



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS IRAPUATO-SALAMANCA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

**Detección de parámetros físicos utilizando
dispositivos de fibra óptica.**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

M. en I. Yanelis López Dieguez

DIRECTORES:

Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala

Dr. Daniel Jáuregui Vázquez

SALAMANCA, GTO.

FEBRERO, 2020

Óllo el a

Yebe a la a cilla que va e tu a.

Yebe a a u a ha ta la cu a.

Y i , la e p a , que e á e va :

Óllo el a a a que pe u a,

Óllo el a e a e a el ba .

Yebe a a el tie p e e i te .

Yebe a a la ho a que nu ca bi lla.

Y i , p e da to ca e cie to :

Óllo el a e a la a a a,

Óllo el a e a e e e .

Silvio Rodríguez, Causas y Azares, 1978

<http://www.zurrondelaprendiz.cult.cu/discos>

A mis padres, por ser el cimiento sobre el que se ha podido sustentar toda mi vida y mi retaguardia en los momentos en los que no he podido estar.

A mi hija, que es la luz que guía mi vida, la que me hace querer ser cada día mejor.

A mi abuelita por ser tan linda y especial.

A mi familia, que me quiere y me apoya, aún en la distancia.

¡Los quiero mucho!

Agradecimientos



Al CONACyT por el apoyo brindado mediante la beca número (CVU/Becario) 577494/307127, por el apoyo brindado el programa de Becas de Movilidad para Becarias y Becarios CONACyT Nacionales 2017 para la realización de una estancia de investigación en la Universidad de Valencia y por el Proyecto de Ciencia Básica No. A1-S-33363/CB2018 “Estudio de las No-linealidades en Fibras de Cristal Fotónico para la obtención de fuentes de luz de amplio espectro y propagación de pulsos cortos de alta energía”.



A la Universidad de Guanajuato por el apoyo brindado mediante el proyecto CIIC No. 114/2019.

A la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado de la Universidad de Guanajuato por el apoyo brindado mediante becas para la realización de una estancia de investigación en la Universidad de Valencia.

Al Laboratorio Nacional de la Universidad de Guanajuato por las imágenes de la Figura 3.10.

A la Oficina del Abogado General, especialmente a la Lic. Fátima Espinoza Hernández, Coordinadora de Trámites Migratorios.

A la División de Ingenierías del Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato y a todos sus trabajadores, especialmente al Dr. Juan Gabriel Aviña Cervantes, al Dr. José Amparo Andrade Lucio y al Dr. Juan Pablo Ramírez Paredes, Coordinadores del Posgrado en Ingeniería Eléctrica.

A todo el Cuerpo Académico de Telecomunicaciones y fotónica, especialmente a mis asesores Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala y Dr. Daniel Jáuregui Vázquez, por toda la ayuda que me brindaron durante estos años.

A todos mis compañeros del Laboratorio de fotónica y fibras ópticas, especialmente al Dr. Luis Alejandro Herrera Piad.



Al Dr. Miguel V. Andrés y al Dr. Antonio Díez Cremades por darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo durante un año en el Laboratorio de Fibras Ópticas de la Universidad de Valencia.



Al Laboratorio de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla por las imágenes utilizadas en la Figura 2.3.

Contenido

AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
<u>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>12</u>
1.1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.5 ANTECEDENTES.....	14
1.6 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	15
<u>CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO.....</u>	<u>16</u>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	16
2.2 FIBRAS ÓPTICAS.....	16
2.3 SENSORES ÓPTICOS.....	21
2.3.1 SENSORES DE INTENSIDAD MODULADA.....	25
2.3.2 SENSORES DE FASE MODULADA.....	26
2.4 COMPONENTES DE UN SENSOR DE FIBRA ÓPTICA.....	29
2.4.1 FUENTES DE LUZ DE AMPLIO ESPECTRO.....	29
2.4.1.1 Diodo superluminiscente.....	29
2.4.1.2 Ruido ASE.....	30
2.4.1.3 Generación de Supercontinuo.....	31
2.4.2 DETECTORES.....	33
2.4.3 ELEMENTOS PASIVOS.....	33
2.4.3.1 Aislador.....	33
2.4.3.2 Multiplexor por división de longitud de onda.....	34
2.4.3.3 Acoplador.....	35
2.4.3.4 Circulador.....	35
2.4.3.5 Controlador de polarización.....	36
<u>CAPÍTULO 3 PROCESO DE FABRICACIÓN DEL INTERFERÓMETRO.....</u>	<u>37</u>
3.1 INTRODUCCIÓN.....	37
3.2 FABRICACIÓN DE LA FIBRA ESTRECHADA.....	37
3.3 ESQUEMA EXPERIMENTAL PARA LA FABRICACIÓN DEL INTERFERÓMETRO DE PUNTA.....	39
3.4 PROCESO DE FABRICACIÓN.....	42
3.5 CARACTERIZACIÓN DEL INTERFERÓMETRO.....	46
<u>CAPÍTULO 4 APLICACIONES.....</u>	<u>50</u>
4.1 INTRODUCCIÓN.....	50
4.2 DETECCIÓN DE CAMBIOS DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN EN DISOLUCIONES ACUOSAS.....	50
4.2.1 CARACTERIZACIÓN.....	51
4.3 DETECCIÓN DE TEMPERATURA.....	56

4.3.1	CARACTERIZACIÓN.	56
4.4	DETECCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE SOLUTO EN DISOLUCIONES ACUOSAS.....	59
4.4.1	RECUBRIMIENTO DE LA ESTRUCTURA INICIAL CON UNA FINA CAPA DE COBRE.	60
4.4.2	ESQUEMA EXPERIMENTAL.	61
4.4.3	RESPUESTA ANTE CAMBIOS DE CONCENTRACIÓN.	63
4.5	LÁSER PARA DETECCIÓN DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN Y TEMPERATURA.	67
4.5.1	ESQUEMA EXPERIMENTAL.	67
4.5.2	RESPUESTA ANTE CAMBIOS DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN.....	73
4.5.3	RESPUESTA ANTE CAMBIOS DE TEMPERATURA.	77
<u>CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....</u>		80
<u>ANEXO I: OBSERVACIÓN EXPERIMENTAL DE INESTABILIDAD MODULACIONAL POR POLARIZACIÓN EN FIBRAS CON DISPERSIÓN NORMAL PARA TODAS LAS LONGITUDES DE ONDA DE GUIADO Y BIRREFRINGENCIA RESIDUAL.</u>		82
AI.1	INTRODUCCIÓN.	82
AI.2	CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA.....	82
AI.2.1	CÁLCULO DE LA DISPERSIÓN TEÓRICA DE LA FIBRA.	83
AI.2.2	MEDIDA DE LA DISPERSIÓN CROMÁTICA A PARTIR DEL PUNTO DE INFLEXIÓN DE FASE. 85	
AI.2.2.1	Esquema experimental.	85
AI.2.3.2	Procesamiento de datos recolectados.	87
AI.2.3	MEDIDA DE LA BIRREFRINGENCIA DE FIBRAS ÓPTICAS.....	90
AI.2.3.1	Esquema experimental.	90
AI.2.3.2	Procesamiento de datos recolectados.	91
AI.3	CÁLCULO TEÓRICO DE LAS BANDAS DE FWM.....	92
AI.4	OBSERVACIÓN EXPERIMENTAL DE INESTABILIDAD MODULACIONAL POR POLARIZACIÓN.	93
AI.4.1	ESQUEMA EXPERIMENTAL.....	93
AI.4.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES.	94
<u>ANEXO II: PRODUCTOS GENERADOS.....</u>		99
AII.1	ARTÍCULOS JCR COMO PRIMER AUTOR	99
AII.2	COLABORACIÓN EN ARTÍCULOS JCR.....	99
AII.3	CONGRESOS INTERNACIONALES	99
AII.4	CONGRESOS NACIONALES.....	100
<u>REFERENCIAS:.....</u>		101

