

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Desarrollo experimental de sensores de fibra óptica basados en microcavidades de fibra hueca.



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Nombre y apellidos del autor: Javier Pradas Martínez

Nombre y apellidos del director/es: Rosa Ana Pérez Herrera

Pamplona, fecha de defensa: 31 de Enero de 2020

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa
Fundación Universidad - Sociedad
Unibertsitate - Gizarte Fundazioa

Resumen

Este trabajo de fin de grado ha sido desarrollado por Javier Pradas Martínez, estudiante de Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación que, motivado por la ampliación del conocimiento sobre la fibra óptica y los fenómenos físicos que ocurren en su interior, ha enfocado el estudio de los sensores de fibra óptica basados en microcavidades de fibra hueca.

Dicho trabajo se divide en dos apartados principales, el primero de ellos explica el método que se ha desarrollado para fabricar dichos sensores con el material disponible en el laboratorio de fotónica Teralab. En la segunda parte se realiza un análisis de las propiedades de estos sensores y se verifica su correcto funcionamiento.

Además, como estudio adicional, se ha fabricado un sensor capaz de medir simultáneamente temperatura y deformación, basado en un interferómetro compuesto por varias microcavidades Fabry-Perot.

Abstract

This work has been carried out by Javier Pradas Martínez, an engineering student in telecommunication technologies who, motivated by the expansion of knowledge about optical fiber and the physical phenomena that occur inside, has focused this work towards the study of fiber optic sensors based on hollow fiber microcavities.

This work is divided into two main subsections, the first one explains the method that has been developed to manufacture these optical fiber sensors with the material available in the Teralab photonics laboratory. In the second one, an analysis and verification on the properties of the correct operation of those microcavities is presented.

In addition to this, and as a further study, a multiparameter sensor based on a dual-cavity Fabry-Perot interferometer has been developed, in order to evaluate temperature and strain variations simultaneously.

Tabla de contenido.

Capítulo 0 - Introducción	8
Capítulo 1 - Marco teórico.....	9
1.1 La fibra óptica.	9
Tipos de fibra.	9
Fundamentos de la emisión óptica.	11
Limitaciones de la fibra óptica.....	13
Efectos no lineales en la fibra óptica.....	14
Láseres de fibra óptica.....	15
Fundamentos físicos de la emisión láser.....	15
1.2 Amplificación óptica.	17
Amplificación mediante el dopaje con tierras raras.	17
Amplificación basada en el efecto Raman.	19
1.3 Láseres de fibra óptica.....	20
Láseres de fibra dopada con Erbio.	20
Láseres basados en amplificación Raman.	21
Láseres random.	21
1.4 Sensores ópticos.....	23
Sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBGs).	23
Sensores basados en cavidades Fabry-Perot.	24
Sensores basados en interferómetros de fibra óptica.	25
Sensores basados en microcavidades.	27
Capítulo 2 - Instrumentación.....	29
2.1 Dispositivos ópticos.	29
Acoplador óptico.	29
Multiplexor por división en longitud de onda (WDM).	30
Circulador óptico.	30
Aislador óptico.....	31
Red de difracción de Bragg (FBG).	31
2.2 Herramientas para trabajar con la fibra óptica.	32
2.3 Herramientas de caracterización.....	33
Medidor de potencia óptica (Power Meter).	33

Interrogador óptico.	33
Reflectómetro óptico.....	35
Capítulo 3 - Proceso de fabricación.....	36
3.1 Materiales utilizados.	36
3.2 Parámetros de configuración de la fusionadora de fibra óptica.....	36
3.3 Proceso de fabricación de las microcavidades.....	37
Capítulo 4 - Medidas y resultados experimentales.....	45
4.1 Obtención de las pérdidas de inserción.	45
4.2 Resultados de las pérdidas de inserción.	45
4.3 Medidas realizadas para obtener el espectro óptico de las microcavidades.	46
4.4 Resultados experimentales obtenidos a partir del espectro óptico.	47
4.5 Caracterización mediante reflectómetro óptico.	55
4.6 Caracterización del funcionamiento de las microcavidades como sensores.....	57
Capítulo 5 - Desarrollo de un sensor multiparámetro.	67
Capítulo 6 - Conclusiones.	73
Capítulo 7 - Bibliografía y referencias.	75

Índice de figuras.

Figura 1-1 Diferencia entre diámetros de fibras monomodo y multimodo.....	10
Figura 1-2 Variación del índice de refracción para fibras de salto de índice y gradiente de índice.	10
Figura 1-3 Vista frontal de una fibra hueca o HCF.....	10
Figura 1-4- Variación del ángulo refractado en función del ángulo incidente.....	11
Figura 1-5 Bandas de energía.	12
Figura 1-6 Explicación gráfica del fenómeno de absorción.....	12
Figura 1-7 Explicación gráfica de la emisión espontánea.....	12
Figura 1-8 Explicación gráfica del fenómeno de emisión estimulada.	13
Figura 1-9 Esquema de una microcavidad Fabry-Perot.	15
Figura 1-10 Esquema de la inversión de población.....	16
Figura 1-11 Configuración básica de un láser de fibra óptica.	16
Figura 1-12 - Configuración de láser con filtrado mediante WDM. [1].....	17
Figura 1-13 Curva de ganancia producida por una fibra dopada con Erblio donde se genera la emisión de dos láseres alrededor de los 1550nm. [3]	18

Figura 1-14 Amplificación Raman en 1550 nm conseguida mediante un bombeo en 1452.41 nm.....	19
Figura 1-15 Backscattering en fibra óptica. [5]	20
Figura 1-16 Niveles energéticos del Erblio con su correspondiente longitud de onda. [7]	21
Figura 1-17 Diferencia de emisión entre un láser convencional y uno aleatorio. [8]....	22
Figura 1-18 Esquema del montaje utilizado para la generación de un láser random mediante una de las microcavidades fabricadas.	22
Figura 1-19 - Resumen gráfico del funcionamiento de una red de difracción de Bragg. [9]	23
Figura 1-20 - Resumen gráfico del funcionamiento de una cavidad Fabry-Perot.....	24
Figura 1-21 - Variación de la fineza de una cavidad Fabry-Perot conjunto a la variación de su rango dinámico.	25
Figura 1-22 Interferómetro Mach-Zhender. [10]	26
Figura 1-23 Dibujo esquemático de un sensor Sagnac.....	26
Figura 1-24 Esquemático de las microcavidades fabricadas en este proyecto.....	28
Figura 2-1 Combinador y separador óptico.....	29
Figura 2-2 Multiplexor / Demultiplexor.....	30
Figura 2-3 Circulador óptico.	30
Figura 2-4 Aislador óptico comercial.....	31
Figura 2-5 Red de difracción de Bragg actuando como filtro.....	32
Figura 2-6 Medida de la variación de potencia respecto a la longitud de onda mediante el interrogador.....	34
Figura 2-7 FFT del espectro óptico de la señal correspondiente a una de las microcavidades en tiempo real.	34
Figura 2-8 Ejemplo de muestra obtenida por el reflectómetro LUNA OBR 4600 al analizar una de las microcavidades fabricadas.	35
Figura 3-1 Posicionamiento de las fibras para la primera fusión.	39
Figura 3-2 Aproximación de la fibra SMF a la HCF.	40
Figura 3-3 Fibra SMF y fibra HCF listas para la fusión.	40
Figura 3-4 Resultado esperado de una correcta primera fusión.....	41
Figura 3-5 Estabilización de la fibra a cortar mediante cortador de fibra óptica.	41
Figura 3-6 Diagrama esquemático de la estructura SMF-HCF-SMF.	42
Figura 3-7 Microcavidad óptica vista desde el microscopio electrónico.	43
Figura 3-8 Colocación del conjunto SMF-HCF	43
Figura 3-9 Resultado final de un correcto seguimiento del proceso de fabricación.	44
Figura 4-1 Respuesta espectral de la microcavidad T3F6 con el interrogador de sensores.	47
Figura 4-2 Respuesta espectral de la microcavidad T1F10 con el interrogador.	48
Figura 4-3 Espectro óptico de la fibra T3F7.....	49
Figura 4-4 Espectro óptico de la microcavidad T3F1.....	49
Figura 4-5 Espectro óptico de la microcavidad T2F1.....	50
Figura 4-6 Espectro óptico de la microcavidad T2F2.....	50

Figura 4-7 Espectro óptico de la microcavidad T3F1.....	51
Figura 4-8 Espectro óptico de la microcavidad T3F2.....	51
Figura 4-9 Espectro óptico de la microcavidad T3F4.....	52
Figura 4-10 Espectro óptico de la microcavidad T3F5.....	52
Figura 4-11 Espectro óptico de la microcavidad T3F6.....	53
Figura 4-12 Espectro óptico de la microcavidad T3F7.....	53
Figura 4-13 Espectro óptico de la microcavidad T3F8.....	54
Figura 4-14 Análisis de una microcavidad mediante el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600.	55
Figura 4-15 Microcavidad T1F1 analizada con reflectómetro de izquierda a derecha. .	56
Figura 4-16 Microcavidad T1f1 analizada con reflectómetro de derecha a izquierda. .	56
Figura 4-17 Configuración para la caracterización de la microcavidad al aplicar un aumento de elongación.....	57
Figura 4-18 Esquema del montaje utilizado para la generación de un láser con el que se caracterizó la sensibilidad a la elongación de las microcavidades.....	58
Figura 4-19 Emisión de la microcavidad T3F2.	58
Figura 4-20 Evolución de la respuesta frecuencial de láser al variar la elongación aplicado sobre la microcavidad T3F2.....	59
Figura 4-21 Ruido que dificulta la localización de máximos.....	59
Figura 4-22 Trazas procesadas de la variación del pico de emisión del láser al aumentar la elongación.....	60
Figura 4-23 Evolución de la longitud de onda en la que se sitúa el máximo en potencia para la fibra T3F2.....	60
Figura 4-24 Caracterización de la microcavidad T2F2, con una sensibilidad de 1.9 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.9886$	61
Figura 4-25 Caracterización de la microcavidad T2F1, con una sensibilidad de 1.9 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.9886$	62
Figura 4-26 Caracterización de la microcavidad T2F2, con una sensibilidad de 2.4 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.992$	63
Figura 4-27 Caracterización de la microcavidad T3F1, con una sensibilidad de 2.5 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2= 0.998$	63
Figura 4-28 Caracterización de la microcavidad T3F2, con una sensibilidad de 2.8 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.997$	64
Figura 4-29 Caracterización de la microcavidad T3F3, con una sensibilidad de 2.5 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.9979$	64
Figura 4-30 Caracterización de la microcavidad T3F4, con una sensibilidad de 0.7 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.998$	65
Figura 4-31 Caracterización de la microcavidad T3F5, con una sensibilidad de 2.3 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2= 0.9998$	65
Figura 4-32 Caracterización de la microcavidad T3F7, con una sensibilidad de 2.5 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2= 0.9996$	66
Figura 5-1 Proceso de fusión de una microcavidad.	68
Figura 5-2 Diagrama esquemático del sensor multiparamétrico propuesto.	68

Figura 5-3 Configuración experimental para las medidas de elongación y temperatura.	69
Figura 5-4 Espectro óptico del sensor multiparámetro.	70
Figura 5-5 Magnitud de la FFT del espectro de la figura 5-4.....	70
Figura 5-6 Variación de fase para las frecuencias espaciales seleccionadas como resultado de la variación de elongación y temperatura.	71
Figura 5-7 Variación de fase en función de la temperatura.....	72

Índice de tablas.

Tabla 1-1Relación entre dopantes y el rango de longitudes de onda que amplifican... 18	18
Tabla 4-1Pérdidas de inserción de las microcavidades fabricadas.	46
Tabla 4-2 Free Spectral Range y longitud de las microcavidades fabricadas.....	54
Tabla 4-3 Sensibilidades, longitud de onda de emisión y R2 de las microcavidades.....	66

Capítulo 0 - Introducción

En los últimos años, el uso de los sensores de fibra óptica ha aumentado considerablemente debido a sus numerosas ventajas frente a los sensores tradicionales, tales como su reducido tamaño, su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, su capacidad de detección remota o su alta sensibilidad.

Este proyecto se ha orientado principalmente hacia el estudio de los sensores de fibra óptica basados en interferómetros Fabry-Perot. Una vez estudiado y comprendido su comportamiento, se han fabricado una serie de sensores basados en microcavidades de fibra hueca, que se comportan como los interferómetros nombrados anteriormente.

La fabricación de estos sensores se ha realizado con el equipo disponible en el equipo de fotónica Teralab. Una vez perfeccionado el método de fabricación se ha descrito meticulosamente en este proyecto con el objetivo de poder seguir fabricando dichos sensores de cara al futuro por parte de otros investigadores y/o estudiantes.

Posteriormente, después de estudiar la instrumentación a utilizar, se han caracterizado dichos sensores de diferentes formas. Se han estudiado las pérdidas de inserción que tienen y el nivel de potencia reflejada que tienen lugar en su interior mediante el reflectómetro LUNA OBR 4600.

Además, se ha obtenido el espectro óptico de cada una de las microcavidades gracias a un interrogador de sensores comercial. Además, haciendo uso de este equipamiento, se han obtenido datos como el rango dinámico o el *Free Spectral Range* de las microcavidades, el cual permite conocer con exactitud el tamaño de estas estructuras.

Asimismo, mediante el interrogador de sensores y con ayuda de unos microposicionadores motorizados (MTS) controlados mediante un software desarrollado en el laboratorio, se han obtenido medidas que, con su posterior procesado, permiten conocer la sensibilidad a la elongación de cada microcavidad fabricada.

Como colofón de este trabajo fin de grado, se ha fabricado y estudiado experimentalmente un sensor multiparamétrico formado por una estructura multi-interferométrica para mediciones simultáneas de la elongación y la temperatura, basado en interferencias Fabry-Perot (FP) y guías reflectantes antirresonantes (AR).

Cabe destacar, que los resultados derivados de este trabajo experimental han sido enviados al congreso internacional *27th International Conference on Optical Fiber Sensors*, para su evaluación y posterior presentación en dicho congreso.

Capítulo 1 - Marco teórico.

En este apartado se explican brevemente los aspectos fundamentales que caracterizan los distintos tipos de fibra óptica, así como los mecanismos de emisión y absorción de la luz. Además, se detallan aspectos cuya comprensión es de suma importancia en este proyecto, tales como los tipos de amplificación óptica, los tipos de láseres y los principales sensores ópticos.

1.1 La fibra óptica.

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica y cilíndrica, capaz de guiar ondas electromagnéticas en el rango de las comunicaciones ópticas.

Esto, añadido a su gran capacidad de transmisión y su inmunidad a las interferencias electromagnéticas, la convierten en el medio ideal para las telecomunicaciones, transmitiendo la información en forma de luz.

La fibra óptica consta de dos zonas concéntricas principales, el núcleo en el interior, que es por donde, en la mayoría de los casos, viaja la mayor parte de la luz transmitida, y la cubierta, más externa. Los parámetros físicos que diferencian los distintos tipos de fibra son las dimensiones y el índice de refracción.

Tipos de fibra.

En función del número de modos guiados que se transmiten por la fibra óptica, diferenciamos fibras monomodo, o SMF según sus siglas en inglés (*Single Mode Fiber*), en las cuales solamente se transmite un único modo, y fibras multimodo o MMF, (*Multi Mode Fiber*), por las que se transmiten varios.

La mayoría de las fibras tienen el mismo diámetro para su cubierta, de alrededor de 125 micras. Es en el núcleo donde radican sus principales diferencias físicas ya que, en función de su tamaño y de la frecuencia a la que trabajen, albergarán uno o más nodos, diferenciando así entre fibras monomodo (SMF) y multimodo (MMF).

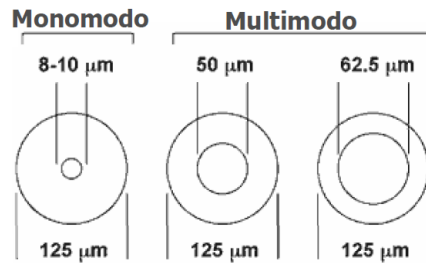


Figura 1-1 Diferencia entre diámetros de fibras monomodo y multimodo.

El núcleo de la fibra está caracterizado por su índice de refracción, ya que éste fija la constante de propagación de la luz. En las fibras multimodo, la evolución del índice de refracción distingue fibras de salto de índice, en las cuales el índice de refracción tanto del núcleo como del revestimiento son uniformes, con las fibras de índice gradual o gradiente de índice, en las que el índice de refracción del núcleo varía de forma gradual desde su centro hasta el límite con la cubierta.

Perfiles de índice de refracción

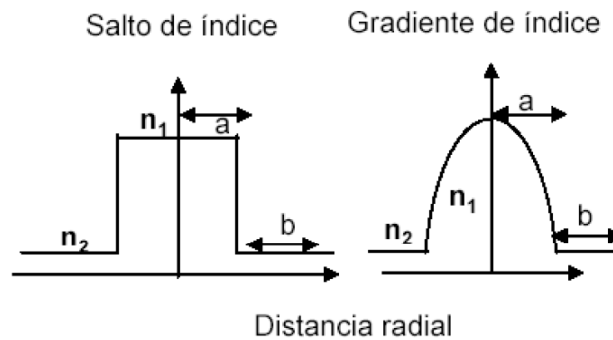


Figura 1-2 Variación del índice de refracción para fibras de salto de índice y gradiente de índice.

Una de las fibras utilizadas durante este trabajo fin de grado, son las llamadas fibras de núcleo hueco (o *Hollow Core Fiber* (HCF) según sus siglas en inglés). Esta es la fibra empleada para fabricar las microcavidades sometidas a estudio, cuyo proceso de fabricación queda explicado en el apartado 3.2.3 *Proceso de fabricación de las microcavidades*.

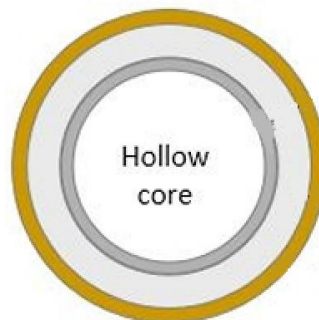


Figura 1-3 Vista frontal de una fibra hueca o HCF.

Para estas fibras HCF utilizadas, el índice de refracción del núcleo es el mismo que el del aire, al estar huecas.

Gracias a la diferencia de índice de refracción entre la cubierta de la fibra y su núcleo, la luz puede ser reflejada por la cubierta y por tanto transmitida a lo largo de ésta obedeciendo las leyes de Snell: cuando la luz incide en un interfaz entre dos medios con distinto índice de refracción parte se refleja y parte se difracta.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Siendo n_1 y n_2 los índices de refracción del núcleo y el revestimiento de la fibra, respectivamente.

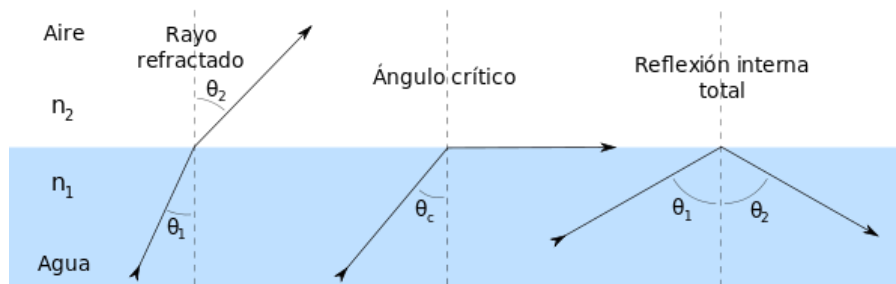


Figura 1-4- Variación del ángulo refractado en función del ángulo incidente.

Fundamentos de la emisión óptica.

Los fenómenos que explican el funcionamiento de los emisores de luz se basan en el estudio de las interacciones luz-materia, considerando que la luz está compuesta por una serie de partículas, llamadas fotones, que son partículas de masa cero que transportan energía electromagnética.

Los fotones presentan niveles de energía discretos. Al unirse para formar estructuras más complejas interactúan y los niveles de energía más altos pasan a formar bandas de energía separadas por bandas de energía prohibidas.

La última banda llena de electrones se denomina banda de valencia (BV), y la banda superior que estará o no ocupada se denomina banda de conducción (BC). La separación energética entre estas bandas se denomina *band gap* y determina las propiedades eléctricas del material, definiéndolo como conductor, semiconductor o aislante.

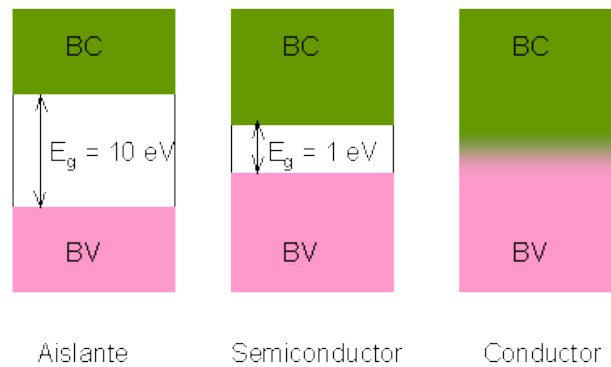


Figura 1-5 Bandas de energía.

Dentro de estas bandas energéticas se puede producir tres mecanismos básicos, y cada uno de ellos se aplica a la óptica de una forma.

- **Mecanismo de absorción.** Cuando un fotón incide en un material semiconductor, su energía es absorbida por éste, de forma que queda un estado de mayor energía y un electrón pasa de la banda de valencia a la banda de conducción.

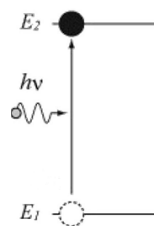


Figura 1-6 Explicación gráfica del fenómeno de absorción.

Este mecanismo se aplica a los fotodetectores, que son capaces de detectar cuando la luz incide sobre ellos.

- **Mecanismo de emisión espontánea.** Cuando un electrón pasa de la banda conductora a la banda de valencia, el sistema pasa a un estado de menor energía y se genera un fotón con fase y dirección de propagación arbitrarias.

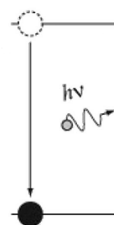


Figura 1-7 Explicación gráfica de la emisión espontánea.

Este mecanismo se usa para generar luz mediante diodos LED. La luz emitida por un diodo LED es incoherente, dada la arbitrariedad de la fase y la dirección de propagación de los electrones que genera.

- **Mecanismo de emisión estimulada.** Cuando un fotón incide sobre el material, un electrón pasa de la banda conductora a la banda de valencia, donde se recombina con un hueco. Esto genera un fotón de fase y dirección de propagación idénticas al incidente.

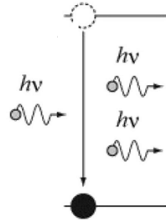


Figura 1-8 Explicación gráfica del fenómeno de emisión estimulada.

Este mecanismo es el que usan los láseres para emitir luz. El uso de la amplificación por emisión estimulada hace que predomine la luz coherente (electrones con igual fase y dirección de propagación) sobre la incoherente.

Limitaciones de la fibra óptica.

Como todos los medios de transmisión, la fibra óptica también tiene sus limitaciones respecto a su longitud. Dos de estas limitaciones pueden resultar críticas: la pérdida de potencia debido a las pérdidas que supone la transmisión de energía por cualquier medio, y la dispersión de los pulsos de luz, ocasionada por el ensanchamiento de éstos dentro de la fibra.

Existen dos tipos de atenuación: intrínseca y extrínseca:

- **Atenuación intrínseca:** Es inherente a la utilización de sílice como en la fabricación de la fibra, y por tanto es inevitable, el propio material tiene picos de absorción localizados en la zona infrarroja para longitudes de onda altas y en la zona ultravioleta para las más bajas. Las imperfecciones en el índice de refracción y geometrías locales (de tamaño menor a λ) también hacen que la luz incidente se disperse espacialmente, y por tanto provocan una pérdida de potencia.

- **Atenuación extrínseca:** Se debe a errores derivados del proceso de fabricación y manipulación de la fibra.

Si durante el proceso de fabricación había restos de humedad en el ambiente, aparecerán en el interior de la fibra iones OH^- , que generarán pico de absorción perjudicial en 1380 nm. A la hora de manipular la fibra, curvar la fibra más de lo recomendado por el fabricante provocará fugas de potencias desde el núcleo debido a macro-curvaturas, al igual que una torsión y estiramiento inadecuados causarán el mismo efecto por micro-curvaturas.

