figuras 4.7 y 4.8), se puede ver que los niveles de XT son más bajos comparados con los obtenidos en los casos anteriores cuando ambos núcleos tienen una TFBG inscrita. Sin embargo, en el caso del BXT 3→4 es más alto que el BXT 1→7 debido a que la resonancia de modo fantasma es más grande en el núcleo 3 que en el núcleo 4.

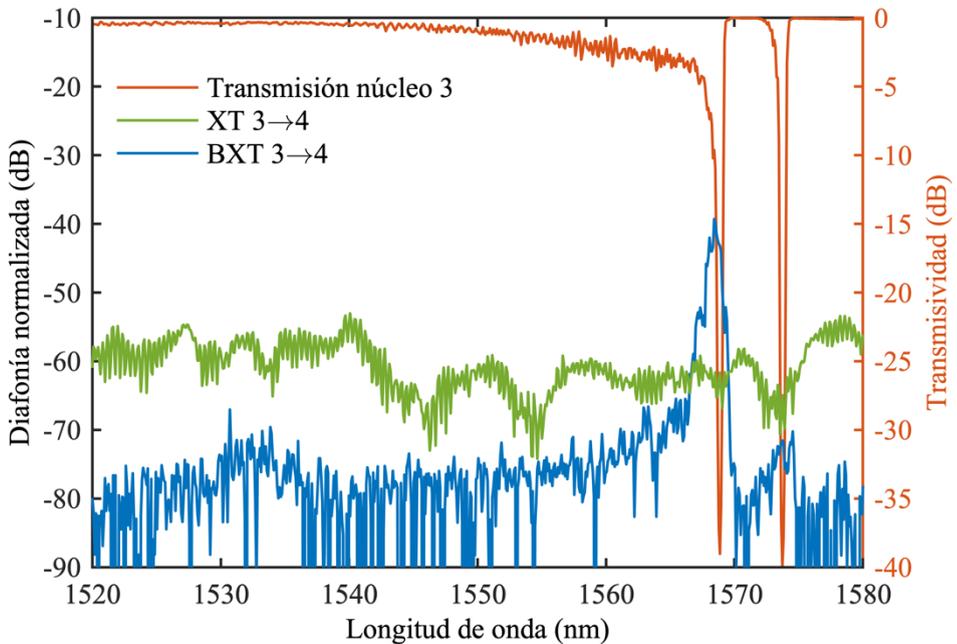


Figura 4.8. Espectro en transmisión del núcleo 3, diafonía (XT) y diafonía hacia atrás (BXT) medidas en el núcleo 4 e inyectando luz por el núcleo 3 [26].

4.3. Caracterización del dispositivo como sensor de deformación y curvatura.

Para demostrar las posibilidades del dispositivo como sensor, se ha analizado el comportamiento de las TFBGs ante estímulos mecánicos de deformación y curvatura. La figura 4.9 muestra el montaje utilizado. Este montaje es similar al que se describe en el capítulo 3, con la diferencia de que a este se le ha colocado una plataforma fija delante de una de las plataformas de translación. De esta forma se consiguen dos mejoras: primero, permite utilizar la plataforma de translación para compensar de manera más sencilla la deformación adicional que sufre la fibra al curvar el fleje y, por otro lado, permite realizar de manera más sencilla las medidas de deformación.

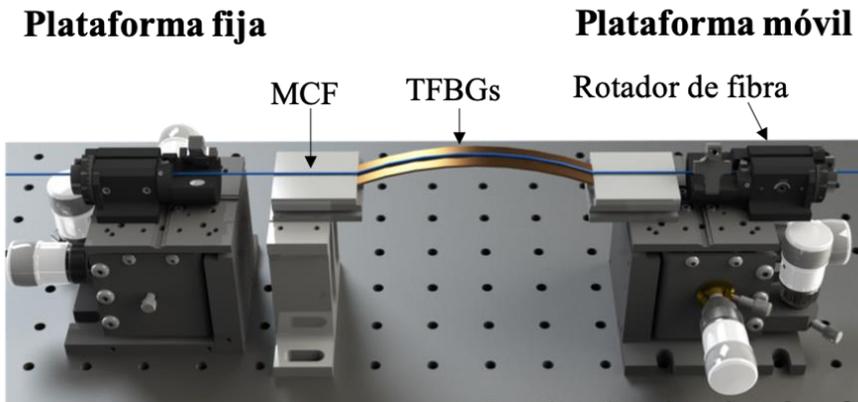


Figura 4.9. Montaje utilizado para las medidas de deformación y curvatura.

Se ha realizado la caracterización del sensor para deformaciones desde 0 hasta $1000 \mu\epsilon$. Para ello se ha utilizado el montaje de la figura 4.9 sin el fleje de metal. Para cada valor de deformación se han medido los espectros en cada núcleo, así como el XT y el BXT. Posteriormente, se ha analizado el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg de la TFBG en el núcleo número 1 y el desplazamiento en longitud de onda de los modos de cubierta. La figura 4.10 muestra el desplazamiento en longitud de onda medido para el modo guiado y distintos modos de cubierta. La tabla 4.1 resume las sensibilidades obtenidas.

Los resultados revelan que el modo guiado, y por tanto la longitud de onda de Bragg, tiene una sensibilidad de $1.187 \text{ pm}/\mu\epsilon$ mientras que la sensibilidad de los modos de cubierta depende de la longitud de onda del modo. Por otro lado, los resultados obtenidos muestran que la sensibilidad es menor para los modos con una longitud de resonancia más alejada de la longitud de onda de Bragg, debido a que tienen un índice efectivo menor. Este efecto concuerda con los resultados publicados por Chen y Albert. en un estudio sobre la sensibilidad a la deformación de las TFBG en fibras de un solo núcleo [21].

Los núcleos 3 y 6 muestran resultados similares. Además, la deformación se puede medir usando el XT y BXT, lo que permitiría compensar sensibilidades cruzadas e implementar nuevos dispositivos. El modo fantasma que se muestra en las medidas de BXT 1->3 (figura 4.5) tiene una sensibilidad de $1.17 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

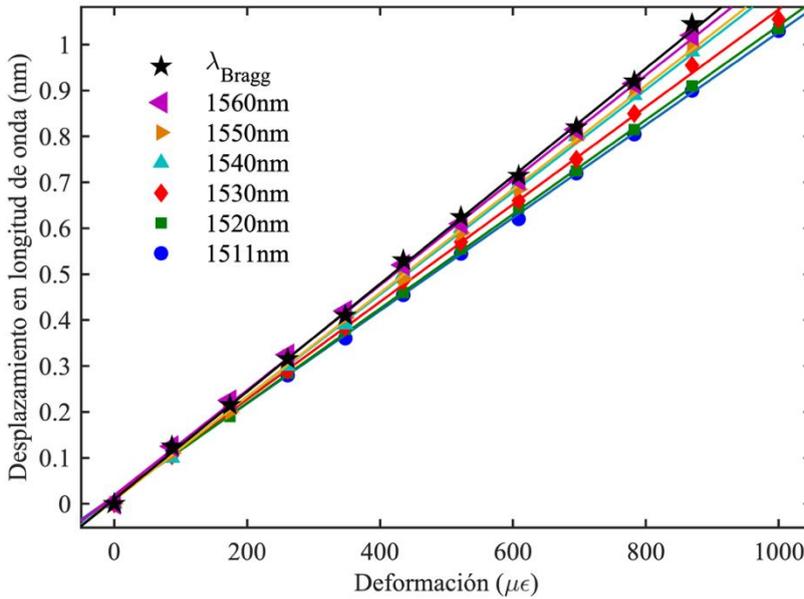


Figura 4.10. Desplazamiento de la longitud de onda de Bragg de la TFBG inscrita en el núcleo 1 y de los modos de cubierta frente a la deformación aplicada a la fibra [26].

| Longitud de onda de resonancia del modo de cubierta (nm) | Sensibilidad a la deformación (pm/ $\mu\epsilon$) |
|--|--|
| 1560 | 1.171 |
| 1550 | 1.140 |
| 1540 | 1.129 |
| 1530 | 1.084 |
| 1520 | 1.048 |
| 1511 | 1.035 |

Tabla 4.1 Sensibilidad a la deformación de los modos de cubierta de la TFBG inscrita en núcleo central de la MCF [26].

Para caracterizar el dispositivo ante curvaturas se ha utilizado el montaje de la figura 4.9. Para curvar el fleje se reduce la distancia entre la plataforma fija y la móvil. Por otro lado, la rotación de la fibra, y por tanto la dirección de curvatura, se puede modificar girando ambos rotadores. Antes de realizar las medidas, se ha orientado la fibra de modo que el núcleo número 3 se ha colocado en la posición superior y en línea con el núcleo número 1 y el número 6, quedando este último en contacto con el fleje. Después, la curvatura se ha ido incrementado desde 0 m^{-1} hasta 4 m^{-1} . Este procedimiento se ha repetido girando la posición de los núcleos 90° . La figura 4.11 muestra los resultados del XT obtenido entre los núcleos 1, 3 y 6. Cuando los

núcleos están alineados verticalmente y aumenta la curvatura, el máximo del XT 1→3 y del XT 3→6 decrecen a un ritmo de 2.5 dB/m^{-1} en ambos casos. Sin embargo, el XT 1→6 permanece constante. Cuando la fibra se rota 90° , el XT 1→3 y el XT 1→6 muestran un nivel similar y prácticamente invariante con la curvatura. Las diferencias observadas en el comportamiento del XT 1→6 son consecuencia de la posición relativa del núcleo 6 en el interior de la fibra y de la distribución de intensidad modal de la cubierta cuando se curva la fibra. Cuando la fibra óptica se curva, debido al efecto elasto-óptico se produce un gradiente en el índice de refracción de la fibra que provoca que la distribución de la intensidad modal de los modos de cubierta se desplace hacia el exterior de la curvatura [27], lo que afecta al XT entre núcleos.

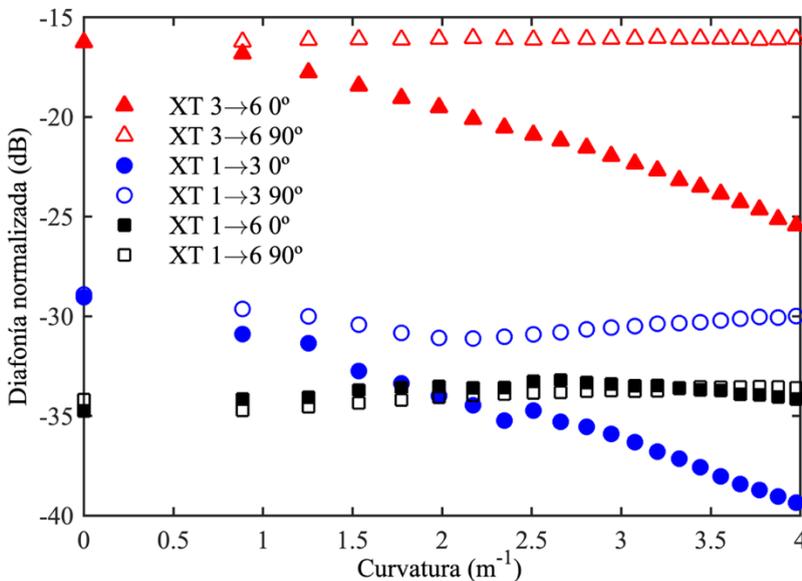


Figura 4.11. Máximo nivel de diafonía (XT) entre los núcleos 1,3 y 6 frente a la curvatura aplicada a la fibra [26].

Para estudiar el comportamiento en longitud de onda de la diafonía cuando se curva la fibra, se ha medido el desplazamiento en longitud de onda del XT para distintas curvaturas. La figura 4.12 representa el desplazamiento en longitud de onda de unos de los picos cercanos al modo fantasma para el XT 1→3, XT 1→6 y XT 3→6. Se observa que el desplazamiento para el XT 1→3 es positivo y aproximadamente lineal con una sensibilidad de 70 pm/m^{-1} . Mientras que el desplazamiento en los XT 3→6 y XT 1→6 muestran un desplazamiento negativo y no lineal, se ha representado un ajuste cuadrático para mostrar la tendencia en estos casos. Este efecto es debido a la posición relativa de los núcleos con la dirección de curvatura.

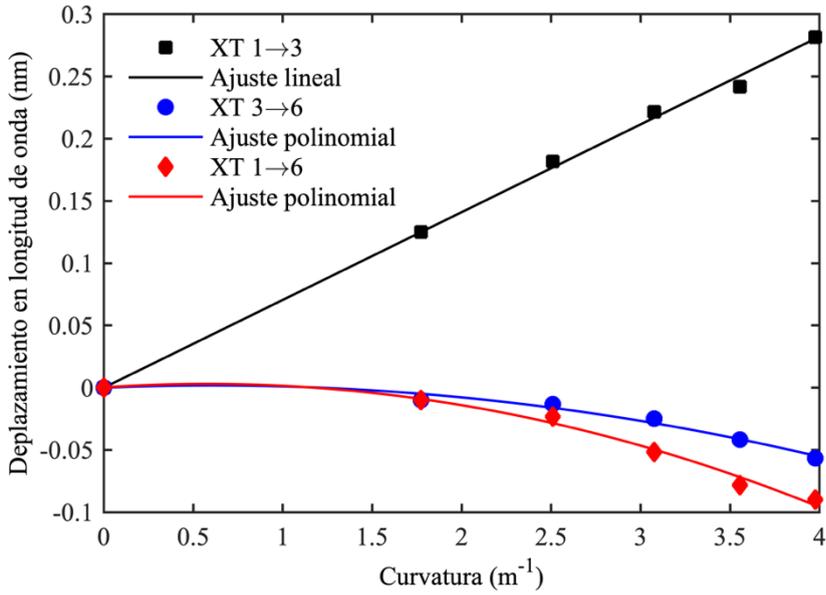


Figura 4.12. Desplazamiento en longitud de onda del XT entre los núcleos 1, 3 y 6 [26].

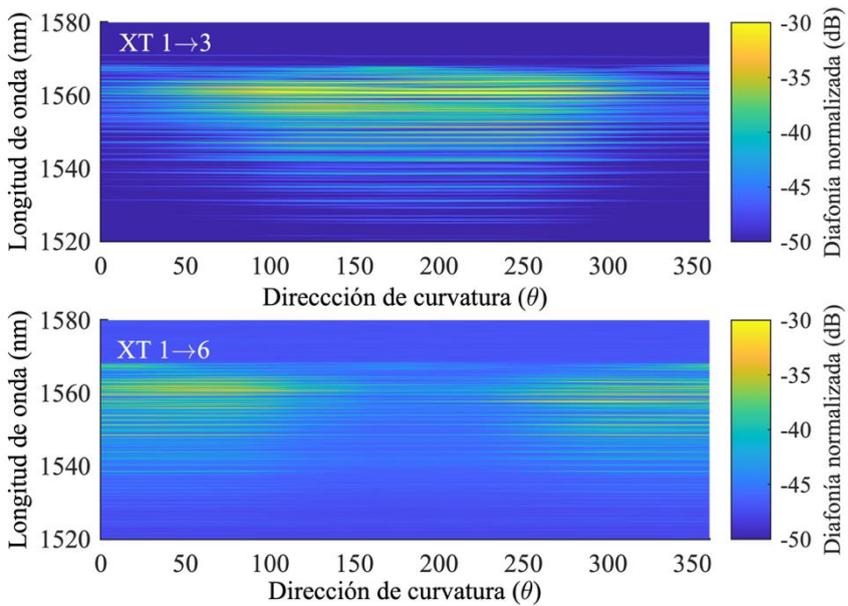


Figura 4.13. Espectrograma del XT entre los núcleos 1, 3 y 6 para distintas direcciones de curvatura [26].

Continuando con el estudio de la curvatura, se ha analizado la influencia de la dirección de curvatura sobre el espectro del XT en un rango de direcciones mucho más amplio que el mostrado en la figura 4.11. Para ello se ha aplicado a la fibra una curvatura fija de 4 m^{-1} y se ha rotado desde 0° a 360° en pasos de 20° . Para cada una de estas direcciones se ha medido el espectro del XT en dos núcleos opuestos, el XT 1→3 y el XT 1→6. Estas medidas se han representado gráficamente en forma de espectrograma para ver cómo afecta la dirección de curvatura a todo el espectro en su conjunto. Este espectrograma es una representación tridimensional, que muestra cómo va variando el espectro conforme va cambiando la dirección de curvatura. En el eje de abscisas se representa la dirección de curvatura, en el eje de ordenadas la longitud de onda del espectro y el nivel de diafonía se representa por colores. Observando el espectrograma de ambos XT mostrado en la figura 4.13, se puede ver que los niveles de diafonía cambian de manera periódica con la dirección de curvatura. Además, cabe destacar que, si comparamos los espectrogramas cada XT, tienen un comportamiento complementario al ser medidos en núcleos opuestos, es decir, para la dirección en que el nivel de XT 1→3 es máximo el XT 1→6 es mínimo.

4.4. Implementación de un sensor de índice de refracción y temperatura.

En la sección anterior se ha demostrado que en una MCF los modos de cubierta permiten el intercambio de energía entre los núcleos que tienen una TFBG, lo que produce un aumento en el nivel de diafonía. También, se ha comprobado que el espectro de esta diafonía inducida es sensible ante estímulos mecánicos. Sin embargo, los modos de cubierta de orden superior son sensibles a los cambios en el índice de refracción del medio que rodea la fibra (SRI del término en inglés *Surrounding Refractive Index*) [17], por lo que se puede utilizar la diafonía que inducen para medir dichos cambios e implementar sensores químicos o biológicos. En esta sección se va a estudiar de manera experimental como afectan los cambios en el SRI a la diafonía entre núcleos. Para tal fin, las TFBGs inscritas en una fibra MCF se han sumergido en distintas disoluciones con diferentes concentraciones, de manera que, en cada caso el SRI es diferente. Además, aprovechando que la fibra estará sumergida en un medio líquido, se ha estudiado como afecta a la diafonía los cambios de temperatura.

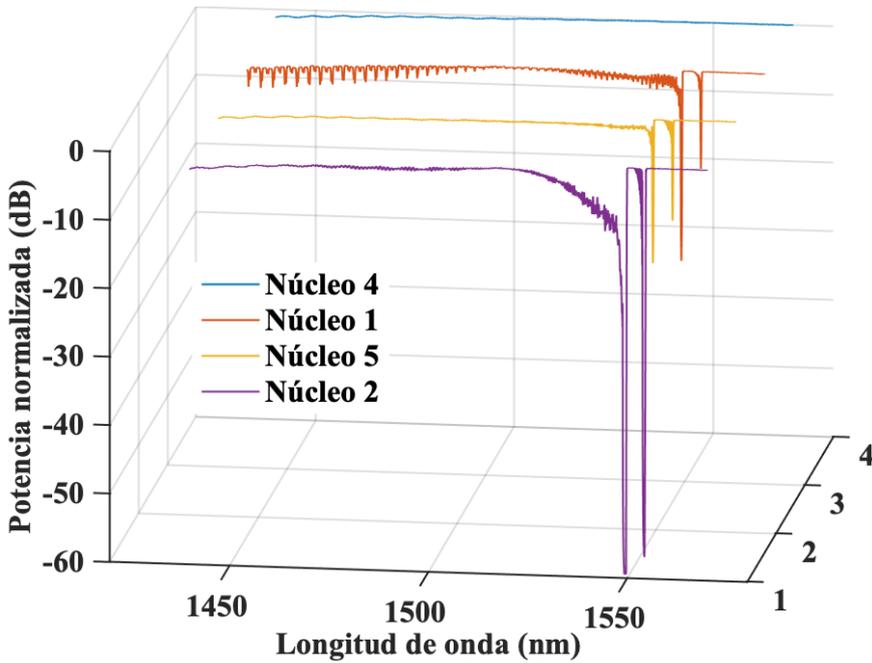


Figura 4.14. Espectros de las TFBRGs de 2ª en los núcleos 1, 2 y 5. El resto de los núcleos sin TFBRG tienen un espectro similar al del núcleo 4 [28].

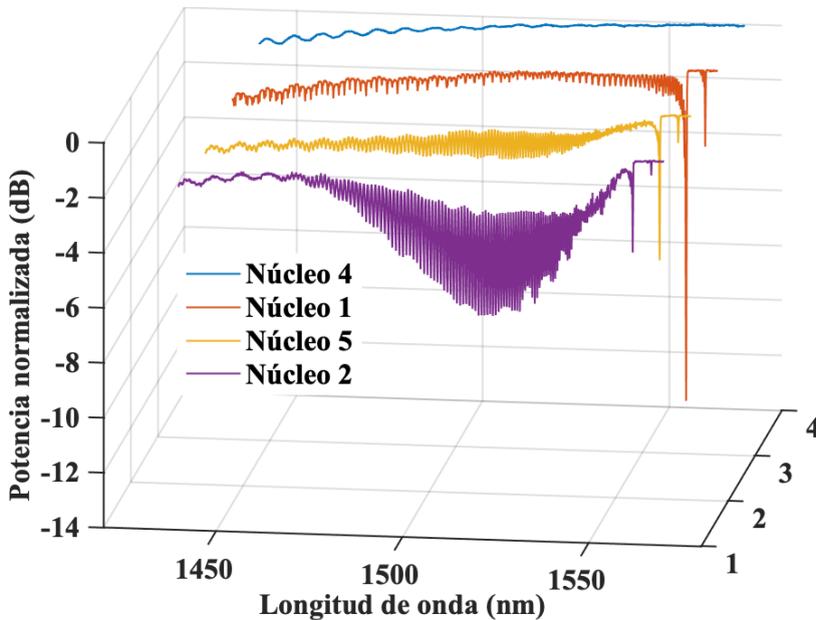


Figura 4.15. Espectros de las TFBRGs de 7ª en los núcleos 1, 2 y 5. El resto de los núcleos sin TFBRG tienen un espectro similar al del núcleo 4 [28].