Índice de Figuras

Figura 2.1: Izquierda: Imagen de la sección transversal de una fibra óptica convencional (SMF-28) tomada con un microscopio electrónico [49]. Centro y derecha: diagrama de la vista lateral de una fibra óptica convencional y representación del perfil escalonado de índice de refracción [46]. a: radio del núcleo, b: radio del, n_0 : índice de refracción del aire ($n_0 = 1$), n_1 : índice de refracción del núcleo, n_2 : índice de refracción del revestimiento.	17
Figura 2.2: Modos de propagación de la luz en fibras ópticas [48].	17
Figura 2.3: Vista transversal de fibras fotónicas con diferentes estructuras (imágenes tomadas con un microscopio electrónico de la BUAP).	21
Figura 2.4: Sensibilidad y Rango de un sensor [53].	23
Figura 2.5: Izquierda: Curva ideal vs curva medida de un sensor con histéresis [53]. Derecha: Curva de histéresis de un sensor [53].	23
Figura 2.6: Clasificación de sensores: Sensores intrínsecos [1].	25
Figura 2.7: Clasificación de sensores: Sensores extrínsecos [1]	25
Figura 2.8: Esquema para generar interferencia por división de frente de onda [54].	27
Figura 2.9: Esquema para generar interferencia por división de amplitud. [54].	28
Figura 2.10: Izquierda: Niveles de energía del erbio (Er^{+3}) [48]. Derecha: Espectro de emisión de 3.5 metros de fibra dopada con erbio (Er^{+3}) (LIEKKI™ Er 16 - 8 / 125) utilizando 980 nm como longitud de onda de bombeo (QPHOTONICS QFBGLD-980-200).	31
Figura 2.11: Esquema básico para la generación de supercontinuo.	31
Figura 2.12: Ejemplos de espectros supercontinuos obtenidos en el laboratorio.	32
Figura 2.13: Diagrama de un aislador de fibra óptica [66].	34
Figura 2.14: Esquema básico de un aislador óptico dependiente de la polarización [66].	34
Figura 2.15: Diagrama de un multiplexor por división en longitud de onda [68].	35
Figura 2.16: Diagrama de un acoplador de fibra óptica de tres puertos [69].	35
Figura 2.17: Diagrama de un circulador de fibra óptica de tres puertos [70].	36
Figura 2.18: Diagrama de un controlador de polarización manual de tres placas [71].	36
Figura 3.1: Diagrama simplificado de la máquina para la fabricación de fibra óptica estrechada mediante fusión y estiramiento (MFFOE) [72].	37
Figura 3.2: Esquema de la geometría de una fibra estrechada. r_0 : radio inicial de la fibra óptica, r_c : radio del cuello uniforme de la fibra óptica estrechada, L : longitud del cuello de la fibra óptica estrechada, L_t : longitud de ambas transiciones de la fibra óptica estrechada, z : dirección de propagación de la luz, r_z : radio de la transición en función de la distancia, dp : profundidad de penetración [72].	38
Figura 3.3: Esquema del sistema implementado para la fabricación y caracterización del interferómetro. ..	40
Figura 3.4: Caracterización del diodo superluminiscente QSDM-1550-1 (gráficos tomados de la hoja de datos del fabricante [75]): a) Respuesta de potencia y voltaje dependientes de la corriente de operación, b) Espectro de emisión del diodo.	41
Figura 3.5: Caracterización en el laboratorio del diodo superluminiscente QSDM-1550-1.	41
Figura 3.6: Caracterización del circulador de fibra óptica de tres puertos de 1550 nm. Curva negra: espectro de transmisión obtenido en el puerto 2, curva azul: espectro de reflexión obtenido en el puerto 3.	42
Figura 3.7: Diagrama descriptivo del proceso de fabricación: posición relativa de la fibra óptica convencional y la microfibra en la empalmadora manual para realizar el empalme. Línea horizontal punteada azul: línea imaginaria que une el centro radial de ambas fibras. Líneas verticales verdes: eje de los electrodos de la empalmadora manual.	43
Figura 3.8: Imagen tomada durante el proceso de fabricación luego de realizar el empalme entre la fibra convencional y la fibra estrechada. Las líneas verticales verdes representan el eje de los electrodos de la empalmadora manual.	44
Figura 3.9: Diagrama descriptivo del proceso de fabricación: posición relativa de la estructura para realizar el corte mediante arco eléctrico de la fibra estrechada. Línea horizontal punteada azul: línea imaginaria que une el centro radial de ambas fibras. Líneas verticales verdes: eje de los electrodos de la empalmadora manual. Recuadro rojo: fracción del diagrama observada en la pantalla de la empalmadora.	45
Figura 3.10: Imagen de un interferómetro fabricado tomada con el microscopio electrónico del Laboratorio Nacional de la Universidad de Guanajuato.	45

Figura 3.11: Espectro de reflexión de tres interferómetros fabricados.	46
Figura 3.12: Diagrama del interferómetro fabricado. D1: longitud de la fibra estrechada.	47
Figura 3.13: Comparación entre la respuesta espectral del interferómetro fabricado (curva azul) y la predicción teórica de su comportamiento (curva negra).	48
Figura 3.14: Análisis mediante FFT de los espectros de dos de los interferómetros fabricados (línea azul). En la esquina superior derecha se muestra el espectro que corresponde al resultado obtenido en cada caso.	49
Figura 4.1: Respuesta espectral de interferómetro inmerso en agua destilada (1.3326 RIU) a diferentes profundidades.	52
Figura 4.2: Análisis de sensibilidad de dos dispositivos ante cambios de índice de refracción.	53
Figura 4.3: Respuesta espectral del interferómetro ante cambios de índice de refracción.	53
Figura 4.4: Análisis mediante FFT de los espectros obtenidos al modificar el índice de refracción del medio. En la esquina superior derecha se muestra el análisis de la respuesta en cada pico.	54
Figura 4.5: Análisis de estabilidad del máximo centrado en 1544.02 nm durante 60 minutos con temperatura e índice de refracción constantes ($T=30^{\circ}\text{C}$, $n=1.3326$ RIU). Variación en longitud de onda: negro, variación en potencia: azul.	55
Figura 4.6: Análisis de sensibilidad de dos dispositivos ante cambios de temperatura.	57
Figura 4.7: Respuesta espectral de un interferómetro ante cambios de temperatura.	57
Figura 4.8: Análisis mediante FFT de los espectros obtenidos al modificar la temperatura del medio.	58
Figura 4.9: Análisis de estabilidad del máximo centrado en 1533.99 nm durante 60 minutos con temperatura de 30°C	58
Figura 4.10: Diagrama del interferómetro de punta recubierto. La línea de color naranja representa la capa de cobre que recubre la estructura.	61
Figura 4.11: Comparativa de los espectros de reflexión del interferómetro original (curva negra) y del interferómetro recubierto con una fina capa de cobre (curva roja). Figura interior: Región desde 1540 nm a 1546 nm.	62
Figura 4.12: Análisis mediante FFT de los espectros de reflexión del interferómetro original (curva negra) y del interferómetro recubierto con una fina capa de cobre (curva roja).	63
Figura 4.13: Análisis de la respuesta del interferómetro original (curva negra) y del interferómetro recubierto con una fina capa de cobre (curva roja) ante cambios en la concentración de la disolución.	65
Figura 4.14: Esquema experimental del láser de anillo.	68
Figura 4.15: Caracterización del diodo láser QFBGLD-980-500 (gráficos tomados de la hoja de datos del fabricante [106]): a) Respuesta de potencia y voltaje dependientes de la corriente de operación, b) Espectro de emisión del diodo.	69
Figura 4.16: Caracterización en el laboratorio del diodo láser QFBGLD-980-500.	69
Figura 4.17: Caracterización del multiplexor por división en longitud de onda de fibra óptica de 980 nm / 1550 nm [68]. Recuadro azul: vecindad de 980 nm, recuadro rojo: vecindad de 1550 nm, curva azul: espectro obtenido en el puerto de 980 nm, curva roja: espectro obtenido en el puerto de 1550 nm.	70
Figura 4.18: Espectro de salida del láser de anillo. Curva roja: sin filtro. Curva negra: con filtro.	71
Figura 4.19: Espectro de emisión del láser.	72
Figura 4.20: Análisis de estabilidad del láser.	72
Figura 4.21: Respuesta a cambios de índice de refracción ($n=1.3323$ RIU).	73
Figura 4.22: Análisis de estabilidad del láser para $n=1.3323$ RIU.	74
Figura 4.23: Respuesta a cambios de índice de refracción ($n=1.3323$ - 1.3799 RIU).	75
Figura 4.24: Análisis de sensibilidad del láser ante cambios de índice de refracción.	76
Figura 4.25: Histéresis del arreglo ante cambios de índice de refracción.	77
Figura 4.26: Espectro de salida del láser para diferentes temperaturas de 90°C a 210°C	78
Figura 4.27: Análisis de la respuesta ante cambios de temperatura de las líneas de emisión P_0 a P_6	78
Figura AI.1: Imágenes de la sección transversal de un tramo de la fibra utilizada obtenidas con el microscopio electrónico de la Universidad de Valencia.	83
Figura AI.2: Dispersión teórica calculada de la fibra analizada.	85
Figura AI.3: Esquema del montaje del interferómetro para la medida de la dispersión. FUT: fibra de prueba.	86
Figura AI.4: Espectro obtenido para tres diferentes posiciones del brazo de referencia.	87