Diferenciamos tres tipos de dispersión fundamentales: intermodal, intramodal y por modo de polarización.

Efectos no lineales en la fibra óptica.

Cuando se transmite información a altas velocidades (mayores a 2,5 Gbps), los pulsos son cortos y con alta potencia de pico, por lo que la intensidad óptica aumenta, llegando a excitarse el *régimen no lineal*, si además la transmisión se realiza a una larga distancia, los cambios de fase se acumulan.

En este *régimen no lineal*, tres conceptos importantes cambian radicalmente respecto al *régimen lineal*:

- La potencia de salida no es proporcional a la potencia de entrada.
- El cambio de fase no es proporcional al índice de refracción.
- Se generan nuevas longitudes de onda y las distintas portadoras interactúan entre sí, generando diafonía y distorsión.

En este *régimen no lineal*, se distinguen diferentes efectos no lineales:

- *Scattering Raman Estimulado, SRS*: Cuando la potencia de entrada supera cierto valor umbral, conocido como *potencia umbral*, P_u , se produce un transvase de potencia desde el modo guiado a campo difundido, se produce por la interacción de la luz con fonones ópticos.
- *Scattering Brillouin Estimulado, SBS*: Es similar al Scattering Raman, solo que en este caso la luz interactúa con un fonón acústico.
- *Automodulación de fase, SPM*: Debido al efecto Kerr, cuando un pulso de suficiente potencia se propaga por la fibra experimenta un cambio de fase proporcional a dicha potencia. La SPM equivale a introducir un chirp, con lo que, en presencia de dispersión, el pulso se ensanchará y, en general, lo hará más rápidamente que si no hubiese automodulación de fase.
- *Modulación cruzada de fase, XPM*: Debido al efecto Kerr, el índice de refracción de un canal se ve afectado por las potencias del resto de canales.
- *Mezclado de cuatro ondas, FWM*: Debido al efecto Kerr, se generan nuevas ondas ópticas a frecuencias $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$, siendo las frecuencias i, j, k , tres componentes de un sistema de N portadoras ópticas.

La energía transmitida a las nuevas longitudes de onda se traduce en una pérdida de potencia en los canales transmitidos y también produce diafonía.

Láseres de fibra óptica.

En este apartado se explican algunos de los fundamentos de los láseres usados en la mayoría de las aplicaciones ópticas, así como los amplificadores y las posibles configuraciones de los láseres, todos ellos de fibra óptica.

Fundamentos físicos de la emisión láser.

Como se ha explicado en el subapartado *fundamentos de la emisión óptica*, un láser emite luz cuyos electrones tienen igual fase y dirección de propagación, es decir, luz coherente.

Para ello, se necesita que la emisión estimulada domine sobre la espontánea, por lo que será necesario un sistema de realimentación positiva, para lograrlo, se puede utilizar, entre otras cosas, dos espejos que reflejen la luz y puedan formar cavidades entre ellos, de forma que ésta sufra repetidas reflexiones en el interior de la cavidad.

Históricamente, la primera en usarse fue la cavidad Fabry-Perot, que está constituida por dos espejos planos que contienen un material semiconductor.

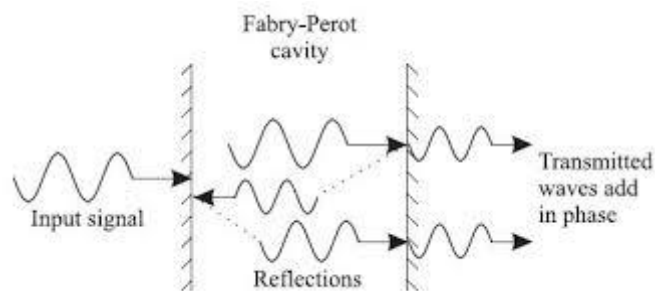


Figura 1-9 Esquema de una microcavidad Fabry-Perot.

Además, a la hora de obtener la ganancia necesaria, se debe producir una inversión de población (mayor cantidad de átomos excitados que átomos con menor energía), que ocurrirá sólo si la densidad de portadores inyectados supera un valor umbral llamado densidad de transparencia.

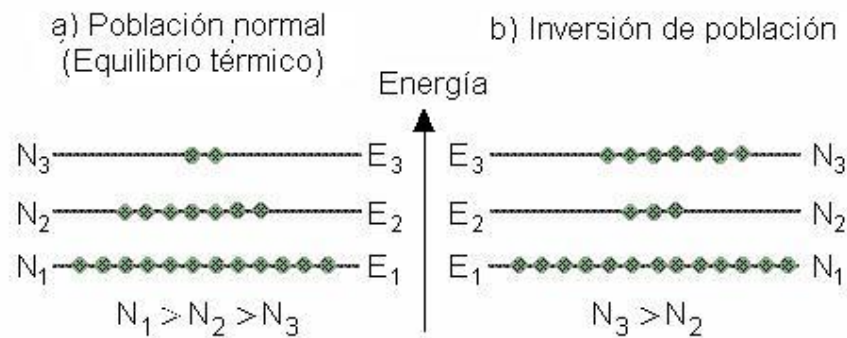


Figura 1-10 Esquema de la inversión de población.

A continuación, se explican las dos principales topologías existentes en los láseres de fibra óptica.

Topología de láser en línea

Consiste en realimentar continuamente el haz de luz mediante la reflexión en dos espejos situados en los extremos del láser.



Figura 1-11 Configuración básica de un láser de fibra óptica.

Estos espejos pueden ser implementados mediante circuladores o redes de difracción de Bragg entre otras. En este último caso, éstos también actuarían como filtro para amplificar únicamente la longitud de onda deseada.

Topología de láser en anillo

Una de las configuraciones clásicas de láseres en anillo se muestra en la Figura 1-12. En esta configuración, se conecta un láser de bombeo a un WDM, de forma que éste aporta la potencia necesaria al medio activo. De esta forma obtendremos la curva de ganancia necesaria para implementar nuestro amplificador.

Seguido, se coloca un circulador (o un acoplador óptico) que dirige toda esta potencia a una red de Bragg. Este FBG selecciona la longitud de onda que se desea amplificar y posteriormente se redirige a una tercera salida gracias al circulador, que va conectado a un acoplador del cual se obtiene la señal de salida amplificada.

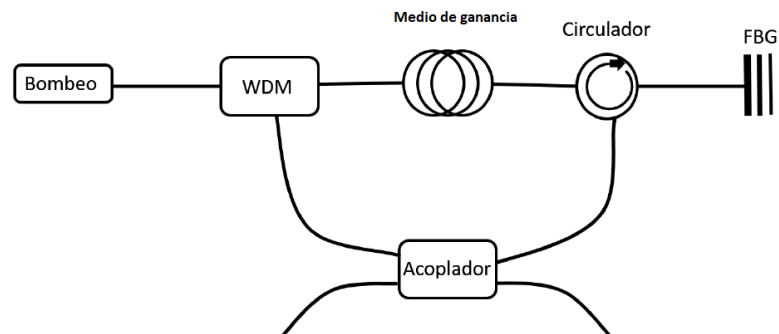


Figura 1-12 - Configuración de láser con filtrado mediante WDM. [1]

1.2 Amplificación óptica.

Para solventar las limitaciones en términos de potencia en muchos de los sistemas de comunicaciones resulta necesario el uso de amplificadores ópticos, cuyo objetivo es aumentar la potencia de una señal óptica sin alterar, en la medida de lo posible, el resto de sus características.

Hay dos tipos de amplificadores ópticos, en primer lugar, están los que amplifican la luz aprovechando los efectos no lineales de la fibra, tales como los amplificadores basados en el efecto Raman o Brillouin. El otro tipo de amplificadores se basa en amplificar la luz a medida que se transmite por una fibra de características especiales, como son las fibras dopadas con tierras raras.

Amplificación mediante el dopaje con tierras raras.

Indiferentemente del dopante, el funcionamiento de este tipo de amplificadores es el mismo; el bombeo óptico a longitudes de onda concretas produce una inversión de población en el núcleo de la fibra, de forma que los iones del medio dopante pasan del estado fundamental al excitado, provocando así emisión estimulada.

Esta inversión de población se produce a lo largo de toda la fibra hasta que la atenuación implícita en esta lo impida. Se define así el término longitud óptima, que se trata de la longitud que deberá tener la fibra dopada para que tenga efectos de amplificación a lo

largo de todo su recorrido, sin llegar a tener exclusivamente atenuación en ningún punto de este.

Resulta lógico pensar que, si la fibra tiene altas concentraciones de dopante, se podrá reducir su longitud y por tanto ahorrar en espacio y riesgos de atenuación, sin embargo, las altas concentraciones de dopante provocan interacciones entre los iones de este que pueden llegar a limitar la inversión de población, por lo resulta habitual encontrar fibras largas y con baja concentración de dopante. [2]

A la hora de elegir la tierra rara con la que se dopa la fibra, será necesario conocer la longitud de onda en la que se desea trabajar, ya que cada una amplifica la señal dentro de un determinado rango, en la tabla 1-1 se muestra cada dopante con su rango de ganancia correspondiente.

Dopante	Rango de λ que es amplificado (nm)
Praseodimio (Pr ³⁺)	1280-1340
Tulio (Tm ³⁺)	1450-1520
Erbio (Er ³⁺)	1500-1600

Tabla 1-1 Relación entre dopantes y el rango de longitudes de onda que amplifican.

Dada la baja atenuación que otorga la tercera ventana (1550 nm) en comunicaciones ópticas, uno de los dopantes más utilizados es el erbio.

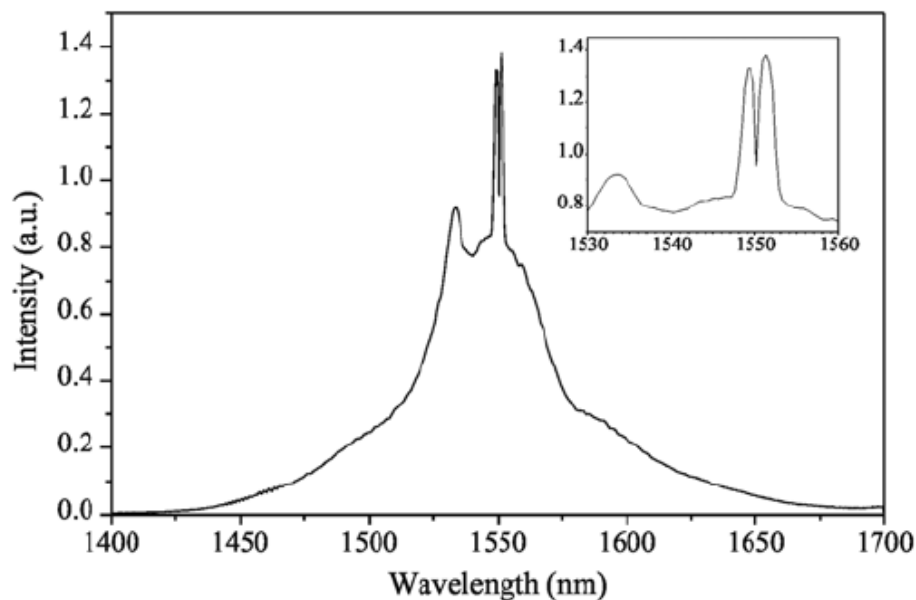


Figura 1-13 Curva de ganancia producida por una fibra dopada con Erbio donde se genera la emisión de dos láseres alrededor de los 1550nm. [3]

Amplificación basada en el efecto Raman.

Este tipo de amplificación se basa en la dispersión Raman. Cuando un fotón incide sobre la fibra óptica, este absorbe parte de su energía, lo cual provoca una vibración que hace que la luz existente se radie en todas las direcciones, sin embargo, esta nueva luz es de menor energía que la incidente, por lo que tendrá una longitud de onda mayor.

Para conseguir la amplificación en la longitud de onda deseada, se radia la fibra con dos longitudes de onda diferentes, una de ellas es la longitud de onda de Stokes, que es la longitud de onda que, al ser bombeada, produce una amplificación en la otra longitud de onda incidente en el centro de dispersión, de este modo las señales radiadas al chocar con el centro de dispersión *scattering*, provocan que todas las ondas dispersadas estén en fase. [4]

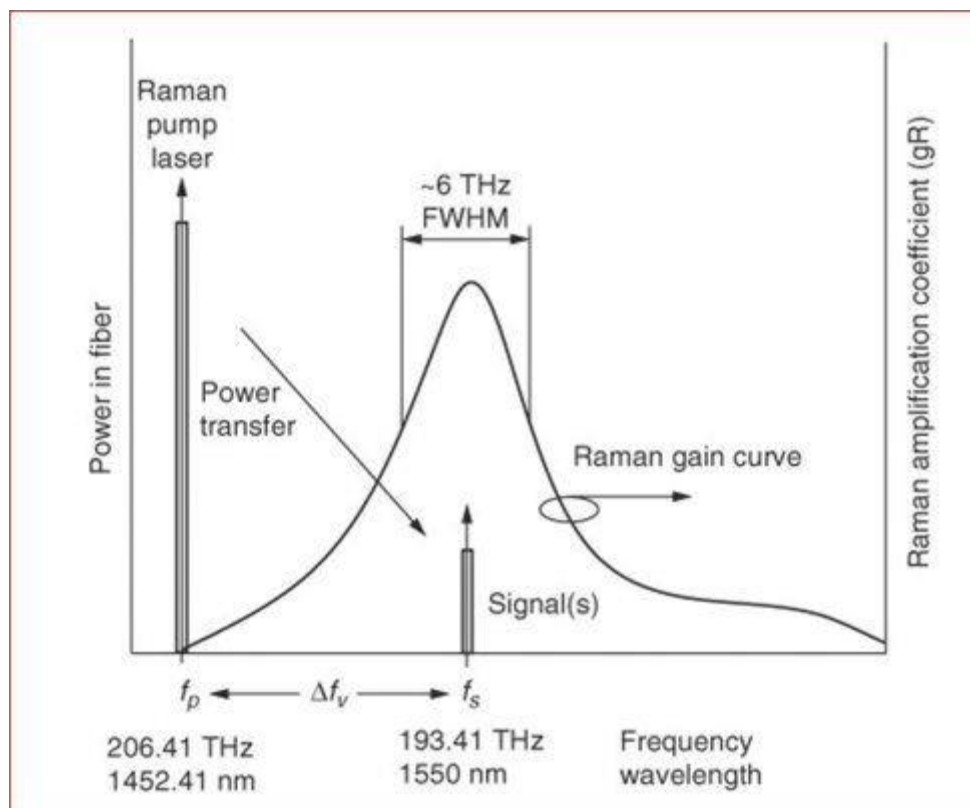


Figura 1-14 Amplificación Raman en 1550 nm conseguida mediante un bombeo en 1452.41 nm

Dichas ondas en fase se propagan en ambos sentidos de la fibra, este efecto se conoce como *backscattering*, y provoca un ruido que se va acumulando cada vez que se llega al siguiente centro de dispersión, ya que la señal con el fotón extra y el bombeo genera nuevos fotones. Algunos de estos fotones se propagarán en el sentido contrario al deseado, dicho proceso se repite constantemente ya que cualquier irregularidad de la fibra puede ser considerado un centro de dispersión.

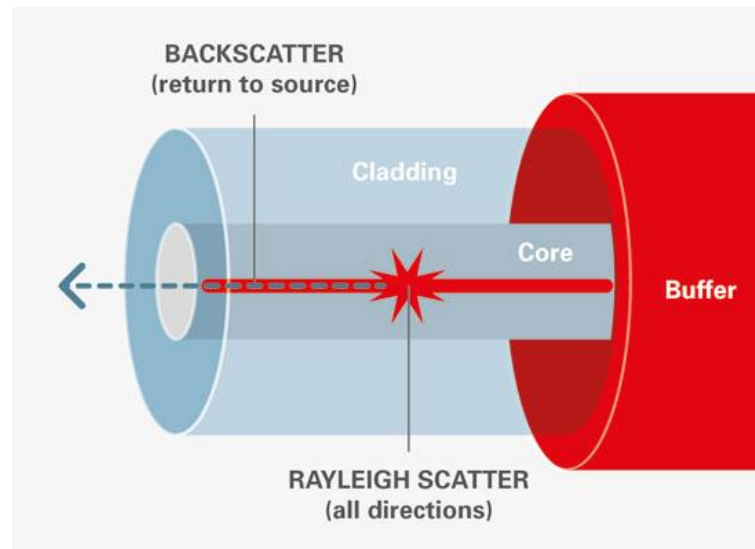


Figura 1-15 Backscattering en fibra óptica. [5]

Es importante controlar la polaridad de la señal a amplificar y el bombeo, dado que si estas tienen polaridades paralelas la amplificación es máxima, y si son ortogonales esta puede llegar incluso a anularse. Sin embargo, dada la complicación que supone el control de la polarización, se suele optar por introducir ambas señales con polarización aleatoria de forma que, aunque la amplificación no sea máxima, tampoco será nula, sino un caso intermedio.

1.3 Láseres de fibra óptica.

Son láseres que utilizan la fibra óptica como medio de ganancia, aunque también hay casos en los que se usan amplificadores ópticos de semiconductor y/o resonadores de fibra.

Estos láseres comparten dos elementos comunes, un bombeo y un medio de ganancia de fibra óptica.

Láseres de fibra dopada con Erblio.

Su método de funcionamiento se basa en la emisión estimulada explicada en el apartado 2.2.1, con la peculiaridad de que el núcleo de la fibra ha sido dopado con iones de Erblio, los cuales facilitan enormemente la emisión estimulada. Resulta interesante destacar la región situada en torno a los $1,55 \mu\text{m}$, dado que coincide con la zona de bajas pérdidas de las fibras de sílice, que son las utilizadas en las comunicaciones ópticas.

Los niveles de energía correspondientes a la capa de valencia y la capa conductora (E1 y E2) para este tipo de láseres son los correspondientes a las longitudes de onda de 0.98 y 1.48 μm , de forma que cuando se acumulan electrones en E2 se invierte la población entre E2 y E1, lo cual deriva en emitir en la longitud de onda correspondiente a la diferencia de estos niveles de energía, que es de 1550 nm para una diferencia energética de 0.80 eV. [6]

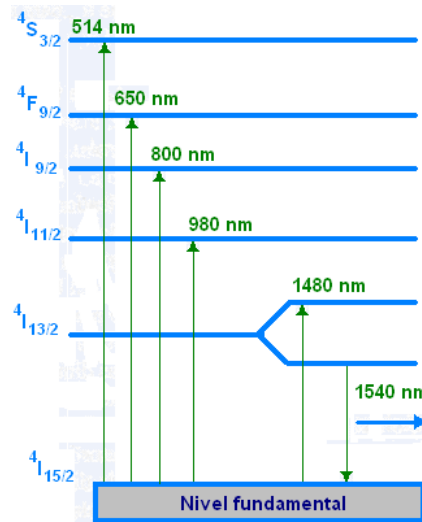


Figura 1-16 Niveles energéticos del Erblio con su correspondiente longitud de onda. [7]

Láseres basados en amplificación Raman.

Al igual que los láseres basados en la amplificación mediante el dopaje con tierras raras, basan su funcionamiento en amplificar la luz a medida que se propaga por la fibra, solo que en este caso la amplificación se produce gracias al fenómeno explicado anteriormente.

Frente a los láseres basados en amplificación por fibra dopada con Erblio, la amplificación Raman cuenta con un mayor ancho de banda y menor ruido, sin embargo, requiere de altas potencias de bombeo.

Láseres random.

Los láseres aleatorios o también llamados láseres *random* se caracterizan por proporcionar retroalimentación óptica mediante la dispersión de partículas, al igual que los láseres convencionales. Se requiere de un medio de ganancia para la amplificación óptica, sin embargo, no se utilizan superficies reflectantes ni estructuras periódicas,

pues la luz está confinada en una región activa por elementos difusores que pueden o no distribuirse espacialmente dentro del medio de ganancia.

Dichos láseres utilizan uno o varios reflectores cuyos puntos de reflexión están dispersos espacialmente, de forma que la luz rebota aleatoriamente entre ellos, obteniendo gran potencia de emisión con una gran estabilidad.

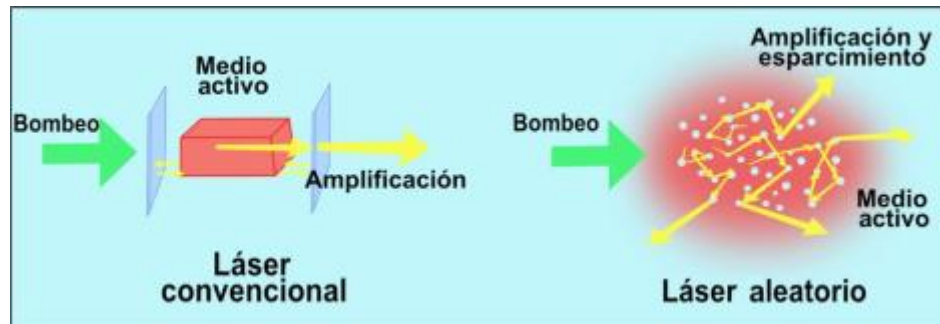


Figura 1-17 Diferencia de emisión entre un láser convencional y uno aleatorio. [8]

Al tener un método de amplificación dependiente de cada material, la emisión también será dependiente de este.

En este proyecto, se han utilizado las microcavidades fabricadas para generar un láser *random* mediante el montaje que se muestra en la Figura 1-18.

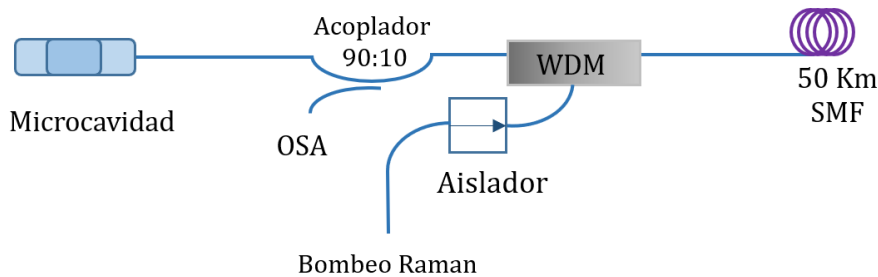


Figura 1-18 Esquema del montaje utilizado para la generación de un láser *random* mediante una de las microcavidades fabricadas.

En dicho montaje se ha utilizado una fuente de bombeo Raman para generar amplificación de la señal óptica en el carrete de fibra SMF de 50 kilómetros situado en un extremo del esquema. Para evitar que las posibles reflexiones producidas por la fibra dañen la fuente de bombeo, se ha colocado un aislador que evita que la luz vaya en dos sentidos, de manera que la fuente de bombeo quede protegida en de las posibles reflexiones que se originen.

Este esquema da lugar a una emisión láser situada a una determinada longitud de onda, la cual depende del tamaño de la microcavidad utilizada.

1.4 Sensores ópticos.

En este capítulo se describen los tipos de sensores que emplean tecnologías ópticas más destacados, así como su principio físico de funcionamiento y su uso en este proyecto.

Una de las principales ventajas del uso de los sensores ópticos para medir magnitudes físicas es su compacto tamaño en comparación con otros sensores no ópticos de sensibilidades similares. Su principal cualidad es la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, dado que la luz circulante por una fibra hace caso omiso de cualquier interferencia electromagnética sea cual sea su potencia.

Sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBGs).

Una red de difracción de Bragg es una microestructura que tiene una variación espacial de su índice de refracción, de forma que generalmente este aumenta conforme avanzamos espacialmente.

Dado su reducido tamaño, de unos pocos milímetros, es fácilmente integrable en una fibra óptica, de forma que en cierto punto de su longitud varíe gradualmente el índice de refracción de su núcleo.

Una red de Bragg es, en resumidas cuentas, un filtro de banda estrecha, pues dada su estructura resonante actúa como un espejo selectivo en función de la longitud de onda. Esto significa que si se inyecta una fuente de luz de banda ancha en una fibra con una red de difracción integrada la red solo reflejará luz con una anchura espectral muy reducida, centrada en torno a la longitud de onda correspondiente al periodo e índice de difracción de la red de difracción. Esta longitud de onda se conoce como longitud de onda de Bragg, λ_b .