Para este caso, se han fabricado dos dispositivos independientes mediante la inscripción de TFBGs de diferentes características que las anteriores, pero inscritas utilizando la misma técnica y en el mismo tipo de fibra MCF. Se han inscrito dos TFBGs distintas, una utilizando una inclinación de 2° y la segunda utilizando una inclinación de 7° . Ambas TFBGs se han inscrito con una longitud de 5 mm. Además, en este caso se han inscrito en los núcleos 1, 2 y 5. En la figura 4.16 se muestra un esquema con la posición de los núcleos durante la inscripción de las TFBGs.

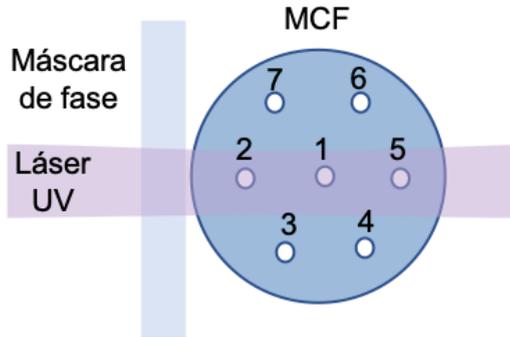


Figura 4.16. Esquema de la orientación de la MCF durante la inscripción de las TFBGs de 2° y 7° .

En las figuras 4.14 y 4.15 se pueden ver los espectros en transmisión para las TFBGs de 2° y 7° respectivamente. Al mismo tiempo, se ha incluido un ejemplo de un espectro de un núcleo sin TFBG grabada, el núcleo 4. Se puede comprobar en las figuras que este núcleo no presenta ninguna resonancia. Por otro lado, las diferencias entre los espectros de cada núcleo se deben, como en el dispositivo anterior, a efectos producidos por el efecto lente de la fibra durante la inscripción de las TFBGs.

En lo que respecta al grado de inclinación de cada TFBG, se puede observar que, al igual que ocurre en las TFBGs en fibras de solo núcleo [17], por un lado, las resonancias del modo guiado reflejado y el modo fantasma son menores para las TFBGs de 7° que las de 2° . Por el contrario, las resonancias de los modos de cubierta son más pronunciadas para las TFBGs de 7° que las de 2° .

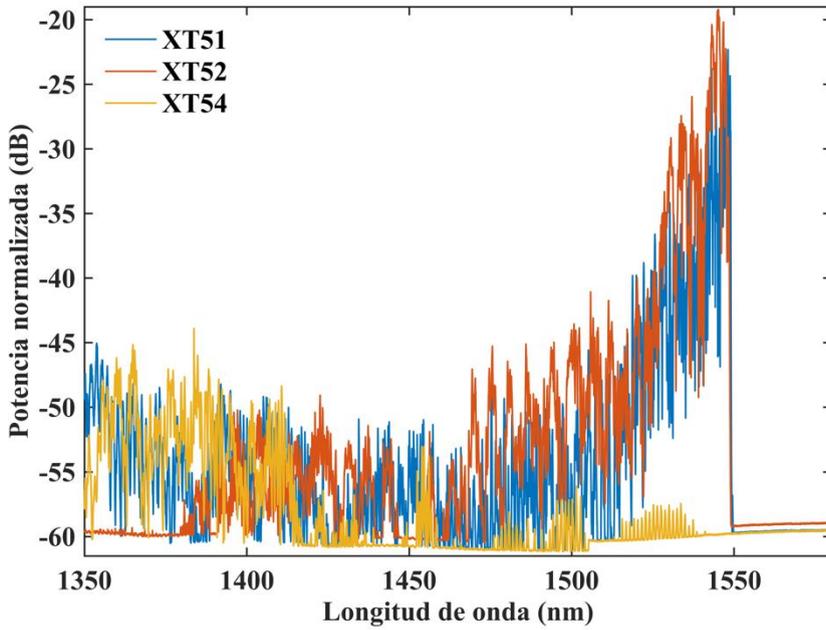


Figura 4.17. XT 5→1, XT 5→2 y XT5→4 para las TFBGs de 2° [28].

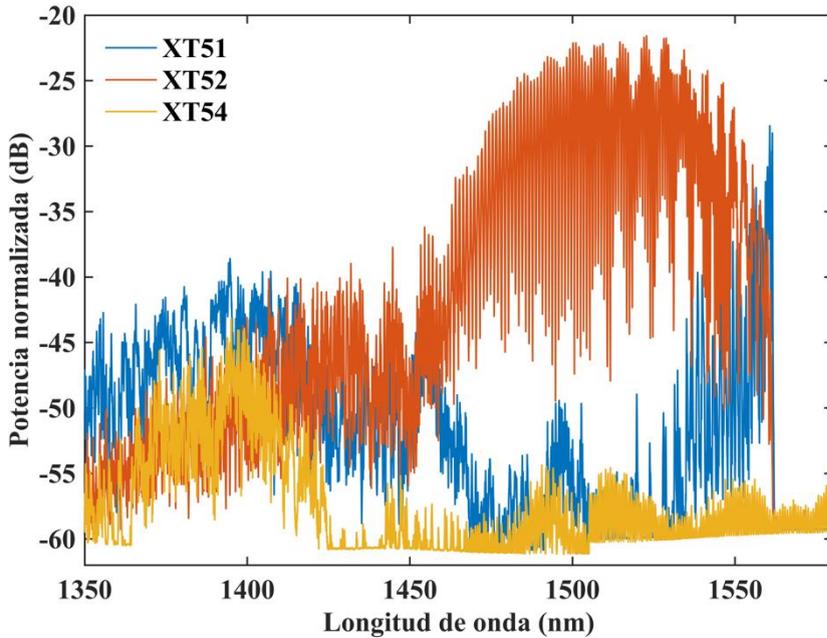


Figura 4.18. XT 5→1, XT 5→2 y XT5→4 para las TFBGs de 7° [28].

En lo que respecta al principio de medida del SRI utilizando la diafonía, a medida que aumenta el índice de refracción exterior, los distintos modos de cubierta dejan de estar guiados y se atenúan rápidamente [5], impidiendo que sean acoplados de nuevo a otro núcleo, por lo que el nivel de diafonía se reduce. Las figuras 4.17 y 4.18 muestran el XT medido entre núcleos con TFBG inscrita (XT 5→1 y XT 5→2), así como el XT entre un núcleo con TFBG inscrita y otro sin TFBG (XT 5→4). Más concretamente la figura 4.17 muestra el XT en el caso de TFBG de 2° y la figura 4.18 los muestra para el caso de TFBGs de 7°. Observando las figuras se puede ver por un lado que el nivel de diafonía aumenta en los núcleos que tienen TFBG comparado con los núcleos donde no hay TFBG. Por otro lado, se puede observar que las TFBGs de 7° permiten reacoplar más modos de cubierta que las TFBGs de 2°.

Para estudiar el comportamiento de la diafonía entre núcleos ante distintos SRI, se han sumergido las TFBGs en disoluciones de agua y sacarosa y posteriormente se ha medido la diafonía entre núcleos para cada disolución. Los espectros ópticos se han medido utilizando un láser sintonizable Yenista TS100HP sincronizado con un analizador de componentes Yenista CT400. La figura 4.19 muestra un esquema del montaje utilizado y la figura 4.20 una fotografía de dicho montaje. La fibra se coloca sobre dos soportes de sujeción que a su vez están montados sobre sendas plataformas de translación. Después, se mueve una de las plataformas para tensionar ligeramente la fibra y mantenerla recta durante las medidas.

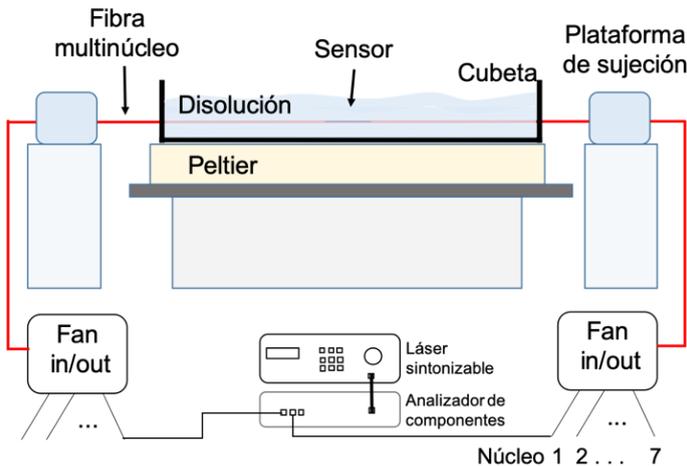


Figura 4.19. Esquema del montaje utilizado para sumergir la fibra en una disolución líquida a temperatura controlada.

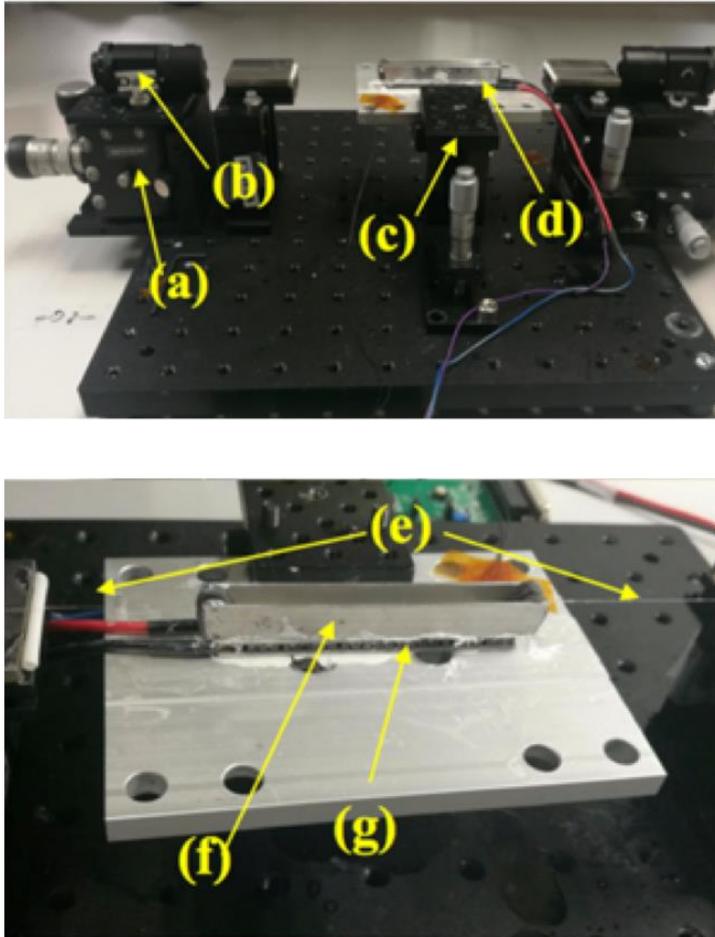


Figura 4.20. Fotografías del montaje: (a) Plataforma de translación, (b) rotador de fibra, (c) plataforma elevadora, (d) (f) cubeta, (e) fibra óptica con las TFBGs y (g) célula Peltier [28].

Entre las dos plataformas anteriores se ha colocado una cubeta metálica para poder sumergir las TFBGs. La temperatura de la cubeta se puede controlar mediante un sistema automático formado por: una célula Peltier que permite calentar o enfriar la cubeta, un termistor para obtener la temperatura de la cubeta y que está situado entre la cubeta y el Peltier, y un controlador electrónico (MAX1968 EVKIT) que ajusta automáticamente la corriente del Peltier para mantener la cubeta a una temperatura constante.

Para estudiar la diafonía ante los cambios de temperatura, en primer lugar, se han sumergido las TFBGs de 2° en agua destilada, de esta forma se consigue una distribución de temperatura más uniforme que si simplemente se deja la fibra al aire. Después, la temperatura del agua se ha ido incrementando desde 10° hasta 40° en pasos de 5°. Para cada temperatura, se ha medido el XT entre los núcleos 1, 2 y 5. Por último, se ha realizado un análisis del XT centrado en el rango de longitudes de onda desde 1546 nm a 1550 nm. Este rango corresponde al XT producido por el acoplo de los modos de cubierta más cercanos al modo fantasma, por lo que son más sensibles a la temperatura y a la deformación [17].

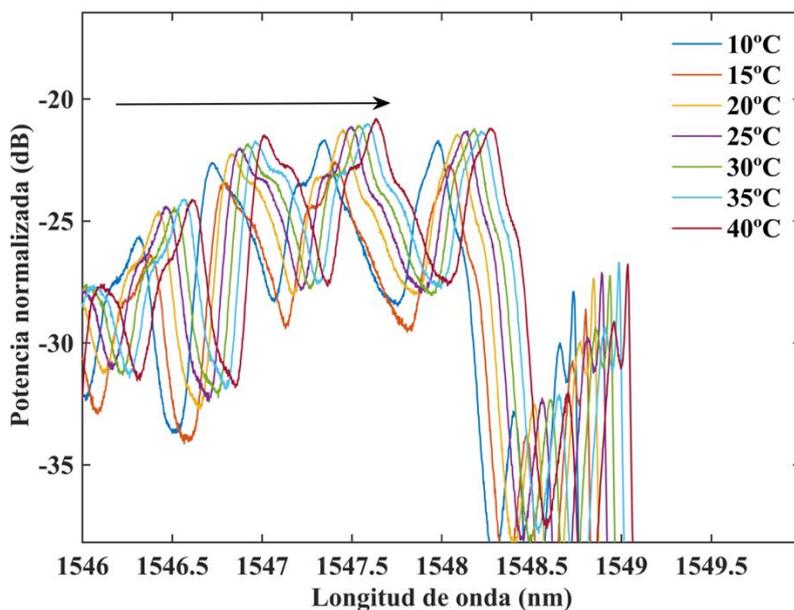


Figura 4.21. Espectro del XT1→2 a diferentes temperaturas. La flecha indica la dirección del incremento de temperatura [28].

La figura 4.21 muestra un ejemplo del XT entre los núcleos 1 y 2 para distintas temperaturas. Es evidente que el nivel de XT no se ve afectado por la temperatura. Sin embargo, sí que sufre un desplazamiento en longitud de onda como era de esperar. Para cuantificar el desplazamiento de todos los máximos a la vez se ha utilizado el método de la correlación cruzada [29]. El desplazamiento se ha calculado tomando como punto de partida el espectro a 10°. En la figura 4.22 se puede observar la correlación cruzada calculada para cada temperatura.

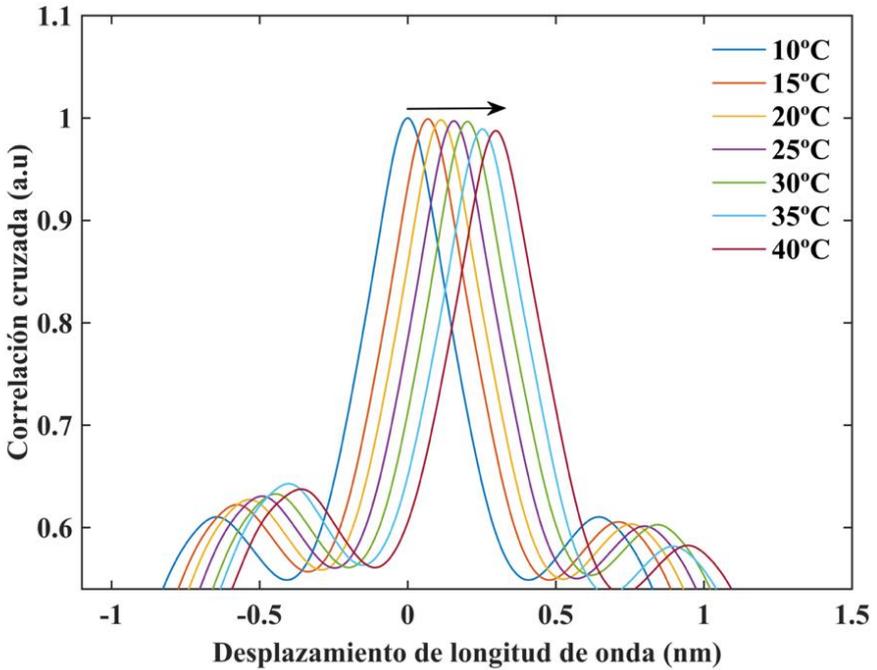


Figura 4.22. Correlación cruzada del X1→2 a 10° con el XT1→2 calculada a diferentes temperaturas [28].

La gráfica de la figura 4.23 contiene el desplazamiento de todas las combinaciones de XT que se han medido. Se puede observar que, en todos los XT medidos el desplazamiento en longitud de onda presenta una dependencia lineal con la temperatura con un pendiente similar en todos los XT. Para obtener la sensibilidad se ha realizado un ajuste lineal al desplazamiento en longitud de onda con la temperatura. La sensibilidad máxima obtenida ha sido 9.75 pm/°C para el XT1→2 y la mínima 9.62 pm/°C para el XT2→5. Estos valores son ligeramente inferiores al de la sensibilidad de una FBG ($\cong 10$ pm/°C). Esto es debido, por un lado, al gradiente de temperatura dentro de la cubeta con agua. Esto provoca que en la zona donde está colocada la fibra la temperatura sea levemente menor que la temperatura del Peltier, lo que implica una pequeña reducción en la sensibilidad calculada. Por otro lado, la sensibilidad a la temperatura es ligeramente menor para los modos de cubierta cuya longitud de onda de resonancia está más alejada de la longitud de onda de Bragg [30].

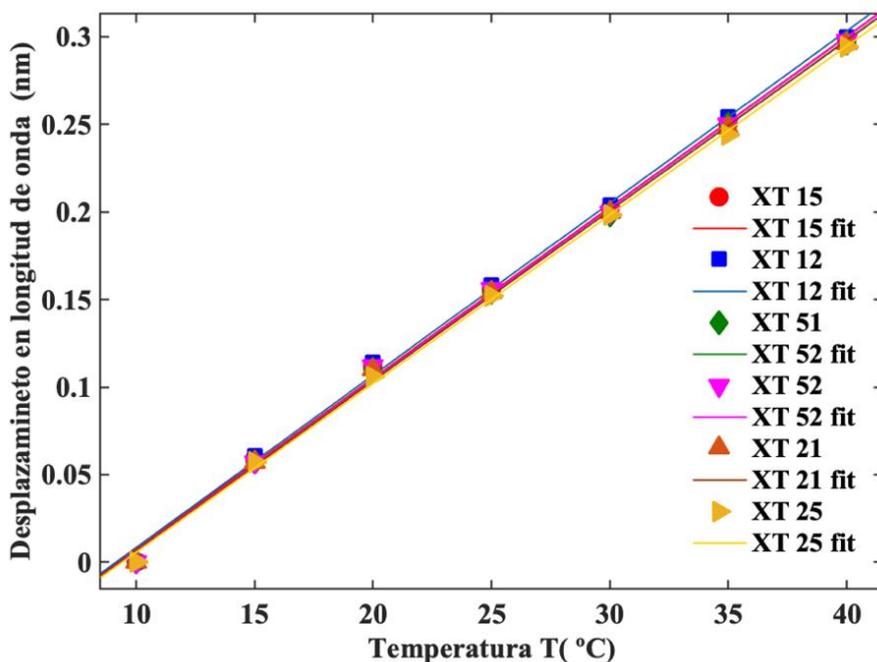


Figura 4.23. Desplazamiento en longitud de onda con la temperatura para todas las combinaciones de XT medidas [28].

Para estudiar el efecto de cambio del índice de refracción que rodea la fibra sobre el XT, los dispositivos fabricados con TFBGs de 2° y 7° se han caracterizado por separado. Cada dispositivo se ha medido primero al aire y después sumergido en diferentes disoluciones de sacarosa y agua destilada. Las concentraciones de cada disolución son del 0%, 10% y desde 25% al 65% en incrementos del 5%. Estas disoluciones tienen un índice de refracción desde 1.3166 hasta 1.4370 según [31]. Para cada disolución se han medido los espectros ópticos de diafonía entre las combinaciones de núcleos 1,2 y 5. Durante todo el ensayo se ha mantenido una temperatura constante de 25°C. Además, entre cambios de disolución se ha limpiado la fibra varias veces con agua destilada caliente, con el objetivo de eliminar cualquier resto de la disolución anterior.

A continuación, se muestran de los resultados obtenidos para cada dispositivo. En el caso del sensor fabricado con TFBGs de 2° la figuras 4.24 y 4.25 muestran los espectros de diafonía XT1→2 y XT1→5. Por otra parte, la figuras 4.26 y 4.27 muestran el espectro de la diafonía XT2→5 y XT1→5 para el caso de las TFBGs de 7°.

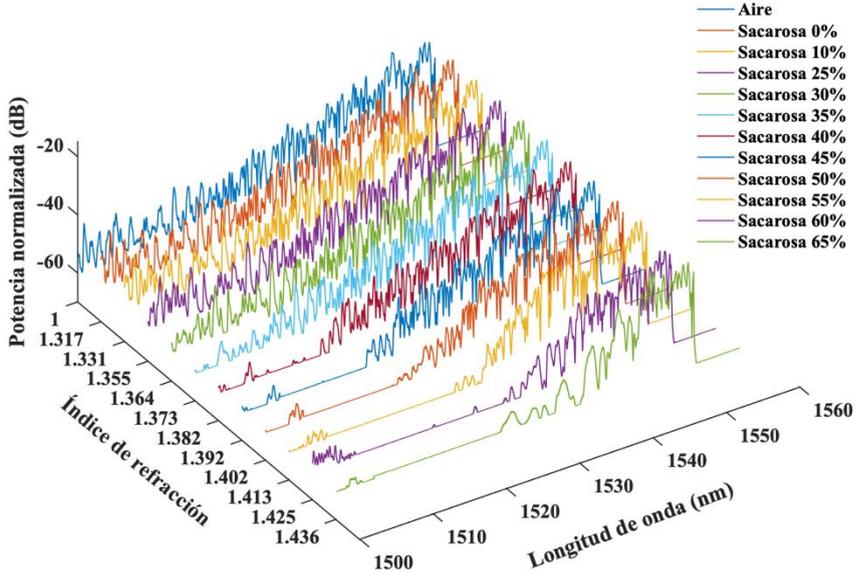


Figura. 4.24. XT1→2, medido con el sensor fabricado con TFBGs de 2° [28].