<i>Figura AI.5: Δd en función de la longitud de onda. Los puntos corresponden a las mediciones en laboratorio y la línea continua muestra el ajuste a la función de Cauchy.</i>	<i>88</i>
<i>Figura AI.6: Obtención experimental de las características dispersivas de la fibra analizada.</i>	<i>89</i>
<i>Figura AI.7: Curva experimental del parámetro de la dispersión por velocidad de grupo de la fibra analizada.</i>	<i>89</i>
<i>Figura AI.8: Esquema del montaje experimental para la medición de la birrefringencia de la fibra óptica. LASER: fuente de luz, MMF: fibra multimodo, OR: receptor óptico, VM: medidor de voltaje, PC: computadora personal.</i>	<i>91</i>
<i>Figura AI.9: Salida del sistema implementado con el polarizador.</i>	<i>92</i>
<i>Figura AI.10: Esquema del montaje experimental para la observación experimental de FWM. LASER: fuente de luz, AL: lente esférica, $\lambda/2$: Placa retardadora, M1: espejo dieléctrico, M2: espejo de banda ancha, O: objetivo de microscopio, OSA: analizador de espectros óptico.</i>	<i>93</i>
<i>Figura AI.11: Espectro obtenido experimentalmente donde pueden observarse las bandas de RAMAN y las bandas estrechas de PMI.</i>	<i>94</i>
<i>Figura AI.12: Espectro obtenido experimentalmente para dos polarizaciones ortogonales a la salida del sistema.</i>	<i>95</i>
<i>Figura AI.13: Espectros obtenidos experimentalmente para dos polarizaciones ortogonales del láser de bombeo.</i>	<i>95</i>
<i>Figura AI.14: Análisis experimental del efecto de la polarización del láser de bombeo sobre las bandas PMI.</i>	<i>96</i>
<i>Figura AI.15: Efecto de la intensidad del bombeo en las bandas PMI.</i>	<i>96</i>
<i>Figura AI.16: Efecto de la intensidad del bombeo en la intensidad de las bandas PMI.</i>	<i>97</i>
<i>Figura AI.17: Efecto de la intensidad del bombeo en la longitud de onda de las bandas PMI.</i>	<i>97</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 3.1: Parámetros utilizados en la empalmadora FITEL S-175 V.2000 para realizar el empalme entre la fibra convencional y la fibra estrechada.</i>	<i>44</i>
---	-----------

Resumen

En este trabajo se presenta la metodología para la fabricación de un interferómetro compuesto completamente de fibra óptica. La técnica propuesta para fabricar interferómetros ofrece la posibilidad de controlar la respuesta del dispositivo durante el proceso de fabricación mediante la aplicación de descargas eléctricas lo cual permite adaptar el dispositivo de las aplicaciones requeridas, garantiza la repetitividad de los resultados y además es económica. Se realizaron algunas caracterizaciones para proponer las posibles aplicaciones de los dispositivos fabricados para la detección de cambios de índice de refracción, temperatura y concentración de disoluciones acuosas y se realizaron los análisis para la detección mediante modulación de fase o de intensidad, obteniéndose resoluciones de 112 dB/RIU, 21.25 nm/RIU para el caso de las modificaciones de índice de refracción del medio que rodeaba a la punta interferométrica, el análisis de la modificación de la temperatura arrojó sensibilidades de 12 pm/°C y las pruebas realizadas modificando la concentración de las disoluciones acuosas donde se sumergió el interferómetro se obtuvo una sensibilidad de 19 pm/% de glicerina por peso pero se logró aumentar el rango de medición al recubrir la punta con una fina capa de cobre. Finalmente, se diseñó un sistema láser de múltiples longitudes de onda que puede ser utilizado también para detectar cambios de índice de refracción y temperatura con valores de sensibilidad de 16.13 nm/RIU y 21 pm/°C respectivamente.

Capítulo 1 Introducción

1.1 Introducción.

La reducción de los tiempos de respuesta ante los cambios del medio que se analizan, aunado a las mayores distancias de transmisión de los datos, flexibilidad en las instalaciones de los sistemas, permitiendo el ahorro de espacio y del volumen de cableado necesarios han provocado que en la actualidad se prefieran los sensores de fibra óptica sobre los sensores tradicionales [1]. Adicionalmente, otro factor que ha influido es el auge de los sensores ópticos ha sido el económico, debido a que los costos de los componentes comerciales tales como fuentes de luz y fotodetectores que se utilizan en el diseño de los sensores ópticos han disminuido mucho, disminuyendo a su vez el costo de los sensores, lo que los ha hecho competitivos en el mercado. En diversas ramas de la tecnología y la vida diaria entre las que se pueden mencionar: la medicina [2–4], telecomunicaciones [5], la industria [6,7], el transporte [8], monitoreo ambiental [9–11], construcción [12], etc. [1], son utilizados los sensores ópticos debido a su versatilidad para detectar cambios en una innumerable variedad de parámetros físicos, químicos y biológicos como aceleración [13], concentración de iones H⁺ (pH) [14,15], deformaciones longitudinales [16], velocidad de fluidos [17], temperatura [18–20], torsión [21], humedad [10,22], tensión [23], detección de gases [9], concentración en disoluciones acuosas [24], vibraciones [8,25], desplazamiento [26], presión [27], campo eléctrico y magnético [11] e índice de refracción [28,29]. Los sensores de fibra óptica pueden ser clasificados en cuatro grandes grupos: (I) sensores de intensidad modulada, (II) sensores de fase modulada o interferométricos, (III) sensores polarimétricos y (IV) sensores espectrométricos [1].

Los sensores interferométricos operan a partir de la diferencia de fase de la luz coherente cuando viaja a través de dos caminos ópticos diferentes. Estos sensores tienen muy alta sensibilidad debido a que pueden responder a pequeños cambios en el medio analizado. La mayoría de los sensores interferométricos incluyen interferómetros de fibra óptica Mach-Zehnder [8,16,19,30], Michelson [17,31], Fabry-Perot [2,10,18,20,26,27,32], Sagnac [11,28], interferómetros multimodales [33,34] o la mezcla de algunos de ellos [1,35–38]. Estos pueden clasificarse en extrínsecos o intrínsecos, dependiendo del lugar donde ocurra la modificación de las características de la luz en relación con el cambio en el entorno. Si

estas modificaciones ocurren en el aire o cualquier otro material que no sea la fibra, se denominan extrínsecos; si, por el contrario, estas modificaciones ocurren en el interior de la fibra, se tienen interferómetros intrínsecos, los cuales suelen resultar muy atractivos debido a que son de tamaño pequeño.

1.2 Objetivo General.

Fabricar un interferómetro intermodal completamente de fibra óptica que pueda ser utilizado para detectar cambios de parámetros físicos del medio.

1.3 Objetivos específicos.

1. Generación de un marco teórico sobre estructuras interferométricas de fibra óptica.
2. Proponer un método de fabricación que permite obtener dispositivos compuestos totalmente de fibra óptica que tengan un óptimo desempeño, que sean compactos, robustos y posean una alta sensibilidad.
3. Participar en congresos nacionales e internacionales, así como publicar un artículo en una revista JCR.

1.4 Justificación.

Los sensores en la actualidad han cobrado una gran importancia ya que se emplean en diversas áreas tales como la medicina, en la industria alimentaria, en la industria automotriz, etc. [1–3,6,8]. En muchas aplicaciones avanzadas que requieren miniaturización, monitoreo remoto o alta sensibilidad, las técnicas empleando sensores de fibra óptica (OFS: Optical Fiber Sensors) resultan una solución muy novedosa. Durante los años sesenta del pasado siglo se comenzó a trabajar en el área de OFS, pero estas investigaciones han llegado a límites insospechados en aquellos comienzos debido a los avances alcanzados en áreas afines como las comunicaciones con fibras ópticas, que ha logrado tener disponibilidad a nivel comercial y a precios económicos de componentes tales como fuentes de luz y fotodetectores [1], lo cual ha disminuido exponencialmente los costos de fabricación de los sensores de fibra óptica, haciéndolos más competitivos en el mercado.

En este trabajo se presenta una nueva técnica de fabricación de interferómetros compuestos completamente de fibra óptica. Los resultados descritos en este documento contribuyen a profundizar en el conocimiento de las posibles aplicaciones de los sensores de fibras ópticas, demostrándose su versatilidad y facilidad de operación.

1.5 Antecedentes.

En los últimos años, se han realizado numerosas investigaciones y se han propuesto una gran variedad de sensores de fibras ópticas basados en interferómetros fabricados totalmente de fibras ópticas. En el año 2008 se publicó un trabajo que se basaba en obtener un interferómetro Fabry-Perot a través del empalme entre una fibra de cristal fotónico de núcleo sólido, un pedazo de fibra de núcleo hueco y una fibra monomodo. En este trabajo se reportó su aplicación como sensor de altas temperaturas ya que podían alcanzarse hasta 1000 grados Celsius [18]. En ese mismo año y también para detectar cambios de temperatura se propuso una estructura que se obtenía usando la configuración MMF-SMF-MMF (MMF: multimode fiber) (SMF: singlemode fiber) mediante empalmes entre un trozo de fibra monomodo sin recubrimiento con dos pedazos pequeños (de aproximadamente 1 milímetro) de fibra multimodo [19].

Un ejemplo en donde la determinación del índice de refracción puede ser aplicable en la industria es el caso del interferómetro diseñado para determinar la adulteración del ron. En este trabajo, publicado en el año 2013, el diseño se basa en el empalme de una sección de fibra multimodo entre dos fibras monomodo [6].