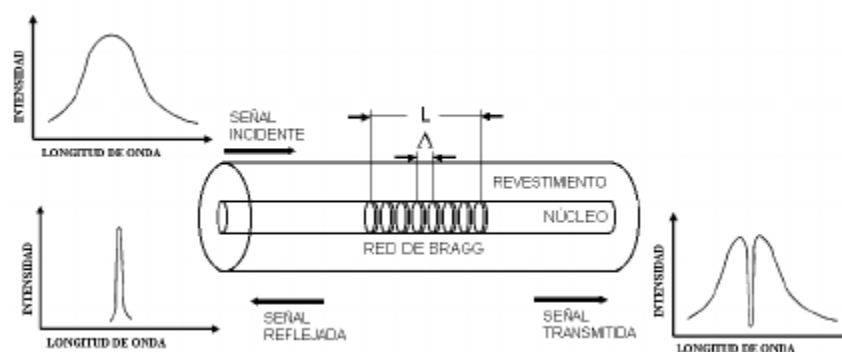


Figura 1-19 - Resumen gráfico del funcionamiento de una red de difracción de Bragg. [9]

Como se aprecia en la Figura 1-19, se inserta una fuente de banda ancha como señal incidente, de forma que la red de difracción refleja un pico aislado en una determinada longitud de onda. Así, la señal transmitida resulta ser la señal incidente menos la banda rechazada.

Una FBG es sensible tanto a la deformación como a los cambios de temperatura, pues si, por ejemplo, esta se estira o comprime, cambiará el índice de refracción de la microestructura, de forma que genera un cambio en la longitud de onda de Bragg proporcional la deformación aplicada.

El silicio es también sensible a los cambios de temperatura, pues éstos alteran el periodo de la microestructura, por lo que, de igual manera, la variación de temperatura provoca una cierta modificación de λ_b .

Sensores basados en cavidades Fabry-Perot.

Como se ha explicado en el apartado *funcionamiento del láser de fibra óptica*, una cavidad Fabry-Perot consta de dos espejos reflectantes, paralelos y separados una distancia L , tal y como se muestra en la Figura 1-20.

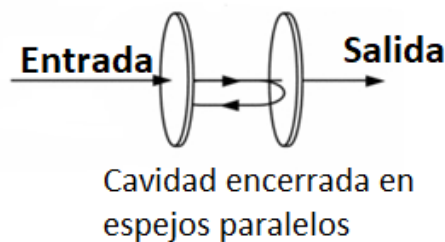


Figura 1-20 - Resumen gráfico del funcionamiento de una cavidad Fabry-Perot.

Un sensor basado en una cavidad Fabry-Perot funciona de la siguiente forma: cuando entra una longitud de onda determinada en la cavidad, esta rebota entre las paredes paralelas repetidas veces, lo cual provoca múltiples reflexiones de la luz en el interior de la cavidad. Cada una de estas reflexiones guarda una diferencia de fase acumulada con la reflexión anterior a ella, que se va acumulando sucesivamente.

Cada reflexión en el interior de la cavidad cuenta con una fase característica. Así, reflexiones de distinto orden, pero misma fase, provocarán una interferencia constructiva, que se traduce en una mayor potencia para una determinada longitud de onda.

De igual forma, también tendrán lugar interferencias destructivas en el interior de la cavidad, en las longitudes de onda con este tipo de interferencias aparecerán valles, acentuando así la pendiente próxima a los picos generados con las interferencias constructivas.

Estos valles y picos hacen que la cavidad actúe como un filtro, de forma que cada una tendrá unos picos a unas longitudes de onda concretas, en función de su longitud e índice de refracción.

La *fineza* es un parámetro indicador de la calidad de la cavidad, y relaciona la separación entre picos consecutivos con la anchura de las franjas a mitad de su amplitud de pico máxima, este parámetro está directamente relacionado con el rango dinámico, de forma que conforme uno aumenta el otro también lo hace.

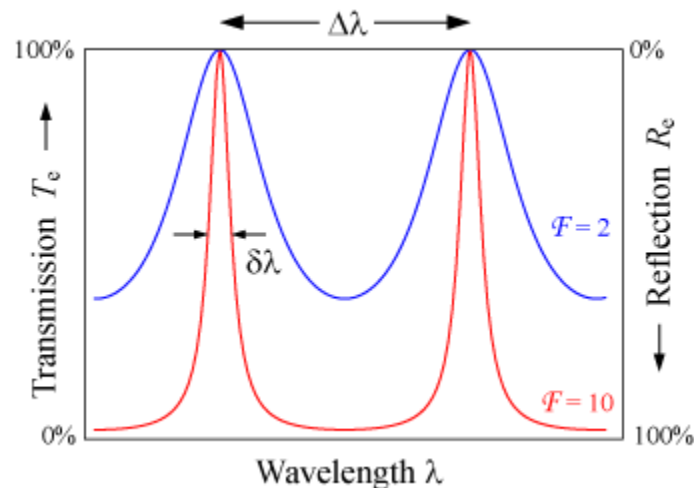


Figura 1-21 - Variación de la fineza de una cavidad Fabry-Perot conjunto a la variación de su rango dinámico.

En la Figura 1-21 se aprecia como una mayor *fineza* lleva implícito un aumento del rango dinámico.

A la hora de usarse como sensor, la cavidad es expuesta a la magnitud física que desea medirse, de forma que ésta puede hacer variar tanto el espaciado entre los reflectores, como el índice de refracción de la cavidad. La variación de estos parámetros provoca un desplazamiento de los picos proporcional a la magnitud aplicada, de modo que ésta pueda ser caracterizada.

Sensores basados en interferómetros de fibra óptica.

Su fundamento teórico es el mismo que en los dos tipos de sensores mencionados anteriormente, una magnitud física modifica la luz que viaja por la fibra a la que se aplica, de forma que modifica parámetros como la amplitud o fase de esta, permitiendo así la caracterización de la magnitud.

Existen varios tipos de sensores basados en interferómetros de fibra óptica, tales como el interferómetro Mach-Zhender, el interferómetro Sagnac, el interferómetro Fizeau o el interferómetro Fabry-Perot, que, dada su estabilidad, facilidad de implementación y estructura compacta, ha sido protagonista de múltiples estudios de sensores físicos, biológicos y químicos en los últimos años.

Los interferómetros Mach-Zhender, están compuestos por una guía de onda óptica que se divide en dos ramas, una de ellas funciona como brazo de referencia y la otra, que tiene un sensor, como brazo de detección. Después, las dos ramas se vuelven a unir de forma que la diferencia de fase entre ambos brazos produce una modulación de intensidad.

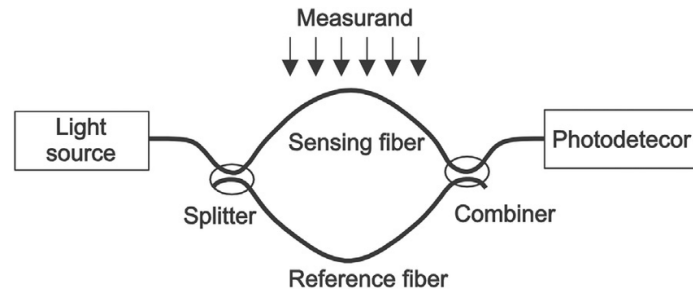


Figura 1-22 Interferómetro Mach-Zhender. [10]

Los interferómetros Sagnac, cuyo esquemático se muestra en la Figura 1-23, están compuestos por un acoplador que divide una señal óptica de entrada, de forma que se propaga en direcciones opuestas a lo largo de un bucle. Si ese bucle gira, se produce un cambio de fase entre los campos propagándose en sentidos opuestos, y, por tanto, una interferencia en el acoplador. [11]

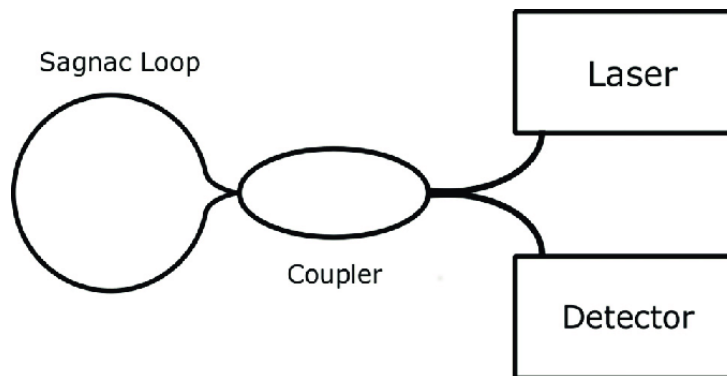


Figura 1-23 Dibujo esquemático de un sensor Sagnac.

Las microcavidades huecas fabricadas en este proyecto, funcionan como un interferómetro Fabry-Perot, de forma que cuando la señal óptica las atraviesa, ésta sufre múltiples reflexiones con diferente fase cada una. Así, se forma un conjunto de valles y picos característico de cada microcavidad. Dicho conjunto se puede desplazar en función de la elongación aplicada, ya que esta modifica la longitud de la microcavidad, de modo que se puede determinar la tensión aplicada en función del desplazamiento producido.

Sensores basados en microcavidades.

Recientemente, se ha demostrado que los sensores basados en microcavidades pueden mostrar una sensibilidad a la elongación mayor que los sensores tradicionales basados en FBGs [12] [13]. En este proyecto, se han fabricado dichas microcavidades para su uso como sensores, y para ello, se ha estudiado su funcionamiento teórico y experimental.

En este proyecto se han fabricado las microcavidades mediante fibra HCF. El proceso de fabricación queda detallado en el capítulo 3, Proceso de fabricación.

Los parámetros de las microcavidades son altamente dependientes de su tamaño, de forma que es importante conocer la relación entre su longitud y dichos parámetros.

$$FSR = \frac{\lambda_m * \lambda_m + 1}{2 * L * n_0} \quad (1)$$

La ecuación (1) muestra la relación entre el *Free Spectral Range* anteriormente comentado y la longitud de la microcavidad [14].

Donde L corresponde con la longitud de la microcavidad, n_0 con el índice de refracción del aire en el interior de la microcavidad (que equivale a 1), m con el orden del pico estudiado, y λ_m con la longitud de onda de resonancia, que se obtiene de la siguiente fórmula.

$$\lambda_m = \frac{2L}{m} * n_0 \quad (2)$$

Relacionando las ecuaciones (1) y (2), es posible determinar el tamaño exacto de la microcavidad conociendo el FSR, dato que corresponde con la distancia que hay entre los valles consecutivos del espectro obtenido con el interrogador.

Además, la longitud de la microcavidad también determina si ésta se comportará como un interferómetro Fabry-Perot o como una guía reflectante antirresonante (AR). En el primer caso, la microcavidad será únicamente sensible a la elongación, mientras que, si se comporta como una guía reflectante AR, será también sensible a la temperatura.

Para que la microcavidad se comporte como un interferómetro FP, su longitud deberá ser inferior a la denominada *Longitud crítica* (L_c), que se calcula mediante la ecuación (3). En caso de que la longitud de la microcavidad sea superior a esta longitud crítica, esta se comportará como una guía reflectante AR.

$$L_c = \sqrt{n_0^2 + n_2^2 - n_1^2} \left(\frac{r}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} + \frac{2d}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \right) \quad (3)$$

En dicha ecuación (3), d corresponde con el espacio entre el límite del núcleo de la fibra hueca y el límite de su la cubierta, r es el radio del núcleo de la fibra hueca y n_0 , n_1 y n_2

son los índices de refracción del aire, el núcleo y la cubierta de la fibra, que corresponden con los valores 1, 1.449 y 1.443 respectivamente.

El esquemático de la Figura 1-24 muestra dos microcavidades de distinta longitud en serie, una mayor a la longitud crítica y otra menor.

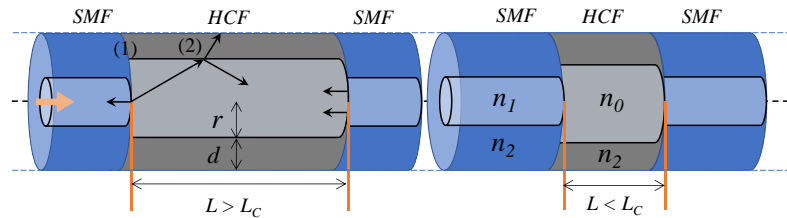


Figura 1-24 Esquemático de las microcavidades fabricadas en este proyecto.

Debido a la reflexión de Fresnel, se genera una interferencia Fabry-Perot (FP) cuando la luz introducida es parcialmente reflejada en el punto (1) (ver Figura 1-24), o lo que es lo mismo, entre las interfaces entre las fibras SMF y HCF. Después el haz de luz se propaga con un cierto ángulo y, si la microcavidad es suficientemente larga, entra en la cubierta de la fibra hueca (indicado en el punto (2) de la Figura 1-24). En este punto la estructura puede verse como un interferómetro FP a lo largo de la dirección longitudinal, debido a que las interferencias entre el aire y la sílice se comportan como dos superficies reflectantes. [14]

Después del primer interferómetro Fabry-Perot, las ondas de luz cuyas longitudes de onda no cumplan la condición de resonancia serán guiadas hasta el segundo interferómetro, el de mayor longitud. Aquí, la interferencia obtenida es la correspondiente a una estructura clásica SMF-MM-SMF [15]. En nuestro caso, el guiado de la reflexión antirresonante (AR) ocurre en la fibra hueca, actuando como una sección de fibra multimodo (MM).

Capítulo 2 - Instrumentación.

En este apartado se presenta una breve introducción sobre los dispositivos utilizados tanto para realizar las microcavidades fabricadas como la instrumentación utilizada para su caracterización.

2.1 Dispositivos ópticos.

La necesidad de manejar la luz a lo largo de su recorrido desde la fuente al receptor condicionó la aparición de dispositivos electroópticos, tanto activos como pasivos, que permitieran manejar la señal óptica con facilidad. En este apartado se describen algunos de los principales dispositivos empleados en la realización de este proyecto.

Acoplador óptico.

Los acopladores ópticos son dispositivos pasivos que permiten dividir o combinar la potencia óptica. Pueden tener un número variable de puertas de entrada o de salidas.

En el caso de que tengan varias entradas y una sola salida, se denominan combinadores ópticos, y si por el contrario tienen una sola entrada, separadores (*splitter*).

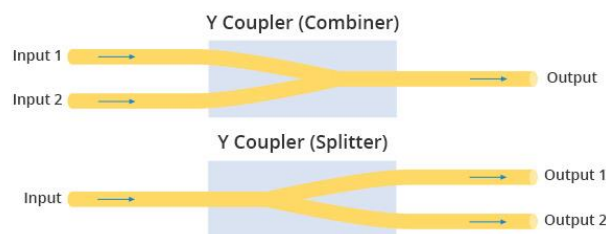


Figura 2-1 Combinador y separador óptico

Multiplexor por división en longitud de onda (WDM).

Como su propio nombre indica, permite multiplexar o demultiplexar señales ópticas, ya que son dispositivos bidireccionales. La multiplexación permite transmitir varias portadoras ópticas de distintas longitudes de onda sobre una misma fibra óptica, y la demultiplexación nos permite separar señales que viajen también juntas sobre una única fibra.

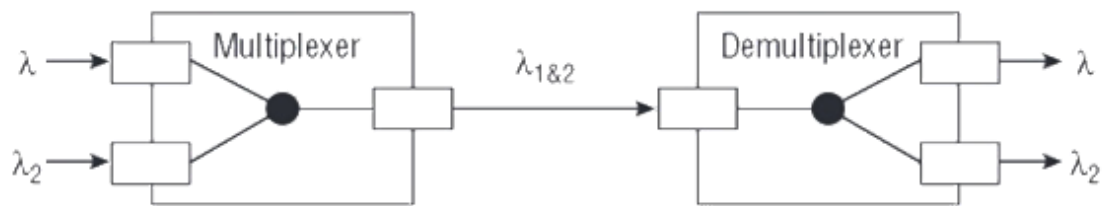


Figura 2-2 Multiplexor / Demultiplexor.

Circulador óptico.

El circulador óptico es un dispositivo pasivo con varios puertos cuya funcionalidad es encaminar la luz entrante al siguiente puerto. Así, la luz incidente por el puerto 1 será encaminada al puerto dos y la introducida por el puerto 2 se encaminará al puerto 3. Cabe destacar que la última y primera entrada se encuentran aisladas, por lo que no será posible encaminar la luz del puerto 3 al 1 (si se trata de un circulador como el de la figura siguiente, de 3 puertos)

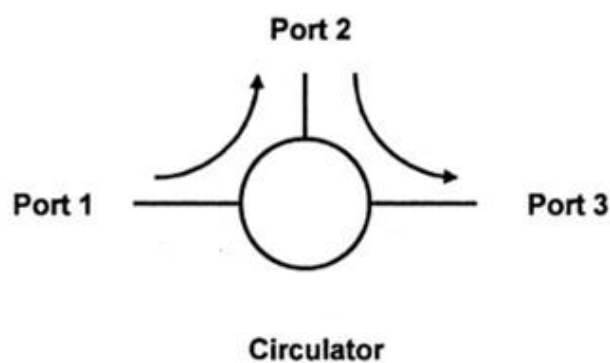


Figura 2-3 Circulador óptico.

Aislador óptico

Los aisladores ópticos son dispositivos pasivos que transmiten la luz en una sola dirección y son realmente útiles para evitar que la luz alcance elementos altamente sensibles, como las fuentes ópticas, debido a reflexiones indeseadas.



Figura 2-4 Aislador óptico comercial.

Red de difracción de Bragg (FBG).

Las *redes de difracción de Bragg*, conocidos como FBG debido a sus siglas en inglés, son unos elementos basados en microestructuras fotónicas sobre fibra óptica que actúan como filtro paso banda estrecho en el dominio frecuencial, es decir, en longitudes de onda [2].

La componente rechazada por esta banda no es dispersada sino reflejada, así, si tenemos un espectro completo a la entrada de la red, a su salida tendremos ese espectro menos la banda de rechazo y a la entrada tendremos la banda rechazada en sentido de contra propagación, como se muestra en la Figura 2-5.

Para su funcionamiento es necesaria un patrón de variación del índice de refracción del núcleo periódico, lo cual se consigue típicamente usando fibra sensibilizada a radiación ultravioleta y máscaras de fase.

Este método emplea un elemento conocido como máscaras de fase, el cual crea una modulación especial en el haz de radiación ultravioleta. Así, al colocar una fibra sobre una máscara de fase, en el núcleo de la fibra quedará marcado un patrón de difracción el núcleo con periodicidad en función de la propia periodicidad de la máscara de fase.

Se usan habitualmente como sensores, pues la sensibilidad de la banda de rechazo frente a parámetros físicos como la temperatura o la tensión es sumamente elevada, además de en sistemas de láseres, que, combinados con los elementos antes vistos, permiten crear sistemas de láseres de fibra de una o más longitudes de onda combinadas.

Dado su reducido tamaño, de unos pocos milímetros, es fácilmente integrable en una fibra óptica, de forma que en cierto punto de su longitud varíe gradualmente el índice de refracción de su núcleo.

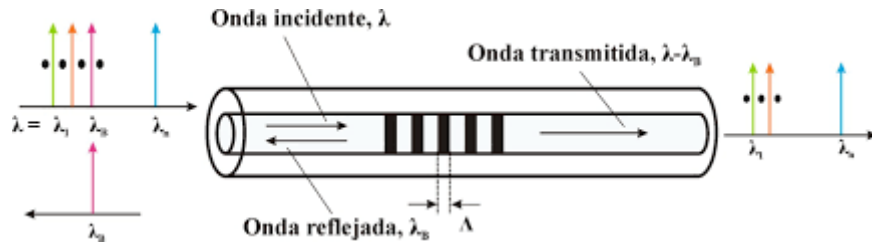


Figura 2-5 Red de difracción de Bragg actuando como filtro.

2.2 Herramientas para trabajar con la fibra óptica.

A la hora de trabajar con las diferentes fibras, se utilizó el siguiente equipamiento:

- *Fusionadora de fibra óptica.* Se utilizó la fusionadora *View 7 arc fusión splicer*, tanto con los modos de operación que esta ofrecía de serie como con algunos parámetros modificados, tal y como se explica en el apartado *Proceso de fabricación*.
- *Cortadora de fibra óptica.* Necesaria para aplicar un corte preciso a las fibras y con el menor ángulo de inclinación posible, ya que puede afectar de forma muy negativa a la fusión de éstas, provocando unas pérdidas por encima de lo recomendado. La cortadora de fibra óptica usada ha sido la *view 7 fiber cleaver*.
- *Peladora de fibra óptica.* Se usa para retirar la capa protectora de las fibras.

2.3 Herramientas de caracterización.

Medidor de potencia óptica (Power Meter).

Este equipamiento nos permite cuantificar las pérdidas de potencia ocasionada cuando la luz circula entre la entrada y la salida de un dispositivo o fibra óptica.

Las pérdidas de potencia en la fibra óptica pueden estar ocasionadas tanto por la atenuación propia de cada fibra, la cual es proporcional a su longitud, como por las fusiones, curvaturas o conectores que pueda haber a lo largo del recorrido.

Para este proyecto, dado que las fibras con las que se trabaja son de longitud reducida, no se tendrán en cuenta las pérdidas por atenuación, sin embargo, resultarán de gran importancia las pérdidas debidas a la fusión de la fibra.

El medidor de potencia óptica utilizado para la caracterización de los sensores en este proyecto fue el *EXFO Multifunction Loss Tester FOT-930 MaxTester II*, que es un medidor de potencia basado en conversión optoelectrónica.

Este tipo de medidores de potencia, necesitan saber en qué longitud de onda se está trabajando para aplicar una corrección a la medida de potencia, en este caso se midió la potencia a 1550 nm.

Interrogador óptico.

El interrogador de sensores óptico es un dispositivo optoelectrónico que permite medir la potencia óptica recibida en función de su longitud de onda, es decir, permite evaluar su espectro óptico.

Para analizar las microcavidades fabricados en este proyecto, se utilizó el interrogador *Smartec SM125*, que cuenta con cuatro canales para fibra óptica. Éste envía los datos a un ordenador mediante un cable ethernet, para ser analizados mediante un software llamado *Enlight*.

Para este proyecto este dispositivo resulta de vital importancia, pues permite conocer las características espectrales más importantes de las microcavidades fabricadas, tales como el *Free Spectral Range (FSR)* o el rango dinámico e la fibra, en la Figura 2-6 aparece la variación de potencia en función de la longitud de onda de una de las microcavidades caracterizadas con este interrogador.

Cabe destacar que, para facilitar la comprensión y el tratamiento de estos datos, se guardaron las medidas obtenidas mediante el interrogador y se analizaron mediante el software *OriginPro8*. Este programa ofrece una interfaz más clara y atractiva para el tratamiento de datos.

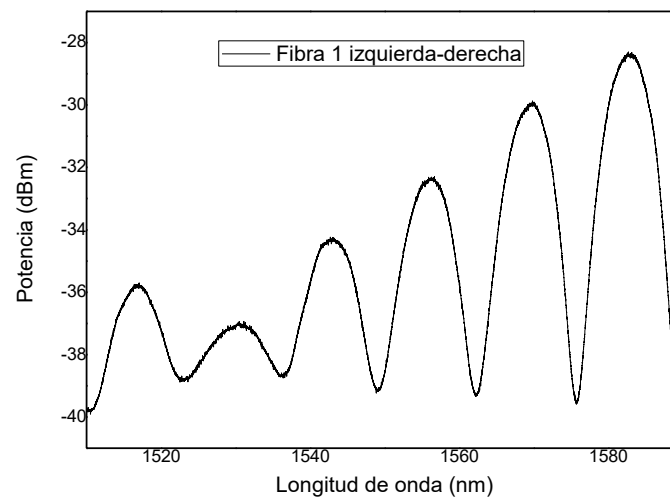


Figura 2-6 Medida de la variación de potencia respecto a la longitud de onda mediante el interrogador.

Después se utilizó un programa desarrollado en el laboratorio [16] mediante la herramienta MatLab, que permitió visualizar la FFT del espectro óptico obtenido en magnitud y fase, tal y como se muestra en la Figura 2-7. Esta información fue utilizada para discernir la variación debido a la elongación y/o la temperatura de las diferentes microcavidades fabricadas y analizadas.