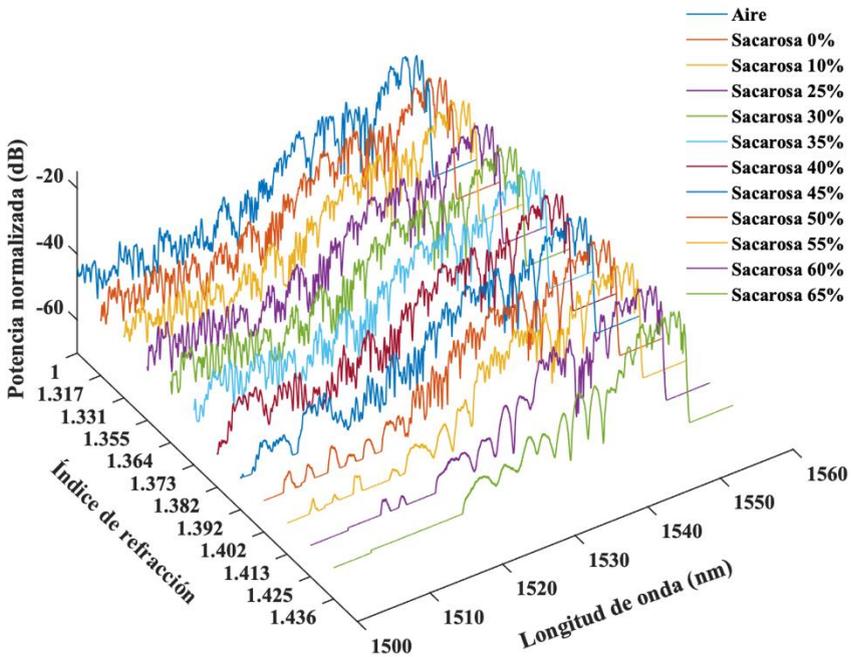


Figura 4.25. XT5→2, medido con el sensor fabricado con TFBGs de 2° [28].

La figura 4.24 muestra el XT entre el núcleo central y uno de los núcleos exteriores (XT1→2) y la figura 4.25 muestra el XT entre dos núcleos exteriores (XT5→2). En ambos casos, si se toma como referencia el espectro cuando el índice de refracción del medio que rodea la fibra es 1, es decir cuando la fibra está al aire, y se compara con los demás espectros, se puede ver que, a medida que aumenta el índice de refracción del medio que rodea la fibra, las componentes espectrales en las longitudes de onda más bajas se van atenuando. Esta atenuación es debida a que los modos de cubierta con un índice de refracción efectivo menor que el índice del exterior se atenúan, y por lo tanto la potencia de las componentes espectrales del XT debidas a estos modos se reduce. Por otra parte, se puede observar que que las mayores atenuaciones se producen para concentraciones de sacarosa superiores al 40%.

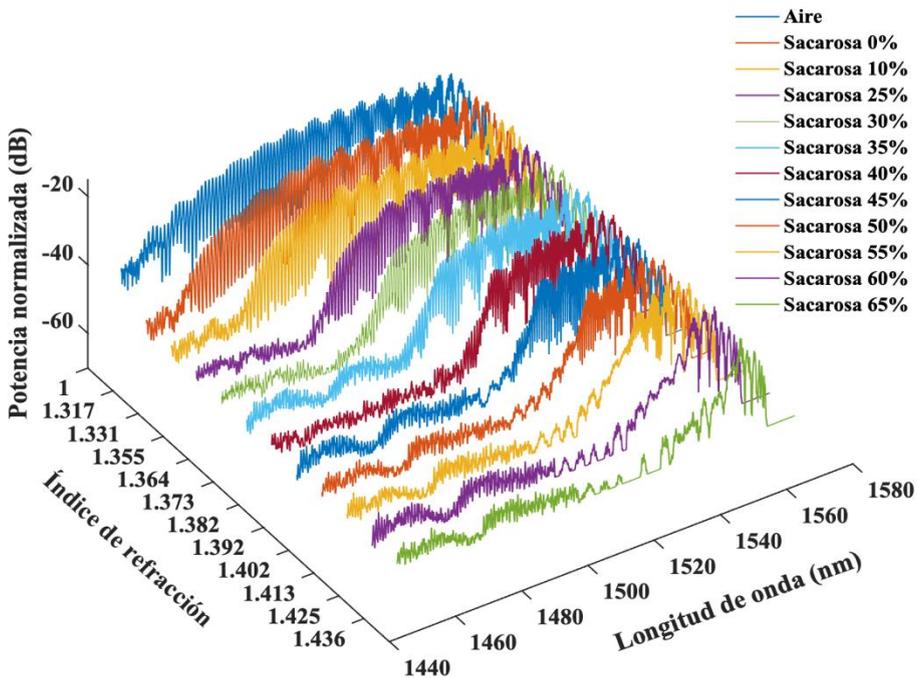


Figura 4.26. XT2→5, medido con el sensor fabricado con TFBGs de 7° [28].

En el caso de las TBGS de 7°, la figura 4.26 muestra el XT entre núcleos exteriores (XT2→5) y la figura 4.27 el XT entre el núcleo central y un núcleo exterior (XT1→5). En ambos casos, al que ocurre en el caso anterior con las TFBGs de 2°, se observa una reducción de las componentes espectrales del XT cuando aumenta el índice de refracción exterior al aumentar la concentración de sacarosa. Sin embargo,

en este caso, los cambios son más notables en el XT entre dos núcleos exteriores. Se puede ver en la figura 4.26 cambios notables en la atenuación a partir de concentraciones de sacarosa superiores al 10%.

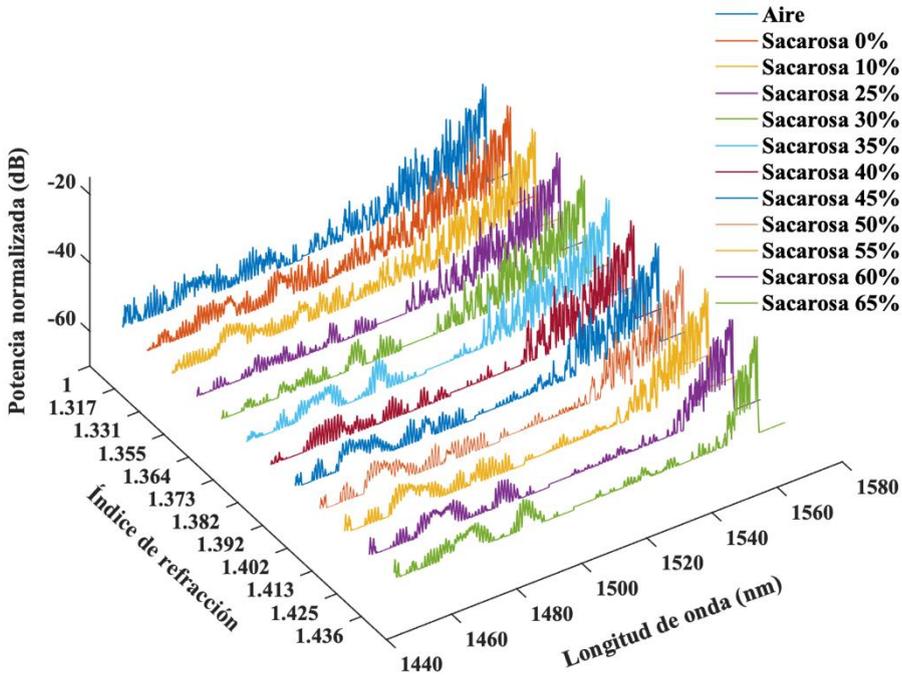


Figura 4.27. XT1→5, medido con el sensor fabricado con TFBGs de 7° [28].

Como se ha podido observar en las figuras anteriores, para los dos sensores, al aumentar la concentración de sacarosa, y por lo tanto el índice de refracción de la disolución, el número de modos de cubierta se reduce.

Para analizar con más detalle este efecto, se ha calculado la potencia de XT integrando su espectro óptico en cada caso. Las figuras 4.28 y 4.29 muestran las potencias de XT para cada índice de refracción, normalizadas respecto a la potencia obtenida cuando el dispositivo está al aire.

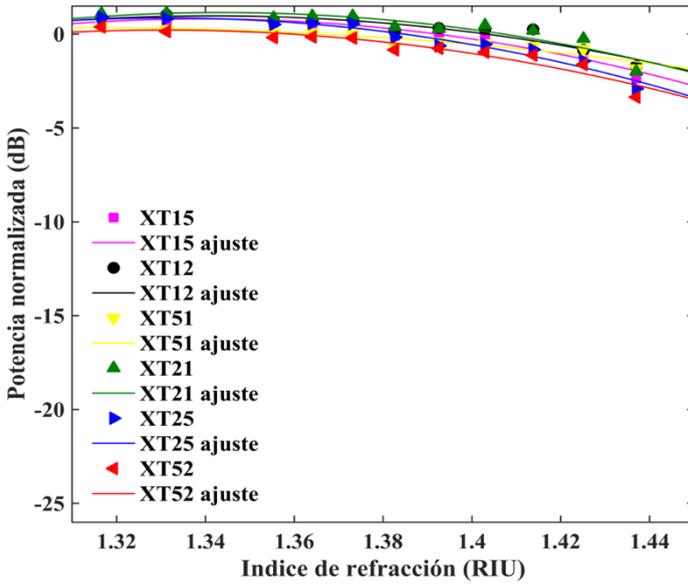


Figura 4.28. Potencia normalizada para todas las combinaciones de diafonía en el sensor fabricado con TFBGs de 2°. Las curvas representadas corresponden al ajuste polinomial de segundo orden aplicado [28].

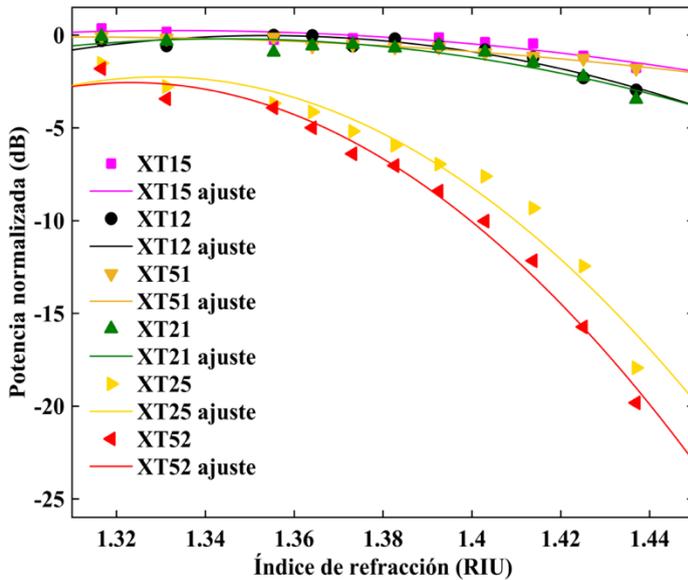


Figure 4.29. Potencia normalizada para todas las combinaciones de diafonía en el sensor fabricado con TFBGs de 7°. Las curvas representadas corresponden al ajuste polinomial de segundo orden aplicado [28].

Se puede observar que para los dos sensores la potencia de XT es sensible al índice de refracción del medio externo. La potencia decrece de forma monótona y no lineal con el aumento de índice de refracción. Para el sensor de 2° todas las potencias de diafonía presentan un decaimiento similar. La sensibilidad media aproximada, expresada en dB por unidad de índice de refracción (*Refractive index unit RIU*), es -9.92 dB/RIU para el rango de índices de refracción entre 1.31 y 1.39 y -49 dB/RIU entre 1.39 y 1.44

En el caso del sensor de 7°, el decaimiento de la potencia de diafonía entre los núcleos exteriores opuestos, 5 y 2, es mayor que en el resto de los casos. La sensibilidad media aproximada para XT5→2 y XT2→5 es -74.2 dB/RIU entre 1.31 y 1.39, y -250 dB/RIU entre 1.39 y 1.44.

4.5. Conclusiones

En este capítulo, se ha comprobado la posibilidad de inscribir de manera selectiva redes de Bragg inclinadas en fibra sobre tres de los siete núcleos de una fibra multinúcleo comercial. Se ha demostrado de manera experimental que se puede acoplar luz entre núcleos mediante el reacoplo de los modos de cubierta que son excitados por estas redes. Posteriormente, se ha estudiado la posibilidad de utilizar esta diafonía para implementar sensores.

De manera experimental se ha analizado la influencia sobre el espectro de la diafonía de distintos estímulos externos. Por una parte, se han analizado estímulos mecánicos de deformación y curvatura, por otro lado, los cambios de temperatura e índice de refracción del medio externo que rodea la fibra óptica. Se ha podido comprobar que la longitud de onda de los modos de cubierta de las TFBGs en fibra MCF es sensible a la deformación. Además, esta sensibilidad es menor para los modos cuya longitud de onda de resonancia está más alejada de la longitud de onda de Bragg de la TFBG. En cuanto a la curvatura, se ha podido ver que el espectro de la diafonía sufre un desplazamiento cuando se curva la fibra. También, se ha visto que la diafonía es sensible a los cambios en la posición de los núcleos respecto a la dirección de curvatura.

Por otra parte, se ha estudiado de manera experimental la influencia de la temperatura y del índice de refracción del medio exterior que rodea a la fibra. Se ha demostrado, al igual que ocurre con el estiramiento, que los cambios de temperatura producen un desplazamiento en el espectro de la diafonía. En cuanto al índice de refracción, se ha demostrado que la potencia de la diafonía se reduce de manera no lineal a medida que aumenta el índice de refracción externo que rodea la fibra.

Además, se ha observado que se consiguen mejores sensibilidades para TFBGs con mayor ángulo.

REFERENCIAS

- [1] K. O. Hill, B. Malo, K. A. Vineberg, F. Bilodeau, D. C. Johnson, y I. Skinner, «Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings», *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 16, p. 1270, 1990, doi: 10.1049/el:19900818.
- [2] S. J. Hewlett, J. D. Love, G. Meltz, y W. W. Morey, «Mode-coupling characteristics of UV-written Bragg gratings in depressed-cladding fibre», *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 9, pp. 730-732, abr. 1994, doi: 10.1049/el:19940427.
- [3] T. Erdogan y J. E. Sipe, «Tilted fiber phase gratings», *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 13, no. 2, p. 296, feb. 1996, doi: 10.1364/JOSAA.13.000296.
- [4] C. Chen, C. Caucheteur, P. Mégret, y J. Albert, «The sensitivity characteristics of tilted fibre Bragg grating sensors with different cladding thicknesses», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 18, no. 10, pp. 3117-3122, oct. 2007, doi: 10.1088/0957-0233/18/10/S11.
- [5] T. Guo, A. Ivanov, C. Chen, y J. Albert, «Temperature-independent tilted fiber grating vibration sensor based on cladding-core recoupling», *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 9, p. 1004, may 2008, doi: 10.1364/OL.33.001004.
- [6] C. Caucheteur, K. Chah, F. Lhomme, M. Blondel, y P. Megret, «Simultaneous bend and temperature sensor using tilted FBG», Bruges, Belgium, may 2005, p. 707. doi: 10.1117/12.623421.
- [7] S. Singh, «Refractive Index Measurement and its Applications», *Phys. Scr.*, vol. 65, no. 2, pp. 167-180, ene. 2002, doi: 10.1238/Physica.Regular.065a00167.
- [8] P. Ray, S. K., y B. Srinivasan, «Enhanced sensitivity etched fiber Bragg gratings for precise measurement of refractive index», Kolkata, India, jun. 2015, p. 965415. doi: 10.1117/12.2182807.
- [9] W. Liang, Y. Huang, Y. Xu, R. K. Lee, y A. Yariv, «Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 15, p. 151122, abr. 2005, doi: 10.1063/1.1904716.
- [10] A. Iadicicco, A. Cusano, S. Campopiano, A. Cutolo, y M. Giordano, «Thinned fiber Bragg gratings as refractive index sensors», *IEEE Sens. J.*, vol. 5, no. 6, pp. 1288-1295, dic. 2005, doi: 10.1109/JSEN.2005.859288.
- [11] A. N. Chryssis, S. S. Saini, S. M. Lee, Hyunmin Yi, W. E. Bentley, y M. Dagenais, «Detecting hybridization of DNA by highly sensitive evanescent field etched core fiber Bragg grating sensors», *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 11, no. 4, pp. 864-872, jul. 2005, doi: 10.1109/JSTQE.2005.857724.

- [12] K. Zhou, X. Chen, L. Zhang, y I. Bennion, «Implementation of optical chemsensors based on HF-etched fibre Bragg grating structures», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 1140-1145, may 2006, doi: 10.1088/0957-0233/17/5/S34.
- [13] T. L. Lowder, J. D. Gordon, S. M. Schultz, y R. H. Selfridge, «Volatile organic compound sensing using a surface-relief D-shaped fiber Bragg grating and a polydimethylsiloxane layer», *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 17, p. 2523, sep. 2007, doi: 10.1364/OL.32.002523.
- [14] K. Schroeder, W. Ecke, R. Mueller, R. Willsch, y A. Andreev, «A fibre Bragg grating refractometer», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 7, pp. 757-764, jul. 2001, doi: 10.1088/0957-0233/12/7/301.
- [15] S. W. James y R. P. Tatam, «Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 5, pp. R49-R61, may 2003, doi: 10.1088/0957-0233/14/5/201.
- [16] M. Janczuk-Richter *et al.*, «Long-period fiber grating sensor for detection of viruses», *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 250, pp. 32-38, oct. 2017, doi: 10.1016/j.snb.2017.04.148.
- [17] J. Albert, L.-Y. Shao, y C. Caucheteur, «Tilted fiber Bragg grating sensors: Tilted fiber Bragg grating sensors», *Laser Photonics Rev.*, vol. 7, no. 1, pp. 83-108, ene. 2013, doi: 10.1002/lpor.201100039.
- [18] T. Guo, F. Liu, B.-O. Guan, y J. Albert, «[INVITED] Tilted fiber grating mechanical and biochemical sensors», *Opt. Laser Technol.*, vol. 78, pp. 19-33, abr. 2016, doi: 10.1016/j.optlastec.2015.10.007.
- [19] Y. Miao, B. Liu, y Q. Zhao, «Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating», *Opt. Fiber Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 233-236, jun. 2009, doi: 10.1016/j.yofte.2008.11.002.
- [20] G. Laffont y P. Ferdinand, «Tilted short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 12, no. 7, pp. 765-770, jul. 2001, doi: 10.1088/0957-0233/12/7/302.
- [21] C. Chen y J. Albert, «Strain-optic coefficients of individual cladding modes of singlemode fibre: theory and experiment», *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 18, p. 1027, 2006, doi: 10.1049/el:20061631.
- [22] K. Saitoh, M. Koshiba, K. Takenaga, y S. Matsuo, «Crosstalk and Core Density in Uncoupled Multicore Fibers», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 24, no. 21, pp. 1898-1901, nov. 2012, doi: 10.1109/LPT.2012.2217489.
- [23] T. Hayashi, T. Taru, O. Shimakawa, T. Sasaki, y E. Sasaoka, «Characterization of Crosstalk in Ultra-Low-Crosstalk Multi-Core Fiber», *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 4, pp. 583-589, feb. 2012, doi: 10.1109/JLT.2011.2177810.
- [24] J. Villatoro, E. Antonio-Lopez, A. Schülzgen, y R. Amezcua-Correa, «Miniature multicore optical fiber vibration sensor», *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 10, p. 2022, may 2017, doi: 10.1364/OL.42.002022.

-
- [25] A. M. Rocha, T. Almeida, R. N. Nogueira, y M. Facão, «Analysis of power transfer on multicore fibers with long-period gratings», *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 2, p. 292, ene. 2015, doi: 10.1364/OL.40.000292.
- [26] D. Barrera, J. Madrigal, y S. Sales, «Tilted fiber Bragg gratings in multicore optical fibers for optical sensing», *Optics Letters*, vol. 42, no. 7, pp. 1460-1463, 2017, doi: 10.1364/OL.42.001460.
- [27] L.-Y. Shao, L. Xiong, C. Chen, A. Laronche, y J. Albert, «Directional Bend Sensor Based on Re-Grown Tilted Fiber Bragg Grating», *J. Lightwave Technol.*, vol. 28, no. 18, pp. 2681-2687, sep. 2010, doi: 10.1109/JLT.2010.2064158.
- [28] J. Madrigal, D. Barrera, y S. Sales, «Refractive Index and Temperature Sensing Using Inter-Core Crosstalk in Multicore Fibers», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 18, pp. 4703-4709, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2917629.
- [29] D. Tosi, «Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors», *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2368, oct. 2017, doi: 10.3390/s17102368.
- [30] C. Chen y J. Albert, «Strain-optic coefficients of individual cladding modes of singlemode fibre: theory and experiment», *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 18, p. 1027, 2006, doi: 10.1049/el:20061631.
- [31] J. E. Saunders, C. Sanders, H. Chen, y H.-P. Looock, «Refractive indices of common solvents and solutions at 1550 nm», *Appl. Opt.*, vol. 55, no. 4, p. 947, feb. 2016, doi: 10.1364/AO.55.000947.