En trabajos previos desarrollados en nuestra universidad se han propuesto interferómetros basados en microcavidades (burbujas) Fabry-Perot que se generan al aplicar descargas eléctricas a una fibra de cristal fotónico de núcleo hueco con el objetivo de colapsar diversas zonas de su estructura [39–42]. Los interferómetros obtenidos han sido probados para detectar cambios de peso, índice de refracción y temperatura. También se trabajó para obtener láseres sintonizables que utilizaban como filtro un interferómetro Mach-Zehnder fabricado mediante el empalme de fibra óptica para comunicaciones (convencional) con fibra fotónica. En el primer caso, la sintonización se obtenía por medio de ajustes en el controlador de polarización del sistema [43]; en el otro arreglo, la sintonización se obtenía modificando el radio de curvatura del propio interferómetro [44].

También se han propuesto sistemas basados en elementos interferométricos usados como filtros que permiten obtener láseres sintonizables [45], en este caso, la sintonización se obtiene modificando la longitud de la fibra multimodo. Posteriormente, se utilizó un láser de anillo obtenido mediante un interferómetro Mach-Zehnder, con el objetivo de detectar cambios de temperatura, empleando como elemento sensor una Rejilla de Bragg [46].

1.6 Organización de la Tesis.

En el Capítulo 2 de este documento se presenta el marco teórico que sirve de base para este trabajo. Inicialmente se expone el principio de funcionamiento de las fibras ópticas para posteriormente tratar el tema de los sensores, prestando especial atención a los sensores de fibras ópticas.

En el Capítulo 3 se realiza la descripción detallada de la metodología del proceso de fabricación del interferómetro de fibra óptica que se propone y se analiza su funcionamiento. El interferómetro propuesto se obtiene al realizar el empalme mediante la técnica de arco eléctrico de dos fibras ópticas con simetrías diferentes. Las fibras ópticas utilizadas en este procedimiento son fibra óptica convencional y un fragmento de fibra óptica convencional estrechada. La punta de la microfibra es cortada aplicando descargas eléctricas lo que permite obtener un interferómetro que puede ser operado en reflexión. Durante la descripción de cada etapa llevada a cabo en este trabajo de investigación, se refiere brevemente el funcionamiento de todos los elementos que conforman los diferentes arreglos utilizados.

El Capítulo 4 muestra los resultados de las pruebas realizadas para establecer las posibles aplicaciones como sensor del dispositivo diseñado y fabricado como parte de esta investigación. Se realizaron pruebas para detección de temperatura, índice de refracción y concentración de disoluciones acuosas.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones de esta investigación y el trabajo a futuro.

En el Anexo I se describen las actividades desarrolladas durante la estancia de investigación pre-doctoral en la Universidad de Valencia, España. El objetivo fundamental de esta parte de la investigación fue la observación experimental del efecto de mezcla de cuatro ondas, específicamente la Inestabilidad Modulacional por Polarización (PMI: polarization modulation instability) que se presenta en fibras que tienen dispersión completamente normal (ANDi: All Normal Dispersion) y birrefringencia residual.

En el Anexo II se muestran los productos científicos generados durante el proyecto de tesis doctoral.

Capítulo 2 Marco Teórico.

2.1 Introducción.

En este capítulo se presenta el marco teórico de esta investigación, se describen los principios básicos del funcionamiento de las fibras ópticas para comunicaciones (convencional) y de los sensores, específicamente los sensores de fibras ópticas. Para finalizar, se describe el funcionamiento de los componentes de los sensores de fibras y se realiza la caracterización de los elementos utilizados en los arreglos implementados durante esta investigación.

2.2 Fibras Ópticas.

El papel de un canal de comunicaciones es transmitir la señal de un punto a otro (de transmisor a receptor) sin distorsionarla, por lo tanto, las fibras ópticas constituyen un excelente canal de comunicaciones. Durante los años sesenta se desarrollaron rápidamente las técnicas de fabricación, hasta que finalmente en 1979 se obtuvieron fibras con pérdidas de 0.2 dB / km en la región de 1550 nm, lo cual revolucionó no solo el campo de las comunicaciones con fibras ópticas, sino que también supuso el inicio de un nuevo campo de investigaciones relacionadas con los fenómenos no lineales en fibras ópticas [47]. Los sistemas de comunicaciones con fibras ópticas comenzaron a estar disponibles comercialmente a partir de 1980 ya que los costos de instalación de estos sistemas eran menores que los sistemas mediante cable coaxial, debido a que las distancias entre repetidores eran mucho menores, unido a otras ventajas como la gran cantidad de información que puede ser transmitida por las fibras, su inmunidad a la interferencia electromagnética, pequeño tamaño y poco peso. [1,48].

La forma más simple de una fibra óptica consiste en un núcleo central de vidrio cubierto por un revestimiento cuyo índice de refracción es ligeramente menor que el del núcleo, tal como se puede observar en la imagen de la Figura 2.1, donde se muestra el diagrama de una fibra óptica que presenta un perfil de índice de refracción escalonado. También existen fibras cuyo perfil es gradual, es decir, el índice de refracción del núcleo se va reduciendo gradualmente desde el centro hasta el límite del recubrimiento. Esta característica ($n_1 > n_2$) es imprescindible para que se cumpla la Ley de Snell y se produzca el fenómeno de reflexión

total interna, el cual es el responsable de la transmisión de la luz por el interior de la fibra [47,48].

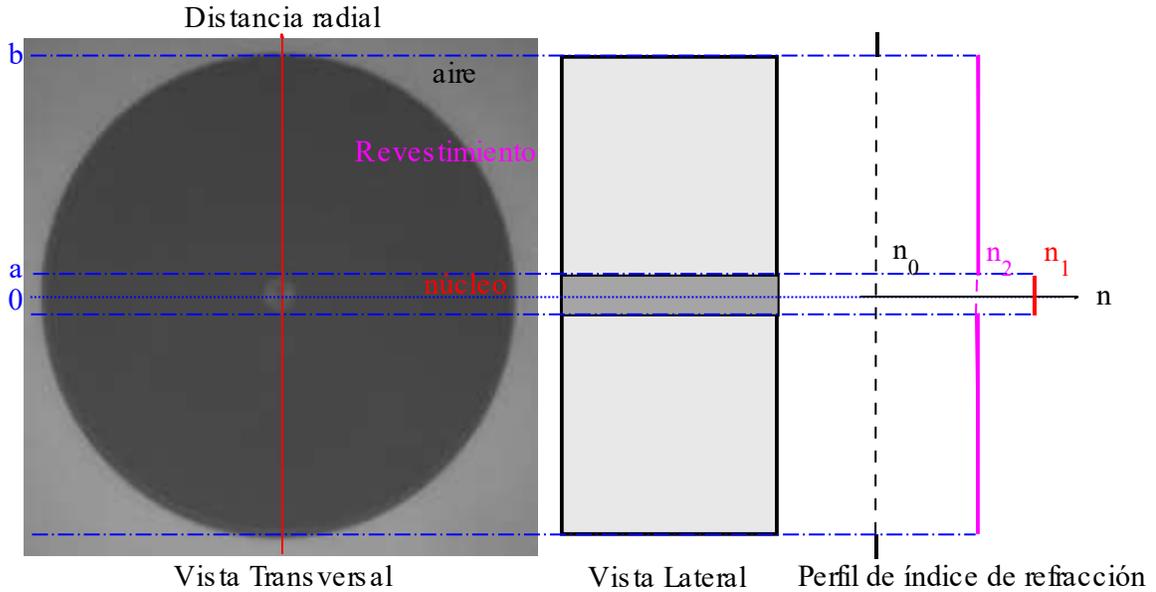


Figura 2.1: Izquierda: Imagen de la sección transversal de una fibra óptica convencional (SMF-28) tomada con un microscopio electrónico [49]. Centro y derecha: diagrama de la vista lateral de una fibra óptica convencional y representación del perfil escalonado de índice de refracción [46]. a : radio del núcleo, b : radio del, n_0 : índice de refracción del aire ($n_0 = 1$), n_1 : índice de refracción del núcleo, n_2 : índice de refracción del revestimiento.

Se conocen como modos de propagación a las diferentes trayectorias que puede seguir la luz al propagarse por la fibra, los cuales representan diferentes soluciones a las ecuaciones de onda con las condiciones de frontera adecuadas. Los modos se pueden clasificar como modos del núcleo y modos del revestimiento (ver Figura 2.2) [48].

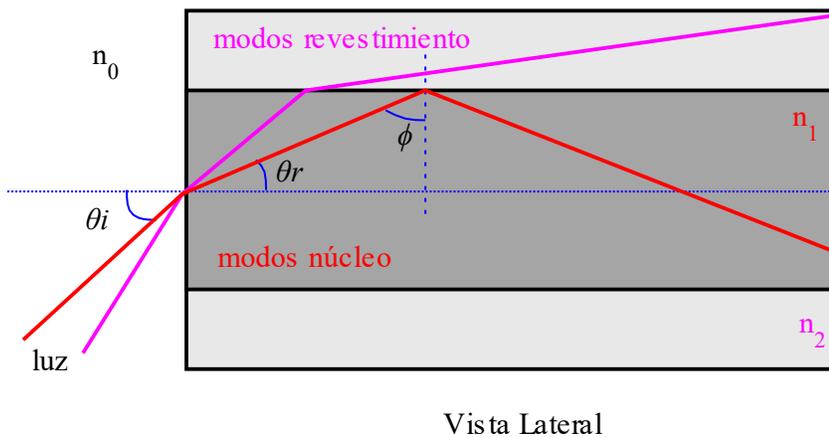


Figura 2.2: Modos de propagación de la luz en fibras ópticas [48].