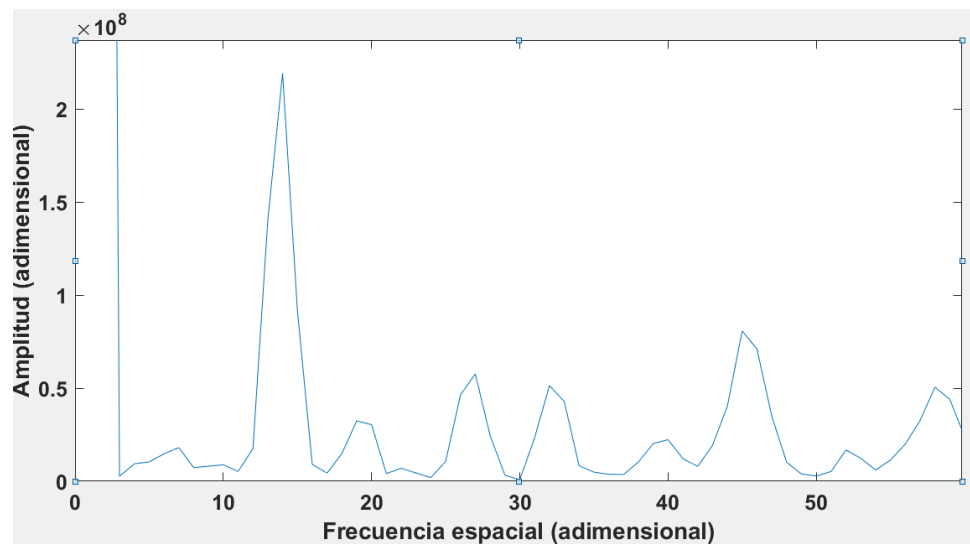


Figura 2-7 FFT del espectro óptico de la señal correspondiente a una de las microcavidades en tiempo real.

Reflectómetro óptico.

Un reflectómetro óptico evalúa la potencia óptica reflejada en una fibra en función de la longitud física de ésta. De esta forma se pueden detectar, entre otras cosas, con precisión y exactitud posibles pérdidas de potencia debidas a funciones defectuosas o curvaturas, además de localizar el punto exacto donde suceden.

Para este proyecto se utilizó el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600, cuyas características de precisión y diagnóstico son casi únicas en la industria de la fibra óptica, pues cuenta con una resolución espacial de 10 μm y no deja zonas muertas, además de ofrecer una visión más completa de lo que sucede en el sistema mediante la opción de detección distribuida. [4]

Gracias a él, se pudo evaluar con precisión las variaciones de la potencia reflejada debidas a las microcavidades de cada una de las estructuras de sensores fabricadas. En la Figura 2-8 se muestra el espectro obtenido al analizar una microcavidad de fibra óptica mediante dicho reflectómetro.

En dicha imagen, se aprecian varios picos, de izquierda a derecha, el primer pico, situado a un metro del reflectómetro, corresponde con las reflexiones producidas por la conexión entre latiguillo del reflectómetro y el latiguillo de la fibra a analizar.

El segundo pico, situado a dos metros y medio del LUNA, corresponde con las reflexiones producidas por la microcavidad fabricada. Como se aprecia en la imagen este pico es el mayor de todos, debido a las múltiples reflexiones tienen lugar en el interior la microcavidad.

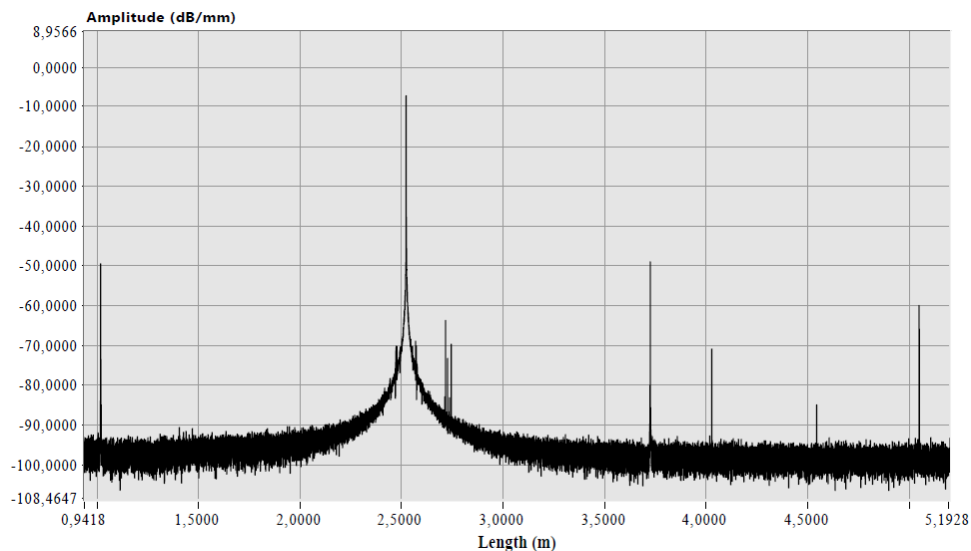


Figura 2-8 Ejemplo de muestra obtenida por el reflectómetro LUNA OBR 4600 al analizar una de las microcavidades fabricadas.

Capítulo 3 - Proceso de fabricación.

En este apartado se describirá el método usado para fabricar las microcavidades, así como los parámetros con los que se configuró el equipamiento de laboratorio empleado y los materiales utilizados.

3.1 Materiales utilizados.

- Fibra monomodo (SMF).
- Fibra hueca (HCF).
- Cortador de fibra óptica (*view 7 fiber cleaver*).
- Pelador de fibra óptica.
- Fusionadora de fibra óptica (*view 7 fusion splicer*).
- Microscopio electrónico (*digital microscope DM3*).

3.2 Parámetros de configuración de la fusionadora de fibra óptica.

- Tipo de alineación: Manual.
De esta forma se puede modificar con total libertad el punto exacto en el que se realizará la fusión, dado que para la fabricación de las microcavidades no aplicaremos el arco justo en el punto medio entre las dos fibras, sino que la fibra monomodo sobrepasará este ligeramente.
- Prueba de tensión: OFF
Dada la fragilidad que aportan las microcavidades, la prueba de tensión aplicada por la fusionadora después de la fusión podría partir el conjunto de fibras en su punto más frágil, así que queda desactivada.
- Pérdida estimada: ON
Para estimar las pérdidas generadas durante las dos fusiones.
- Límite de pérdida: 0.50 dB
Aunque haya fibras que superen este límite de pérdidas, los valores obtenidos quedan almacenados para su posterior estudio.
- Límite ángulo de núcleo: 1.0°
Para garantizar una fusión uniforme se limita el ángulo de corte del núcleo de fibra.

- Limite ángulo de corte: 3.0°
Para garantizar una fusión correcta, se limita el ángulo de corte de los dos tipos de fibras. En caso de ignorar la advertencia de la fusionadora y fusionar con ángulos de corte superiores a 3°, la fragilidad de la microcavidad aumenta enormemente, y es muy probable que la fibra se parta por la mitad al recogerla, aún con la prueba de tensión desactivada.
- Posición GAP: 0 pix
Mantenemos el punto de arco en el centro de la pantalla, pues lo que desplazaremos serán las fibras de forma manual.
- GAP: 19 pix
Al no colocar el GAP en el punto medio entre fibras, sino posicionado encima de ellas, es necesario disminuir la potencia de arco para que no colapsen los núcleos de las fibras huecas.
Es importante no disminuir en exceso la potencia del arco fusión, pues al no aplicarse justo en el punto medio entre las fibras, cabe la posibilidad de que la potencia de arco sea insuficiente y que no lleguen a fusionarse.
- Tiempo arco: 500 ms
Al igual que con la potencia del GAP, se disminuyó el tiempo de arco y pre-arco para evitar el colapso de las fibras a fusionar.

3.3 Proceso de fabricación de las microcavidades.

Después de sucesivos ensayos experimentales, se perfeccionó el método para la fabricación de las microcavidades de fibra óptica, cuyos pasos quedan descritos en este subapartado.

1. Retirado de la capa de recubrimiento de dos fibras monomodo y de una fibra hueca con el stripper.

Hay que tener especial cuidado al retirar el recubrimiento de la fibra hueca dada su alta fragilidad y la limitada disponibilidad de esta.

2. Cortado de un extremo de las fibras monomodo y otro extremo de la fibra hueca.

El corte deberá ser lo más perpendicular al eje de fusión posible para garantizar una fusión óptima. Cabe destacar el especial cuidado que hay que tener a la hora de cortar la fibra hueca, pues dada su fragilidad, si se desliza la cuchilla de la cortadora demasiado rápido puede llegar a estropear la cubierta de la fibra.

3. Primera fusión: Fibra monomodo con fibra hueca.

Una vez colocadas ambas fibras en la fusionadora, se deberá ajustar el posicionamiento de las fibras mediante los comandos de control de la fusionadora.

Como se trabaja con un tipo de fibra especial para la cual la fusionadora no está preparada por defecto, el proceso de fusión no puede realizarse mediante el ajuste automático de la misma, pues de hacerlo, las fibras quedarán separadas con los electrodos encima del hueco entre fibras. Por ello, y con un punto de fusión tan bajo (tal y como se ha explicado en el apartado *Parámetros de configuración*), las fibras no llegarían a fusionarse y quedarían con los extremos redondeados y, por tanto, inutilizables.

Durante este paso del proceso de fusión es importante tener bajo control en todo momento las medidas de las fibras y la distancia de ambas respecto a los electrodos o punto de fusión. Para facilitar esta tarea se fabricó una lámina con puntos equidistantes que fue adherida a la parte superior de la pantalla de la fusionadora. De esta forma se agilizó enormemente la tarea de posicionamiento de las fibras y se facilitó la caracterización del proceso de ajuste. Cada división de esta regla equivalía a aproximadamente 30 micras, y la franja más gruesa señalaba el punto de fusión cuando la fusionadora muestra las fibras desde la perspectiva $\frac{X}{Y}$.

A la hora de posicionar las fibras, el primer paso es aplicar la perspectiva $\frac{X}{Y}$, para así tener localizado el punto de fusión justo debajo del centro de la regla fabricada. Posteriormente, se desplaza la fibra hueca lo máximo posible hacia la izquierda, sin perderla de vista, mediante el comando *R press*. Así tendremos espacio suficiente para

desplazar la fibra monomodo, ya que, si colisionan ambos extremos y sufren roces constantes, podría perjudicar el proceso de fusión.

Posteriormente, la fibra monomodo se coloca debajo del punto de fusión seleccionado y se desplaza mediante el comando *L press*, sobrepasando el punto de fusión como mínimo 15 micras (media división) y como máximo 45 micras (división y media).

Para facilitar la comprensión del posicionamiento de la fibra monomodo se adjunta la Figura 3-1, en la cual se ha destacado la ubicación en la que deberían situarse los electrodos mediante una línea amarilla.

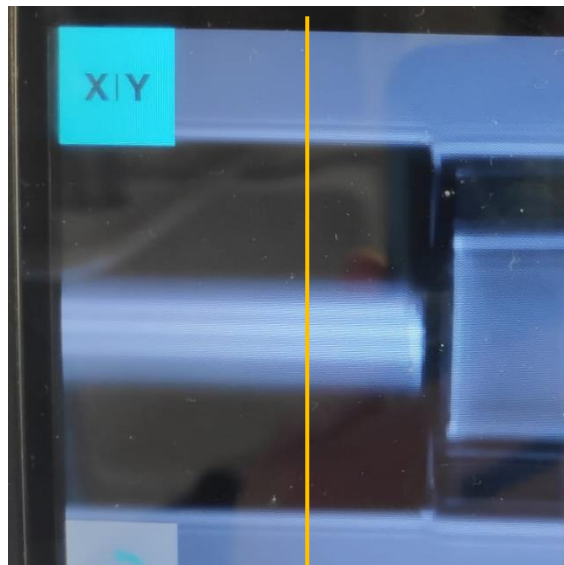


Figura 3-1 Posicionamiento de las fibras para la primera fusión.

En dicha figura la fibra de la izquierda es la fibra monomodo, de forma que sobrepasa el punto de fusión unas 15 micras.

Una vez se haya posicionado y fijado la fibra monomodo, se aproxima a ésta la fibra hueca mediante el comando *R press*, de forma que sean contiguas la una a la otra. Una vez están próximas, se ajusta verticalmente mediante los comandos *X align* e *Y align*, de forma que no exista desnivel entre la línea horizontal que las delimita. Una vez ajustadas, se aproxima la fibra hueca a la monomodo, pero sin que ésta ejerza presión, pues se podría modificar su posicionamiento, meticulosamente medido, o alterar el ángulo de corte de ambas.

En la figura 3-2, se observa cómo se ha aproximado la fibra hueca a la monomodo, para luego juntarlas tal y como se muestra en la figura 3-3, sin que se desplacen verticalmente por la presión.



Figura 3-2 Aproximación de la fibra SMF a la HCF.

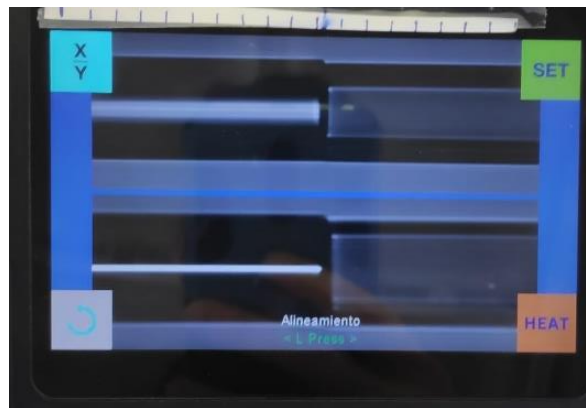


Figura 3-3 Fibra SMF y fibra HCF listas para la fusión.

Una vez están ambas fibras correctamente posicionadas, se procede a la fusión de éstas mediante el botón ARC de la fusionadora.

En la figura 3-4 se muestra el resultado que deriva de un correcto cumplimiento de los pasos de la primera fusión.



Figura 3-4 Resultado esperado de una correcta primera fusión

4. Ajuste, mediante el microscopio digital, de la longitud de la microcavidad.

Una vez extraído el resultado de la primera fusión de la fusionadora, se analiza con el microscopio digital DM3. Para garantizar la estabilidad de las fibras se sujetan con ayuda del cortador de fibra con la tapa levantada, como aparece en la figura 3-5.



Figura 3-5 Estabilización de la fibra a cortar mediante cortador de fibra óptica.

Las dimensiones de la fibra hueca determinan las características espectrales de la microcavidad fabricada, así como su sensibilidad a la elongación y/o a la temperatura

[14]. Este tamaño puede ser mayor o menor que la longitud crítica (L_c) de la fibra, este valor se obtiene al resolver la ecuación (1).

$$L_c = \sqrt{n_0^2 + n_2^2 - n_1^2} \left(\frac{r}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} + \frac{2d}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \right) \quad (1)$$

Donde, como queda explicado en la figura 3-6, n_0 , n_1 y n_2 son los índices de refracción del aire, el núcleo y el revestimiento de la fibra, que corresponden con 1, 1.449 y 1.443 respectivamente. d corresponde con el espacio entre el límite del núcleo de la fibra hueca y el límite del revestimiento de esta, y r con el radio del núcleo de la fibra hueca.

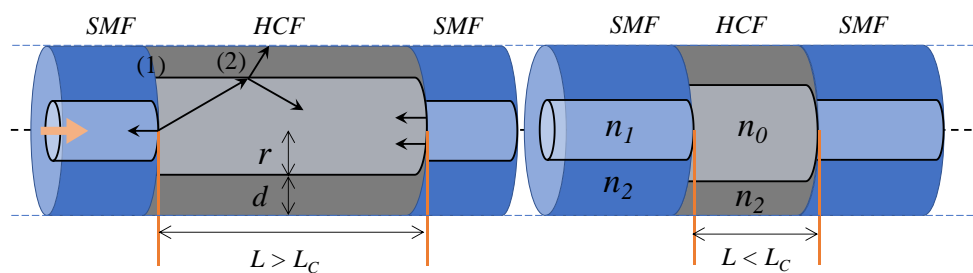


Figura 3-6 Diagrama esquemático de la estructura SMF-HCF-SMF.

En este proyecto se han utilizado dos tipos de fibra hueca diferentes, con unos diámetros de núcleo de 20.5 micras y 57 micras, por lo que la longitud crítica será distinta en función de la fibra hueca usada.

En el caso de la fibra utilizada para la fusión del ejemplo, el diámetro del núcleo hueco es de 20.5 micras y el externo de 125.5 micras, por lo que la longitud crítica según la ecuación (1) es de 175 micras, que se corresponde con algo menos de seis divisiones en la regla en la parte superior de la pantalla.

Para estudiar las propiedades de las microcavidades, se han fabricado fibras tanto con un tamaño de la microcavidad mayor a la longitud crítica, como inferior a esta.

Una vez estabilizada la fibra, se ajusta su tamaño meticulosamente gracias al aumento óptico del microscopio, de tal forma que la cuchilla de la cortadora marque el final de la microcavidad, tal y como se muestra en la figura 3-7.



Figura 3-7 Microcavidad óptica vista desde el microscopio electrónico.

5. Cortado de la fibra hueca.

Una vez decidido el tamaño de la microcavidad, se retira la cortadora del microscopio para facilitar su manejo y se corta con cuidado. Como se ha comentado con anterioridad, dado que la fibra hueca es muy frágil, resulta sencillo que su cubierta se quiebre si el corte se realiza demasiado deprisa. Esto puede echar a perder todo el proceso anterior y obligar a empezar desde el principio.

Desde este punto, el conjunto que forman la fibra monomodo y la microcavidad queda definido como *conjunto SMF-HCF*.

6. Segunda fusión: Microcavidad con la segunda fibra monomodo

Ahora se posicionarán en la fusionadora un extremo de fibra monomodo correctamente pelado y cortado, y el extremo de la microcavidad del conjunto SMF-HCF.

Como se enseña en la Figura 3-8, el conjunto SMF-HCF se coloca en la parte izquierda de la fusionadora y la fibra monomodo a la derecha.

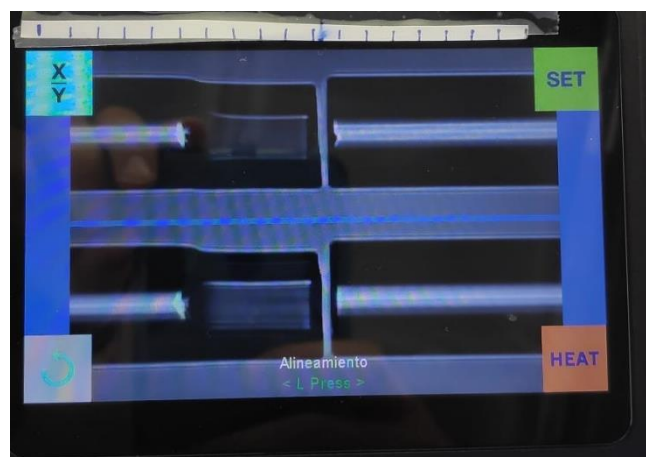


Figura 3-8 Colocación del conjunto SMF-HCF

De esta forma, las diferentes fibras quedan ordenadas de la siguiente manera: SMF-HCF-SMF.

De nuevo se usa la perspectiva $\frac{X}{Y}$ para tener localizado el punto de fusión y, al igual que en la primera fusión, se retira la fibra izquierda mediante el comando *L press* para maniobrar con mayor facilidad con la fibra situada a la derecha.

En esta ocasión será el conjunto SMF-HCF el que deba situarse, al menos, a 15 micras del punto de fusión, pues al actuar los electrodos sobre la fibra hueca, dará como resultado una soldadura más suave y redondeada.

Posteriormente, se aproxima la fibra monomodo al conjunto SMF-HCF y, después de ajustar las dos fibras verticalmente, se aproximan del mismo modo que en la primera fusión, sin ejercer una presión excesiva la una sobre la otra.

Una vez posicionadas correctamente, se procede a fusionar las fibras mediante el comando ARC. Si se han seguido correctamente los pasos y las distancias descritas en el proceso, el resultado debería ser similar al que aparece en la figura 3-8.

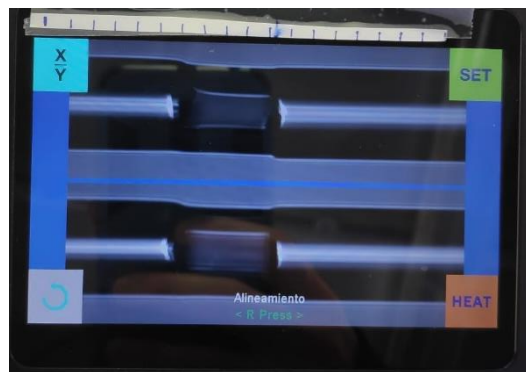


Figura 3-9 Resultado final de un correcto seguimiento del proceso de fabricación.

La microcavidad de fibra que aparece en el ejemplo consta de una longitud de fibra hueca equivalente a 4 divisiones, lo cual se corresponde con una longitud de unas 120 micras, inferior a la longitud crítica, por lo que sería una fibra insensible a la temperatura, pero sensible a la elongación.

Aunque el proceso de fusión esté concluido, es importante tener especial cuidado al retirar la fibra resultante de la fusionadora, debido a su elevada fragilidad ya que podría romperse con facilidad. Una vez extraída, se procede al etiquetado y almacenamiento de ésta para su posterior estudio.

Capítulo 4 - Medidas y resultados experimentales.

En este capítulo se explican los distintos métodos que se usaron para analizar las microcavidades, así como se estudian los resultados obtenidos a raíz de estos métodos.

4.1 Obtención de las pérdidas de inserción.

Para conocer las pérdidas de inserción correspondientes a cada microcavidad, se utilizó el medidor en potencias *EXFO Multifunction Loss Tester FOT-930*. Se conectó a su entrada y salida los dos extremos de cada microcavidad, y se evaluaron las pérdidas de inserción en ambos sentidos, ya que estas microcavidades no son del todo simétricas debido a las variables en cuanto a su proceso de fabricación.

De esta forma, se pueden conocer las pérdidas correspondientes a las fusiones realizadas durante proceso de fabricación de estas microcavidades.

Hay que tener en cuenta que, además de las fusiones correspondientes a la fabricación, se han realizado dos fusiones adicionales para añadir un latiguillo a cada extremo de la fibra, estas dos nuevas fusiones tienen pérdidas muy reducidas en comparación con las del proceso de fabricación (dado que se realizan entre dos fibras monomodo iguales). El valor de estas pérdidas oscila entre 0 dB y 0.02 dB.

4.2 Resultados de las pérdidas de inserción.

En la Tabla 4-1 aparecen las pérdidas de inserción de las microcavidades fabricadas. Como se puede apreciar, estas pérdidas no son despreciables, oscilando entre los 5 y 14 dB por microcavidad, tanto en un sentido como en otro. Esto es debido, principalmente, a la diferencia del diámetro del núcleo entre la fibra monomodo y la fibra hueca, siendo de unos 9µm para la SMF y de 57 µm o 20.5 µm para las fibras huecas empleadas en este estudio experimental.

Nombre microcavidad	Pérdidas izda-dcha (dBm)	Pérdidas dcha-izda (dBm)
T2F1	-8.72	-9.16

T2F2	-5.67	-6.12
T3F1	-13.35	-13.41
T3F2	-5.24	-5.46
T3F6	-5.26	-5.96
T3F4	-2.9	-3.2
T3F5	-3.94	-3.74
T3F6	-4.56	-4.78
T3F7	-5.28	-5.26
T3F8	-31.48	-32.67
T4F1	-5.57	-5.69
T4F2	-2.9	-3.2
T4F3	-8.72	-9.16
T4F4	-5.58	-6.21
T4F5	-34.89	-34.58
T4F6	-9.33	-9.27
T4F7	-8.87	-12.97

Tabla 4-1 Pérdidas de inserción de las microcavidades fabricadas.

Como se ve en la tabla anterior, las microcavidades correspondientes a las fibras T3F8 y T4F5, cuentan con unas pérdidas mucho más elevadas que el resto. Esto es debido a que, para la fabricación de la microcavidad T3F8 se utilizó un tramo de HCF de grandes dimensiones (1 centímetro de longitud). Las grandes pérdidas de inserción de la microcavidad T4F5 son debidas a una mala fusión debido, muy probablemente, a un mal corte de las fibras antes de someterlas a la fusión.