Capítulo 5

Sensores de forma en fibra óptica multinúcleo para entornos radiactivos

Resumen: En este capítulo se ha diseñado e implementado un sensor óptico de forma para entornos con presencia de radiaciones ionizantes de alta energía basado en fibra multinúcleo (MFC). Con el objetivo de estudiar cómo afecta la radiación a las FBGs inscritas en fibras con o sin carga de hidrogeno, se han inscrito dos conjuntos de FBGs en sendas muestras de fibra MCF de siete núcleos, una hidrogenada y otra sin hidrogenar. Las dos muestras se han colocado enrolladas en una estructura metálica circular. Posteriormente se han expuesto a radiación gamma durante 330 horas hasta alcanzar una dosis absorbida de 0.19 MGy. Después se han analizado los efectos permanentes de la radiación en las muestras. El desplazamiento en longitud de onda producido por la radiación en la fibra hidrogenada ha sido de 415 pm, aproximadamente 10 veces mayor que el observado para la fibra sin hidrogenar. Sin embargo, la utilización de fibras con varios núcleos permite implementar sensores de forma inmunes a este efecto sin necesidad de modificar la composición de la fibra o aplicar tratamientos térmicos o de pre-radiación. Para comprobar el funcionamiento de los sensores, se ha calculado la curvatura del soporte donde están colocadas las fibras mediante la información proporcionada por las FBGs. El error obtenido en el cálculo del radio de curvatura después de la exposición es de aproximadamente 1 cm en ambas muestras.

5.1. Introducción

Los sensores en fibra óptica son excelentes candidatos para ser utilizados en condiciones ambientales extremas, son inmunes a las interferencias electromagnéticas, no suponen un riesgo de incendio, son químicamente inertes y pueden ser diseñados para soportar altas temperaturas. Estas propiedades han llamado la atención a diversos grupos de investigación para estudiar la utilización de estos sensores en entornos hostiles, tales como entornos a altas temperaturas, altas presiones o radiaciones ionizantes de alta energía [1]–[4].

Los entornos con presencia de radiaciones ionizantes de alta energía son particularmente interesantes para la utilización de sensores de fibra óptica. Los principales efectos de la radiación sobre la fibra óptica son: emisión inducida por la radiación (RIE), atenuación inducida por la radiación (RIA) y cambios en el índice de refracción (RIRIC) [5]. El RIE es una luminiscencia que se guía por la fibra y es más notable en longitudes de onda del visible. El RIA es un incremento de la atenuación de la fibra. El RIA afecta a todos los sensores y reduce la distancia máxima a la que se pueden utilizar. Aunque esta atenuación se puede restituir después de la irradiación, el RIA es una limitación importante sobre todo para los sensores en fibra óptica basados en amplitud. Para solventar este problema, se han desarrollado fibras resistentes a la radiación que consiguen reducir los efectos del RIA. Sin embargo, no existe todavía una composición de la fibra ideal debido a los numerosos parámetros que influyen en la sensibilidad a la radiación [6], [7].

Mientras que el RIE puede provocar una reducción de la relación señal a ruido, el RIRIC modifica el índice de refracción de la fibra óptica según las condiciones de radiación y la composición de la fibra óptica. Este efecto puede suponer una limitación en la precisión de los sensores cuya información va codificada en longitud de onda, como es el caso de las FBGs. En las FBGs, el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg producida por la radiación se conoce como *radiation-induced Bragg wavelength shift* (RI-BWS).

Varios trabajos previos han estudiado los efectos de la radiación sobre las FBGs, tratando de reducir la sensibilidad de estos dispositivos, bien intentando obtener una mejor composición de la fibra óptica, bien variando las condiciones de inscripción o aplicando tratamientos térmicos para reducir el efecto del RI-BWS [4]–[11]. Todos estos esfuerzos se han centrado en reducir al máximo el RI-BWS. Morana et al. obtuvieron un RI-BWS por debajo de 10 pm. Posteriormente, Kuhhenn et al. obtuvieron un RI-BWS del orden de 2 pm. En ambos casos se requiere un tratamiento térmico de la fibra después de la inscripción de la FBG [9], [10].

Como se ha explicado anteriormente, en entornos radioactivos, el RI-BWS es un efecto no deseable cuando se utilizan sensores basados en FBGs. En este capítulo se propone un método alternativo para conseguir compensar este efecto. Se estudiará la posibilidad de utilizar el desplazamiento diferencial entre la longitud de onda de Bragg de dos o más FBGs. Las FBGs se exponen a la misma irradiación y los efectos sobre ellas son los mismos.

Normalmente la información del sensor va codificada en la longitud de onda de la FBG. Sin embargo, si el sensor dispone de varias FBGs la información se puede codificar en las diferencias de longitud de onda mediante la modificación de la sensibilidad de las FBGs a la magnitud que queremos medir, por ejemplo, curvatura, estiramiento o temperatura. Este planteamiento se puede hacer de manera más sencilla utilizando fibras MCF, donde las condiciones de radiación serán similares en todos los núcleos y la sensibilidad se puede modificar curvando la fibra óptica [12].

Las MCF ya han sido utilizadas para implementar sensores de curvatura y de forma [13], [14]. En estos sensores, las FBGs inscritas en los núcleos de la MCF tienen distintas sensibilidades dependiendo de la posición relativa de los núcleos respecto a la dirección de curvatura. La curvatura y su dirección se pueden obtener midiendo las diferencias entre los desplazamientos en longitud de onda de cada FBG. De igual forma, el mismo principio se puede aplicar para implementar otros tipos de sensores.

El objetivo principal es demostrar que los sensores implementados en fibra multinúcleo se pueden utilizar en entornos con emisiones de radiación gamma sin tener que realizar ninguna modificación especial en la composición de la fibra y sin necesitar tratamientos adicionales. Para ello, se ha inscrito un conjunto de FBGs en dos muestras de fibra MCF. Para tener muestras con diferentes sensibilidades a la radiación un conjunto de FBGs se ha inscrito en una fibra hidrogenada y otra en una fibra sin hidrogenar. Después, los dos conjuntos se han enrollado en un soporte cilíndrico y han permanecido expuestos a radiación gamma. Tras la radiación se han analizado los espectros de las FBGs para demostrar el funcionamiento del sensor.

5.2. Fabricación del sensor

Para la fabricación de los sensores se ha utilizado una fibra MCF comercial de siete núcleos (Fibercore SM7C1500) y el sistema de fabricación detallado en el capítulo 2. Se han fabricado FBGs en dos muestras de fibra. Antes de la inscripción, una de las muestras de fibra se ha sometido a un proceso de hidrogenado a alta presión para aumentar su fotosensibilidad. La muestra hidrogenada ha permanecido en una cámara con hidrogeno a 50 bar de presión y temperatura ambiente durante 14 días. A la otra muestra no se le ha realizado ningún tratamiento previo. Como primer paso, se ha retirado de la zona donde se van a grabar las FBGs el recubrimiento de acrilato que protege a la fibra utilizando una peladora mecánica.

Después de la inscripción, la fibra no se ha vuelto a recubrir con acrilato para evitar que la sensibilidad a la radiación de las FBGs se vea afectada [15]. La inscripción de las FBGs se ha realizado en todos los núcleos utilizando el sistema de fabricación descrito en el capítulo 2. En total, se han fabricado 28 FBGs en cada muestra con 4 FBGs por núcleo. La figura 5.1 muestra un esquema de la distribución del conjunto de FBGs en la MFC. Las FBGs tienen una longitud de 10 mm y una separación entre ellas de 10 mm.

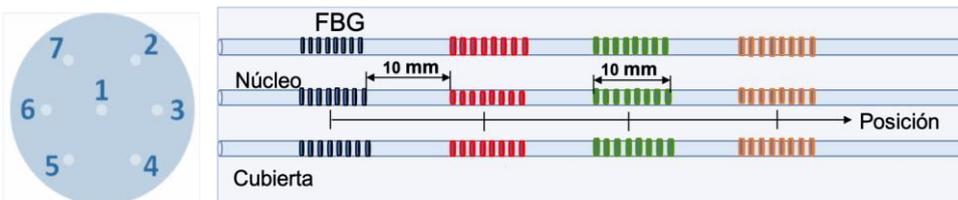


Figura 5.1. (Izquierda) Vista de transversal de la MCF y numeración de los núcleos. (Derecha) Vista longitudinal de la MCF y distribución de las FBGs [16].

Se han medido los espectros en reflexión de los dos sensores fabricados. Para ello se ha utilizado un láser sintonizable Yenista TS100HP junto con un analizador de componentes Yenista CT400 y un circulador óptico. Para medir los núcleos de manera independiente se han utilizado dos dispositivos *fan-in/out*. La figura 5.2 muestra los espectros medidos en reflexión de las FBGs inscritas en los siete núcleos de la MCF sin hidrogenar, mientras que la figura 5.3 los muestra para la MCF hidrogenada.

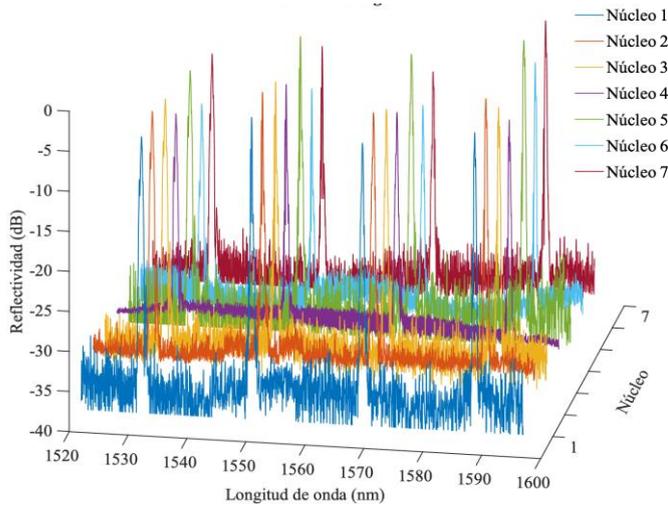


Figura 5.2. Espectros en reflexión de las FBGs inscritas en los núcleos de la fibra MCF sin hidrogenar [16].

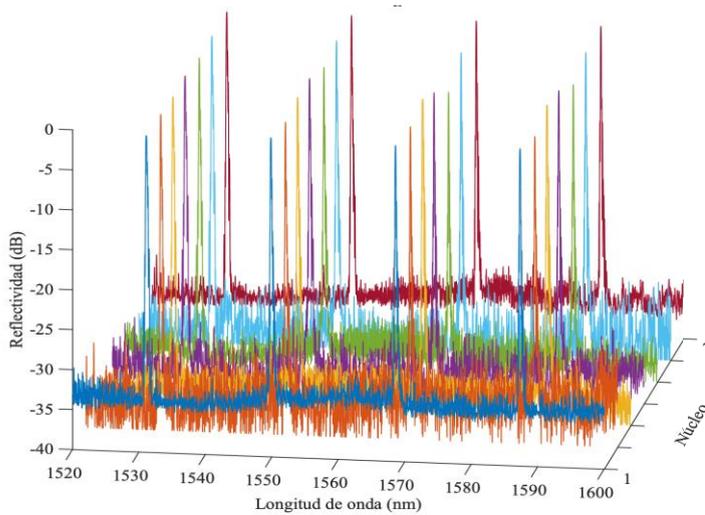


Figura 5.3. Espectros en reflexión de las FBGs inscritas en los núcleos de la fibra MCF hidrogenada [16].

Antes del proceso de irradiación, las fibras se han enrollado en un soporte metálico y cilíndrico de 20 cm de diámetro. Las fibras se han sujetado de forma mecánica para que mantengan su forma durante todo el experimento. La figura 5.4 muestra un esquema de las fibras montadas sobre el soporte. Los espectros de las FBGs se han vuelto a medir antes del proceso de irradiación. Después, se han desconectado las fibras MCF de sus respectivos *fan-in/outs* para protegerlos de la radiación. Acto

seguido se ha colocado el soporte con las muestras dentro una cámara para proceder a su irradiación.

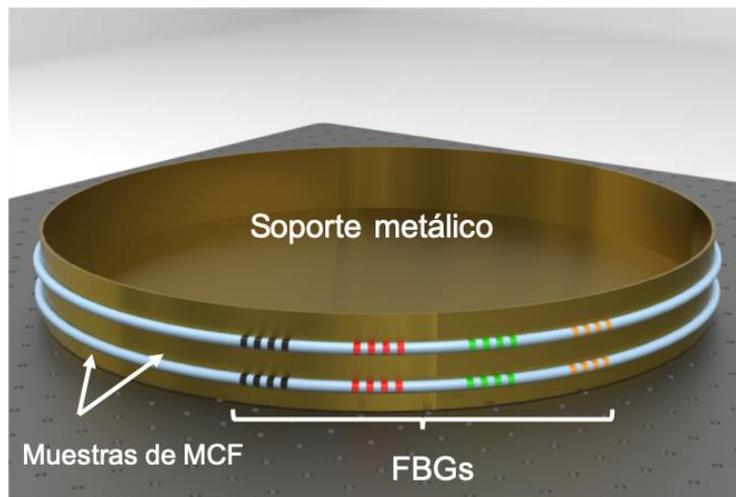


Figura 5.4. Esquema de las fibras montadas sobre el soporte cilíndrico y posición de las FBGs [16].

5.3. Irradiación

El proceso de irradiación de las muestras se ha realizado en la cámara de irradiación IRMA perteneciente al Instituto de Radioprotección y Seguridad Nuclear (IRSN, Francia). El soporte metálico con las muestras se ha colocado dentro de la cámara a una distancia de 65.8 cm de la fuente de radiación. La fuente estaba compuesta por cuatro barras de ^{60}Co con una radioactividad de 916.02 TBq. El soporte se ha colocado en posición vertical para asegurar que todas las FBGs reciben la misma dosis de radiación. En la figura 5.5 se muestra una fotografía de cámara IRMA y el esquema de colocación de las muestras de fibra.

Las muestras fueron irradiadas durante 13 días y 18 horas, con una tasa de dosis de 58 Gy/h aproximadamente, hasta una dosis total aproximada de 192 kGy. La figura 5.5 muestra un plano de la cámara de irradiación y de la posición de las muestras de los sensores.



Figura 5.5. Foto de la cámara de irradiación IRMA (izquierda) [17]. Plano de la posición de la fuente radioactiva y el soporte los sensores dentro de la cámara (derecha).

5.4. Resultados experimentales

Seis semanas después de acabar el proceso de irradiación, se han recuperado las muestras, se les han vuelto a colocar los *fan-in/out* a cada fibra sin quitarlas del soporte metálico y se han vuelto a medir los espectros. Después, para analizar los efectos provocados por la radiación gamma sobre las FBGs, se han comparado con los espectros medidos antes y después de irradiar las fibras. Las figuras 5.6 y 5.7 muestran un ejemplo de los espectros de las FBGs medidos cuando la fibra estaba en posición recta, curvada (colocada en el soporte) y curvada después de la irradiación. La figura 5.6 corresponde a la muestra de fibra no hidrogenada. El núcleo 3 está colocado en la parte interior de la curvatura y muestra un desplazamiento de longitud de onda hacia el azul, es decir hacia longitudes de onda más bajas, mientras que el núcleo 6 está en la parte externa a la curvatura y muestra un desplazamiento en sentido contrario. Si se comparan los espectros antes y después de recibir la radiación, se puede ver una leve reducción de la reflectividad y un pequeño desplazamiento en longitud de onda. Las dos medidas se han tomado aproximadamente a la misma temperatura ambiente con un margen de $\pm 0.5^\circ\text{C}$. El desplazamiento en longitud de onda medio observado en todas las FBGs es de 27 pm. Teniendo en cuenta que la sensibilidad a la temperatura de una FBG es de $9.8 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ se tiene una incertidumbre de $\pm 4.9 \text{ pm}$ provocada por variaciones de la temperatura ambiente. La reducción de la relación señal a ruido media es de 0.63 dB.

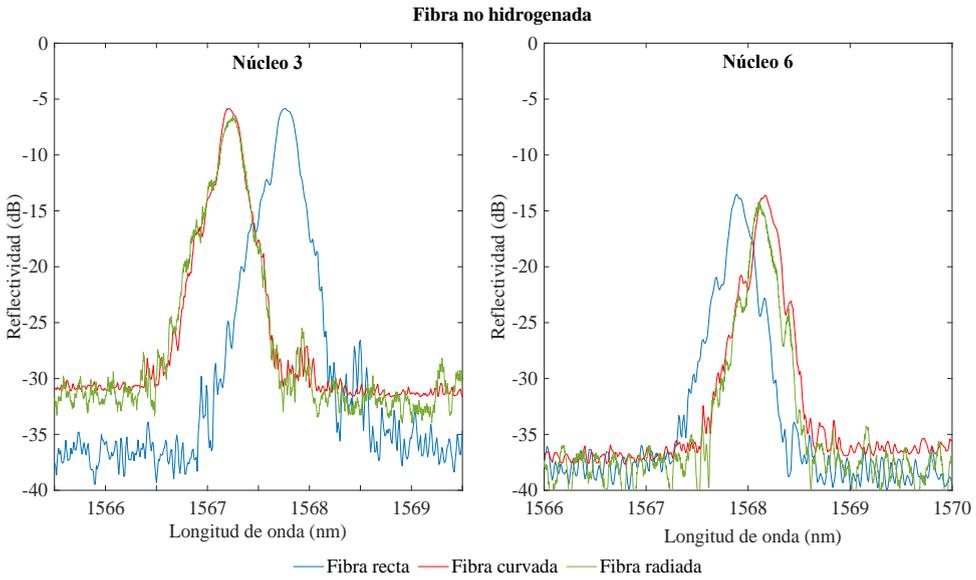


Figura 5.6. Espectros de una FBG en el núcleo 3 y núcleo 6, con la fibra no hidrogenada recta, colocada en el soporte y después de recibir la radiación [16].

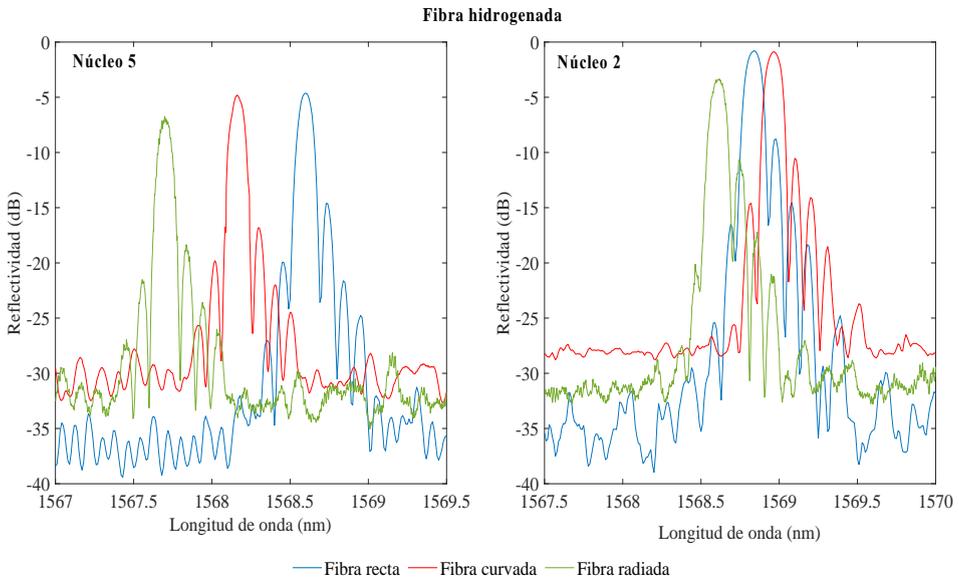


Figura 5.7. Espectros de una FBG en el núcleo 5 y núcleo 2, con la fibra hidrogenada recta, colocada en el soporte y después de recibir la radiación [16].

La figura 5.7 muestra un ejemplo de los espectros medidos en la muestra hidrogenada. En este caso, el núcleo 5 está en la parte interna de la curvatura y el 2 en la parte externa. Después de la radiación, se puede observar que la reflectividad decae y la relación señal a ruido se reduce en término medio 2.21 dB. El desplazamiento en longitud de onda medio es de 415 pm. Este desplazamiento es más de diez veces superior al que se observa en la fibra sin hidrogenar.

Los resultados obtenidos se corresponden con los obtenidos en estudios previos sobre fibras de un solo núcleo hidrogenadas y sin hidrogenar [4]–[11]. Las tablas 5.1 y 5.2 recopilan las longitudes de onda de Bragg de todas las FBGs antes y después haber sido irradiadas.

| Núcleo | FBG 1 | | | FBG 2 | | | FBG 3 | | | FBG 4 | | |
|--------|---------------------|------|-----|---------------------|------|-----|---------------------|------|-----|---------------------|------|-----|
| | λ_B Inicial | C | R |
| 1 | 1530.218 | -143 | 6 | 1548.919 | -145 | 8 | 1567.731 | -148 | 18 | 1586.796 | -141 | 16 |
| 2 | 1530.058 | -409 | 49 | 1548.755 | -418 | 16 | 1567.576 | -467 | 39 | 1586.667 | -498 | 8 |
| 3 | 1530.230 | -518 | -12 | 1548.940 | -526 | -18 | 1567.762 | -555 | 43 | 1586.818 | -501 | -23 |
| 4 | 1530.033 | -253 | -65 | 1548.730 | -256 | -36 | 1567.539 | -240 | 13 | 1586.597 | -158 | -9 |
| 5 | 1530.417 | -209 | -49 | 1548.126 | -238 | -17 | 1567.964 | -241 | -14 | 1586.075 | -225 | 10 |
| 6 | 1530.355 | 245 | 42 | 1548.044 | 249 | 21 | 1567.898 | 266 | -18 | 1586.966 | 219 | 34 |
| 7 | 1530.105 | 310 | 70 | 1548.783 | 329 | 52 | 1567.600 | 337 | 22 | 1586.715 | 276 | 48 |

Tabla 5.1. Fibra sin hidrogenar. Longitud de onda de Bragg de las FBGs con la fibra recta (nm), su desplazamiento (en pm) cuando la fibra esta curvada (C) y el desplazamiento adicional después de la irradiación (R) [16].