La transmisión de luz en el interior de las fibras, al igual que cualquier fenómeno de propagación de ondas electromagnéticas, se rige por las Ecuaciones de Maxwell (ver Ecuaciones 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4) [50], donde \vec{E} y \vec{H} son los vectores de campo eléctrico y magnéticos respectivamente, \vec{D} y \vec{B} corresponden con la densidad de campo eléctrico y magnético respectivamente, \vec{J} representa el vector densidad de corriente y ρ_v es la densidad de carga [47].

$$\text{Ley de Faraday} \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad 2.1$$

$$\text{Ley de Ampere Generalizada} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad 2.2$$

$$\text{Ley de Gauss} \quad \nabla \cdot \vec{D} = \rho_v, \quad 2.3$$

$$\text{Ley de Gauss para el Campo Magnético} \quad \nabla \cdot \vec{B} = 0. \quad 2.4$$

Es posible calcular \vec{D} y \vec{B} a partir de \vec{E} y \vec{H} según las Ecuaciones 2.5 y 2.6, donde ϵ_0 es la permitividad en el vacío, μ_0 es la permeabilidad en el vacío, \vec{P} y \vec{M} son las polarizaciones eléctrica y magnética [50].

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad 2.5$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \vec{M}. \quad 2.6$$

En el caso particular de las fibras ópticas, donde no existen cargas libres pues están constituidas de un material dieléctrico, $\vec{J} = 0$ y $\rho_v = 0$, además se cumple que $\vec{M} = 0$ debido a que es un medio no magnético, por tanto:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad 2.7$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad 2.8$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = 0, \quad 2.9$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad 2.10$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}, \quad 2.11$$

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H}. \quad 2.12$$

Considerando la identidad:

$$\nabla \times (\nabla \times V) = \nabla(\nabla \cdot V) - \nabla^2 V, \quad 2.13$$

y tomando en cuenta que $c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}$, donde c representa la velocidad de la luz en el vacío,

quedaría:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad 2.14$$

De manera similar a la anteriormente descrita se puede obtener:

$$\nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0. \quad 2.15$$

Las Ecuaciones 2.14 y 2.15 se conocen como Ecuaciones de Onda y describen la propagación de la luz por un medio, el cual puede ser la fibra óptica [47,50]. La solución de estas ecuaciones para el caso específico de las fibras ópticas se puede obtener de la siguiente manera:

$$\nabla^2 E(r, t) - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 E(r, t)}{dt^2} = 0. \quad 2.16$$

Si se aplica la transformada de Fourier se puede escribir:

$$\nabla^2 E(\omega, t) + n^2 k_0^2 E(\omega, t) = 0, \quad 2.17$$

donde:

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad 2.18$$

k_0 es el número de onda en el vacío y λ es la longitud de onda de trabajo.

Al reescribir apropiadamente en coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z) la Ecuación de Onda se obtiene:

$$\frac{d^2 E_z}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dE_z}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2 E_z}{d\phi^2} + \frac{d^2 E_z}{dz^2} + n^2 k_0^2 E_z = 0, \quad 2.19$$

Teniendo en cuenta las condiciones de frontera y considerando una fibra óptica convencional con perfil de índice de refracción escalonado:

$$n = \begin{cases} n_1 & \text{para } r \leq a \\ n_2 & \text{para } r > a, \end{cases} \quad 2.20$$

se obtiene:

$$E_z(r, \phi, z) = R(r)\Phi(\phi)Z(z), \quad 2.21$$

$$\frac{d^2Z}{dz^2} + \beta^2 Z = 0, \quad 2.22$$

$$\frac{d^2\Phi}{d\phi^2} + m^2 \Phi = 0, \quad 2.23$$

$$\frac{d^2R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(n^2 k_0^2 - \frac{m^2}{r^2} + \beta^2 \right) R = 0. \quad 2.24$$

Para 2.22 la solución es $Z = e^{i\beta z}$.

De igual forma, para la Ecuación 2.23 la solución es $\Phi = e^{im\phi}$.

Sin embargo, la Ecuación 2.24 se debe resolver mediante las funciones de Bessel:

$$E_z = \begin{cases} A J_m(pr) + A' Y_m(pr) & \text{para } r \leq a \\ C K_m(qr) + C' I_m(qr) & \text{para } r > a, \end{cases} \quad 2.25$$

A, A', C, C' son constantes y J_m, Y_m, K_m, I_m son las diferentes funciones de Bessel.

La solución general de la Ecuación 2.21, quedaría:

$$E_z = \begin{cases} A J_m(pr) e^{im\phi} e^{i\beta z} & \text{para } r \leq a \\ C K_m(qr) e^{im\phi} e^{i\beta z} & \text{para } r > a. \end{cases} \quad 2.26$$

Se puede proceder de la misma forma para el campo magnético H_z .

El número de modos que pueden transmitirse por una fibra a una determinada longitud de onda (λ), está determinado por su diseño: radio de su núcleo (a) y diferencia de índice de refracción entre el núcleo (n_1) y el recubrimiento (n_2). Esta relación se muestra en la Ecuación 2.27, donde v es un valor adimensional que representa la frecuencia normalizada y λ representa la longitud de onda de trabajo. Un tipo particular de fibras que sólo soporta el modo fundamental es conocida como fibras monomodo ($v \leq 2.405$), en correspondencia con esta clasificación, las fibras por las que se transmite más de un modo se conocen como fibras multimodo ($v > 2.405$) [48]

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \quad 2.27$$

Aproximadamente en 1985 se comenzaron a fabricar fibras dopadas con tierras raras, que fueron ampliamente utilizadas para el diseño de nuevos amplificadores y láseres, las que estuvieron disponibles a nivel comercial a partir de 1990 [47]. Las fibras dopadas se fabrican dopando el núcleo de las fibras con tierras raras que sirven como medio de ganancia para su

utilización como amplificadores y a su vez determinan las características de éstos (longitud de onda y ancho de banda de ganancia). Se pueden utilizar muchas tierras raras para obtener amplificadores que operen entre 500 nm y 3500 nm, entre ellas erbio (Er), holmio (Ho), neodimio (Nd), samario (Sm), tulio (Tm) e iterbio (Yb) [47,48], por ejemplo las fibras dopadas con iterbio (Yb) trabajan alrededor de 1060 nm, las fibras dopadas con erbio (Er) emiten en la zona de 1530 nm y las fibras dopadas con Tulio pueden utilizarse como amplificadores en la región de 2000 nm [47,48].

A partir de 1996, comenzó a desarrollarse un nuevo tipo de fibras ópticas conocidas como fibras de cristal fotónico (PCF: Photonic Crystal Fibers) o fibras microestructuradas, las que pueden tener disímiles diseños (ver Figura 2.3) permitiendo una mayor flexibilidad en las características dispersivas de las fibras, haciéndolas muy interesantes en muchas áreas del conocimiento tales como: comunicaciones ópticas, óptica no lineal y el campo de sensores.

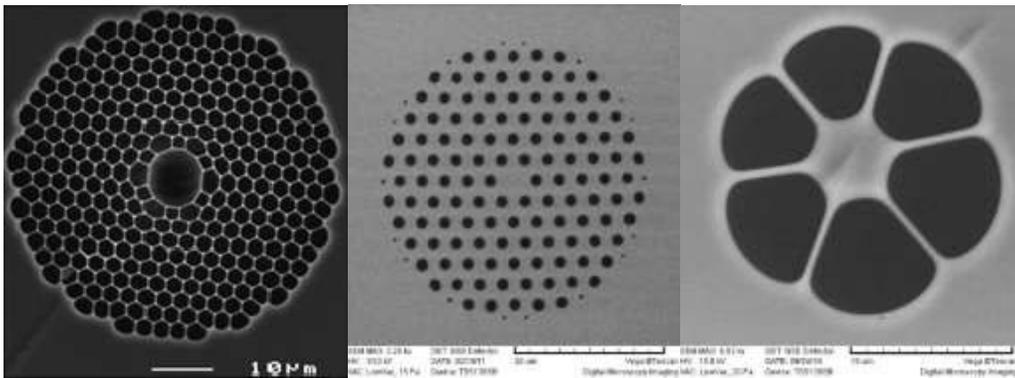


Figura 2.3: Vista transversal de fibras fotónicas con diferentes estructuras (imágenes tomadas con un microscopio electrónico de la BUAP).