4.3 Medidas realizadas para obtener el espectro óptico de las microcavidades.

Mediante el interrogador de sensores *Smartec SM-125*, cuyo funcionamiento ha quedado descrito en el apartado 2.3 Instrumentación óptica, se estudió el espectro óptico de cada una de estas microcavidades. Este interrogador muestra el espectro óptico en un rango que va desde la longitud de onda de 1510 nm hasta 1590 nm.

Cabe destacar que las figuras mostradas en el siguiente apartado, Resultados experimentales, no se obtienen con ese formato directamente del interrogador, sino que se han tratado los datos obtenidos mediante el programa de análisis de datos *OriginPro8*, para tratar con una interfaz más clara y modificar las figuras y facilitar su análisis.

4.4 Resultados experimentales obtenidos a partir del espectro óptico.

A continuación, se muestran los espectros ópticos obtenidos mediante el interrogador de las microcavidades fabricadas.

Rango dinámico.

Este análisis espectral permite conocer el rango dinámico de cada microcavidad fabricada. Este valor determina el rango de valores entre los que puede variar el nivel de potencia pues, como se ha explicado en el apartado 2.4.2 Sensores basados en cavidades Fabry-Perot, las continuas reflexiones que ocurren cuando la luz atraviesa la microcavidad generan diversos picos y valles en el espectro óptico. La diferencia de nivel entre los picos y los valles define el valor de rango dinámico.

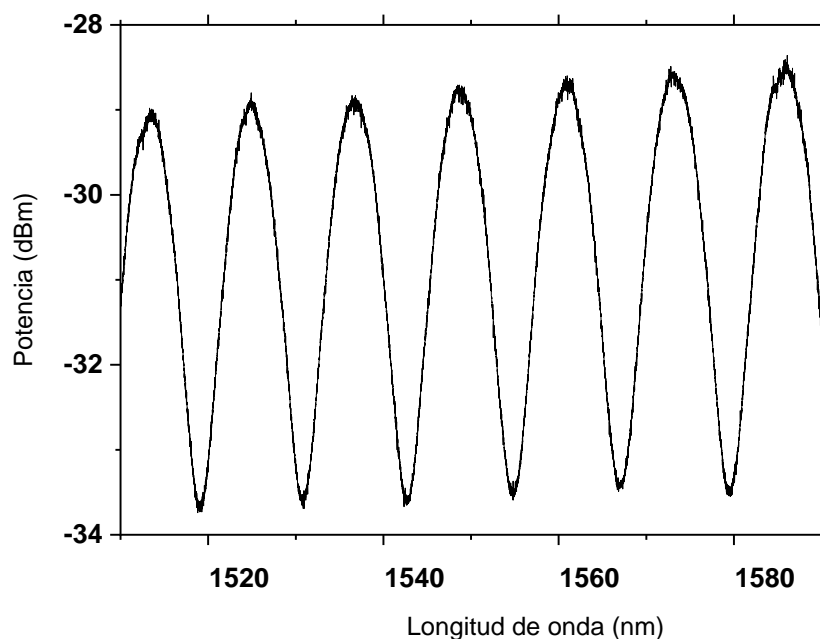


Figura 4-1 Respuesta espectral de la microcavidad T3F6 con el interrogador de sensores.

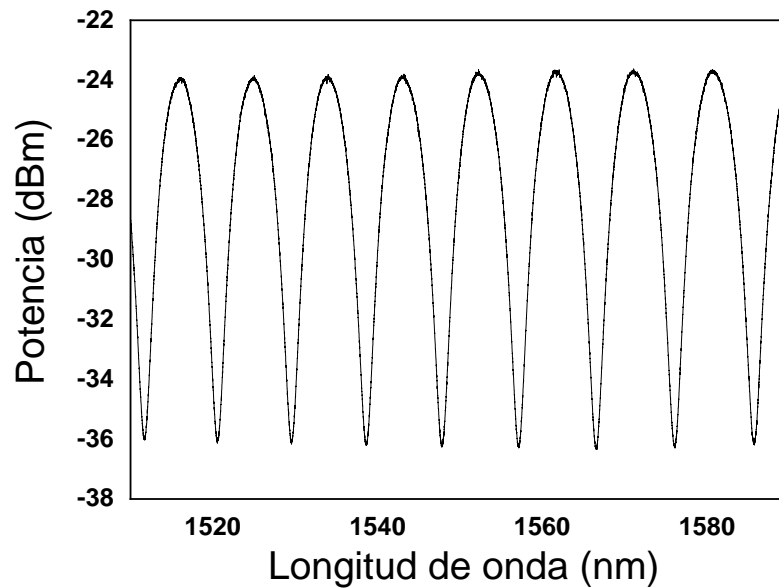


Figura 4-2 Respuesta espectral de la microcavidad T1F10 con el interrogador.

Las figuras 4-1 y 4-2 muestran un ejemplo de esta variabilidad entre los posibles rangos dinámicos de las microcavidades fabricadas, siendo de 5 dB para la microcavidad etiquetada como T3F5 y de 28 dB para la fibra T1F10.

Free Spectral Range

En el eje horizontal de las gráficas, se puede evaluar el *Free Spectral Range (FSR)*, que se define como la distancia, en longitud de onda, entre dos valles o dos picos consecutivos.

Tal y como se ha explicado en los fundamentos teóricos, la siguiente fórmula relaciona el valor del FSR con la longitud física de la microcavidad.

$$FSR = \frac{\lambda_m * \lambda_{m+1}}{2 * L * n_0} \quad (1)$$

Donde L corresponde con la longitud de la microcavidad, n_0 con el índice de refracción del aire en el interior de la microcavidad (que equivale a 1), y λ_m con la longitud de onda de resonancia, que se obtiene de la siguiente fórmula.

$$\lambda_m = \frac{2L}{m} * n_0 \quad (2)$$

Relacionando las ecuaciones (1) y (2), es posible determinar el tamaño exacto de la microcavidad conociendo el FSR, dato que corresponde con la distancia que hay entre los valles consecutivos del espectro obtenido con el interrogador.

Por ejemplo, la fibra T3F7 tiene una distancia entre valles consecutivos de unos 10 nm, tal y como se muestra en la Figura 4-3.

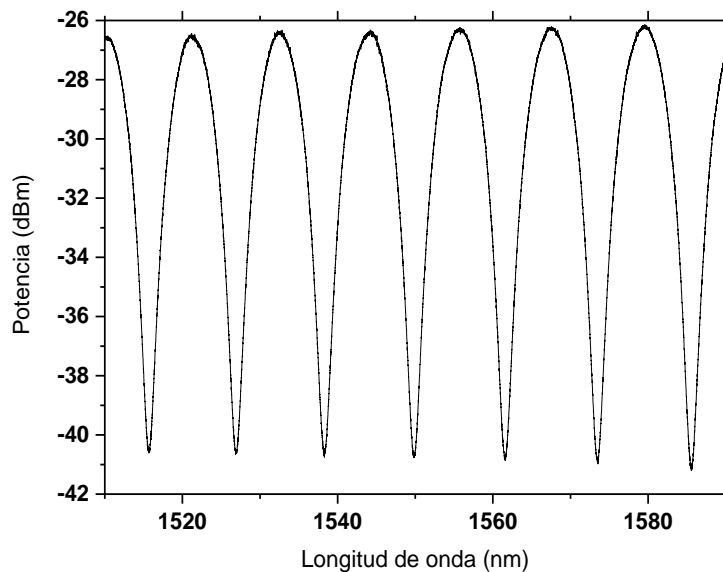


Figura 4-3 Espectro óptico de la fibra T3F7.

Si introducimos este valor de FSR en las ecuaciones mencionadas anteriormente, se obtiene que la longitud de la microcavidad es de unos 50 μm . Si por el contrario calculamos el tamaño de la microcavidad para la fibra T3F1 (Figura 4-4) que cuenta con un FSR de 7 nm, obtenemos que su longitud es de 71 μm .

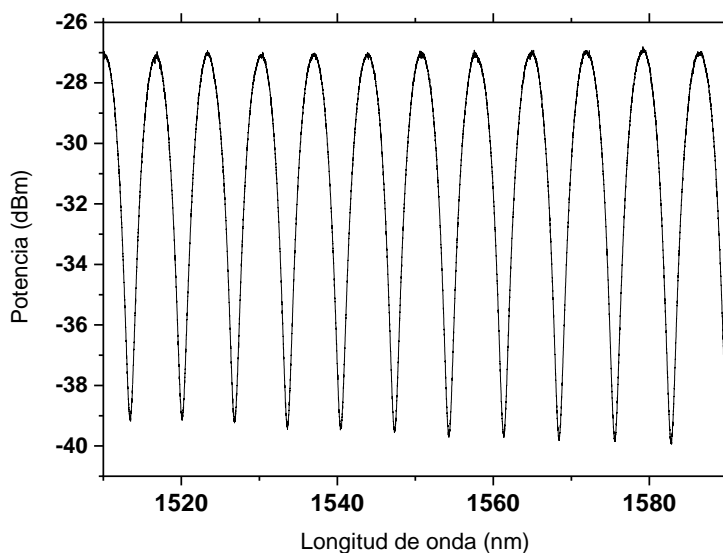


Figura 4-4 Espectro óptico de la microcavidad T3F1

Se puede concluir por lo tanto que, cuanto mayor sea la longitud de la microcavidad, menor será su *Free Spectral Range*.

A continuación, se muestran todos los espectros ópticos de las microcavidades fabricadas, con una tabla que relaciona su FSR con el tamaño de la microcavidad.

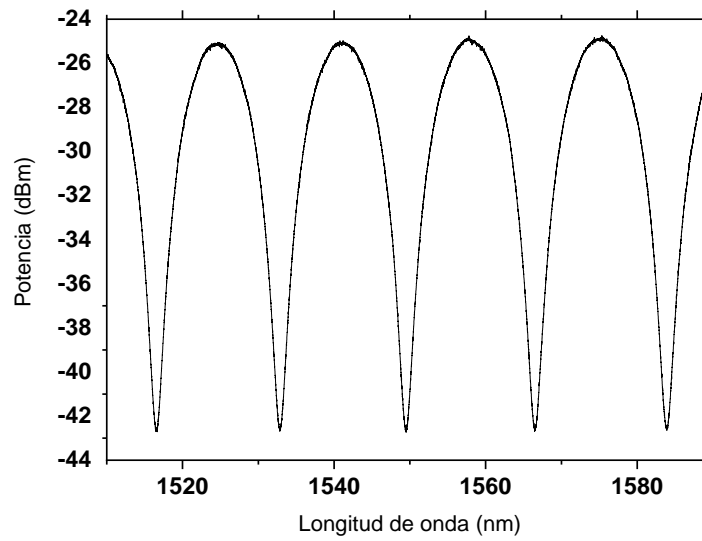


Figura 4-5 Espectro óptico de la microcavidad T2F1.

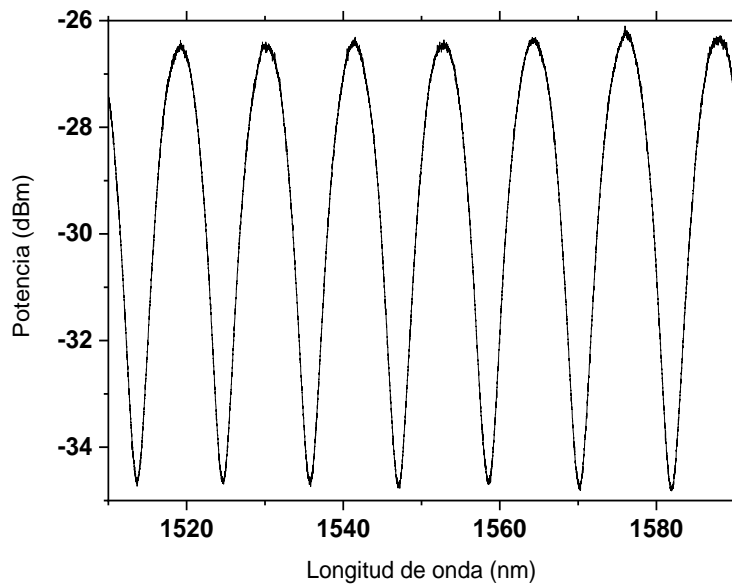


Figura 4-6 Espectro óptico de la microcavidad T2F2.

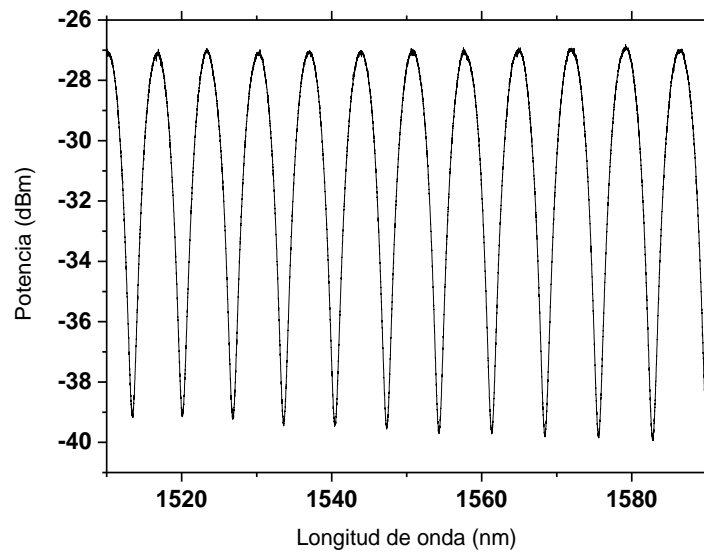


Figura 4-7 Espectro óptico de la microcavidad T3F1.

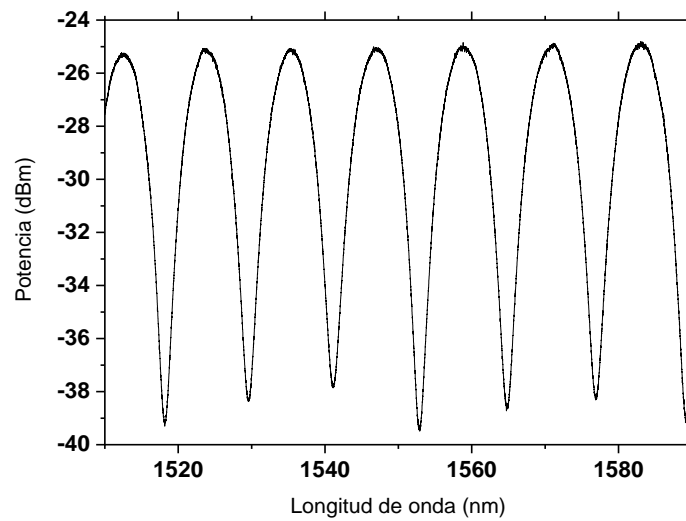


Figura 4-8 Espectro óptico de la microcavidad T3F2.

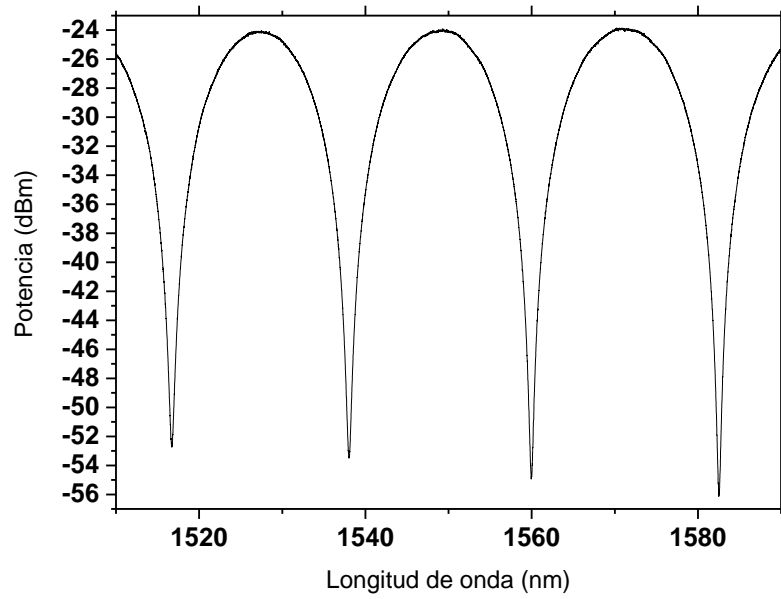


Figura 4-9 Espectro óptico de la microcavidad T3F4.

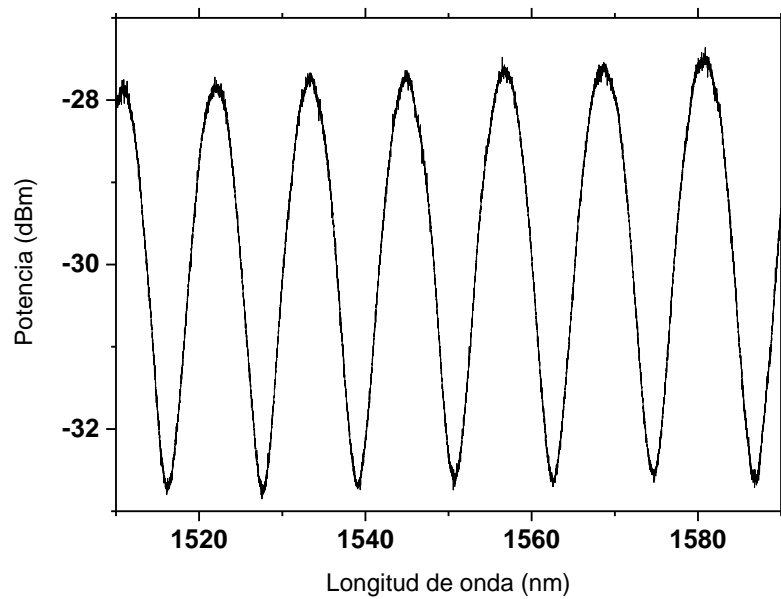


Figura 4-10 Espectro óptico de la microcavidad T3F5.

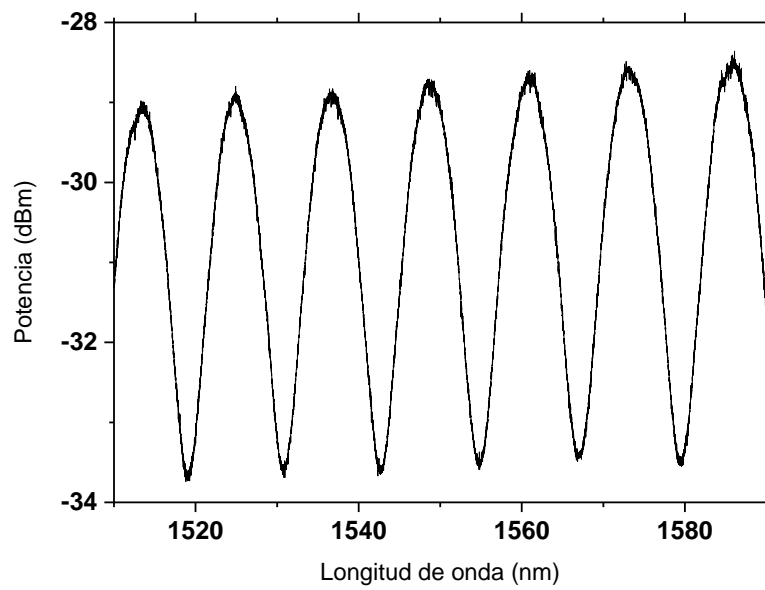


Figura 4-11 Espectro óptico de la microcavidad T3F6.

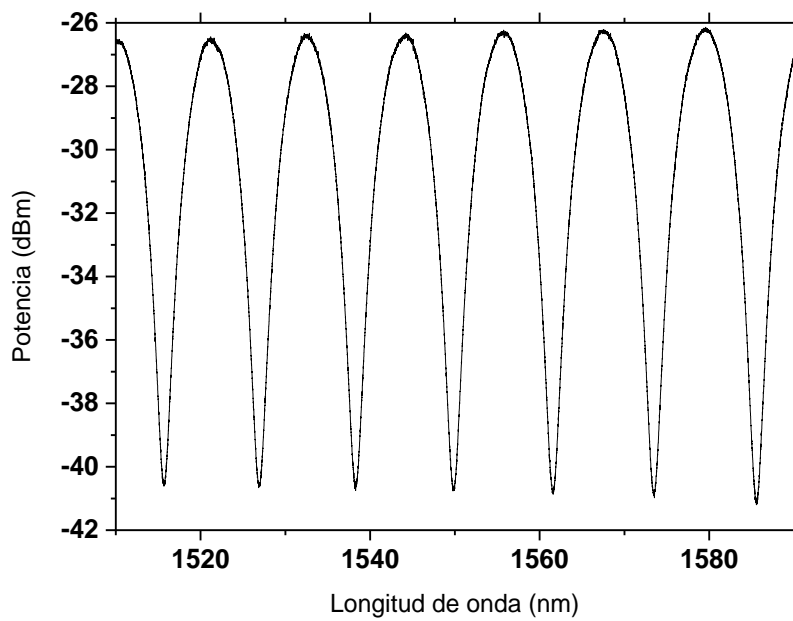


Figura 4-12 Espectro óptico de la microcavidad T3F7.

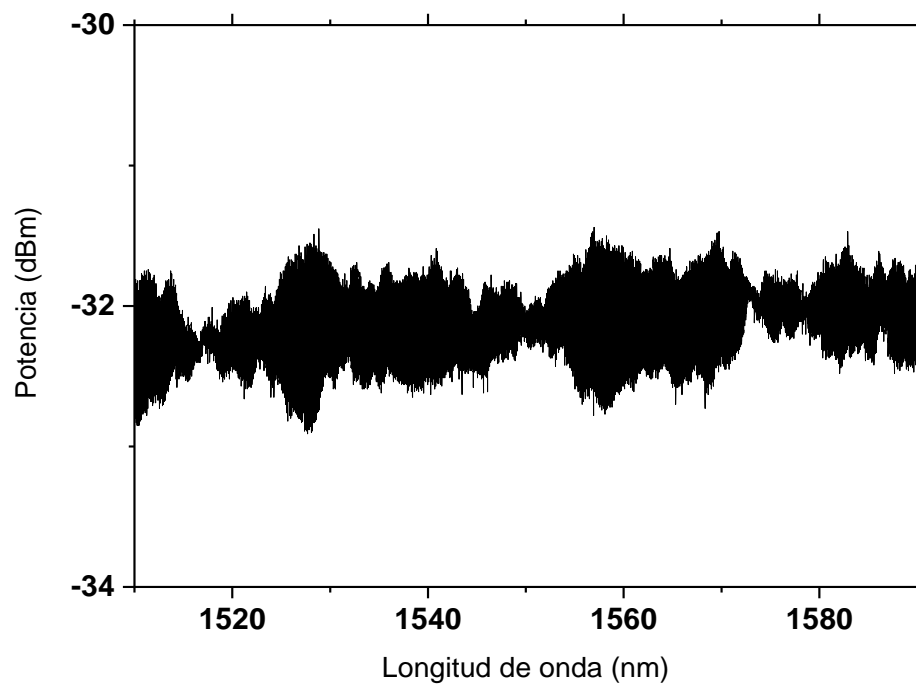


Figura 4-13 Espectro óptico de la microcavidad T3F8.

Como se puede apreciar, todas las imágenes son similares salvo la correspondiente a la microcavidad T3F8. Esto es debido a que se utilizó una microcavidad de un tamaño excesivamente largo (1 centímetro).

Nombre de la fibra	Free Spectral Range (nm)	Longitud de la microcavidad (μm)
T2F1	16	31
T2F2	11	45.83
T3F1	7	72.94
T3F2	10	50
T3F4	20	25
T3F5	12	41.67
T3F6	12	41.67
T3F7	10	50

Tabla 4-2 Free Spectral Range y longitud de las microcavidades fabricadas.

4.5 Caracterización mediante reflectómetro óptico.

Tras caracterizar las pérdidas de inserción y la respuesta espectral de estas microcavidades, se procedió a su caracterización mediante el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600. La Figura 4-14, muestra un ejemplo de la traza obtenida al realizar esta medida.