La columna C indica el desplazamiento en longitud de onda medido después de curvar la fibra colocándola en el soporte metálico y la columna R indica el desplazamiento adicional después del proceso de irradiación. Hay que tener en cuenta que la longitud de onda de Bragg inicial se ha medido con la fibra ligeramente tensionada para mantener la fibra en posición recta, esta tensión se pierde cuando se coloca la fibra en el soporte. La longitud de onda de Bragg de cada FBG se ha obtenido mediante interpolación polinómica del espectro para minimizar el error [18].

| Núcleo | FBG 1 | | | FBG 2 | | | FBG 3 | | | FBG 4 | | |
|--------|---------------------|------|------|---------------------|------|------|---------------------|------|------|---------------------|------|------|
| | λ_B Inicial | C | R |
| 1 | 1531.118 | -169 | -332 | 1549.871 | -170 | -321 | 1568.609 | -151 | -317 | 1587.351 | -106 | -325 |
| 2 | 1531.287 | 108 | -333 | 1550.048 | 125 | -360 | 1568.838 | 128 | -295 | 1587.570 | 189 | -333 |
| 3 | 1531.121 | 169 | -330 | 1549.886 | 194 | -315 | 1568.698 | 238 | -378 | 1587.412 | 253 | -353 |
| 4 | 1530.942 | -113 | -360 | 1549.676 | -108 | -271 | 1568.405 | -45 | -405 | 1587.172 | -79 | -346 |
| 5 | 1531.092 | -450 | -360 | 1549.846 | -461 | -301 | 1568.600 | -439 | -380 | 1587.363 | -449 | -358 |
| 6 | 1530.978 | -515 | -349 | 1549.726 | -521 | -384 | 1568.476 | -539 | -340 | 1587.231 | -492 | -374 |
| 7 | 1531.224 | -241 | -386 | 1549.987 | -238 | -415 | 1568.767 | -270 | -297 | 1587.513 | -193 | -362 |

Tabla 5.2. Fibra hidrogenada. Longitud de onda de Bragg de las FBGs con la fibra recta (nm), su desplazamiento (en pm) cuando la fibra esta curvada (C) y el desplazamiento adicional después de la irradiación (R) [16].

En los sensores basados en fibras ópticas MFC, la magnitud a medir puede estar codificada en las diferencias de longitud de onda entre las FBGs de los distintos núcleos. En el caso de los sensores de forma en una fibra de 7 núcleos, la curvatura, su radio y dirección se pueden calcular utilizando las siguientes ecuaciones [16]:

$$\vec{k}_{app} = -\sum_{i=2}^7 \frac{\varepsilon_i}{d} \cos \frac{\pi}{3} (i-1) \vec{j} - \sum_{i=2}^7 \frac{\varepsilon_i}{d} \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{3} (i-1) \right) \vec{k}, \quad (9)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta \lambda_i}{k_i}, \quad (10)$$

$$k = \frac{|\vec{k}_{app}|}{3}, \quad (11)$$

$$r = \frac{1}{k}, \quad (12)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{k_{app,\vec{k}}}{k_{app,\vec{j}}} \right) + \phi; \text{ donde } \phi = \begin{cases} 0, & k_{app,j} \leq 0 \\ \pi, & k_{app,j} > 0 \end{cases} \quad (13)$$

Donde k es la curvatura, r es su radio, θ su dirección, ε_i son los valores de estiramiento en los núcleos externos, $\Delta \lambda$ es el desplazamiento en longitud de onda medido en la FBG de cada núcleo, k_i es la sensibilidad al estiramiento y d la distancia entre el núcleo y el centro de la fibra [19]. La figura 5.8 muestra un esquema de estos

parámetros. En este caso, la MCF utilizada es homogénea, por lo que todos sus núcleos tienen la misma sensibilidad al estiramiento y la misma distancia al centro de la fibra, pero no es un requerimiento, se pueden aplicar las mismas ecuaciones en el caso de que la MCF fuese heterogénea.

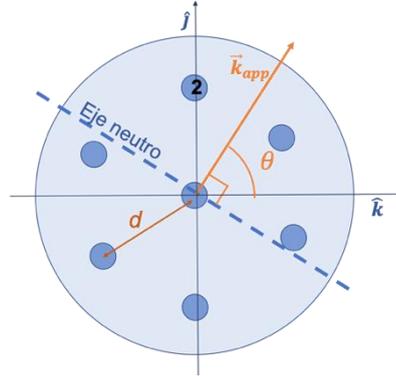


Figura 5.8. Esquema de la geometría de la MCF y parámetros para determinar la curvatura.

Si se desarrolla la ecuación 9 se puede ver que los senos y cosenos son de signos contrarios en los núcleos 2 y 5, 3 y 6 y 4 y 7, por lo que el desplazamiento en longitud de onda común a ellos se resta. Esto permite que el sensor sea inmune a los efectos del RI-BWS.

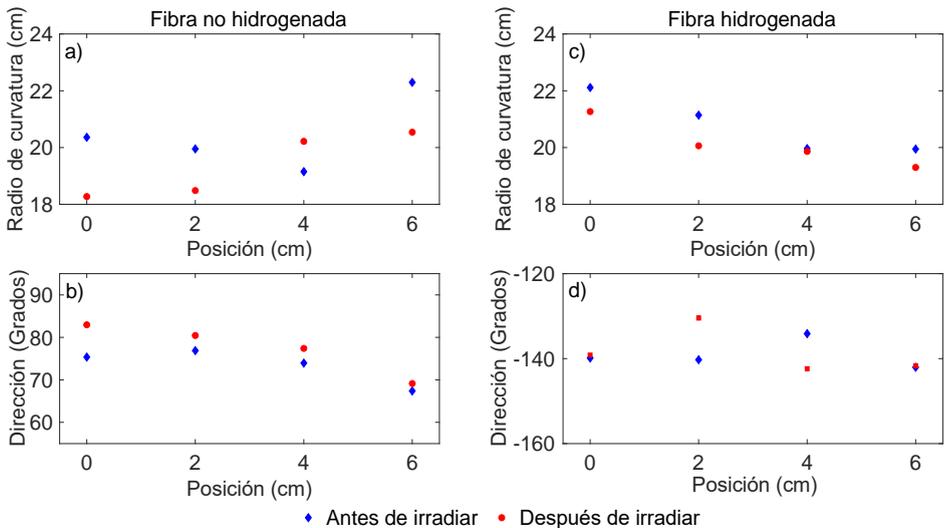


Figura 5.9. Curvatura calculada antes y después de irradiar las fibras para cada posición donde se encuentran las FBGs [16].

Se han calculado las curvaturas de las fibras, sus radios y direcciones, en los puntos donde están situadas cada FBG. Estos cálculos se han realizado antes y después de irradiar las fibras ópticas. La figura 5.9 muestra los valores obtenidos en cada posición de las dos muestras de fibra. Se puede ver que la dirección de curvatura es totalmente diferente en cada muestra de fibra, esto es de esperar ya que, al colocar las fibras en la estructura circular, la posición relativa de los núcleos respecto a la dirección de curvatura es distinta en cada muestra de fibra. Las pequeñas variaciones en la dirección obtenida para cada punto son debidas a que la posición relativa de los núcleos puede variar ligeramente por la torsión de la fibra.

Antes del proceso de irradiación, para la fibra sin hidrogenar, la media del radio curvatura obtenido en todas las posiciones es de 20.44 cm y la dirección media es de 73.39°. Después de la irradiación, se ha obtenido 19.38 cm y 77.48° de radio de curvatura medio y dirección de curvatura media respectivamente. Para el caso de la fibra hidrogenada, antes de irradiarla, se ha obtenido un radio curvatura medio de 20.79 cm y una dirección media de -139.07°, mientras que después de la radiación se han obtenido un valor medio de radio y dirección de 20.12 cm y -138.42° respectivamente. A la vista de los resultados obtenidos en ambas muestras, las diferencias de las curvaturas obtenidas antes y después de radiación son similares, incluso teniendo en cuenta que el RI-BWS es casi diez veces mayor en la fibra hidrogenada. Esto demuestra que el error no depende del desplazamiento en longitud de onda que produce la radiación gamma sobre las FBGs. Por otra parte, los pequeños errores cometidos en el cálculo de la curvatura pueden ser debidos a la manipulación de la estructura metálica durante las pruebas experimentales y errores en la determinación de la longitud de onda de Bragg [20].

5.5. Conclusiones

En este capítulo se ha diseñado e implementado un sensor óptico de forma para entornos con presencia de radiaciones ionizantes de alta energía basado en fibra multinúcleo (MFC). Se han inscrito dos conjuntos de cuatro FBGs en todos los núcleos de una MFC de siete núcleos en sendas muestras de fibra, una hidrogenada y otra sin hidrogenar. A continuación, se han colocado en una estructura circular y se han expuesto a la radiación emitida por ^{60}Co . Después de la irradiación se ha observado que las FBGs de la fibra hidrogenada han sufrido un mayor desplazamiento en longitud de onda, aproximadamente 10 veces superior que las de la fibra sin hidrogenar. Sin embargo, se ha observado que las diferencias entre la curvatura obtenida en las fibras antes y después de recibir la radiación son similares en las dos muestras. Con esto se demuestra experimentalmente que con los sensores de forma implementados en una

fibra MCF, se puede compensar el desplazamiento en longitud de onda inducido en las FBGs por efecto la radiación y no tiene influencia sobre la obtención de la curvatura. Además, el mismo concepto se puede aplicar para desarrollar sensores de otras magnitudes en entornos radioactivos.

REFERENCIAS

- [1] S. Bandyopadhyay, J. Canning, M. Stevenson, y K. Cook, «Ultrahigh-temperature regenerated gratings in boron-codoped germanosilicate optical fiber using 193 nm», *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 16, p. 1917, ago. 2008, doi: 10.1364/OL.33.001917.
- [2] D. Barrera, V. Finazzi, J. Villatoro, S. Sales, y V. Pruneri, «Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Applications», *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 107-112, ene. 2012, doi: 10.1109/JSEN.2011.2122254.
- [3] J.-Y. Huang *et al.*, «FBGs written in specialty fiber for high pressure/high temperature measurement», *Opt. Express*, vol. 25, no. 15, p. 17936, jul. 2017, doi: 10.1364/OE.25.017936.
- [4] A. I. Gusarov *et al.*, «High total dose radiation effects on temperature sensing fiber Bragg gratings», *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, no. 9, pp. 1159-1161, sep. 1999, doi: 10.1109/68.784237.
- [5] M. Perry, P. Niewczas, y M. Johnston, «Effects of Neutron-Gamma Radiation on Fiber Bragg Grating Sensors: A Review», *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 11, pp. 3248-3257, nov. 2012, doi: 10.1109/JSEN.2012.2214030.
- [6] S. Girard *et al.*, «Recent advances in radiation-hardened fiber-based technologies for space applications», *J. Opt.*, vol. 20, no. 9, p. 093001, sep. 2018, doi: 10.1088/2040-8986/aad271.
- [7] A. Gusarov y S. K. Hoeffgen, «Radiation Effects on Fiber Gratings», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 60, no. 3, pp. 2037-2053, jun. 2013, doi: 10.1109/TNS.2013.2252366.
- [8] A. Morana *et al.*, «Radiation tolerant fiber Bragg gratings for high temperature monitoring at MGy dose levels», *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 18, p. 5313, sep. 2014, doi: 10.1364/OL.39.005313.
- [9] A. Morana *et al.*, «Influence of photo-inscription conditions on the radiation-response of fiber Bragg gratings», *Opt. Express*, vol. 23, no. 7, p. 8659, abr. 2015, doi: 10.1364/OE.23.008659.
- [10] J. Kuhnenn *et al.*, «Gamma Radiation Tests of Radiation-Hardened Fiber Bragg Grating Based Sensors for Radiation Environments», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, pp. 1-1, 2017, doi: 10.1109/TNS.2017.2673023.
- [11] A. I. Gusarov *et al.*, «Behavior of fibre Bragg gratings under high total dose gamma radiation», *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 47, no. 3, pp. 688-692, jun. 2000, doi: 10.1109/23.856499.
- [12] D. Barrera, J. Hervás, I. Gasulla, y S. Sales, «Enhanced accuracy sensors using multicore optical fibres based on RFBGs for temperatures up to 1000°C», Limerick, Ireland, may 2016, p. 99161J. doi: 10.1117/12.2236617.

- [13] G. M. H. Flockhart, W. N. MacPherson, J. S. Barton, J. D. C. Jones, L. Zhang, y I. Bennion, «Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber», *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 6, p. 387, mar. 2003, doi: 10.1364/OL.28.000387.
- [14] D. Barrera, I. Gasulla, y S. Sales, «Multipoint Two-Dimensional Curvature Optical Fiber Sensor Based on a Nontwisted Homogeneous Four-Core Fiber», *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 12, pp. 2445-2450, jun. 2015, doi: 10.1109/JLT.2014.2366556.
- [15] T. Blanchet *et al.*, «Radiation Effects on Type I Fiber Bragg Gratings: Influence of Recoating and Irradiation Conditions», *J. Light. Technol.*, vol. 36, no. 4, pp. 998-1004, feb. 2018, doi: 10.1109/JLT.2018.2791640.
- [16] D. Barrera, J. Madrigal, S. Delepine-Lesoille, y S. Sales, «Multicore optical fiber shape sensors suitable for use under gamma radiation», *Optics Express*, vol. 27, no. 20, pp. 29026-29033, 2019, doi: 10.1364/OE.27.029026.
- [17] S. Delepine-Lesoille *et al.*, «France's State of the Art Distributed Optical Fibre Sensors Qualified for the Monitoring of the French Underground Repository for High Level and Intermediate Level Long Lived Radioactive Wastes», *Sensors*, vol. 17, no. 6, p. 1377, jun. 2017, doi: 10.3390/s17061377.
- [18] D. Tosi, «Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors», *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2368, oct. 2017, doi: 10.3390/s17102368.
- [19] J. P. Moore y M. D. Rogge, «Shape sensing using multi-core fiber optic cable and parametric curve solutions», *Opt. Express*, vol. 20, no. 3, p. 2967, ene. 2012, doi: 10.1364/OE.20.002967.
- [20] I. Floris, S. Sales, P. A. Calderón, y J. M. Adam, «Measurement uncertainty of multicore optical fiber sensors used to sense curvature and bending direction», *Measurement*, vol. 132, pp. 35-46, ene. 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2018.09.033.

Capítulo 6

Redes de Bragg regeneradas en fibra óptica multinúcleo

Resumen: En este capítulo se estudia la posibilidad de usar fibras multinúcleo para implementar sensores capaces de trabajar en entornos con altas temperaturas. Para ello, en primer lugar, se ha fabricado un dispositivo mediante la inscripción de FBGs en una fibra comercial de siete núcleos. Posteriormente, las FBGs se han sometido a un proceso térmico para generar FBGs regeneradas capaces de soportar temperaturas de hasta 1000°C. Finalmente se muestran los resultados obtenidos en la caracterización del dispositivo como sensor de temperatura estiramiento y curvatura.

6.1. Introducción

En multitud de sectores tales como: producción industrial, producción de energía, siderurgia, automoción o aeroespacial entre otros, es muy común encontrar elementos que alcanzan temperaturas elevadas. La monitorización de estos elementos es clave para controlar determinados procesos de fabricación, detectar anomalías y vigilar la salud de las estructuras para prevenir los colapsos de estas y evitar accidentes. Los sensores de fibra óptica juegan un papel fundamental en la monitorización de elementos y estructuras sometidas a altas temperaturas ya que una fibra óptica puede soportar temperaturas superiores a 1000°C. Las FBGs inscritas en fibras ópticas de un solo núcleo son unos de los dispositivos más utilizados para la implementación de sensores. En los últimos años se han utilizado para diversas aplicaciones tales como, la monitorización de procesos industriales convencionales, la monitorización de estructuras en ingeniería civil, y en la industria aeroespacial, entre otras [1]–[6]. Sin embargo, las FBGs de tipo I no son capaces de sobrevivir en entornos con altas temperaturas, ya que la modulación del índice de refracción se va reduciendo de forma progresiva e irreversible cuando la temperatura supera los 400°C, lo que provoca que la FBG vaya disminuyendo su reflectividad hasta quedar inutilizable [7].

Para abordar el problema de la degradación con la temperatura en FBGs de tipo I existen distintas alternativas. Una posible solución es utilizar FBGs de tipo II o IIA [8]. Este tipo de FBGs se inscriben mediante pulsos de alta energía y muy corta duración, del orden de femtosegundos o picosegundos. Estos pulsos provocan un daño en el material de la fibra óptica el cual modifica el índice de refracción permanentemente en las zonas expuestas a la radiación. Algunos estudios demuestran que estas FBGs pueden soportar temperaturas superiores a 1000°C sin degradarse [9]. Otra solución es utilizar FBGs regeneradas conocidas como *Regenerated Fiber Bragg Gratings* (RFBGs). Una RFBG se crea a partir de una FBG de tipo I que se somete a un tratamiento térmico, tras el cual es capaz de operar a temperaturas por encima de 1000 °C.

Las RFBGs tienen aplicaciones en un número cada vez mayor de campos, como por ejemplo en turbinas, reactores químicos, reactores nucleares, vehículos aeroespaciales, control del procesos de fundición de metales o la monitorización de estructuras bajo la acción del fuego, entre otras [10]–[15]. Sin embargo, en el ámbito de la monitorización de la salud estructural en ingeniería civil o en la industria aeroespacial, puede ser necesario monitorizar simultáneamente otros parámetros como la curvatura o la forma además de la temperatura. Las RFBGs fabricadas en fibras de un

solo núcleo no son sensibles de por sí a la curvatura, al igual que ocurre con las FBGs. Por el contrario, sí que lo son las FBG inscritas en fibras MCF, tal y como se vio en el capítulo 5. Por lo tanto, se podría combinar las propiedades de las RFBGs junto con las de las fibras MCF para implementar sensores de curvatura capaces de operar a altas temperaturas. Este tipo de sensores puede ser de gran utilidad para monitorizar elementos que se curven o se deformen mientras están expuestos a altas temperaturas, por ejemplo, estructuras durante pruebas de incendios, partes de vehículos aeroespaciales o componentes de plantas eléctricas o instalaciones industriales, tales como tuberías, tanques o turbinas entre muchas otras [16], [17].

En este capítulo se estudian las posibilidades que ofrecen las RFBGs fabricadas en fibra MCF como sensores en entornos a alta temperatura. En primer lugar, se describe el proceso de regeneración de las FBGs previamente inscritas en la fibra MCF. Seguidamente se describe y se muestran los resultados de la caracterización del dispositivo sensor fabricado. Por un lado, se caracteriza en temperatura y deformación. Y por otro lado se caracteriza en magnitud y dirección de curvatura. Para finalizar, se resumen las conclusiones obtenidas.

6.2. Fabricación de las RFBGs

El proceso de fabricación de una RFBG se realiza en dos fases. Primero se inscribe una FBG de tipo I que actúa como semilla. Después esta FBG se somete a un tratamiento térmico de alta temperatura. Durante este proceso, la FBG semilla sufre un desvanecimiento cuando se alcanzan altas temperaturas, pero llegado un punto la FBG comienza a resurgir de nuevo hasta alcanzar una reflectividad estable. A este proceso se le denomina regeneración. La temperatura para la cual ocurre la regeneración, se denomina temperatura de regeneración y depende de la composición de la fibra entre otros factores. En la mayoría de los casos la temperatura de regeneración suele estar en el orden de 500°C y 900°C para RFBGs fabricadas en fibras dopadas con Ge y F.

Durante más de dos décadas, desde que Fokine et al. publicara la primera investigación sobre la formación de RFBGs, se han llevado a cabo multitud de investigaciones sobre RFBGs en distintitos tipos de fibra y con distintos tratamientos previos a la regeneración [18]. A pesar de la amplia base de conocimiento que existe sobre RFBGs, todavía existe cierta incertidumbre sobre el mecanismo por el cual se produce la regeneración. Sobre este tema existen dos teorías alternativas, la teoría de la cristalización y la teoría de la composición química [19], [20]. Si bien, estas teorías han sido comprobadas experimentalmente y hasta la fecha no han sido refutadas,

ambas compiten para explicar el fenómeno de regeneración en toda su complejidad. Ahora bien, a pesar de que la incertidumbre existente sobre la regeneración, las RFBGs se fabrican con éxito y de una manera fiable, reproducible y eficiente.

Para fabricar el dispositivo basado en RFBGs en fibra MCF, en primer lugar, se ha inscrito un conjunto de 7 FBGs de tipo I, una en cada núcleo de una fibra MCF comercial (Fibercore SM-7C1500). Como paso previo a la inscripción, la fibra fue hidrogenada a 50 bar de presión y a temperatura ambiente durante más de 15 días. Las FBGs se han inscrito de manera simultánea en todos los núcleos utilizando el método descrito en el capítulo 2. Después, las FBGs se han sometido a un tratamiento térmico controlado. El montaje y las distintas fases del proceso se detallan a continuación.