Si el núcleo es sólido, la estructura fotónica que lo rodea posee un índice de refracción mucho menor que el del núcleo, por lo que se cumple el principio de reflexión total interna modificada y esto posibilita el guiado de la luz a lo largo de la fibra. Sin embargo, si el núcleo es hueco, o sea, en su interior tiene aire, se produce el fenómeno de banda prohibida y es lo que provoca que la luz quede confinada en el núcleo y sea guiada a lo largo de la fibra [47].

2.3 Sensores Ópticos.

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes (físicas, químicas o biológicas) y transformarlas en variables que puedan ser manipuladas y cuantificadas. Un sensor óptico aprovecha la interacción de la luz con la materia para detectar las características de esta última y pueden ser utilizados en diversos contextos como la medicina [2,3,51], en la

industria [6], el transporte [8], etc. [1] debido a la facilidad que presentan para adaptarse a aplicaciones que requieren miniaturización, monitoreo remoto o alta sensibilidad.

Los primeros trabajos en el área de sensores de fibra óptica (OFS: Optical Fiber Sensors) datan de los comienzos de la década de 1960 pero en los últimos años, estas investigaciones han sido más numerosas debido al desarrollo vertiginoso que han alcanzado los sistemas de comunicaciones con fibras ópticas, lo cual ha disminuido significativamente los costos de los sensores de fibra óptica debido a que se han podido emplear componentes comerciales y económicos tales como fuentes de luz y fotodetectores. Los sensores de fibra óptica convierten un parámetro físico en una salida óptica [1].

El proceso de detección o monitoreo se basa en el análisis del entorno que realiza un sistema para determinar modificaciones en el mismo y está conformado por tres niveles o pasos. El primero es el elemento sensor que está en contacto con el entorno y recibe directamente los cambios en este, dichos cambios hacen que varíe alguna característica del sensor. El segundo paso es la transmisión de esas variaciones a la unidad de procesamiento y finalmente, en la unidad de procesamiento se analizan las variaciones para determinar el factor que las provocó [52].

Las características principales de un sensor son: sensibilidad, resolución y exactitud [35,52]. La sensibilidad es una de las características más importantes de un sensor ya que representa su capacidad para variar ante los cambios del entorno. Se define como la pendiente de la curva característica de salida ($S = \Delta y / \Delta x$ en la Figura 2.4). También se define como la variación mínima del parámetro de entrada que va a crear un cambio detectable en la salida [3,35,53]. El rango de un sensor representa el rango de valores de la magnitud de entrada que se encuentran comprendidos entre los valores máximo y mínimo que pueden ser medidos (y_{max}, y_{min} en la Figura 2.4) [3,53].

La resolución representa el cambio más pequeño o la mínima diferencia entre dos valores próximos que el sistema es capaz de detectar, está relacionada con la precisión con que la medición se realiza, por tanto, se ve afectada por las especificaciones del sistema de detección [3,35,53] La precisión es el error de medida máximo esperado o la repetibilidad de la medición y la repetitividad es el error esperado al repetir varias veces la misma medida [53].

La exactitud representa la diferencia entre la salida real y el valor teórico de dicha salida (valor verdadero). Se cuantifica mediante la Ecuación 2.28 y se da en valor absoluto [53].

$$Exactitud = Valor\ verdadero - Valor\ medido.$$

2.28

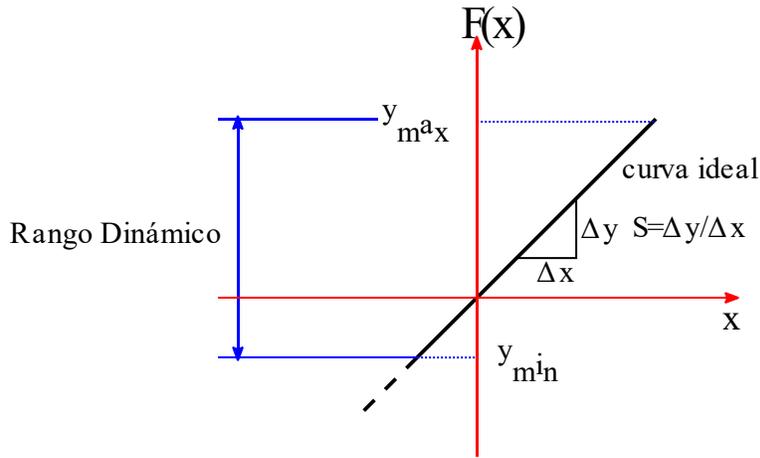


Figura 2.4: Sensibilidad y Rango de un sensor [53].

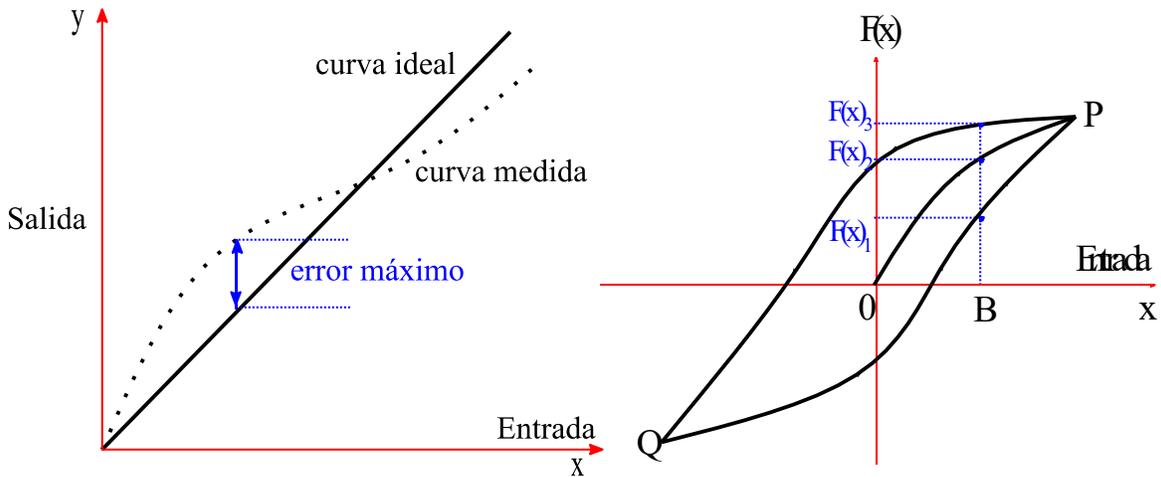


Figura 2.5: Izquierda: Curva ideal vs curva medida de un sensor con histéresis [53]. Derecha: Curva de histéresis de un sensor [53]

Se define como Offset (o desviación de cero) al valor de la variable de salida cuando la variable de entrada es nula. Si el rango de medida no llega a valores nulos de la variable de entrada, habitualmente se establece otro punto de referencia para definir el offset [53].

Un transductor debe ser capaz de seguir los cambios del parámetro de entrada, independientemente de la dirección en que se produzca. La histéresis se refiere a la característica que tiene un sensor en ser incapaz de repetir fielmente, en la dirección opuesta de la operación, los datos que se han registrado en una dirección (ver Figura 2.5) [53].

La rapidez de respuesta puede ser un tiempo fijo o depender de cuánto varíe la magnitud a medir. Depende de la capacidad del sistema para seguir las variaciones de la magnitud de entrada [3,53].

Existen otras magnitudes, aparte de la medida como magnitud de entrada, que influyen en la variable de salida y se denominan derivas. Por ejemplo, pueden ser condiciones ambientales, como la humedad, la temperatura u otras como el envejecimiento (oxidación, desgaste, etc.) del sensor [53].

Los sensores de fibra pueden ser utilizados para medir una gran cantidad de parámetros físicos y presentan ventajas sobre los electrónicos que están muy relacionadas a las características de las fibras ópticas [1]:

- Operan en condiciones de temperaturas extremas y dada su inmunidad a interferencias electromagnéticas, son apropiados para utilizarse cerca de fuentes de alta tensión.
- Debido al carácter dieléctrico de la fibra, carecen de los problemas derivados de la puesta a tierra o descargas eléctricas.
- Toleran altas concentraciones de gases peligrosos como hidrógeno y ambientes corrosivos, soportan fuertes vibraciones, son extremadamente sensibles y de gran ancho de banda.
- Dado que estos dispositivos son livianos y de pequeño tamaño, su aplicación resulta apropiada en dos grandes industrias: aeroespacial y automotriz.
- La mayoría de los transductores son pasivos (no necesitan una fuente de potencia eléctrica cercana) y pueden ser monitoreados a distancia.
- En muchos casos, varios transductores pueden ser multiplexados en una única fibra.

Los sensores pueden ser clasificados de diversas maneras. Se pueden clasificar en intrínsecos (todo de fibra) (ver Figura 2.6) o extrínsecos (híbrido) (ver Figura 2.7). En los sensores intrínsecos, los cambios del entorno producen cambios en las características de la luz guiada por la fibra; mientras que en los sensores extrínsecos la variación en el entorno produce una variación en las características de la luz fuera de la fibra y luego esta luz modificada se introduce en la fibra para que sea guiada hasta el receptor [35,52].