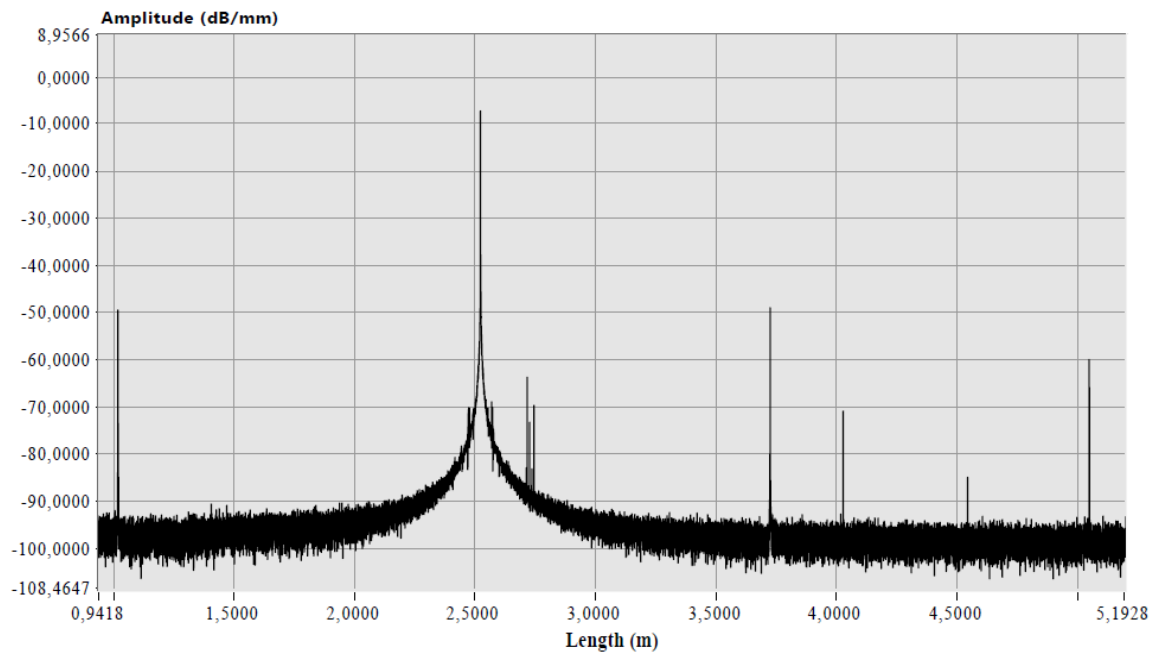


Figura 4-14 Análisis de una microcavidad mediante el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600.

En dicha imagen, se aprecian varios picos, de izquierda a derecha. El primer pico, situado aproximadamente a un metro de distancia del reflectómetro, corresponde con las reflexiones producidas por la conexión entre latiguillo que está permanentemente conectado al reflectómetro y el latiguillo de la muestra a analizar.

El segundo pico, situado a dos metros y medio del LUNA, corresponde con las reflexiones producidas por la microcavidad. Como se observa en esta imagen, este pico es el mayor de todos, debido a las múltiples reflexiones que tienen lugar en el interior de la microcavidad.

Como se aprecia, las diferencias de potencia entre los picos correspondientes a los latiguillos y los correspondientes a la microcavidad son notablemente diferenciables, siendo de -50 dB/mm para los latiguillos y de -9 dB/mm para la microcavidad.

Los picos siguientes no resultan interesantes para su estudio, ya que corresponden al final de la muestra a analizar, a conexiones entre latiguillos, o lo que comúnmente se denomina reflexiones fantasma, y que son ecos de las reflexiones principales.

Si se analiza la misma microcavidad con el reflectómetro cada vez desde un extremo, se aprecia cómo las reflexiones producidas por la microcavidad aparecen en distintas distancias para cada caso, tal y como se muestra en las figuras 4-15 y 4-16. En ellas se

muestran el análisis mediante el reflectómetro óptico de una misma microcavidad en distintos sentidos.

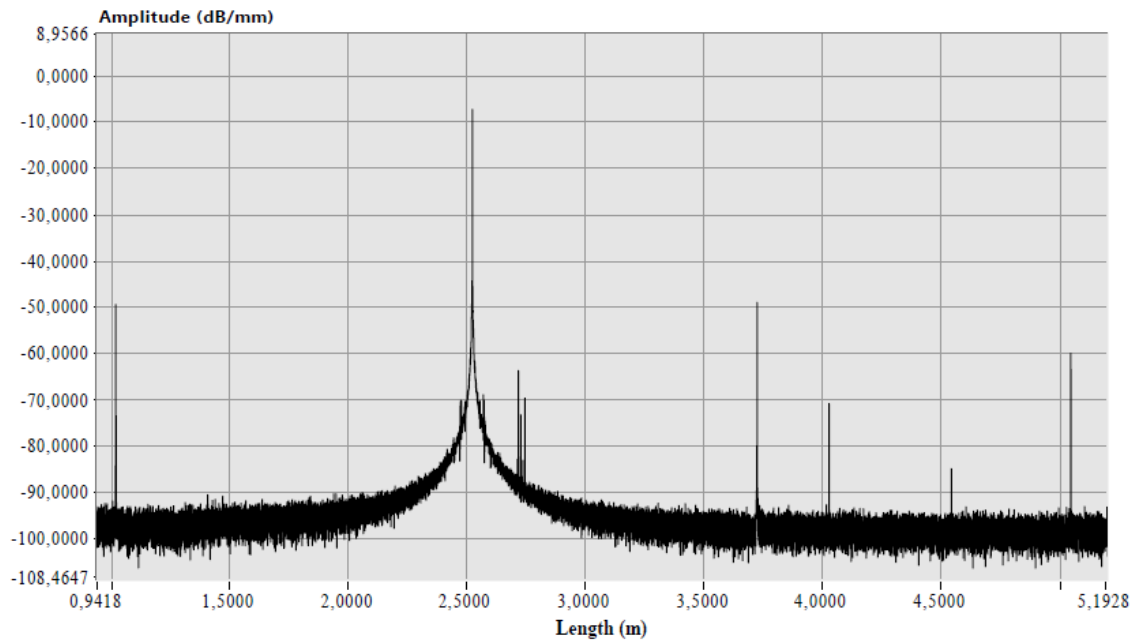


Figura 4-15 Microcavidad T1F1 analizada con reflectómetro de izquierda a derecha.

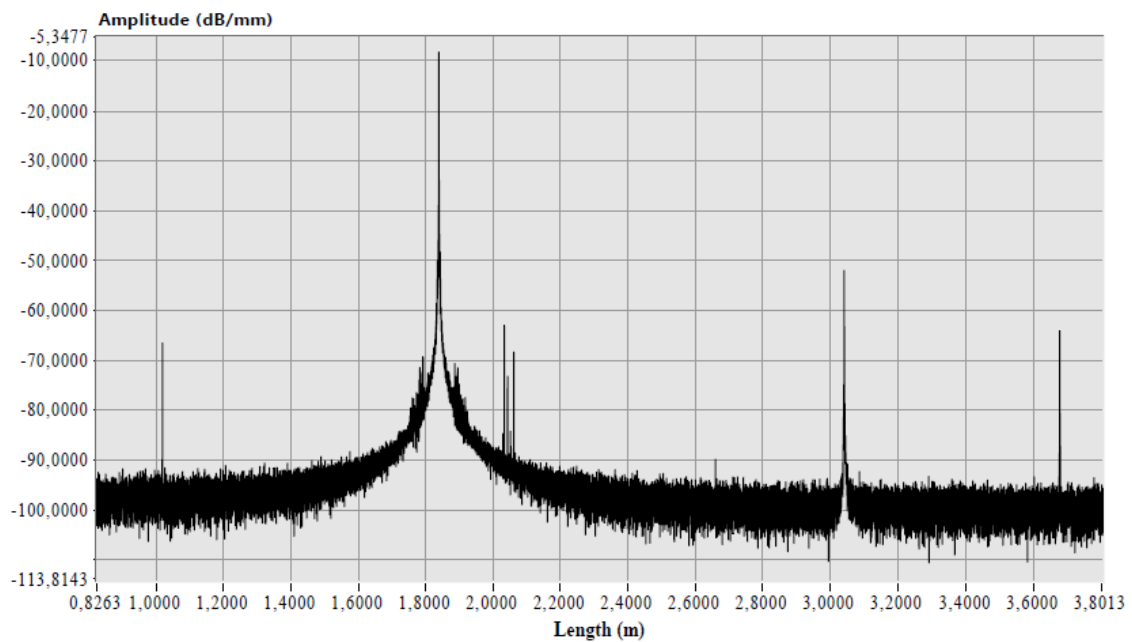


Figura 4-16 Microcavidad T1f1 analizada con reflectómetro de derecha a izquierda.

Como se aprecia en dichas imágenes, la primera de las reflexiones producidas por la microcavidad aparece a 2,5 metros del reflectómetro, y en la segunda a 1,82 metros.

4.6 Caracterización del funcionamiento de las microcavidades como sensores.

Para la realización de este apartado experimental se implementó el montaje que se muestra en la Figura 4-18. En dicho montaje, se ha utilizado una fuente de bombeo Raman para generar amplificación de la señal óptica en el rollo de fibra SMF de 50 kilómetros situado en un extremo del circuito. Para evitar que las posibles reflexiones producidas por la fibra dañen la fuente de bombeo, se ha colocado un aislador que evita que la luz vaya en dos sentidos, de manera que solo pueda ir desde el bombeo hacia la cavidad.

Posteriormente, la luz es reflejada hasta la microcavidad, que está siendo sometida a una elongación mediante unos motores controlados por un software desarrollado en el laboratorio [16]. Dicho software permite aplicar dicha elongación con una resolución por paso de 17 nm. Para caracterizar la microcavidad, se tomó una longitud inicial de 17 centímetros y luego se aplicó una elongación de 17 nm por paso.

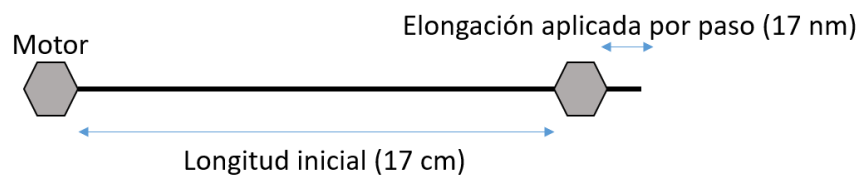


Figura 4-17 Configuración para la caracterización de la microcavidad al aplicar un aumento de elongación.

Se aplicaron 2000 pasos, por lo que al tener 50 pasos/salto se obtuvieron 40 medidas distintas para cada microcavidad.

Este montaje experimental, mostrado en la Figura 4-18, da lugar a una emisión láser situada a una determinada longitud de onda. A medida que la longitud física de la microcavidad se ve afectada por un aumento de la elongación aplicada, esta longitud de onda central del láser emitido, se va desplazando a longitudes de onda mayores. Este desplazamiento se evalúa gracias al analizador de espectros óptico (OSA) conectado a la otra salida del acoplador, de forma que se puede hacer un seguimiento de la evolución del láser generado en función de la elongación aplicada sobre la microcavidad sujeta a estudio.

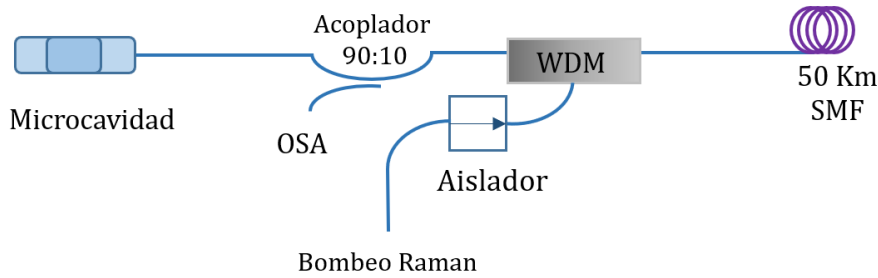


Figura 4-18 Esquema del montaje utilizado para la generación de un láser con el que se caracterizó la sensibilidad a la elongación de las microcavidades.

Después de recoger los datos obtenidos por el OSA en formato de libro de Excel, se procesaron con MatLab para así obtener la variación en la respuesta de la emisión láser a medida que variaba la elongación aplicada.

En la Figura 4-19 se muestra una de las trazas obtenidas, donde se puede ver espectro obtenido del láser generado por la cavidad formada entre la microcavidad fabricada y el carrete de 50km de fibra SMF (1547nm para este caso).

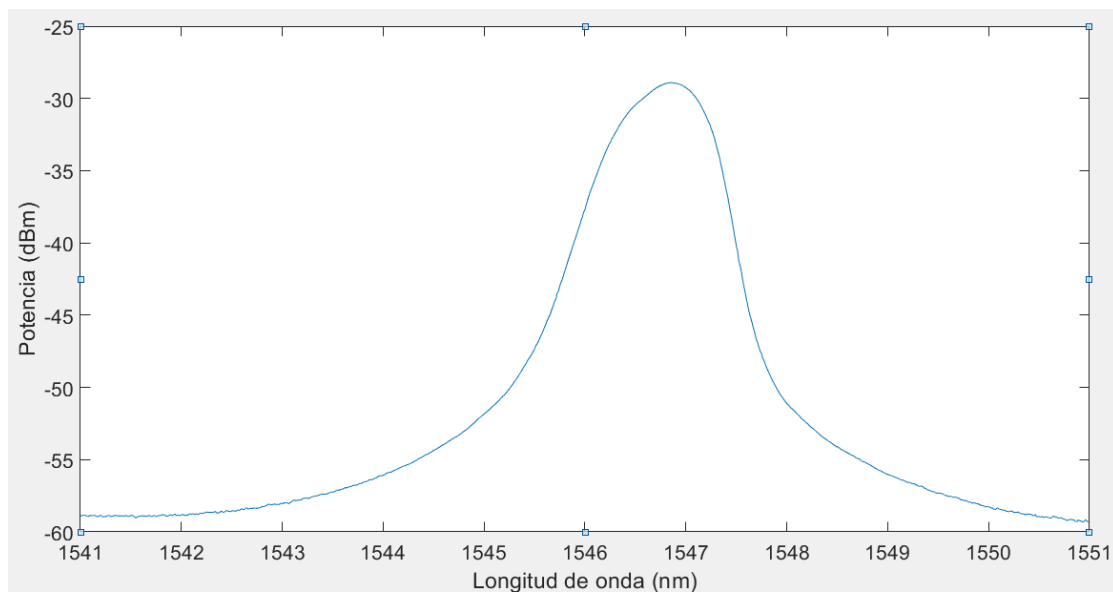


Figura 4-19 Emisión de la microcavidad T3F2.

Como se ha explicado anteriormente, al aplicar una elongación sobre la microcavidad, la longitud de onda de la emisión del láser que se genera también varía. Por tanto, el valor de la longitud de onda donde se obtiene el valor máximo de potencia de salida del láser generado por la cavidad se desplaza ligeramente en longitud de onda.

A la hora de caracterizar las microcavidades fabricadas trabajando como sensores, fue necesario estudiar el desplazamiento que sufre este máximo en potencia en términos de longitud de onda en función de la tensión mecánica aplicada- Para ello, se tomaron

numerosas medidas a medida que esta elongación aumentaba, y por tanto este valor de longitud de onda de emisión se desplazaba.

En la Figura 4-20 quedan representadas todas las trazas tomadas para la fibra T3F2 al aumentar la elongación aplicada a la microcavidad. En ella se aprecia un claro desplazamiento en longitud de onda.

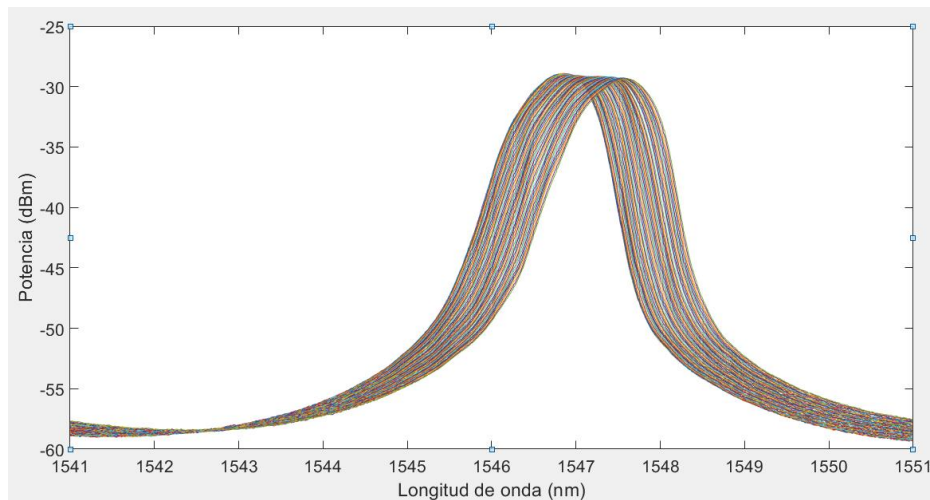


Figura 4-20 Evolución de la respuesta frecuencial de láser al variar la elongación aplicado sobre la microcavidad T3F2.

Sin embargo, a la hora de localizar el valor de la potencia máxima de cada medida, se vio que las respuestas presentaban un ruido o rizado en la parte superior de todas ellas, lo que dificulta dicha tarea, tal y como se muestra en la Figura 4-21. Por ello se realizó un procesado de las trazas obtenidas, mediante el comando *smoothdata* de MatLab, cuyo resultado aparece la Figura 4-22.

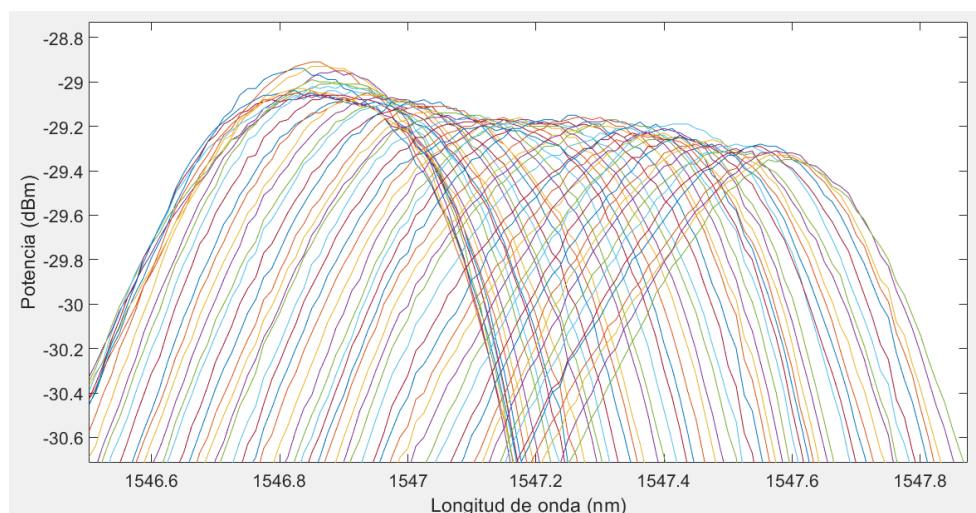


Figura 4-21 Ruido que dificulta la localización de máximos.

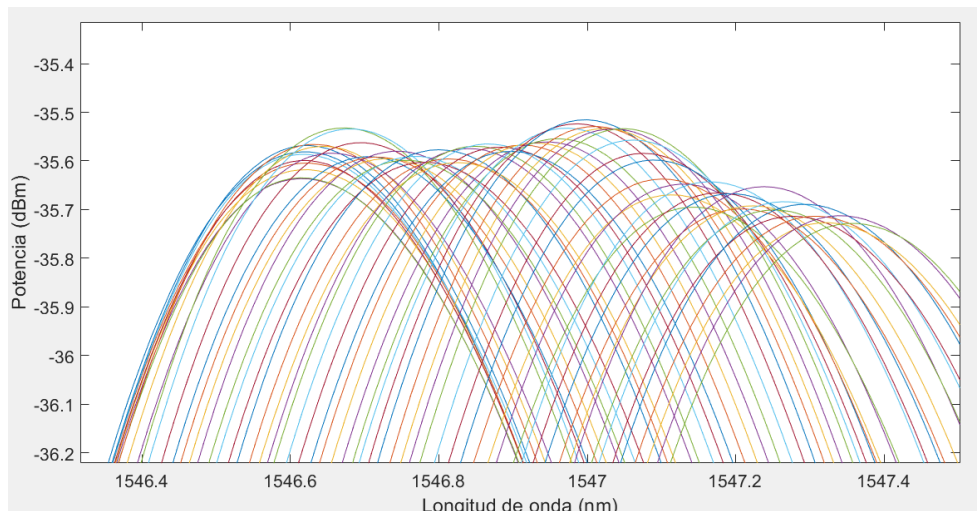


Figura 4-22 Trazas procesadas de la variación del pico de emisión del láser al aumentar la elongación.

Una vez procesadas las medidas, resulta sencillo localizar los máximos de cada traza mediante el comando *max* de MatLab. Estos valores han sido posteriormente almacenados en los vectores *PosicionMaximo* y *ValorMaximo*, para asignar a cada máximo su λ correspondiente. Este proceso se llevó a cabo mediante el comando $\text{LambdaMaxima} = \text{Lambda}(\text{PosicionMaximo})$. De esta forma se puede ver cómo varía la posición en longitud de onda de cada máximo, tal y como queda definido en la Figura 4-23.

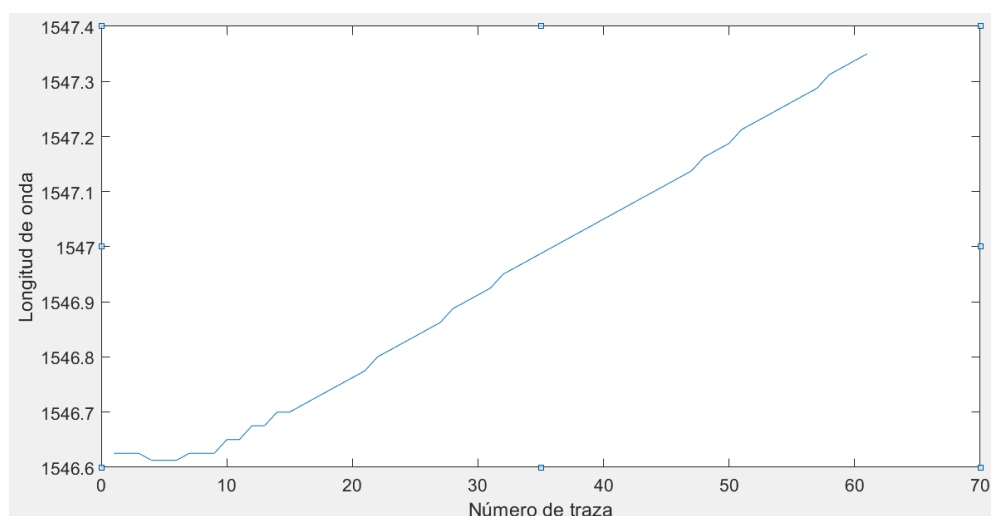


Figura 4-23 Evolución de la longitud de onda en la que se sitúa el máximo en potencia para la fibra T3F2

En dicha figura se aprecia cómo al principio y al final de la toma de medidas, la pendiente es más suave que en la zona intermedia. La estabilidad en longitud de onda que se observa al principio de la Figura 4-23 es debida a que al comenzar la toma de datos, la microcavidad no estaba tensa, por lo que este parámetro se mantuvo prácticamente constante. Para el caso de elongaciones más altas, lo que ocurrió es que la fibra comenzó a resbalar sobre los soportes, haciéndose menos sensible a las variaciones de la elongación. Estos tramos han sido retirados para que no afecten a la pendiente y otorgar una mayor exactitud en el cálculo de la sensibilidad.

Para facilitar la comparación de resultados y la obtención de la sensibilidad, se han exportado los datos obtenidos por MatLab a Excel.

A la hora de comparar la posición del máximo en potencia de cada traza con la elongación aplicada, es necesario un cambio de unidades en el eje x.

Tal y como se ha explicado anteriormente, los motores permiten aplicar una elongación de 17 nm por paso y, teniendo cuenta que la longitud inicial es de 17 cms, al aplicar 50 pasos por salto se obtiene que entre cada medida se ha producido una deformación de 5 $\mu\epsilon$.