Para realizar el tratamiento térmico, se ha montado el sistema mostrado en la figura 6.1. El sistema está compuesto por un horno tubular de pequeñas dimensiones, un interrogador de sensores ópticos (Micron Optics sm130) y un ordenador.

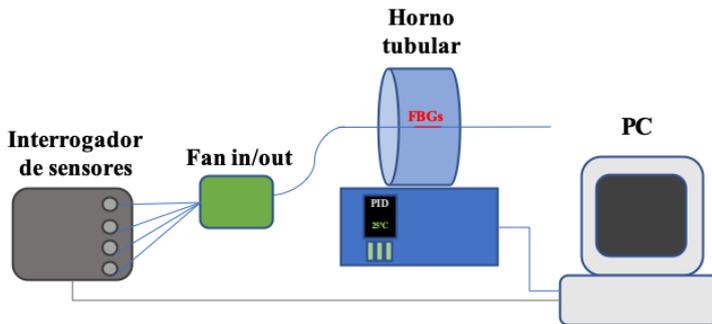


Figura 6.1. Esquema del montaje del sistema de recocido.

La fibra MCF se introduce en el horno, de tal manera que la parte que contiene las FBGs queda colocada en el centro del horno. De esta forma, a ambos extremos de la zona de las FBGs queda suficiente fibra para que se pueda manipular sin problemas una vez haya terminado el recocido. A su vez la fibra está conectada a un dispositivo *fan-in/out* para poder acceder a cada uno de sus núcleos de manera independiente. Los latiguillos de fibra que corresponden a cada núcleo están conectados al interrogador de sensores, que permite monitorizar durante todo el proceso obteniendo la potencia reflejada y la longitud de onda de Bragg de las FBGs. El principal inconveniente de este interrogador es que solamente tiene cuatro canales, por lo que solo se pueden monitorizar cuatro de las siete FBGs inscritas en la MCF. El interrogador está conectado a un ordenador que registra los datos de cada FBG durante todo el proceso. Al mismo tiempo el ordenador recoge los datos de temperatura proporcionados por un termopar colocado dentro del horno. Por otro lado, el horno dispone

de un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) de temperatura programable, en el cual se introducen manualmente las distintas secuencias de temperatura del tratamiento térmico.

El proceso térmico consta de tres fases. En la primera fase se calienta la fibra desde temperatura ambiente hasta 1000°C con una velocidad de 6°C/min. En la segunda fase temperatura se mantiene constante durante al menos 2.5 h. Por último, en la tercera fase, se detiene el calentamiento y se deja enfriar dentro del horno. Durante todo el proceso de calentamiento se han monitorizado las FBGs del núcleo central (núcleo número 1) y tres núcleos exteriores (núcleos números 2, 4 y 6). La figura 6.2 muestra los datos de la potencia reflejada normalizada de la FBG en cada núcleo, así como la temperatura del horno en cada instante de tiempo. La potencia se ha normalizado con la potencia reflejada máxima por la FBG al inicio del proceso, por lo que este dato nos aporta información sobre las pérdidas de reflectividad que sufre la FBG durante todo el proceso.

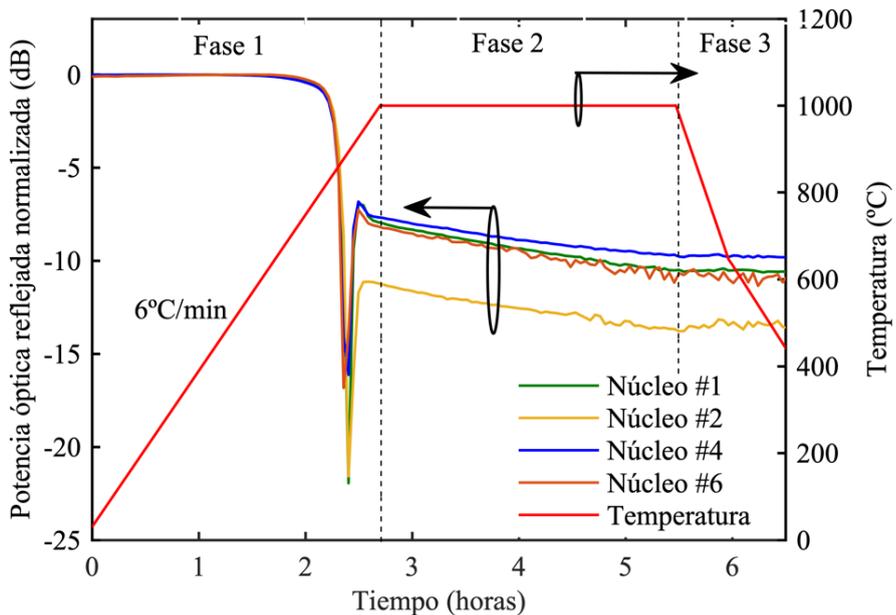


Figura 6.2. Potencia óptica reflejada normalizada en las FBGs de los núcleos números 1, 2, 4 y 6 durante el proceso de recocido [21].

Como se puede ver en la figura 6.2, en la primera fase, inicialmente la potencia reflejada se mantiene constante. Sin embargo, cuando la temperatura está cerca de 700°C, la potencia empieza a decaer rápidamente hasta que se produce la regeneración

y empieza a crecer de nuevo. Según los datos obtenidos la temperatura de regeneración es de 950°C. Tras la regeneración se puede ver que la RFBG continúa aumentando su reflectividad hasta aproximadamente el final de la primera fase. Durante la segunda fase, la reflectividad va disminuyendo, pero en este caso, con una velocidad cada vez menor hasta que, cerca del final de la segunda fase, la potencia reflejada por la RFBG se estabiliza. Por último, se puede ver como durante la fase de enfriamiento la potencia se mantiene estable.

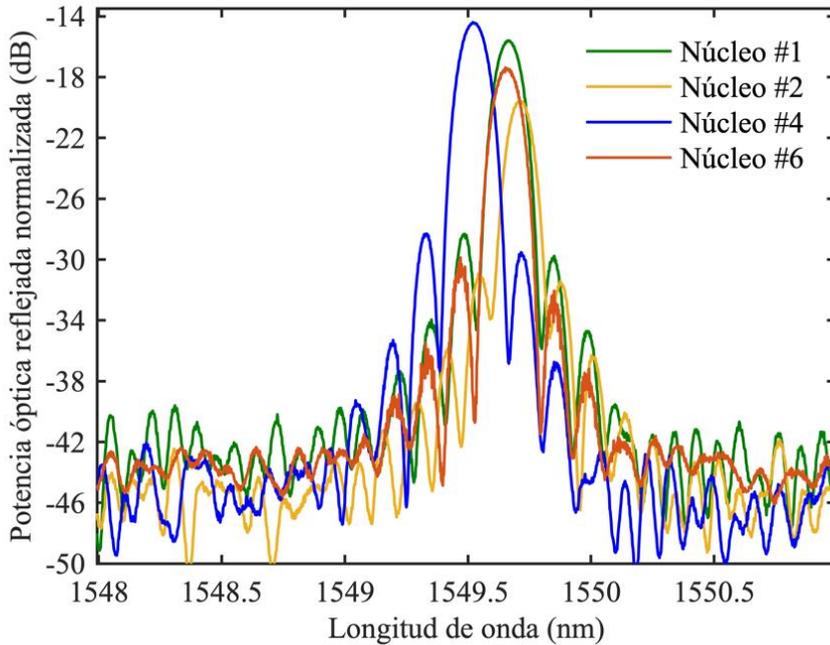


Figura 6.3. Espectro de las RFBGs en el núcleo central (núcleo 1) y en algunos de los núcleos exteriores (núcleos 2, 4 y 6) [21].

Si se observa potencia reflejada por las FBGs en cada núcleo por separado, se puede ver que la evolución de la reflectividad sigue la misma tendencia en todas ellas. Sin embargo, se aprecian diferencias en el valor de la potencia reflejada. En un principio las FBGs de todos los núcleos se atenúan por igual hasta llegar al punto de regeneración. En este punto las reflectividades de las FBGs en los núcleos 4 y 6, sufren una atenuación similar de 17 dB mientras que las de los núcleos números 1 y 2 sufren una atenuación de 22 dB. De la misma manera, después de la regeneración, las reflectividades de las RFBGs en los núcleos número 1, 4 y 6 presentan una atenuación de 10 dB que es similar a la atenuación del núcleo número 2, que es de 13dB. Las diferencias observadas en la reflectividad de las RFBGs son debidas a que las

reflectividades de las FBG semilla son ligeramente distintas en cada uno de los núcleos, como se ha visto en el capítulo 2 [18].

Después de la regeneración se han medido los espectros de las RFBGs en los mismos núcleos que se han estado monitorizando durante el tratamiento térmico. La figura 6.3 muestra los espectros de las RFBGs medidos a temperatura ambiente.

Se puede ver en los espectros de la figura 6.3 que, si bien la reflectividad es pequeña, los espectros no están deteriorados, es decir, presentan la forma típica de un espectro de una FBG uniforme, por lo tanto, en RFBG se pueden monitorizar sin problemas su longitud de onda de Bragg y utilizarlas como sensores codificados en longitud de onda. Para estudiar las posibilidades que ofrecen estas RFBGs en fibra MCF el dispositivo fabricado se ha caracterizado como sensor en temperatura, estiramiento y finalmente en curvatura. En las siguientes secciones se describe la caracterización y los resultados obtenidos.

6.3. Caracterización en temperatura y deformación

Una de las principales ventajas que ofrecen las RFBGs en fibra MCF sobre las fabricadas en fibras de un solo núcleo es que son sensibles a la curvatura. Sin embargo, al igual que ocurre con las FBGs en fibra MCF, la RFBG situada en el núcleo central de la fibra no se ve afectada por los cambios en la curvatura de la fibra, en cambio sí que le afectan los cambios en la temperatura o en la tensión de la fibra óptica. Así pues, se puede utilizar la RFBG del núcleo central para implementar un sensor de temperatura o estiramiento, que a su vez se puede utilizar para compensar la sensibilidad cruzada de la temperatura o el estiramiento en las medidas de curvatura. Por este motivo la caracterización en temperatura y estiramiento se ha realizado únicamente para la RFBG del núcleo central de la fibra (núcleo número 1).

En primer lugar, para la caracterización en temperatura la fibra se ha sometido a un proceso de calentamiento desde 24 °C hasta 1000 °C en un horno tubular. La zona de las RFBGs se ha colocado en el centro del horno. Durante el proceso, se ha monitorizado la longitud de onda de Bragg de la RFBG mediante un interrogador de sensores ópticos. La figura 6.4 muestra el desplazamiento en longitud de onda de las RFBG en el núcleo 1 para cada valor de temperatura medido. El desplazamiento se ha calculado tomando como punto inicial la longitud de onda de la RFBG a 24°C.

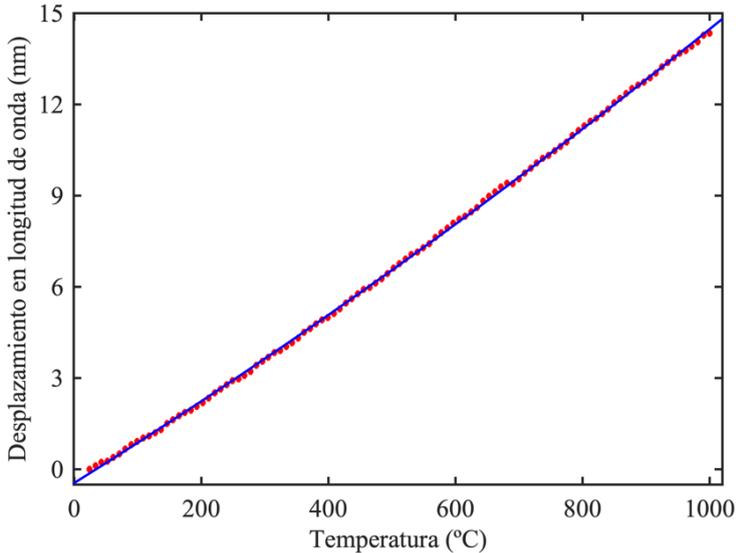


Figura 6.4. Desplazamiento en longitud de onda de la RFBG en el núcleo 1 con la temperatura. Los puntos rojos indican el valor de desplazamiento para cada temperatura y la línea azul representa el ajuste polinómico aplicado [21].

Según los datos obtenidos, el desplazamiento en longitud de onda con la temperatura no sigue un comportamiento totalmente lineal. Para modelizar este comportamiento, a los datos obtenidos se les ha realizado un ajuste cuadrático, como resultado se ha obtenido la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda(T) = 1.853 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 + 0.0137 \cdot T + 0.458 \quad (14)$$

donde $\Delta\lambda$ es el desplazamiento en longitud de onda nanómetros y T es la temperatura en grados centígrados. El coeficiente de determinación R^2 obtenido es 0.99, lo que indica que el polinomio de segundo grado utilizado se ajusta bastante bien a los datos obtenidos.

En lo que respecta a la caracterización en estiramiento, para estirar la fibra se ha utilizado el mismo montaje descrito en el capítulo 3. La fibra se ha colocado entre dos plataformas de translación y se ha fijado mediante adhesivo de cianocrilato. Es necesario destacar que la fibra después del proceso de recocido aumenta su fragilidad. A lo largo de la superficie de una fibra óptica existen múltiples fisuras de diferente profundidad y distribuidas de forma aleatoria. Estas fisuras concentran los esfuerzos mecánicos y limitan el esfuerzo máximo que puede soportar la fibra óptica antes de romperse [22]. Cuando la fibra se somete a un proceso de calentamiento, la profundidad de las fisuras presentes en su superficie aumenta, lo que provoca una

reducción del esfuerzo mecánico que pueden soportar y aumenta la probabilidad de ruptura [23]. Como paso previo a la caracterización de las RFBGs en estiramiento, se ha realizado una prueba de ruptura con una muestra de fibra MCF. Esta fibra se ha sometido al mismo tratamiento térmico que se ha utilizado para fabricar las RFBGs. Después, la fibra óptica se ha colocado sobre las plataformas de translación y se ha estirado progresivamente hasta alcanzar el punto de ruptura. El punto de ruptura se ha alcanzado a $1300 \mu\epsilon$, teniendo esto en cuenta, el estiramiento máximo de la fibra se ha limitado a $1200 \mu\epsilon$.

Para caracterizar la RFBG del núcleo 1 en estiramiento, se ha estirado progresivamente la fibra desde reposo ($0 \mu\epsilon$) hasta $1200 \mu\epsilon$ en incrementos de $50 \mu\epsilon$. Para cada valor de estiramiento se ha medido el desplazamiento en longitud de onda respecto de su longitud de onda de Bragg cuando la fibra estaba en reposo. La figura 6.5 muestra el desplazamiento en longitud de onda medido para cada valor de estiramiento.

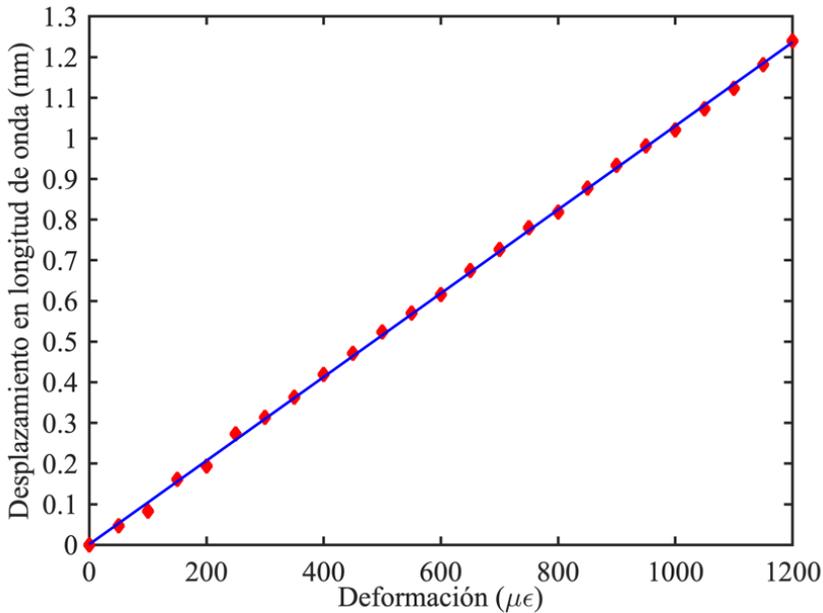


Figura 6.5. Desplazamiento en longitud de onda de la RFBG en el núcleo número 1 para distintos valores de estiramiento. La línea representa el ajuste lineal aplicado [21].

Según los datos obtenidos el desplazamiento en longitud de onda de la RFBG en el núcleo número 1 tiene un comportamiento lineal con el estiramiento aplicado a la fibra. A los datos obtenidos se les ha aplicado un ajuste lineal mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda(\varepsilon) = k \cdot \varepsilon \quad (8)$$

donde $\Delta\lambda$ es el desplazamiento en longitud de onda nanómetros y ε es el estiramiento expresado en *micro strains* ($\mu\varepsilon$) y k es la sensibilidad. El coeficiente de determinación R^2 obtenido es 0.99, lo que indica que el desplazamiento en longitud de onda medido tiene una fuerte relación línea con el estiramiento de la fibra. El valor de k obtenido es de 1.02 pm/ $\mu\varepsilon$. Este valor de sensibilidad es similar al de los sensores de estiramiento implementados con FBGs en fibras de un solo núcleo.

6.4. Caracterización en curvatura.

Para la caracterización de curvatura de las RFBGs fabricadas en la fibra MCF se ha empleado el montaje que se muestra en la figura 6.6. El funcionamiento de este montaje ya se ha descrito en el capítulo 3. La longitud del fleje de acero (L) es 15 cm y la distancia que puede recorrer la plataforma móvil (D) varía entre 0 mm y 3 mm.

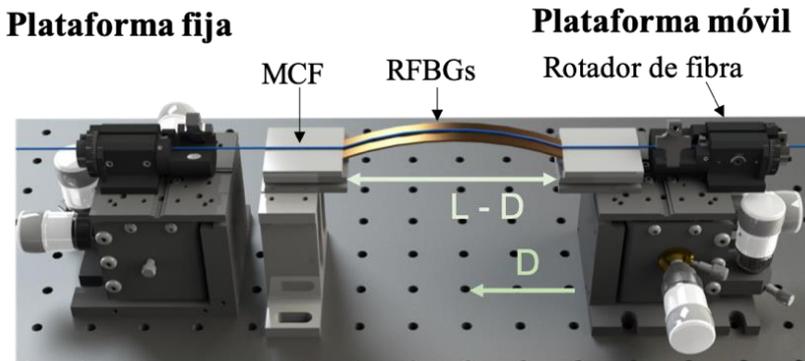


Figura 6.6 Montaje utilizado para la caracterización en curvatura de las RFBGs [21].

La fibra MCF se ha colocado sobre el fleje y se ha sujetado en ambos extremos por sendos rotadores. La zona de la fibra que contiene las RFBG se ha situado en el centro del fleje. Una vez colocada la fibra se han utilizado los rotadores para orientar los núcleos. El núcleo número 5 se ha colocado perpendicular al fleje y por encima del núcleo central, de esta forma el núcleo opuesto (núcleo número 2) queda alineado con el núcleo 5 y situado por debajo del núcleo central. Después la curvatura se ha ido incrementado gradualmente desde 2.3 m^{-1} hasta 4.6 m^{-1} y se ha medido el desplazamiento en longitud de onda de las RFBGs en todos los núcleos de la fibra tomando como referencia la longitud de onda cuando $D=0.5$ mm. Cabe destacar que se ha

evitado utilizar como referencia cuando $D=0$ mm ya que en este punto es muy complicado tener la fibra completamente plana y el error es mayor.

La figura 6.7 muestra el desplazamiento en longitud de onda obtenido en las RFBGs de todos los núcleos de la fibra MCF. Como era de esperar, el desplazamiento en longitud de onda observado en el núcleo central (núcleo número 1) es despreciable, mientras que, en los núcleos exteriores, el desplazamiento es positivo en los núcleos que están situados por encima del núcleo central y negativos en los opuestos. Por otro lado, la mayor variación en longitud de onda se obtiene en los núcleos 2 y 5 dado que son los que están situados más lejos del centro de la fibra. Por el contrario, el resto de los núcleos al estar más cerca presentan una variación menor.

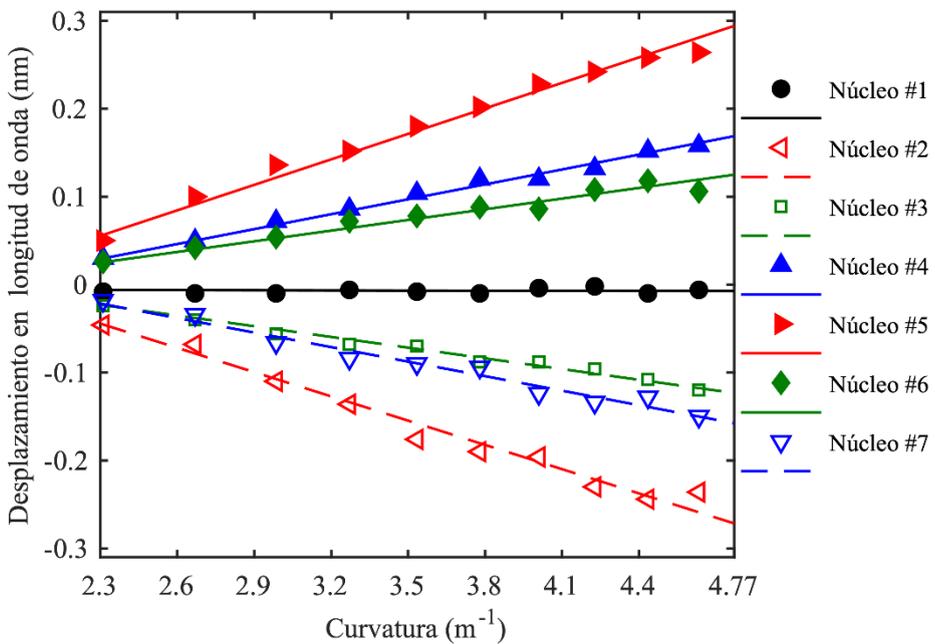


Figura 6.7. Desplazamiento en longitud de onda de las RFBGs en todos los núcleos para cada valor de curvatura. Las líneas corresponden al ajuste lineal aplicado [21].