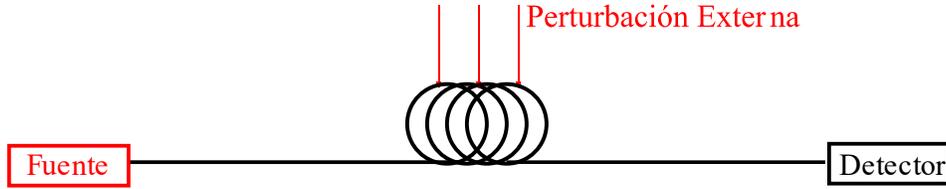


Figura 2.6: Clasificación de sensores: Sensores intrínsecos [1].

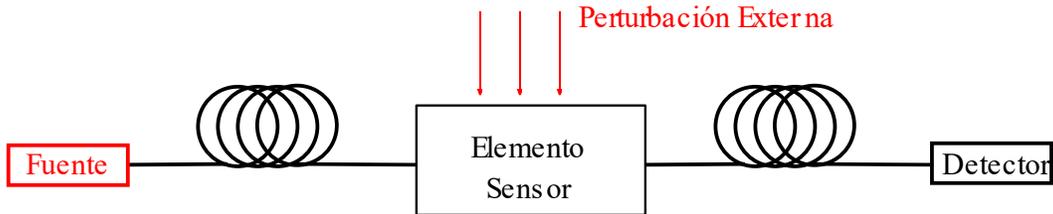


Figura 2.7: Clasificación de sensores: Sensores extrínsecos [1].

Si se tiene en cuenta su principio de operación, pueden ser clasificados como: sensores de intensidad modulada (se producen cambios de la intensidad de la luz), sensores de fase modulada o interferométricos (cambios en la fase de la luz), sensores polarimétricos (cambios en el estado de polarización de la luz) y por último, los sensores espectrométricos (cambios en la longitud de onda de la luz) [1]. Durante esta investigación se trabajó con sensores de intensidad modulada y con sensores de fase modulada.

2.3.1 Sensores de intensidad modulada.

Los sensores de intensidad modulada son uno de los primeros tipos y quizás el tipo más simple de sensores de fibra óptica. En el esquema de modulación de intensidad, la señal óptica se transmite a través de las fibras ópticas, y luego su intensidad se modula mediante diversos medios, como la flexión de la fibra, la reflectancia o el cambio del medio a través del cual se transmite la luz. Las principales ventajas de los sensores de intensidad modulada son su facilidad de fabricación, la simplicidad del sistema de detección y de procesamiento de señales y el bajo costo de implementación. La principal desventaja de esta técnica es que la flexión de la fibra óptica, los desajustes de acoplamiento, la fluctuación de la fuente de alimentación, entre otros eventos, pueden causar la atenuación o la inestabilidad de la intensidad de la señal, lo que lleva a un sistema sensor menos confiable. Una solución para este problema es utilizar una fracción de la luz de entrada como referencia de intensidad para monitorear la fluctuación de la potencia de entrada y realizar la compensación [1].

2.3.2 Sensores de fase modulada.

La modulación de fase se produce cuando la fase de señal portadora varía en función de la señal moduladora, lo cual permite obtener sensores interferométricos basados en este principio. La interferencia es el fenómeno asociado a la superposición de ondas, el cual puede presentarse tanto en ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, etc. Para que este fenómeno se produzca debe existir superposición espacial y temporal de los campos de las fuentes, coherencia entre ellos y que estén polarizadas no ortogonalmente entre sí [1,36,52].

Cuando un haz de luz proveniente de una fuente es dividido convenientemente en dos caminos ópticos y luego estos son superpuestos, en la región de superposición se obtiene un patrón de interferencia que está conformado por puntos de máxima intensidad y mínima intensidad (que puede llegar a ser cero). La superposición de dos ondas de luz estrictamente monocromática siempre da lugar a interferencias, sin embargo, la luz producida por una fuente real de luz nunca es estrictamente monocromática. No obstante, si se superponen dos ondas provenientes de la misma fuente, las fluctuaciones de los dos están generalmente correlacionadas y, por tanto, ambos son completamente (o parcialmente) coherentes, dependiendo si la correlación es completa o parcial [40].

Existen dos métodos generales para obtener rayos a partir de un solo haz de luz: división de frente de onda o división de amplitud. En la Figura 2.8 se muestra el diagrama general del Experimento de Young, que se basa en la división de frente de onda.

En este caso, se hace pasar el haz por aberturas que se encuentran una al lado de la otra. Al otro lado de esta pared hay una pantalla de proyección o una placa fotográfica. Cuando una de las rejillas se cubre aparece un único pico correspondiente a la luz que proviene de la rendija abierta. Sin embargo, cuando ambas están abiertas en lugar de formarse una imagen superposición de las obtenidas con las rendijas abiertas individualmente, tal y como ocurriría si la luz estuviera hecha de partículas, se obtiene una figura de interferencias con rayas oscuras y otras brillantes. Este patrón de interferencias se explica fácilmente a partir de la interferencia de las ondas de luz al combinarse la luz que procede de dos rendijas, de manera muy similar a como las ondas en la superficie del agua se combinan para crear picos y regiones más planas. En las líneas brillantes la interferencia es de tipo "constructiva". El mayor brillo se debe a la superposición de ondas de luz coincidiendo en fase sobre la superficie de proyección. En las líneas oscuras la interferencia es "destructiva" con

prácticamente ausencia de luz a consecuencia de la llegada de ondas de luz de fase opuesta (la cresta de una onda se superpone con el valle de otra).

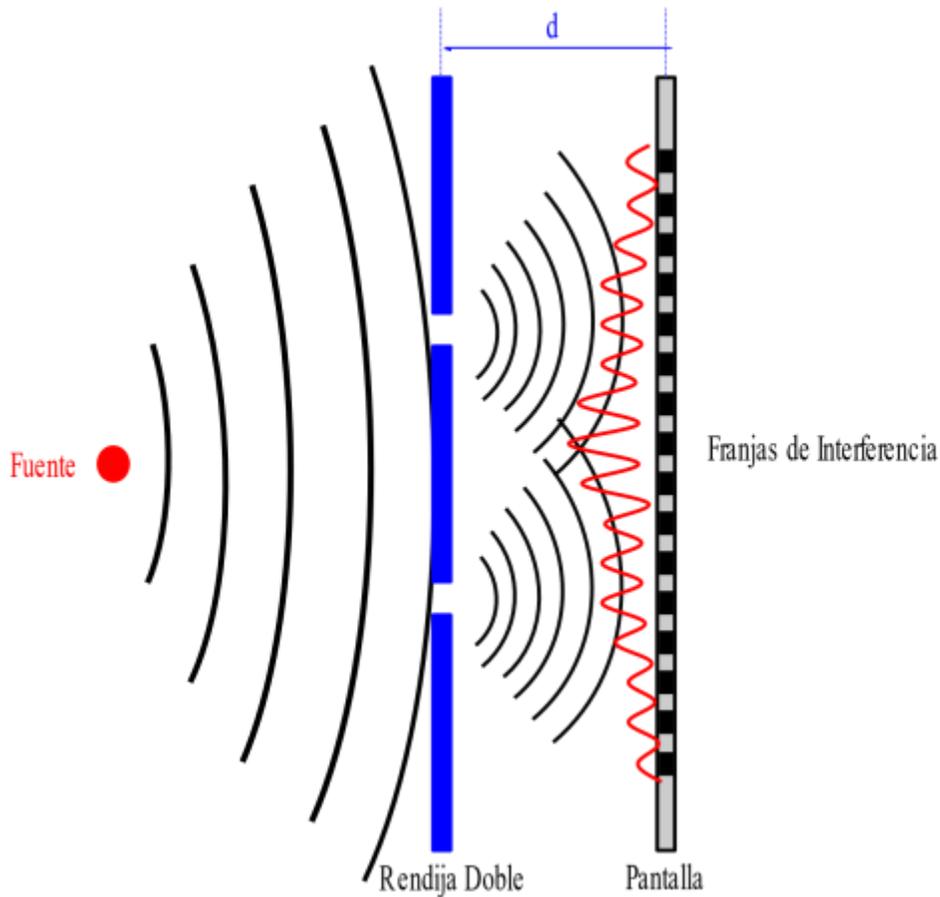


Figura 2.8: Esquema para generar interferencia por división de frente de onda [54].

En la Figura 2.9 se presenta el diagrama del interferómetro Mach-Zehnder, que ejemplifica el fenómeno de interferencia por división de amplitud. El haz proveniente de la fuente se divide en dos partes iguales y cada una de ellas viaja hasta llegar a un espejo altamente reflectante que las dirige hasta el divisor de haz donde se recombinan y juntas llegan al receptor. Una de las trayectorias se toma como referencia y en la otra se provoca una pequeña diferencia de camino óptico a recorrer en comparación con la referencia y esto provoca que se produzca el fenómeno de interferencia [1,36].