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta L}{L_{inicial}} = \frac{\text{Número de pasos} * \text{Elongación por paso}}{L_{inicial}} = \frac{50 * 17 \cdot 10^{-9}}{17 \cdot 10^{-2}} = 5 \mu\epsilon$$

Por ello, para modificar el eje x, basta con crear una columna con unidades en $\mu\epsilon$, que vaya aumentando de cinco en cinco, y relacionar cada una de las trazas obtenidas con la elongación aplicada correspondiente. La Figura 4-24 muestra la el desplazamiento de la longitud de onda donde se localiza cada máximo en potencia en función de la deformación aplicada.

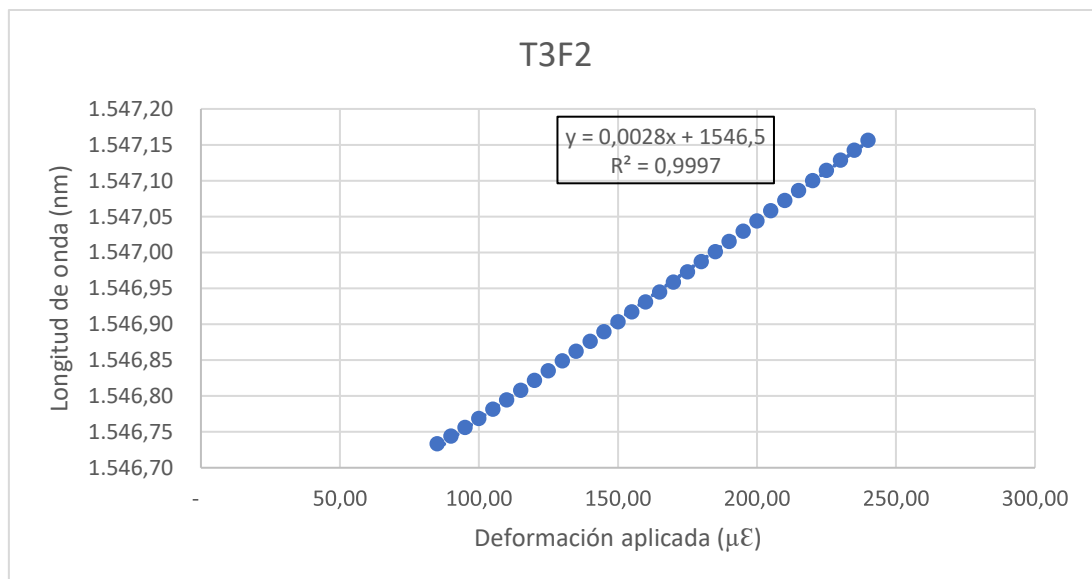


Figura 4-24 Caracterización de la microcavidad T2F2, con una sensibilidad de 1.9 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.9886$.

En la figura anterior se observa cómo ha evolucionado la posición de la longitud de onda del máximo en potencia en función de la tensión mecánica aplicada. Si se realiza un ajuste lineal Excel, obtenemos la función $y = 0.0028x + 1546.5$. La constante que aparece en esta función determina la longitud de onda en la que emite el láser generado por la microcavidad cuando la deformación aplicada es de $\mu\epsilon$, y la pendiente determina su sensibilidad. En este caso, la microcavidad T3F2 emite en una longitud de onda de 1546.5 nm y tiene una sensibilidad de 2.8 pm/ $\mu\epsilon$.

Cabe destacar que el valor del coeficiente de determinación, R^2 , que aparece al realizar un ajuste lineal en los análisis llevados a cabo, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretende explicar, es decir, cuanto más se aproxime este valor a 1, mayor es la veracidad de la sensibilidad obtenida. Los coeficientes de determinación obtenidos al evaluar las microcavidades fabricadas oscilaron entre 0.997 y 0.999.

A continuación, se muestran las sensibilidades obtenidas para las distintas microcavidades.

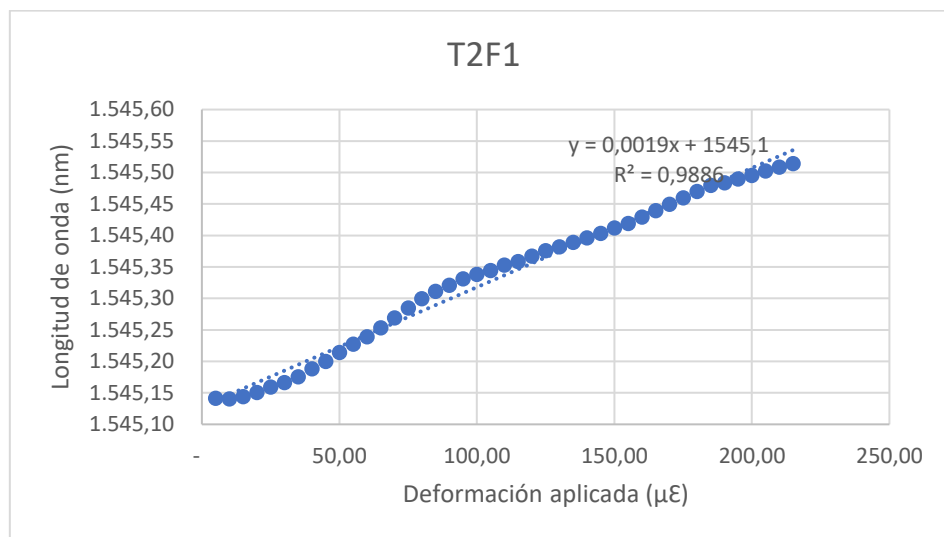


Figura 4-25 Caracterización de la microcavidad T2F1, con una sensibilidad de 1.9 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.9886$.

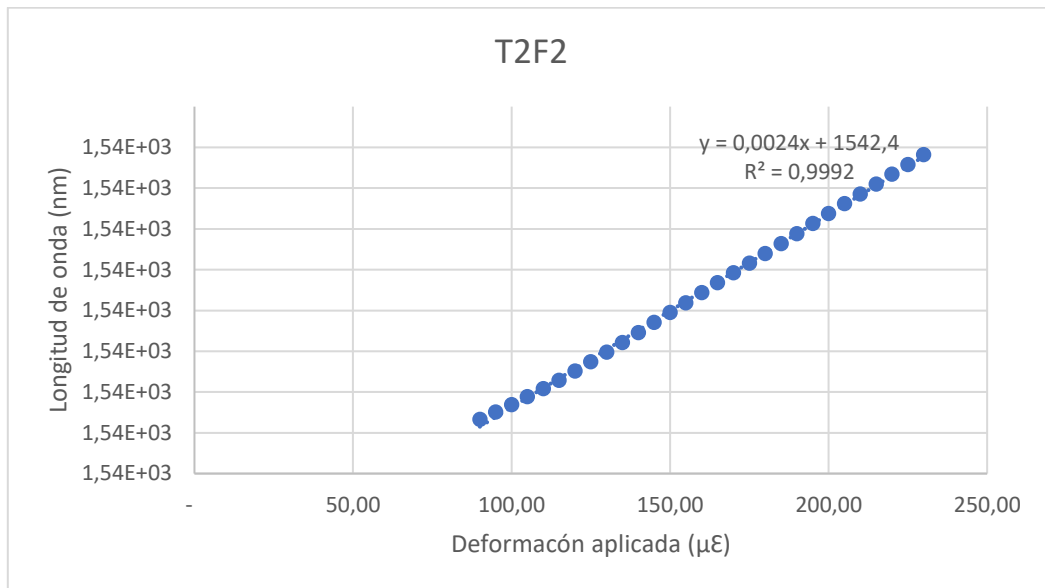


Figura 4-26 Caracterización de la microcavidad T2F2, con una sensibilidad de 2.4 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.992$.

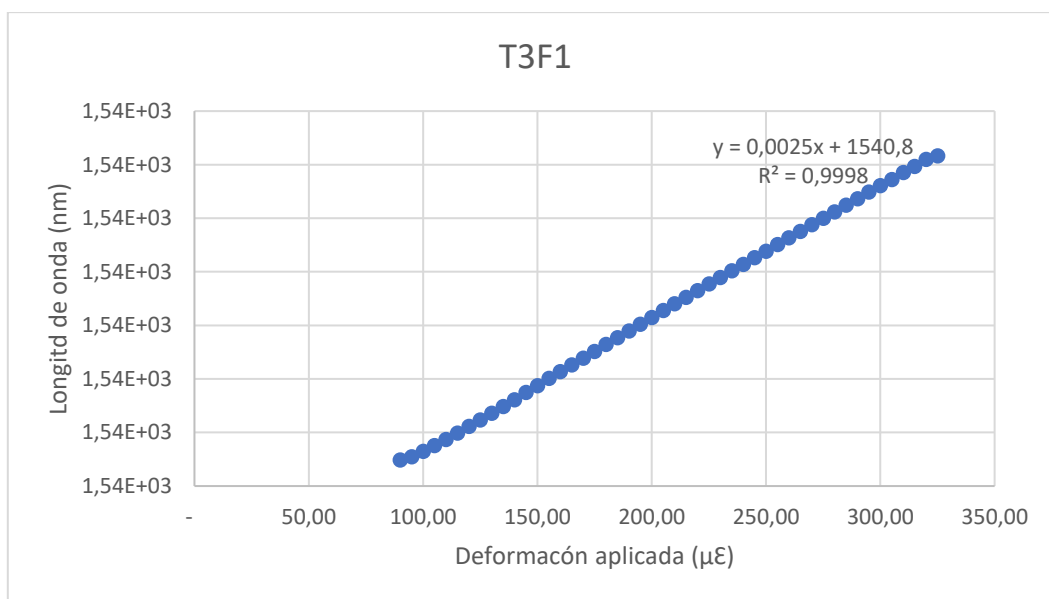


Figura 4-27 Caracterización de la microcavidad T3F1, con una sensibilidad de 2.5 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2= 0998$.

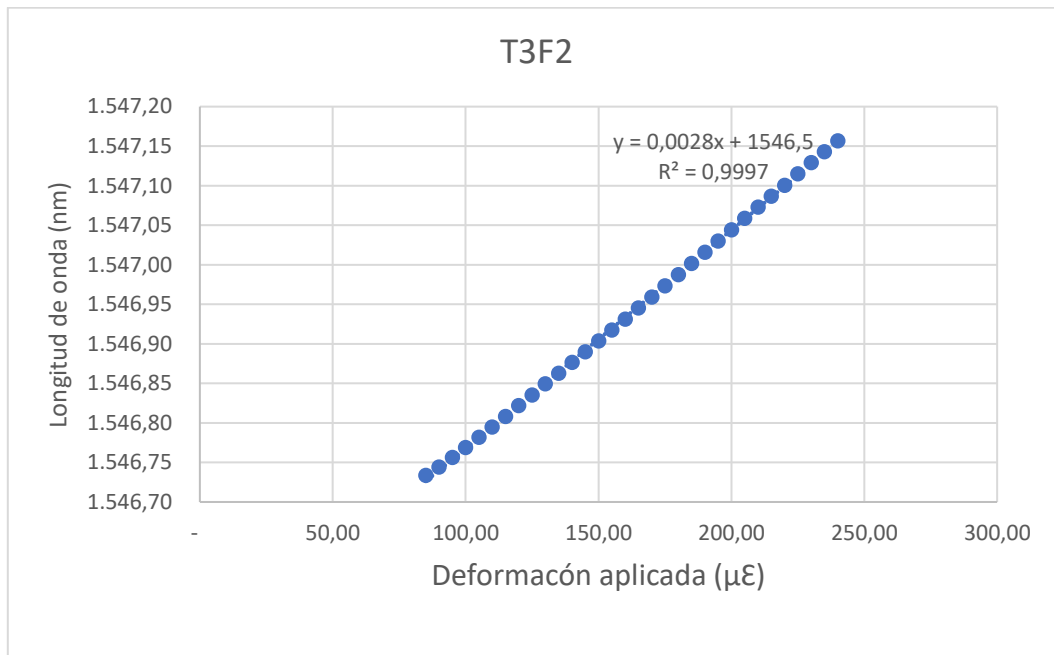


Figura 4-28 Caracterización de la microcavidad T3F2, con una sensibilidad de 2.8 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.997$.

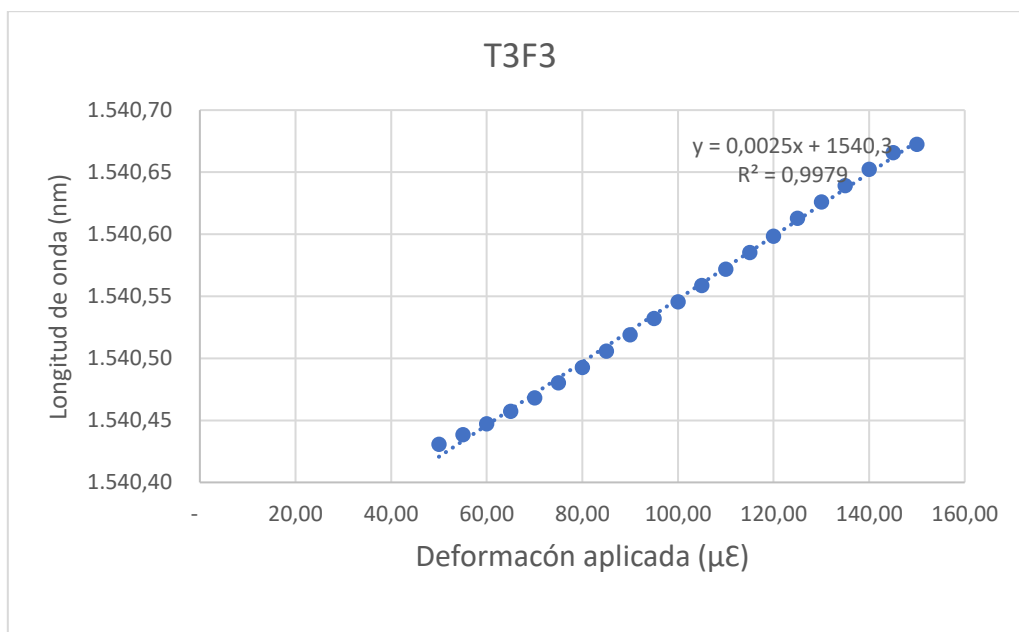


Figura 4-29 Caracterización de la microcavidad T3F3, con una sensibilidad de 2.5 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.9979$.

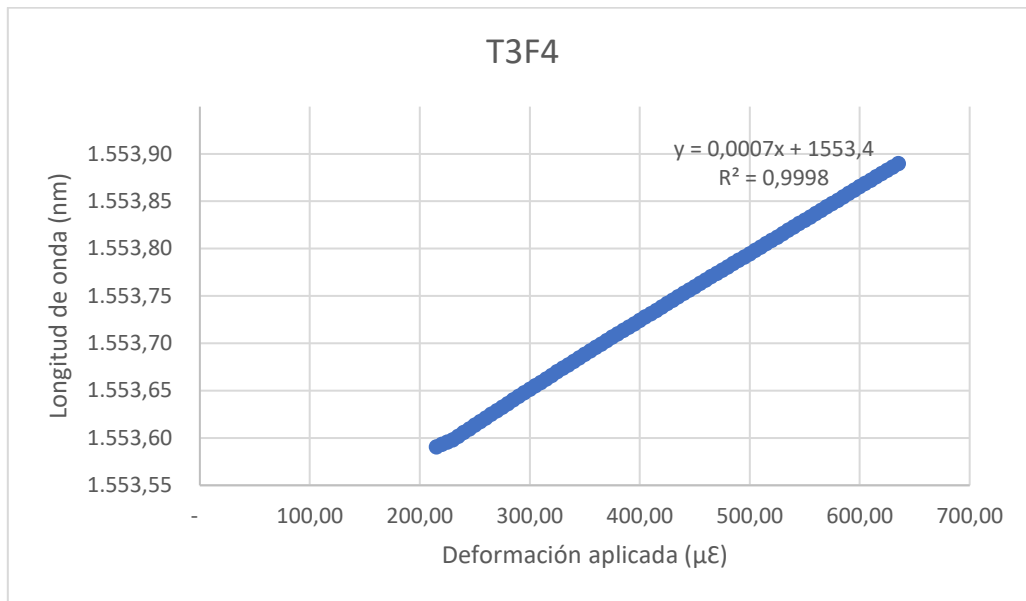


Figura 4-30 Caracterización de la microcavidad T3F4, con una sensibilidad de 0.7 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2=0.998$.

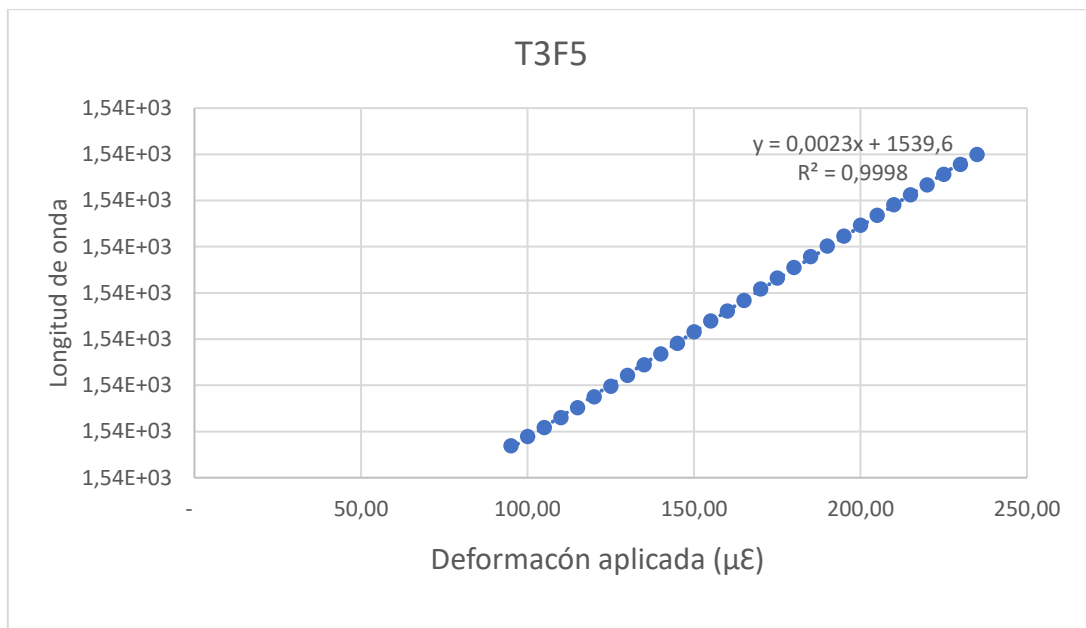


Figura 4-31 Caracterización de la microcavidad T3F5, con una sensibilidad de 2.3 pm/ $\mu\epsilon$ y un coeficiente de determinación de $R^2= 0.9998$.

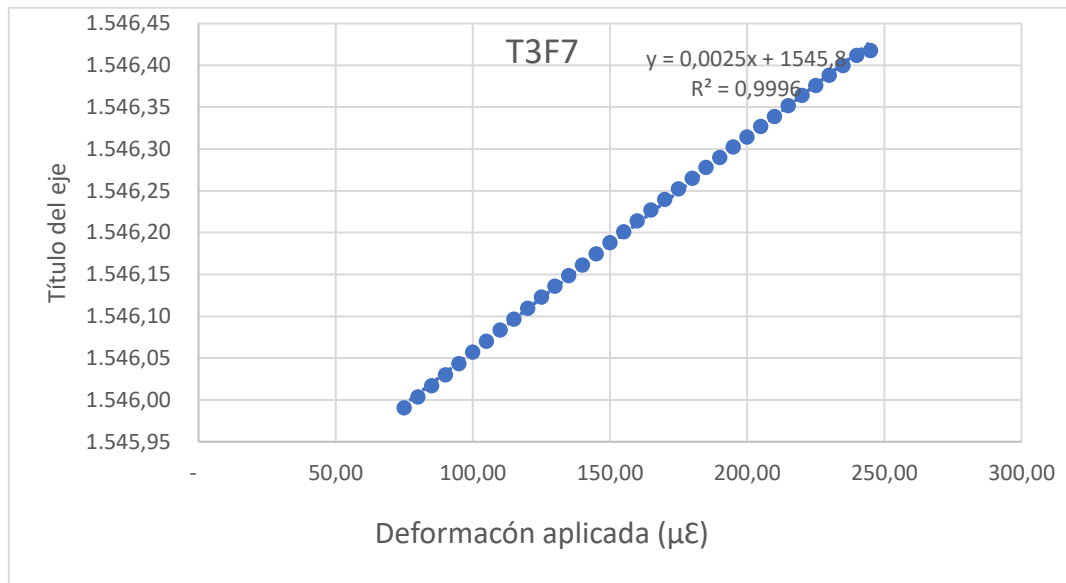


Figura 4-32 Caracterización de la microcavidad T3F7, con una sensibilidad de 2.5 pm/μΕ y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.9996$.

A continuación, se muestra en la tabla 4-3 la longitud de onda de emisión que genera cada una de las microcavidades estudiadas, así como su sensibilidad, y el valor de R^2 . Esta tabla se completa con el valor de la longitud física de cada una de estas microcavidades fabricadas.

Microcavidad	λ de emisión (nm)	Sensibilidad (pm/μΕ)	R^2	Longitud de la microcavidad (μm)
T2F1	1545.1	1.9	0.9986	31
T2F2	1542.4	2.4	0.9992	45.83
T3F1	1540	2.5	0.9998	72.94
T3F2	1546.5	2.8	0.9997	50
T3F3	1540.3	2.5	0.9979	25
T3F4	1553.4	0.7	0.9998	41.67
T3F5	1539.6	2.3	0.9998	41.67
T3F7	1545.8	2.5	0.9996	50

Tabla 4-3 Sensibilidades, longitud de onda de emisión y R^2 de las microcavidades.

Los valores típicos de sensibilidad a la elongación para sensores FBG rondan los 1.2 pm/μΕ [13] [12], por lo que en la mayoría de los casos los sensores fabricados doblan la sensibilidad de los anteriores.

Capítulo 5 - Desarrollo de un sensor multiparámetro.

Una vez analizados y estudiados los parámetros de un sistema óptico para la consecución de medidas de un único parámetro, se plantea el reto de fabricar sistemas capaces de discriminar un mayor número de magnitudes simultáneamente. Los cambios en las magnitudes del mundo real y su correspondiente diafonía han hecho que este concepto cobre una mayor importancia en las últimas décadas [17].

Anteriormente, se han presentado sensores multiparamétricos basados en múltiples interferómetros Fabry-Perot (FPI) con diferentes longitudes en su microcavidad [18] [19] en los que la información del parámetro que se quería medir se codificó para cada una de las longitudes de las cavidades individuales. Sin embargo, en este proyecto se presenta una estructura multi-interferométrica basada en la interferencia Fabry-Perot (FP) y la guía reflectante antirresonante (AR). En este sistema, simplemente analizando la fase de la FFT de algunas frecuencias espaciales específicas, los cambios en los sensores pueden ser fácilmente monitorizados.

Estas variaciones de fase muestran los cambios en longitud de onda producidos por variaciones de elongación o temperatura para cada contribución espectral por separado. Por otra parte, la mayoría de los sensores de fibra óptica están diseñados para ser relativamente grandes en tamaño, así como para medir un solo parámetro. En este proyecto se presenta experimentalmente un sensor puntual capaz de realizar mediciones en dos parámetros de forma simple y de bajo coste. Esto nos permite medir elongación y temperatura mediante interferencias FP y guías reflectantes AR.

El sensor propuesto, cuyo diagrama esquemático se muestra en la Figura 5-2, está compuesto por una pareja de estructuras SMF-HCF-SMF. Una sección de fibra hueca, con un diámetro interno de $20.5 \mu\text{m}$ y un diámetro externo de $125.5 \mu\text{m}$, se fusionaron entre dos secciones de fibra SMF. El proceso de fabricación fue similar al descrito en el apartado de fabricación. Los parámetros de configuración de la fusionadora fueron optimizados para evitar la deformación o el colapso de la región del tubo de sílice, el punto de fusión se posicionó mayoritariamente en la zona SMF.

Posteriormente, la fibra se cortó con la longitud elegida con la ayuda de un microscopio electrónico. En la Figura 5-1 se muestra el proceso de fusión para una de las estructuras SMF-HCF-SMF. Este proceso se repitió para dos longitudes distintas de fibra hueca (HCF) situado entre las fibras monomodo. Finalmente, estas dos microcavidades se fusionaron, tal y como muestra la Figura 5-2.