Para analizar la sensibilidad a la curvatura de las RFBGs en la fibra MCF se ha realizado un ajuste lineal a los datos obtenidos. Este ajuste se ha representado junto con los datos en la figura 6.7. La ecuación utilizada en el ajuste está incluida en la tabla 6.1. En esta ecuación $\Delta\lambda$ es el desplazamiento en longitud de onda en nm, C es la curvatura en m^{-1} y a y b son los coeficientes del ajuste lineal, donde a representa la sensibilidad expresada en nm/m^{-1} . La tabla 6.1 también incluye los coeficientes de

los ajustes correspondientes a las RFBGs en todos los núcleos, así como el coeficiente de determinación R^2 obtenido en cada caso.

$$\Delta\lambda(C) = a \cdot C + b$$

| Núcleo | a | b | R^2 |
|--------|---------|---------|--------|
| 1 | -0.0004 | -0.0052 | < 0.20 |
| 2 | -0.092 | 0.17 | 0.98 |
| 3 | -0.040 | 0.07 | 0.98 |
| 4 | 0.056 | -0.10 | 0.99 |
| 5 | 0.096 | -0.16 | 0.98 |
| 6 | 0.040 | -0.07 | 0.96 |
| 7 | -0.055 | 0.10 | 0.98 |

Tabla 6.1. Ecuación, coeficientes del ajuste lineal aplicado al desplazamiento en longitud de onda con la curvatura [21].

En lo que respecta a los núcleos exteriores se puede comprobar que el desplazamiento en longitud de onda sigue un comportamiento lineal ya que sus coeficientes R^2 son cercanos a 1. Respecto a las sensibilidades obtenidas, se puede ver que son distintas en cada núcleo ya que dependen de la posición en la que este colocada la fibra y la dirección de curvatura. De acuerdo con la teoría, las sensibilidades de los núcleos opuestos son simétricas, es decir, una pareja de núcleos opuestos siempre y cuando no estén sobre la línea neutra de la fibra, tienen el mismo valor de sensibilidad a la curvatura, pero de signo contrario, positivo si el núcleo está por encima de la línea neutra o negativo si está por debajo. Se puede comprobar que esto se cumple en los resultados obtenidos. Las diferencias que se observan entre los núcleos 3 y 6, por un lado, y 4 y 7, por otro se deben a un pequeño error en la alineación de los núcleos de la fibra óptica respecto al fleje.

Como se ha podido comprobar, el desplazamiento en longitud de onda de las RFBGs en una fibra MCF no solo responde a la magnitud de curvatura, sino que también depende de la posición relativa de los núcleos a la dirección de curvatura. Dicho de otra manera, las RFBGs en esta fibra son sensibles tanto a la magnitud como a la dirección de curvatura. Para caracterizar la respuesta de las RFBGs ante distintas direcciones de curvatura se ha fijado una magnitud de curvatura y se ha rotado la fibra desde 0° hasta 360° en pasos de 15° . Para cada dirección de curvatura se ha medido el desplazamiento en longitud de onda de las RFBG en cada núcleo.

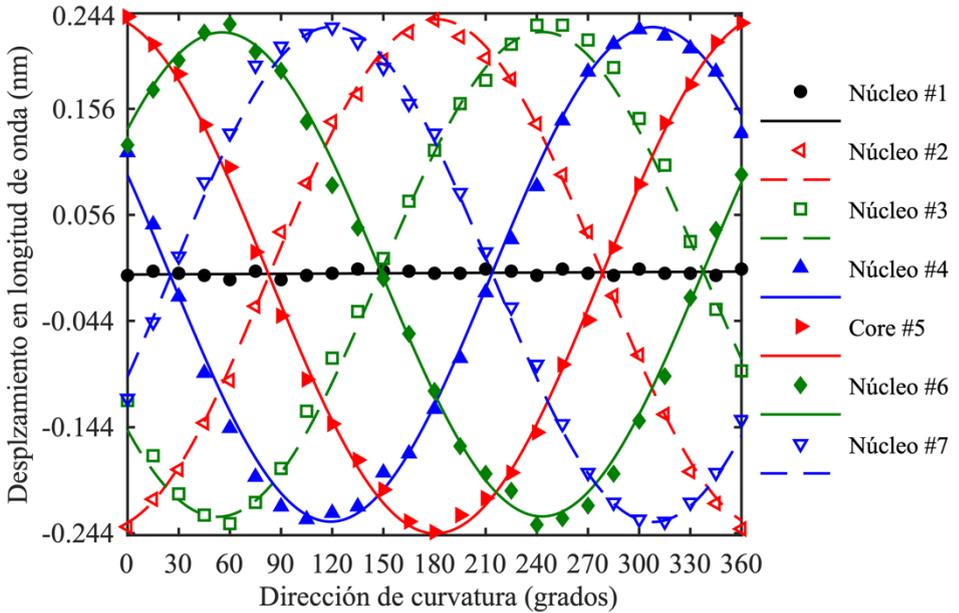


Figura 6.8. Desplazamiento en longitud de onda con la dirección de curvatura. Las líneas representan el ajuste aplicado [21].

En la figura 6.8 está representado el desplazamiento en longitud de onda con relación al máximo y el mínimo desplazamiento medido en todo el rango de direcciones. Se puede ver que el desplazamiento tiene un comportamiento sinusoidal en los núcleos exteriores. Para caracterizar este comportamiento se ha aplicado un ajuste a los datos utilizando una función senoidal. La tabla 6.2 contiene la ecuación del ajuste y los coeficientes. En la ecuación de la tabla 6.2, $\Delta\lambda$ es el desplazamiento en longitud de onda en nm, θ es la dirección de curvatura en grados y a , b y c son los coeficientes del ajuste senoidal. En todos los núcleos exteriores el coeficiente R^2 es cercano a 1 por el ajuste realizado es representativo de los datos obtenidos.

$$\Delta\lambda(\theta) = a \cdot \text{sen}(b \cdot \theta + c)$$

| Núcleo | a | b | c | R^2 |
|--------|-------|-------|--------|--------|
| 1 | 0.002 | 0.008 | -0.487 | < 0.20 |
| 2 | 0.240 | 0.016 | -1.338 | 0.99 |
| 3 | 0.228 | 0.016 | -2.443 | 0.99 |
| 4 | 0.233 | 0.016 | 2.729 | 0.99 |
| 5 | 0.244 | 0.016 | 1.813 | 0.99 |
| 6 | 0.228 | 0.016 | 0.642 | 0.99 |
| 7 | 0.233 | 0.016 | -0.426 | 0.99 |

Tabla 6.2 Ecuación y coeficientes del ajuste aplicado para el desplazamiento en longitud de onda con la dirección de curvatura [21].

En relación con el núcleo central (núcleo número 1), los coeficientes mostrados tanto en la tabla 6.1 como en la tabla 6.2 indican que el desplazamiento en longitud de onda no depende ni de la magnitud ni la dirección de curvatura. Además, los coeficientes R^2 están cercanos a cero lo que indica que el desplazamiento no tiene un comportamiento lineal con la magnitud de curvatura ni tampoco senoidal con la dirección. Si calculamos su media y su desviación típica, en las medidas de magnitud de curvatura, se obtiene un desplazamiento medio de -0.0067 nm y una desviación típica de 0.0035 nm. En el caso de las medidas de dirección se ha obtenido un desplazamiento medio de 0.0012 nm y una desviación típica de 0.0028 nm. Este pequeño desplazamiento que experimenta la RFBG del núcleo central puede ser debido a errores sistemáticos o bien a cambios de temperatura o tensión en la fibra producidos durante las medidas.

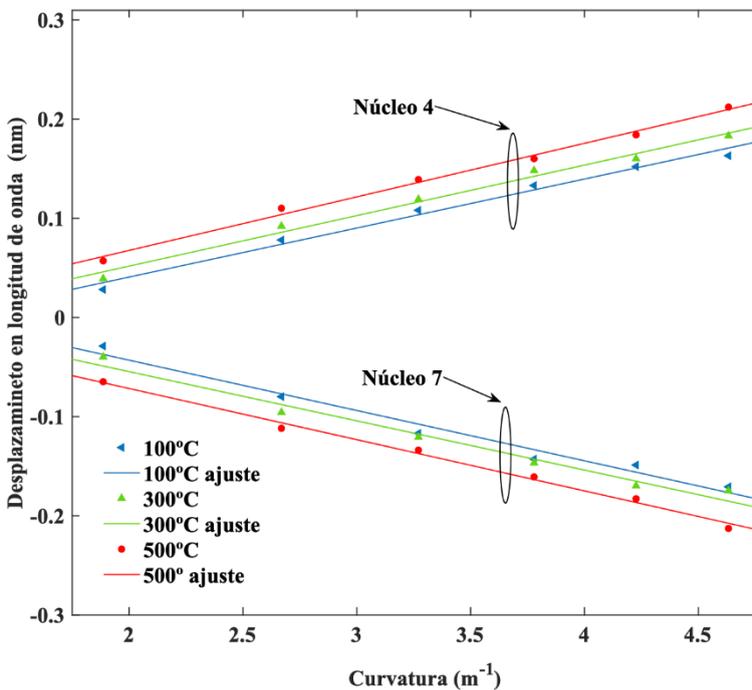


Figura 6.9. Desplazamiento en longitud de onda de las RFBG en los núcleos 4 y 7 con la curvatura para temperaturas elevadas [21].

Finalmente, con los datos obtenidos de la caracterización se ha demostrado que de las RFBG en fibra MCF se pueden utilizar como sensor de curvatura direccional, dicho de otra manera, proporcionan información tanto de la magnitud como de la dirección. Para determinar simultáneamente la magnitud y la dirección, primero se

determina la dirección de curvatura observando la relación entre los desplazamientos longitud de onda de las RFBGs de todos los núcleos, ya que esta relación es única para cada dirección. Después la magnitud de curvatura se determina teniendo en cuenta que es proporcional a al desplazamiento en longitud de onda.

Una vez que se ha caracterizado el sensor de curvatura a temperatura ambiente, para comprobar su funcionamiento a temperaturas más elevadas, se han medido curvaturas a 100°C, 300°C y 500°C. Para calentar la fibra sin dañar los elementos del montaje se ha utilizado una pistola de aire caliente regulable. Para cada temperatura se han medido curvaturas en los núcleos 4 y 7 para curvaturas desde 1.9 m^{-1} a 4.6 m^{-1} . Para compensar el desplazamiento debido al incremento de temperatura se ha utilizado la longitud de onda de la RFBG en el núcleo 1. En la figura 6.9 se pueden ver los resultados obtenidos. Se observa que las pendientes son similares para las tres temperaturas, lo que indica que no hay variaciones apreciables en la sensibilidad a la curvatura cuando aumenta la temperatura. Esto se debe a que, cuando la fibra se calienta hasta 500°C, los cambios en la sensibilidad a la deformación inducidos por la temperatura no son lo suficientemente grandes para observar cambios significativos en la sensibilidad a la curvatura [24, 25].

6.5. Conclusiones

En este capítulo se ha diseñado, implementado y caracterizado un sensor multi-paramétrico capaz de medir temperatura, estiramiento y curvatura capaz de operar en entornos a altas temperaturas. El sensor se ha fabricado mediante la inscripción de FBGs en una fibra MCF de siete núcleos. Tras la inscripción las FBGs se han sometido a un proceso térmico de alta temperatura y se han transformado con éxito en RFBGs. En cuanto a la caracterización, primero el sensor se ha caracterizado para temperaturas de hasta 1000 °C y se ha observado que el desplazamiento en longitud de onda de las RFBGs tiene un comportamiento cuadrático con la temperatura. Después se ha caracterizado en estiramiento hasta 1200 $\mu\epsilon$ y se ha obtenido una sensibilidad de 1.02 pm/ $\mu\epsilon$. Finalmente se han hecho pruebas para medir curvatura (magnitud y dirección). La magnitud de curvatura se ha caracterizado hasta 4.6 m^{-1} y en dirección desde 0° hasta 360°. La sensibilidad a la curvatura obtenida ha sido de 96 pm/ m^{-1} . Por último, se ha comprobado que el núcleo central, al igual que todos los núcleos es sensible a la temperatura y el estiramiento, pero no es sensible a la curvatura. Por lo tanto, se puede utilizar la RFBG del núcleo central como sensor de temperatura o estiramiento y a la vez las RFBGs de los núcleos exteriores como sensor de curvatura.

REFERENCIAS

- [1] B. Lee, «Review of the present status of optical fiber sensors», *Opt. Fiber Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 57-79, abr. 2003, doi: 10.1016/S1068-5200(02)00527-8.
- [2] A. D. Kersey *et al.*, «Fiber grating sensors», *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, ago. 1997, doi: 10.1109/50.618377.
- [3] G. Allwood, G. Wild, y S. Hinckley, «Fiber Bragg Grating Sensors for Mainstream Industrial Processes», *Electronics*, vol. 6, no. 4, p. 92, oct. 2017, doi: 10.3390/electronics6040092.
- [4] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta, y D. K. Bhattacharya, «Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 147, no. 1, pp. 150-164, sep. 2008, doi: 10.1016/j.sna.2008.04.008.
- [5] B. Torres, I. Payá-Zaforteza, P. A. Calderón, y J. M. Adam, «Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring», *Eng. Struct.*, vol. 33, no. 2, pp. 539-548, feb. 2011, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.11.012.
- [6] I. Mckenzie y N. Karafolas, «Fiber optic sensing in space structures: the experience of the European Space Agency (Invited Paper)», Bruges, Belgium, may 2005, p. 262. doi: 10.1117/12.623988.
- [7] T. Erdogan, V. Mizrahi, P. J. Lemaire, y D. Monroe, «Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings», *J. Appl. Phys.*, vol. 76, no. 1, pp. 73-80, jul. 1994, doi: 10.1063/1.357062.
- [8] L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, y A. Mysyrowicz, «Study of damage in fused silica induced by ultra-short IR laser pulses», *Opt. Commun.*, vol. 191, no. 3-6, pp. 333-339, may 2001, doi: 10.1016/S0030-4018(01)01152-X.
- [9] C. W. Smelser, S. J. Mihailov, y D. Grobncic, «Formation of Type I-IR and Type II-IR gratings with an ultrafast IR laser and a phase mask», *Opt. Express*, vol. 13, no. 14, p. 5377, 2005, doi: 10.1364/OPEX.13.005377.
- [10] D. Barrera, V. Finazzi, J. Villatoro, S. Sales, y V. Pruneri, «Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Applications», *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 107-112, ene. 2012, doi: 10.1109/JSEN.2011.2122254.
- [11] F. J. Dutz, S. Boje, U. Orth, A. W. Koch, y J. Roths, «High-Temperature Profile Monitoring in Gas Turbine Exhaust-Gas Diffusers with Six-Point Fiber-Optic Sensor Array», *Int. J. Turbomach. Propuls. Power*, vol. 5, no. 4, p. 25, sep. 2020, doi: 10.3390/ijtp5040025.
- [12] F. J. Dutz, A. Heinrich, R. Bank, A. W. Koch, y J. Roths, «Fiber-Optic Multipoint Sensor System with Low Drift for the Long-Term Monitoring of High-Temperature Distributions in Chemical Reactors», *Sensors*, vol. 19, no. 24, p. 5476, dic. 2019, doi: 10.3390/s19245476.
- [13] G. Laffont, R. Cotillard, N. Roussel, R. Desmarchelier, y S. Rougeault, «Temperature Resistant Fiber Bragg Gratings for On-Line and Structural Health Monitoring of the Next-

- Generation of Nuclear Reactors», *Sensors*, vol. 18, no. 6, p. 1791, jun. 2018, doi: 10.3390/s18061791.
- [14] M. Lindner *et al.*, «Regenerated Bragg Grating Sensor Array for Temperature Measurements During an Aluminum Casting Process», *IEEE Sens. J.*, vol. 18, no. 13, pp. 5352-5360, jul. 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2837164.
- [15] B. T. Górriz, I. Payá-Zaforteza, P. A. Calderón García, y S. Sales Maicas, «New fiber optic sensor for monitoring temperatures in concrete structures during fires», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 254, pp. 116-125, feb. 2017, doi: 10.1016/j.sna.2016.12.013.
- [16] K. Cook *et al.*, «Overview of high temperature fibre Bragg gratings», en *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*, Singapore, Singapore, jul. 2017, pp. 1-3. doi: 10.1109/CLEOPR.2017.8119092.
- [17] W. Ecke y M. W. Schmitt, «Fiber Bragg Gratings in Industrial Sensing», en *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013*, Anaheim, California, 2013, p. OM3G.1. doi: 10.1364/OFC.2013.OM3G.1.
- [18] L. Polz, F. J. Dutz, R. R. J. Maier, H. Bartelt, y J. Roths, «Regenerated Fibre Bragg Gratings: A critical assessment of more than 20 years of investigations», *Opt. Laser Technol.*, vol. 134, p. 106650, feb. 2021, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106650.
- [19] M. Fokine, «Underlying mechanisms, applications, and limitations of chemical composition gratings in silica based fibers», *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 349, pp. 98-104, dic. 2004, doi: 10.1016/j.jnoncrysol.2004.08.208.
- [20] J. Canning, M. Stevenson, S. Bandyopadhyay, y K. Cook, «Extreme Silica Optical Fibre Gratings», *Sensors*, vol. 8, no. 10, pp. 6448-6452, oct. 2008, doi: 10.3390/s8106448.
- [21] J. Madrigal, D. Barrera, y S. Sales, «Regenerated fiber bragg gratings in multicore fiber for multi-parameter sensing», *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 4, 2020, doi: 10.1109/JSTQE.2019.2958998.
- [22] J. Capmany, F. J. Fraile-Peárez, y J. Martí, *Dispositivos de Comunicaciones Ópticas*. Editorial Sintesis, 1999.
- [23] S. Feih, K. Manatpon, Z. Mathys, A. G. Gibson, y A. P. Mouritz, «Strength degradation of glass fibers at high temperatures», *J Mater Sci*, vol. 44, no. 2, pp. 392-400, ene. 2009, doi: 10.1007/s10853-008-3140-x.
- [24] G.-Y. Li y B.-O. Guan, «The strain response of chemical composition gratings at high temperatures», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, no. 2, p. 025204, feb. 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/2/025204.
- [25] M. J. O'Dwyer, C.-C. Ye, S. W. James, y R. P. Tatam, «Thermal dependence of the strain response of optical fibre Bragg gratings», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1607-1613, ago. 2004, doi: 10.1088/0957-0233/15/8/031.

Capítulo 7

Conclusiones y líneas abiertas

7.1. Conclusiones

El objetivo de esta tesis doctoral es el estudio de las posibilidades que ofrecen las fibras multinúcleo para el desarrollo de nuevos sensores ópticos basados en dispositivos fotónicos en fibra, como son las FBGs, TFBGs, LPGs y RFBGs. Para llevar a cabo el estudio, en primer lugar, se ha implementado un sistema de fabricación que permite la inscripción de estos dispositivos en los distintos núcleos de las fibras ópticas multinúcleo. Después se han implementado y caracterizado distintos tipos sensores basados en los dispositivos mencionados anteriormente.

En el capítulo 2 se ha descrito el sistema utilizado para la fabricación de los sensores presentados en esta tesis. El sistema se ha implementado sobre el sistema de fabricación de FBGs en fibra de un solo núcleo existente en las instalaciones del PRL en la Universidad Politécnica de Valencia. Se han instalado los componentes necesarios para permitir inscribir FBGs, TFBGs y LPGs, tanto en fibras de un solo núcleo como en fibras multinúcleo. El sistema permite la inscripción total en todos los núcleos de una MCF o bien la inscripción selectiva un conjunto de ellos. Esta técnica de inscripción selectiva es fundamental, ya que aprovechar al máximo las posibilidades que brinda la distribución espacial de los núcleos en un MCF para el desarrollo de sensores avanzados.

En el capítulo 3 se ha demostrado que es posible la inscripción selectiva de LPGs en una fibra MCF de siete núcleos. Se ha conseguido fabricar un dispositivo compuesto por distintas LPGs inscritas en núcleos diferentes dentro de la fibra MCF. Este dispositivo se ha caracterizado como sensor de estiramiento, torsión y curvatura (magnitud y dirección). En los resultados experimentales obtenidos se ha observado que el sensor tiene una sensibilidad más baja al estiramiento que una FBG. En la caracterización del sensor bajo estímulos de torsión, se ha observado que esta provoca una disminución del nivel de la banda de atenuación de la LPG que es mayor en los núcleos exteriores que en central. Por último, en lo que respecta a la caracterización del sensor en curvatura, se ha demostrado que el desplazamiento en longitud de onda de las LPGs en los núcleos exteriores el lineal con la curvatura aplicada a la fibra, mientras que las LPGs en núcleo central es despreciable. La sensibilidad máxima obtenida ha sido de 4.85 nm/m^{-1} . Cabe destacar que esta sensibilidad es mayor que la sensibilidad obtenida con FBGs. En la caracterización en dirección de curvatura del sensor se ha observado que el desplazamiento en longitud de onda de las LPGs tiene un comportamiento sinusoidal. Además, los desplazamientos en longitud de onda entre las LPGs de cada núcleo guardan una relación única

para cada dirección de curvatura, lo que permite obtener la dirección de curvatura.

En el capítulo 4 se ha demostrado la posibilidad de inscribir TFBG de manera selectiva en los núcleos de una fibra MCF. Además, se ha demostrado experimentalmente que los modos de cubierta excitados por las TFBGs se reacoplan entre los núcleos, lo que provoca un aumento del nivel de diafonía entre los núcleos que tienen una TFBG. Esta diafonía provocada por la inscripción de las redes de difracción inclinadas es intencionada, local y controlada y puede aprovecharse para el desarrollo de distintos dispositivos y sensores ópticos. De manera experimental se ha estudiado la influencia de distintos estímulos externos sobre el espectro de la diafonía. Se ha observado que la longitud de onda de los modos de cubierta de las TFBGs es sensible al estiramiento, y su sensibilidad es menor para los modos cuya longitud de onda de resonancia está más alejada de la longitud de onda de Bragg de la TFBG. En lo relativo a la curvatura, se ha observado en el espectro de la diafonía que su nivel depende de la posición de los núcleos respecto de la dirección de curvatura y además, se desplaza en longitud de onda cuando se curva la fibra.

En el mismo capítulo, a parte de la influencia de los estímulos mecánicos sobre la diafonía inducida por las TFBGs, se ha estudiado experimentalmente la influencia de la temperatura y el índice de refracción del medio que rodea a la fibra MCF. Se ha observado que los cambios de temperatura producen un desplazamiento en el espectro de la diafonía. En lo que respecta a los cambios en el índice de refracción, se ha demostrado que la potencia de la diafonía se reduce de manera no lineal a medida que aumenta el índice de refracción del medio que rodea la fibra.

En el capítulo 5 se ha desarrollado un sensor de curvatura en MCF capaz de operar en entornos radioactivos. En presencia de radiación, las FBGs experimentan un cambio de longitud de onda, esto puede inducir errores en las medidas. Sin embargo, en los sensores de curvatura implementados con FBGs en MCF, la información de la curvatura se puede obtener de la diferencia de los desplazamientos de longitud de onda entre las FBGs de cada núcleo. Al obtener la curvatura de forma diferencial, cualquier cambio en longitud de onda que afecte a todas las FBGs por igual no afecta al cálculo de la curvatura. En este capítulo se ha fabricado un sensor de curvatura mediante la inscripción de FBGs en todos los núcleos de una MCF. Se ha utilizado dos muestras de la misma fibra MCF, una hidrogenada y otra sin hidrogenar. Después, el sensor se ha expuesto a una radiación y se ha comprobado su funcionamiento. Se ha demostrado que efectivamente la radiación produce un desplazamiento en longitud de onda en todos los núcleos de la fibra óptica. El

desplazamiento en longitud de onda observado en la fibra hidrogenada es más de diez veces superior al de la fibra sin hidrogenar. En ambas muestras de fibra las diferencias de las curvaturas obtenidas antes y después de radiación son similares. Para la fibra sin hidrogenar, antes del proceso de irradiación, se ha obtenido un radio de curvatura medio de 20.44 cm y una dirección media de 73.39° , mientras que después de la irradiación, se ha obtenido un radio de 19.38 cm y una dirección de 77.48° . En el caso de la fibra hidrogenada, antes de irradiarla, se ha obtenido un radio curvatura medio de 20.79 cm y una dirección media de -139.07° . Después de la radiación se han obtenido unos valores de 20.12 cm y -138.42° de radio y dirección de curvatura respectivamente.

En el capítulo 6, se ha desarrollado un sensor multiparamétrico en fibra MCF capaz de operar a altas temperaturas. Este sensor se ha implementado mediante la fabricación de RFBG en una fibra MCF. En el capítulo se describe el proceso de obtención de las RFBGs. El sensor se ha caracterizado para altas temperaturas, estimamiento y curvatura. Se ha observado que la temperatura de regeneración es 950°C por lo que es similar a la de una RFBG en una fibra estándar. La sensibilidad a la temperatura no sigue un comportamiento totalmente lineal y la sensibilidad a la deformación es $1.02 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

7.2. Líneas abiertas

Las fibras ópticas MCF tienen un enorme potencial para el desarrollo de novedosos dispositivos de comunicaciones ópticas y sensores en fibra óptica avanzados. Para aprovechar al máximo este potencial de estas fibras es fundamental una técnica de inscripción selectiva eficaz. En esta tesis se ha mostrado una posible técnica de inscripción selectiva, la cual ha permitido el desarrollo de nuevos sensores ópticos basados en fibras MCF. Sin embargo, no se han agotado todas las posibilidades que ofrecen las fibras MCF en el campo de los sensores ópticos. Se pueden abrir nuevas líneas de investigación orientadas, por un lado, a mejorar las técnicas de inscripción selectiva, y por otro lado, al desarrollo de sensores o dispositivos de comunicaciones ópticas avanzados.

Estas son las líneas de investigación abiertas que se pretende continuar en un futuro:

- Desarrollar e implementar un sistema de alineamiento de la fibra MCF automático. Para este sistema se plantea sustituir todos los componentes que actualmente se accionan o se ajustan manualmente por otros con control electromecánico por ordenador. Además, es necesario desarrollar el software

de control y los algoritmos de alineamiento. Con este sistema automático se mejoraría la precisión en el alineamiento y se optimizaría el tiempo de fabricación de los dispositivos.

- Implementar un sistema de inscripción de FBGs basado en técnicas interferométricas. Para ello es fundamental desarrollar un sistema que permita controlar con precisión la posición de la fibra, el ángulo de interferencia entre los haces UV y la zona donde se produce dicha interferencia. Este sistema permitiría inscribir FBGs o TFBGs sin necesidad de utilizar una máscara de fase y por lo tanto ampliar el rango de periodos que se pueden inscribir.
- Desarrollar técnicas que mitiguen el efecto lente para conseguir una inscripción selectiva más eficiente. Existen técnicas para reducir el efecto lente que consisten en el pulido de la fibra para aplanar la zona donde incide el haz. Sin embargo, mediante estas técnicas se modifica permanente la estructura de la fibra y puede perjudicar a las propiedades mecánicas de la misma. El reto está en conseguir un interfaz entre la fibra y el haz láser de manera que se reduzca el efecto lente y no modifique la estructura de la fibra.
- Estudiar la posibilidad de optimizar el acoplo de luz entre núcleos producido por las LPGs y TFBGs. Uno de los desafíos más importantes dentro de esta línea es conseguir simular mediante software el acoplo entre núcleos cuando hay inscrito en ellos una TFBG o una LPG. Mediante estas simulaciones se puede estudiar cuales son los parámetros de fabricación de las TFBGs o LPGs que optimizan el acoplo. Una vez optimizado, el acoplo de luz entre los núcleos permitirá el desarrollo de dispositivos de comunicaciones ópticas, como por ejemplo enrutadores ópticos y amplificadores, además de sensores con mejores características respecto a los actuales.
- Desarrollar biosensores basados en el acoplo de luz los núcleos de una fibra MCF. Se ha podido ver en esta tesis que el acoplo entre los núcleos es sensible al índice de refracción del medio que rodea la fibra y permite detectar concentraciones de diversas sustancias. El siguiente paso sería funcionalizar la fibra con recubrimientos que cambien su índice de refracción ante la presencia de ciertas sustancias biológicas. El reto de hacer esto en fibras ópticas MCF radica en conseguir recubrir cada zona de influencia de un núcleo con una sustancia distinta. Si se consigue, se podría estudiar la posibilidad de implementar un sensor capaz de medir diversas sustancias biológicas a la vez utilizando una misma fibra óptica MCF.
- Desarrollar sensores multiparamétricos en fibras ópticas MCF basados en la combinación de FBGs, TFBGs y LPGs inscritas en distintos núcleos. Para llevar a cabo este objetivo es fundamental conseguir optimizar al máximo la técnica de inscripción selectiva de redes de difracción en una fibra óptica MCF. Si se consigue se permitiría el desarrollo de sensores capaces de medir distintas magnitudes en una misma zona de la fibra.

- Monitorización de estructuras mediante sensores de curvatura en MCF embebidos. Las FBGs en fibras de un solo núcleo embebidas en estructuras de diversos materiales se han utilizado para monitorizar la deformación y la temperatura de estas. Sin embargo, las FBGs en fibras ópticas MCF permiten obtener además información sobre la curvatura o la forma que adopta la estructura. Esto tiene un gran potencial para la monitorización de la salud estructural en diversos campos como la industria del automóvil o la industria aeroespacial entre otras. El principal reto dentro de esta línea de investigación es conseguir incrustar la fibra MCF dentro de estas estructuras de manera controlada, sencilla, eficiente y sin que sufra daños. Una vez incrustada es necesario estudiar cómo se comporta ante los distintos estímulos externos.

Anexo 1

Publicaciones científicas del autor

1. Publicaciones en revistas internacionales.

- [1] Z. Liu *et al.*, «Temperature-insensitive curvature sensor based on Bragg gratings written in strongly coupled multicore fiber», *Optics Letters*, vol. 46, no. 16, pp. 3933-3936, 2021, doi: 10.1364/OL.432889.
- [2] I. Floris *et al.*, «Effects of bonding on the performance of optical fiber strain sensors», *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 28, no. 9, 2021, doi: 10.1002/stc.2782.
- [3] J. Madrigal, D. Barrera, y S. Sales, «Regenerated fiber bragg gratings in multicore fiber for multi-parameter sensing», *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 4, 2020, doi: 10.1109/JSTQE.2019.2958998.
- [4] Z. Liu *et al.*, «Strongly coupled multicore fiber with FBGs for multipoint and multiparameter sensing», *Optical Fiber Technology*, vol. 58, 2020, doi: 10.1016/j.yofte.2020.102315.
- [5] I. Floris, J. Madrigal, S. Sales, P. A. Calderón, y J. M. Adam, «Twisting measurement and compensation of optical shape sensor based on spun multicore fiber», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 140, 2020, doi: 10.1016/j.ymsp.2020.106700.
- [6] I. Floris, J. Madrigal, S. Sales, J. M. Adam, y P. A. Calderón, «Experimental study of the influence of FBG length on optical shape sensor performance», *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 126, 2020, doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.105878.
- [7] H. H. Diamandi *et al.*, «Opto-Mechanical Interactions in Multi-Core Optical Fibers and Their Applications», *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 26, no. 4, 2020, doi: 10.1109/JSTQE.2019.2958933.
- [8] D. Zheng *et al.*, «Temperature-insensitive optical tilt sensor based on a single eccentric-core fiber Bragg grating», *Optics Letters*, vol. 44, no. 22, pp. 5570-5573, 2019, doi: 10.1364/OL.44.005570.
- [9] J. Madrigal, D. Barrera, y S. Sales, «Refractive Index and Temperature Sensing Using Inter-Core Crosstalk in Multicore Fibers», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 18, pp. 4703-4709, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2917629.

- [10] F. Khan, A. Denasi, D. Barrera, J. Madrigal, S. Sales, y S. Misra, «Multi-Core Optical Fibers with Bragg Gratings as Shape Sensor for Flexible Medical Instruments», *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 14, pp. 5878-5884, 2019, doi: 10.1109/JSEN.2019.2905010.
- [11] S. García, R. Guillem, J. Madrigal, D. Barrera, S. Sales, y I. Gasulla, «Sampled true time delay line operation by inscription of long period gratings in few-mode fibers», *Optics Express*, vol. 27, no. 16, pp. 22787-22793, 2019, doi: 10.1364/OE.27.022787.
- [12] D. Barrera, J. Madrigal, S. Delepine-Lesoille, y S. Sales, «Multicore optical fiber shape sensors suitable for use under gamma radiation», *Optics Express*, vol. 27, no. 20, pp. 29026-29033, 2019, doi: 10.1364/OE.27.029026.
- [13] J. Hervás, D. Barrera, J. Madrigal, y S. Sales, «Microwave Photonics Filtering Interrogation Technique under Coherent Regime for Hot Spot Detection on a Weak FBGs Array», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 1039-1045, 2018, doi: 10.1109/JLT.2018.2793161.
- [14] R. Guillem, S. García, J. Madrigal, D. Barrera, y I. Gasulla, «Few-mode fiber true time delay lines for distributed radiofrequency signal processing», *Optics Express*, vol. 26, no. 20, pp. 25761-25768, 2018, doi: 10.1364/OE.26.025761.
- [15] J. Clement Bellido *et al.*, «Fast incoherent OFDR interrogation of FBG arrays using sparse radio frequency responses», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, pp. 4393-4400, 2018, doi: 10.1109/JLT.2018.2821199.
- [16] D. Barrera, J. Madrigal, y S. Sales, «Long Period Gratings in Multicore Optical Fibers for Directional Curvature Sensor Implementation», *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 4, pp. 1063-1068, 2018, doi: 10.1109/JLT.2017.2764951.
- [17] D. Zheng, J. Madrigal, H. Chen, D. Barrera, y S. Sales, «Multicore fiber-Bragg-grating-based directional curvature sensor interrogated by a broadband source with a sinusoidal spectrum», *Optics Letters*, vol. 42, no. 18, pp. 3710-3713, 2017, doi: 10.1364/OL.42.003710.
- [18] D. Zheng, J. Madrigal, D. Barrera, S. Sales, y J. Capmany, «Microwave Photonic Filtering for Interrogating FBG-Based Multicore Fiber Curvature Sensor», *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 29, no. 20, pp. 1707-1710, 2017, doi: 10.1109/LPT.2017.2742579.
- [19] J. Madrigal, F. J. Fraile-Peláez, D. Zheng, D. Barrera, y S. Sales, «Characterization of a FBG sensor interrogation system based on a mode-locked laser scheme», *Optics Express*, vol. 25, no. 20, pp. 24650-24657, 2017, doi: 10.1364/OE.25.024650.

- [20] D. Barrera, J. Madrigal, y S. Sales, «Tilted fiber Bragg gratings in multicore optical fibers for optical sensing», *Optics Letters*, vol. 42, no. 7, pp. 1460-1463, 2017, doi: 10.1364/OL.42.001460.

2. Publicaciones en congresos internacionales

- [1] D. Sartiano, J. M. Madrigal, y S. Sales, «Coherent and Incoherent Regimes for Microwave Photonics Fiber Sensing», en *Proceedings of IEEE Sensors, 2020*, vol. 2020-October. doi: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278813.
- [2] J. M. B. Pereira et al., «High-Voltage Sensor Based on Fiber Bragg Grating in Fibers with Electrodes», en *Conference Proceedings - Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting-LEOS, 2020*, vol. 2020-May.
- [3] H. Garcia-Miquel, L. Cebrian, J. Madrigal, y S. Sales, «Current Sensor Based on a Fiber Bragg Grating Coated by Electroplated Magnetostrictive Material», en *Proceedings of IEEE Sensors, 2020*, vol. 2020-October. doi: 10.1109/SENSORS47125.2020.9278925.
- [4] I. Floris, J. Madrigal, S. Sales, P. A. Calderón, y J. M. Adam, «Twisting compensation of optical multicore fiber shape sensors for flexible medical instruments», en *Progress in Biomedical Optics and Imaging - Proceedings of SPIE, 2020*, vol. 11233. doi: 10.1117/12.2543783.
- [5] D. Sartiano, J. Madrigal, y S. Sales, «Sub-cm temperature monitoring of 500 weak gratings array through chirped ultra-short light pulses», en *Optics InfoBase Conference Papers, 2019*, vol. Part F166-Sensors 2019. doi: 10.1364/SENSORS.2019.SW5A.5.
- [6] D. Sartiano, J. Hervas, J. M. Madrigal, D. Perez-Galacho, y S. Sales, «On the use of microwave photonics techniques for novel sensing applications», en *International Conference on Transparent Optical Networks, 2019*, vol. 2019-July. doi: 10.1109/ICTON.2019.8840442.
- [7] S. Sales, D. Barrea, J. Hervas, y J. Madrigal, «Microwave Photonics for Optical Fiber Sensors», 2019. doi: 10.1364/ofc.2019.th3i.1.
- [8] J. M. B. Pereira et al., «High-voltage fiber sensor based on fiber Bragg grating in poled fiber», en *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2019*, vol. 11199. doi: 10.1117/12.2540628.

- [9] S. García, R. Guillem, J. Madrigal, D. Barrera, S. Sales, y I. Gasulla, «Few-mode fibre delay lines with inscribed long period gratings for radiofrequency signal processing», en IET Conference Publications, 2019, vol. 2019, no. CP765. [En línea]
- [10] I. Floris, J. Madrigal, S. Sales, J. M. Adam, y P. A. Calderón, «Experimental study of the influence of FBG length on optical multicore shape sensors performance», en Optics InfoBase Conference Papers, 2019, vol. Part F138-ACPC 2019. [En línea].
- [11] Madrigal, J., Barrera, D., Calderon, PA., y Sales, S., «Regenerated Multicore Fibre Bragg Gratings for Structural Health Monitoring in Harsh Environments», presentado en 15th European Conference on Spacecraft structures, Materials & Environmental Testing (ECSSMET 2018), Noordwijk, the Netherlands, 2018.
- [12] J. Madrigal, D. Barrera, y S. Sales, «Refractive index and temperature sensor based on TFBGs in multicore fiber», en Optics InfoBase Conference Papers, 2018, vol. Part F124-OFS 2018. doi: 10.1364/ofs.2018.the11.
- [13] J. Clement, J. Madrigal, J. Hervás, y C. R. Fernández-Pousa, «Fast interrogation of equally-spaced arrays of fiber Bragg gratings using sparse incoherent OFDR», en Optics InfoBase Conference Papers, 2018, vol. Part F98-BGPPM 2018. doi: 10.1364/BGPPM.2018.JTu2A.60.
- [14] A. Bergman et al., «Opto-mechanical point sensing in a multi-core fiber», en Optics InfoBase Conference Papers, 2018, vol. Part F124-OFS 2018. doi: 10.1364/ofs.2018.fb3.
- [15] D. Barrera, J. Madrigal, y S. Sales, «Tilted fiber Bragg gratings for selective coupling in a multicore optical fiber», en Optics InfoBase Conference Papers, 2018, vol. Part F84-OFC 2018. doi: 10.1364/OFC.2018.Th1K.4.
- [16] D. Barrera, J. Goicoechea, J. Madrigal, M. González-Larequi, F. J. Arregui, y S. Sales, «Partially coated long period fiber Bragg gratings in multicore optical fibers», en Optics InfoBase Conference Papers, 2018, vol. Part F110-Sensors 2018. doi: 10.1364/SENSORS.2018.SeM4E.5.
- [17] D. Zheng, Y. Ma, J. Madrigal, D. Barrera, S. Sales, y J. Capmany, «FBGs based multicore fiber curvature sensor interrogation using microwave photonics filtering techniques», en MWP 2017 - 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2017, vol. 2017-December, pp. 1-3. doi: 10.1109/MWP.2017.8168632.
- [18] D. Sartiano, J. Madrigal, y S. Sales, «Low-cost pressure sensor embedded in mattress», 2017.
- [19] J. Madrigal, D. Barrera, J. Hervás, H. Chen, y S. Sales, «Directional curvature sensor based on long period gratings in multicore optical fiber», en Proceedings

- of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2017, vol. 10323. doi: 10.1117/12.2264920.
- [20] J. Hervás, J. Madrigal, D. Barrera, y S. Sales, «Multiplexing FBG sensors combining microwave photonics and phase modulation», 2017. doi: 10.1109/IC-TON.2017.8024932.
- [21] J. Hervás, D. Barrera, J. Madrigal, y S. Sales, «Phase modulation to intensity modulation conversion for sensitive FBG sensor interrogation», en Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2017, vol. 10323. doi: 10.1117/12.2265400.
- [22] J. Hervás, D. Barrera, J. Madrigal, y S. Sales, «Microwave photonics filtering interrogation technique under coherent regime for hot spot detection on cascaded FBG fiber», en Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2017, vol. 10323. doi: 10.1117/12.2265395.

3. Publicaciones en congresos nacionales

- [1] J. Madrigal, D. Barrera, y S. Sales, «Sensor de índice de refracción basado en la diafonía entre núcleos de una fibra óptica multinúcleo», presentado en XI Reunión Española de Optoelectrónica (OPTOEL 2019), Zaragoza, España, 2019.
- [2] D. Sartiano, «Sub-cm temperature monitoring of 500 weak gratings array through chirped ultra-short light pulses», presentado en XI Reunión Española de Optoelectrónica (OPTOEL 2019), Zaragoza, España, 2019.

4. Patentes

- [1] Título: Coupled-core optical fiber with fiber Bragg grating and sensing device
Inventores: Javier Madrigal, Salvador Sales
Nº de solicitud: EP21382402
Fecha registro: 04/05/2021
- [2] Título: Sistema y método de monitorización de potencia y temperatura en redes de fibra óptica
Inventores: David Barrera, Javier Madrigal, Salvador Sales
Nº de solicitud: P201931134
Fecha registro: 19/12/2019

5. Participación en proyectos de investigación

- [1] **Nombre del proyecto:** Dispositivos en fibras especiales multimodo/multinúcleo para redes de comunicaciones y aplicaciones de sensores
Entidad financiadora: Agencia Estatal de Investigación
Fecha de inicio: 01/09/2018
Duración: 2 años
- [2] **Nombre del proyecto:** Building on the use of spatial multiplexing 5G networks infrastructures and showcasing advanced technologies and networking capabilities
Entidad financiadora: Comisión de las Comunidades Europea
Fecha de inicio: 03/01/2018
Duración: 5 meses
- [3] **Nombre del proyecto:** Fibre Nervous Sensing Systems
Entidad financiadora: Comisión de las Comunidades Europea
Fecha de inicio: 01/03/2017
Duración: 9 meses