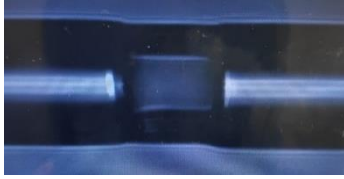


Figura 5-1 Proceso de fusión de una microcavidad.

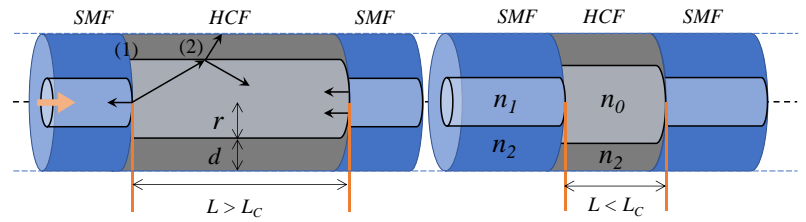


Figura 5-2 Diagrama esquemático del sensor multiparamétrico propuesto.

Debido a la reflexión de Fresnel, se genera una interferencia Fabry-Perot (FP) cuando la luz introducida es parcialmente reflejada en el punto (1) (ver Figura 5-2), o lo que es lo mismo, entre las interfaces entre las fibras SMF y HCF. Después el haz de luz se propaga con un cierto ángulo y, si la microcavidad es suficientemente larga, entra en la cubierta de la fibra hueca (indicado en el punto (2) de la Figura 5-2). En este punto la estructura puede verse como un interferómetro FP a lo largo de la dirección longitudinal, debido a que las interferencias entre el aire y la sílice se comportan como dos superficies reflectantes [17].

Después del primer interferómetro Fabry-Perot, las ondas de luz cuyas longitudes de onda no cumplan la condición de resonancia serán guiadas hasta el segundo interferómetro, el de mayor longitud. Aquí, la interferencia obtenida es la correspondiente a una estructura clásica SMF-MM-SMF [15]. En nuestro caso, el guiado de la reflexión antirresonante (AR) ocurre en la fibra hueca, actuando como una sección de fibra multimodo (MM).

Esta transición entre el interferómetro FP y el guiado de reflexión AR se ha analizado detalladamente en estructuras de fibra hueca situadas entre fibras monomodo [14] [20], mostrando que cuando la longitud de la fibra hueca supera la longitud crítica, ambas interferencias (FP y AR) se pueden observar en el espectro en reflexión. Tal y como se explica en detalle en la referencia [20] esta longitud crítica (L_c) se puede obtener mediante la ecuación (1) [14].

$$L_c = \sqrt{n_0^2 + n_2^2 - n_1^2} \left(\frac{r}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} + \frac{2d}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \right) \quad (1)$$

Donde, como queda explicado en la Figura 5-2, d corresponde con el espacio entre el límite del núcleo de la fibra hueca y el límite de su la cubierta, r es el radio del núcleo de la fibra hueca y n_0 , n_1 y n_2 son los índices de refracción del aire, el núcleo y la cubierta de la fibra, que corresponden con los valores 1, 1.449 y 1.443 respectivamente.

Considerando las dimensiones de la HCF utilizada, los diámetros internos y externos corresponden con 20.5 y 125.5 μm , respectivamente. De acuerdo con la ecuación (1), la longitud crítica es, en este caso, de 175,92 μm . Teniendo en cuenta este valor, se fabricaron dos microcavidades de diferente longitud, una superior a esta longitud crítica (228 μm) y otra inferior a esta (115 μm).

Tras fusionar estas dos estructuras SMF-HCF-SMF, y mediante el interrogador de FBGs *Micron Optics® SM 125*, se caracterizó su espectro en reflexión. Para ello, esta estructura se colocó sobre unos microposicionadores motorizados, (*Motorized Translation Stage* o MTS según sus siglas en inglés), controlados externamente con una resolución por paso de 17nm. Bajo esta estructura se colocó una superficie de goma cuya temperatura se podía controlar también externamente, como se muestra en la Figura 5-3. De esta forma era posible aplicar variaciones de elongación y temperatura simultáneamente.

La caracterización de esta estructura se realizó aplicando una elongación de 5800 $\mu\epsilon$ en pasos de 200 $\mu\epsilon$, y repetido a diferentes temperaturas desde 36°C a 90°C.

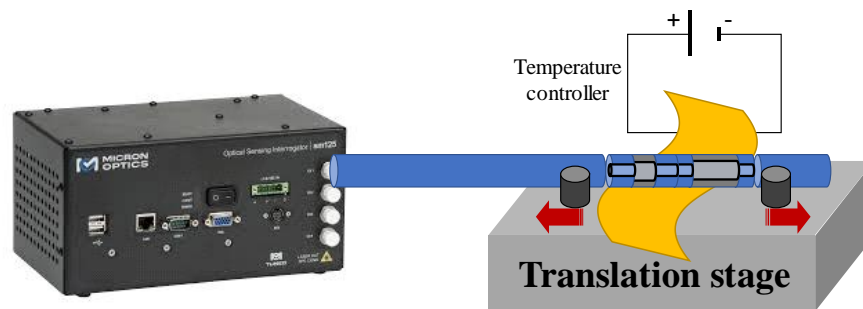


Figura 5-3 Configuración experimental para las medidas de elongación y temperatura.

Como en trabajos anteriores [16], el principio de operación del sensor multiparamétrico está basado en la combinación del espectro obtenido del interrogador de sensores basados en FBGs trabajando en una configuración en reflexión y su FFT.

La Figura 5-4 muestra el espectro óptico combinado de las dos microcavidades a temperatura ambiente sin aplicar ninguna elongación. Para diferenciar la información de cada sensor se ha analizado la FFT de su respuesta espectral, obteniendo distintas contribuciones para cada uno de los interferómetros presentes en este sensor FP en cascada, como muestra la Figura 5-5. De esta forma, las variaciones de fase de las diferentes frecuencias espaciales, los cambios que sufren ambos sensores pueden ser monitorizados fácilmente. Estas variaciones de la fase que se producen en los principales picos de la respuesta FFT, (frecuencias espaciales de 0.1375 y 0.2875 nm^{-1}), reflejan las variaciones de longitud de onda inducidas por la variación de la elongación o la temperatura en cada contribución espectral por separado.

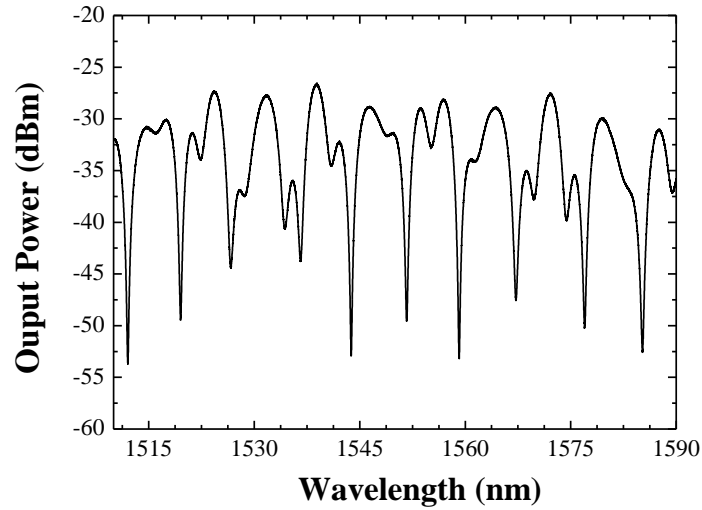


Figura 5-4 Espectro óptico del sensor multiparámetro.

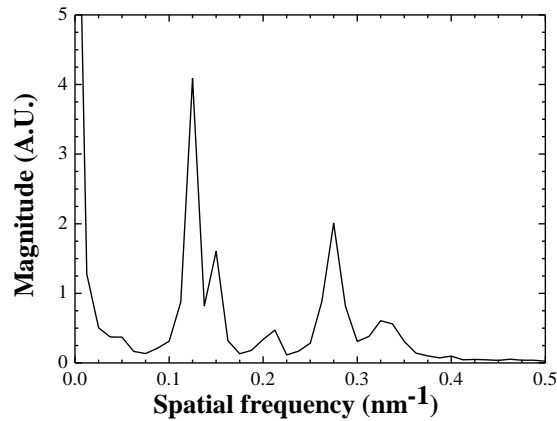


Figura 5-5 Magnitud de la FFT del espectro de la figura 5-4.

El interrogador recoge los datos de los sensores con una frecuencia de 1 Hz. Para medir la capacidad de los sensores en tiempo real, se utilizó un *software* desarrollado en el laboratorio [16]. Este *software* recoge el espectro de los sensores, realiza una FFT, y estira el sensor controlado el MTS. Como se ha destacado anteriormente, este proceso fue repetido para diferentes temperaturas, desde los 36°C hasta los 90°C.

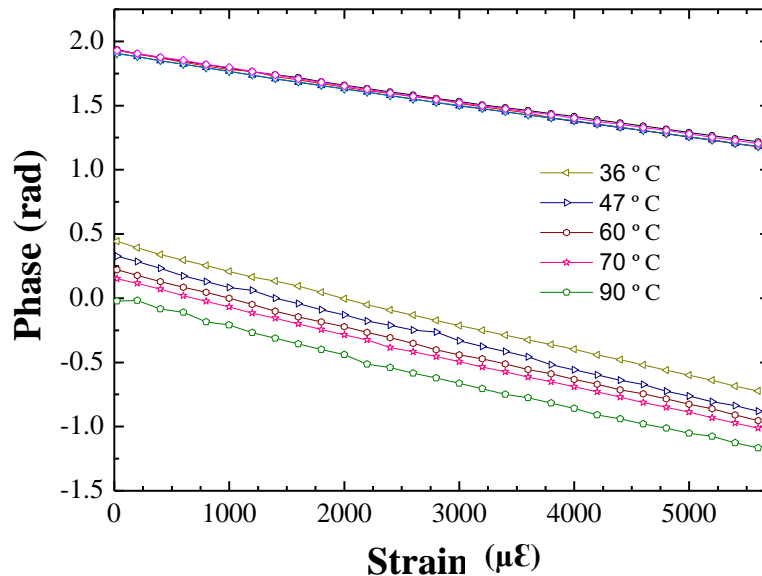


Figura 5-6 Variación de fase para las frecuencias espaciales seleccionadas como resultado de la variación de elongación y temperatura.

En la Figura 5-6 se muestra la variación de la fase que presentan las frecuencias espaciales seleccionadas, en función de la variación de temperatura. En la parte superior de dicha figura, se puede ver el comportamiento en fase de la microcavidad cuya longitud es inferior a la longitud crítica. Como se observa, es insensible a los cambios de temperatura, pero no a la elongación aplicada, por lo que puede usarse para medir dicha elongación. Aquí, el sensor presenta una clara respuesta lineal a las variaciones de la elongación, mostrando una sensibilidad de $-0.129 \text{ rad/m}\epsilon$ y un error (o coeficiente de determinación en este caso) de $R^2=0.999$. Por otro lado, presenta una variación despreciable en fase para los cambios de temperatura, tal y como se esperaba.

De la misma manera, cuando la longitud de HCF supera la longitud crítica, en el espectro reflejado aparecen tanto la interferencia FP como la guía reflectante AR, aportando una sensibilidad a diferentes parámetros, como la elongación y la temperatura. Esto puede apreciarse en la parte inferior de la Figura 5-6, donde se pueden ver variaciones de fase tanto para la variación de elongación aplicada como para los cambios de temperatura. Además, haciendo un seguimiento de dichos valores, es posible discriminar dichos parámetros de manera independiente.

En este caso, el sensor multiparámetro presenta una respuesta lineal a la elongación, con una sensibilidad de $-0.2084 \text{ rad/m}\epsilon$ y un error o coeficiente de determinación de $R^2=0.999$. Además, al ser de una longitud mayor a la longitud crítica, presenta una sensibilidad a la temperatura (Figura 5-7) de $-0.0077 \text{ rad}/^\circ\text{C}$ y un error de $R^2=0.999$.

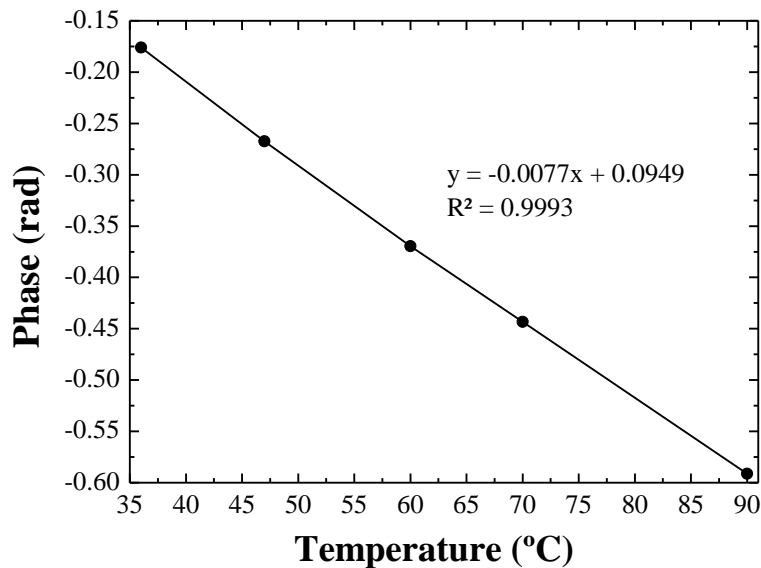


Figura 5-7 Variación de fase en función de la temperatura.

Por lo tanto, queda demostrado que las microcavidades cuya longitud es inferior a la longitud crítica, se comportan como interferómetros Fabry-Perot, mostrando sensibilidad a la elongación y una clara insensibilidad a los cambios de temperatura. Además, también se demuestra que las microcavidades cuya longitud sea mayor que la longitud crítica, son sensibles tanto a la elongación como a la temperatura, ya que se comportan como una guía reflectante antirresonante AR.

Concretamente, los resultados experimentales obtenidos muestran una sensibilidad a la elongación y a la temperatura de $-0.2084 \text{ rad/m}\epsilon$ y $-0.0077 \text{ rad}/^\circ\text{C}$ respectivamente para la contribución de la antirresonancia, correspondiente con la microcavidad cuya longitud es superior a la longitud crítica, ambas con un error de $R^2=0.999$.

Por otro lado, al analizar la interferencia FP (microcavidad con longitud inferior a la longitud crítica), se obtuvo una sensibilidad a la elongación de -0.129 rad/ms con un error de $R^2=0.999$. Se demostró además que esta microcavidad era insensible a los cambios de temperatura.

Cabe destacar que los resultados derivados de este trabajo experimental han sido enviados al congreso internacional *27th International Conference on Optical Fiber Sensors*, para su evaluación y posterior presentación en dicho congreso [21].

Capítulo 6 - Conclusiones.

En este trabajo fin de grado se ha desarrollado un método para fabricar sensores basados en microcavidades con el material disponible en el laboratorio de fotónica Teralab. Dicho método, basado en el desarrollo experimental de estas microcavidades, plantea la importancia que yace en parámetros como la distancia a la que se debe colocar el punto de fusión respecto de las fibras a fusionar, entre otros. Esto es debido a que una de las fibras que conforman la microcavidad, la fibra hueca (HCF), resulta sumamente frágil, por lo que una fusión incorrecta podría echar a perder todo el proceso de fabricación.

También se resalta la importancia de la longitud física de la microcavidad en relación a las características como sensor que presenta. Uno de los parámetros clave a estudiar fue el de la longitud crítica, ya que, además de condicionar el valor del *Free Spectral Range* que tendrá el sensor, determina si éste será sensible a la elongación y los cambios de temperatura (longitud superior a la longitud crítica) o solamente a la elongación (longitud inferior a dicho valor).

Después de desarrollar un programa para la fusionadora de fibra óptica capaz de fabricar estas microcavidades, se han caracterizado de diversas formas. En primer lugar, se recogieron los datos correspondientes a las pérdidas de inserción de cada microcavidad, mediante el medidor en potencias *EXFO Multifunction Loss Tester FOT-930*. Dichas pérdidas se deben, principalmente, a la diferencia del diámetro del núcleo entre la fibra monomodo y la fibra hueca, siendo de unos 9 μm para la SMF y de 57 μm o 20.5 μm para las fibras huecas empleadas. Estos valores oscilaron entre 5 dB y 14 dB, salvo para casos muy puntuales.

Posteriormente se estudió el espectro óptico de cada una de las microcavidades mediante el interrogador de sensores *Smartec SM-125*. De dicho espectro se obtuvieron valores como el rango dinámico de las microcavidades o *Free Spectral Range* de cada microcavidad, mediante el cual se pudo determinar con exactitud la longitud física de estas estructuras.

Se han analizado estas microcavidades además mediante el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600 y se ha verificado que en ellas se producen un gran número de reflexiones, motivo por el cual se decidió utilizar estas estructuras como reflectores dentro de una cavidad distribuida para la generación de láseres.

Gracias a la implementación de esta cavidad distribuida se ha obtenido también la sensibilidad a la elongación de dichas microcavidades. Se ha implementado un sistema óptico mediante el cual se consigue evaluar la variación de la longitud de onda en la que emite el láser generado por la microcavidad en función de elongación aplicada. En este estudio se han posicionado diferentes microcavidades sujetos a unos

microposicionadores motorizados controlados mediante un *software* externo, de forma que se les pudo aplicar una elongación controlada externamente. Al aplicar dicha elongación el tamaño de las microcavidades se modificaba, por lo que la longitud de onda de emisión se vio afectada, lo que nos sirvió para cuantificar su sensibilidad.

Las sensibilidades de los sensores fabricados oscilaron entre $1 \text{ pm}/\mu\epsilon$ y $3 \text{ pm}/\mu\epsilon$, con un coeficiente de determinación que en la mayoría de los casos no baja de 0.999. Estos valores presentaban mejoras notables frente a los valores típicos de sensibilidad frente a la elongación de los FBGs, que ronda los $1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

Como colofón de este trabajo fin de grado, se ha fabricado y estudiado experimentalmente un sensor multiparamétrico basado en una estructura multi-interferométrica para mediciones de elongación y temperatura simultáneamente.

Esta estructura se basa en las interferencias Fabry-Perot (FP) y las guías reflectantes (AR), fabricada con dos microcavidades de fibra hueca de diferentes longitudes. La primera de ellas contaba con una longitud inferior a la longitud crítica y la segunda con una longitud superior a está.

Realizando un seguimiento de las fases de la FFT de unas componentes frecuenciales específicas, los cambios en el sensor pueden ser monitorizados de manera independiente. Estas variaciones de fase siguen los cambios en longitud de onda producidos, por la elongación aplicada o por el cambio de temperatura, para cada contribución espectral por separado.

Los resultados experimentales obtenidos muestran una sensibilidad a la elongación y a la temperatura de $-0.2084 \text{ rad}/\text{m}\epsilon$ y $-0.0077 \text{ rad}/^\circ\text{C}$ respectivamente para la contribución AR, correspondiente a la microcavidad cuya longitud es superior a la longitud crítica, ambas con un error de $R^2=0.999$.

Por otro lado, al analizar la interferencia FP (microcavidad con longitud inferior a la longitud crítica), se obtuvo una sensibilidad a la elongación de $-0.129 \text{ rad}/\text{m}\epsilon$ con un error de $R^2=0.999$. Se demostró además que esta microcavidad era insensible a los cambios de temperatura.

Los resultados derivados de este trabajo experimental han sido enviados al congreso internacional *27th International Conference on Optical Fiber Sensors*, para su evaluación y posterior presentación en dicho congreso.

Capítulo 7 - Bibliografía y referencias.

- [1] «www.researchgate.net,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/The-configuration-of-the-tunable-erbium-doped-fiber-ring-laser_fig2_258420561.
- [2] P. Cabezudo Sánchez-Valverde, «Caracterización de dispositivos avanzados de fibra óptica.,» Pamplona/Iruña, 2018.
- [3] «www.researchgate.net,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Broadband-fluorescence-of-an-erbium-doped-fibre-laser-Broadband-peak-at-1550-nm-due-to_fig27_226100236.
- [4] I. Iturri Gil, «Diseño y caracterización de nuevas topologías de redes de sensores multiplexados en longitud de onda mediante láseres de fibra con emisión multilínea.,» Pamplona/Iruña, 2014.
- [5] «www.wireandcabletips.com,» [En línea]. Available: <https://www.wireandcabletips.com/fiber-optic-cabling-solutions-sensing-applications/>.
- [6] R. A. Pérez Herrera y M. López-Amo , «Descripción y aplicaciones: Láseres de fibra óptica.,» *Mundo Electrónico*.
- [7] «www.grupoorion.es,» [En línea]. Available: <http://grupoorion.unex.es:8001/rid=1HWBMTTJJ-29C546W-1ZQS/Dispositivos%20Opticos%20activos.cmap>.
- [8] «www.materialesavanzados.wordpress.com,» [En línea]. Available: <https://materialesavanzados.wordpress.com/2014/05/07/deformando-la-luz-emision-%E2%80%A8laser-aleatoria-y-pruebas-mecanicas-%E2%80%A8en-tejido-biologico/>.
- [9] «www.hbm.com,» [En línea]. Available: <https://www.hbm.com/>.
- [10] «www.researchgate.net,» [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/A-fiber-optic-Mach-Zehnder-interferometer_fig11_324873138.
- [11] M. Bravo, «Contribution to the development of new photonic systems for fiber optic sensing applications.».

- [12] E. Campanella, A. Cuccovillo, C. Campanella, A. Yurt y V. Passaro, «Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications,» *Sensors*, 2018.
- [13] L. Grattan y B. Meggit, «Optical Fiber Sensor Technology: Devices and Technology.,» *Optoelectronics, Imaging and Sensing, Springer Science & Business Media.*, vol. 2, 2012.
- [14] X. ZHANG, H. PAN, H. BAI, M. YAN y J. WANG, «Transition of Fabry–Perot and antiresonant mechanisms via a SMF-capillary-SMF structure.,» *Optics Letters*.
- [15] P. R. Horche, M. López-Amo, M. A. Muriel y J. A. Martín Pereda, «Spectral behavior of a low cost all fiber component based on untapered multifiber sensors.,» *IEEE Photonics Technology*, 1989.
- [16] D. Leandro, M. Bravo, A. Ortigosa y M. Lopez-Amo, «Real-time FFT analysis for interferometric sensors multiplexing,» *Journal of Lightwave Technology*, pp. 354-360, 2015.
- [17] C. Zhu, R. Gerald y J. Huang, «A Dual-parameter Internally Fabry-Perot Microcavity Sensor,» *IEEE Sensors*, 2019.
- [18] Z. Zhang, J. He, B. Du, F. Zhang, K. Guo y Y. Wang, «Measurement of high pressure and high temperature using a dual-cavity Fabry-Perot interferometer created in cascade hollow core fibers.,» *Opt. Lett.*, 2018.
- [19] Y. Zhang, «Simultaneous measurements of temperature and pressure with cascaded extrinsic Fabry-Perot interferometer and intrinsic Fabry-Perot interferometer sensors.,» *Optical Engineering*, 2014.
- [20] F. Hou, «Investigation of transmission and reflection of antiresonance in a SMF-capillary-SMF structure.,» *Advanced Sensor Systems and Applications VIII. International Society for Optics and Photonics*, 2018.
- [21] R. A. Perez-Herrera, M. Bravo, D. Leandro, J. Pradas, N. Susana y M. López-Amo, «Multiparameter sensor based on a multi-interferometric serial configuration for temperature and strain measurements,» Pamplona/Iruña, 2020.
- [22] «www.community.fs.com,» [En línea]. Available: <https://community.fs.com/blog/how-do-different-fiber-optic-couplers-work.html>.
- [23] «www.wdm-mux-demux.com,» [En línea]. Available: www.wdm-mux-demux.com/future-understanding-for-wdm-multiplexer.
- [24] «<http://personales.upv.es/jquiles/prffi/semi/ayuda/hlpbandas.htm>,» [En línea].

- [25] «www.cisco.com,» [En línea]. Available:
<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/optical-networking/ons-15454-m6-multiservice-transport-platform-mstp/212834-practical-aspects-of-raman-amplifier.html>.
- [26] R. A. Pérez Herrera, S. Novais, M. Bravo, D. Leandro, S. Silva, O. Frazao y M. Lopez-Amo, «Multiplexing optical fiber Fabry-Perot interferometers based on air-microcavities.,» *Seventh European Workshop on Optical Fiber Sensors.*, 2019.