Para realizar el análisis de la interferencia, se considerará el caso más simple, el caso en que se superponen dos ondas monocromáticas en un punto determinado del espacio (Detector en la Figura 2.9). Entonces, puede considerarse que el campo total en ese punto está dado por la Ecuación 2.29, donde \vec{E}_1 y \vec{E}_2 corresponden con el campo eléctrico de cada haz y su valor

está dado por la Ecuación 2.30 y la Ecuación 2.31. En estas últimas ecuaciones, ω representa la frecuencia angular de la radiación electromagnética que se propaga a lo largo de la dirección z y β representa la componente en z de la constante de propagación k .

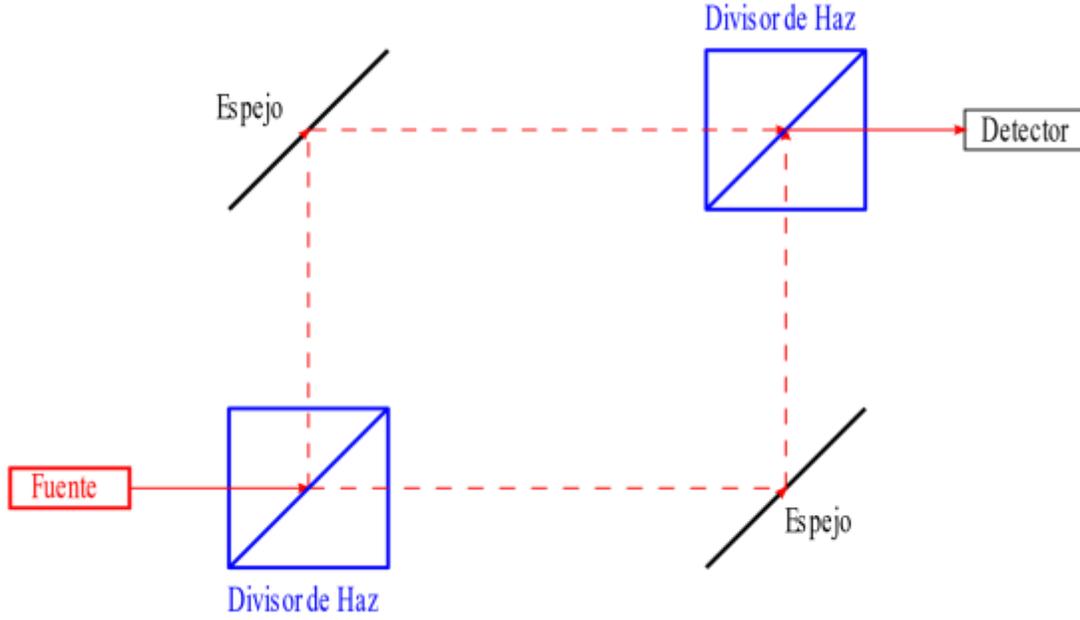


Figura 2.9: Esquema para generar interferencia por división de amplitud. [54].

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2, \quad 2.29$$

$$\vec{E}_1 = E_{01} e^{i(\omega t + \beta_1 z)}, \quad 2.30$$

$$\vec{E}_2 = E_{02} e^{i(\omega t + \beta_2 z)}. \quad 2.31$$

La intensidad en ese punto está dada por la Ecuación 2.32. Al realizar las operaciones matemáticas necesarias se obtiene que el valor de intensidad es el mostrado en la Ecuación 2.33, y la diferencia de fase ($\Delta\phi$) está determinada por la Ecuación 2.34. En esta última ecuación Δn representa la diferencia de índice de refracción del medio en los dos caminos recorridos, d representa la longitud del camino óptico y λ la longitud de onda de trabajo.

$$I = \langle E \cdot E^* \rangle, \quad 2.32$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\Delta\phi), \quad 2.33$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta n d}{\lambda}. \quad 2.34$$

Los sensores interferométricos de fibra se basan en la diferencia de fase de la luz coherente cuando viaja a través de dos diferentes caminos ópticos en la misma fibra, o en diferentes

fibras. Estos sensores usualmente se consideran como sensores de alta sensibilidad debido a su capacidad de responder a pequeños cambios. La mayoría de los sensores interferométricos incluyen interferómetros de fibra óptica Mach-Zehnder [30], Michelson [31], Fabry-Perot [32], Sagnac [28] interferómetros multimodales [33,34,55,56] o una combinación de varios tipos de interferómetros [1,35–38].

2.4 Componentes de un sensor de fibra óptica.

2.4.1 Fuentes de luz de amplio espectro.

Existen diferentes fuentes de “luz blanca” que son utilizadas en interferometría. El hecho de que se le conozca como “luz blanca” no implica que dichas fuentes de luz emitan en el espectro visible, de hecho, la mayor parte de los sistemas utilizados para monitorear los sensores ópticos utilizan luz infrarroja. El término “luz blanca”, o fuentes de amplio espectro, se emplea para identificar a fuentes de luz cuyo espectro es lo suficientemente amplio como para que la longitud de coherencia de la fuente de luz sea mucho menor que la longitud del trayecto óptico de ida y vuelta del interferómetro. Entre estas podemos encontrar: diodos superluminescentes (SLD: superluminescent diode), diodos emisores de luz (LED: light-emitting diodes), fibras dopadas con tierras raras y lámparas de tungsteno. Estas fuentes típicamente tienen anchos espectrales de unas pocas decenas de nanómetros [35]. En esta sección describiremos las características fundamentales de los diodos superluminescentes, de las fuentes de ruido ASE (Amplified Spontaneous Emission) basadas en fibras dopadas con erbio, y de las fuentes de supercontinuo; debido a que fueron empleadas en las pruebas realizadas como parte de este trabajo de investigación.

2.4.1.1 Diodo superluminescente.

Un diodo superluminescente (SLD: superluminescent diode) es un dispositivo semiconductor que emite luz al hacer fluir una corriente a través de su estructura. Los SLD son dispositivos intermedios entre los diodos emisores de luz (LED: light-emitting diodes) convencionales y los láseres. Presentan una anchura espectral menor que los primeros y mayor que los segundos. La emisión que se produce al hacer fluir la corriente hacia una unión p-n altamente dopada es capaz de producir una emisión espontánea (ASE: Amplified Spontaneous Emission), cuyo rango de longitudes de onda de emisión depende de los sustratos utilizados: Arseniuro de Galio (GaAs) o Aluminio-Arseniuro de Galio (AlGaAs)

para 850 nm, Indio-Arseniuro de Galio-Fósforo (InGaAsP) para 1310 nm e Indio-Fósforo (InP) para 1550 nm. Estos dispositivos emiten potencias mucho más altas que los LED y los ELED (edge-emitting LED), pero son muy sensibles a la retroalimentación y sus espectros también dependen en gran medida de la temperatura de la unión. Los anchos de banda de emisión pueden variar de 5 a 100 nm centrados de 400 a 1700 nm con una potencia de salida de varios mili-Watts para una corriente de inyección de varios cientos de mili-Amperes. Su geometría se aproxima a los diodos láser (LD: laser diode), pero carecen de un mecanismo eficiente de realimentación óptica necesario para conseguir alta coherencia. Se puede formar un diodo láser semiconductor agregando superficies reflectantes a un diodo superluminiscente, para obtener una inversión de población y, por lo tanto, un láser [52].

2.4.1.2 Ruido ASE.

En esta sección se analizan las características de las fibras dopadas con erbio que permiten su utilización como fuentes de luz de amplio espectro que se conocen como fuentes de ruido ASE (ASE: Amplified Spontaneous Emission) y como amplificadores ópticos. La ganancia de un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA: Erbium-doped fiber amplifier) se obtiene al bombear la fibra con una determinada longitud de onda que permite la inversión de población.

La mayoría de los EDFAs utiliza un bombeo de 980 nm, ya que para obtener una buena amplificación utilizando un bombeo de 1480 nm se requieren fibras más largas y mayor potencia del bombeo [48]. En la parte izquierda de la Figura 2.10 se muestran los niveles de energía del erbio donde puede apreciarse que al bombear la fibra dopada con erbio con 980 nm, los iones del erbio que se encuentran en el nivel fundamental ($^4I_{15/2}$) son excitados y pasan a un nivel más energético ($^4I_{11/2}$) mediante la absorción de energía, en este nivel tienen un tiempo de vida medio de 0.001 milisegundos por lo que los iones decaen al nivel de energía inferior ($^4I_{13/2}$) por Emisión Espontánea, emitiendo mediante este proceso los fotones que provocan la fluorescencia típica de color verde (495-570 nm) que puede observarse en las fibras dopadas con erbio al ser bombeadas con 980 nm. El nivel $^4I_{13/2}$ es un nivel metaestable donde el tiempo de vida medio de los iones es de 10 milisegundos. Esto garantiza que se produzca la inversión de población, o sea, que existan más iones excitados en este nivel de energía que en el nivel inferior y que al decaer al nivel de energía fundamental se produzca la Emisión Estimulada, permitiendo la amplificación

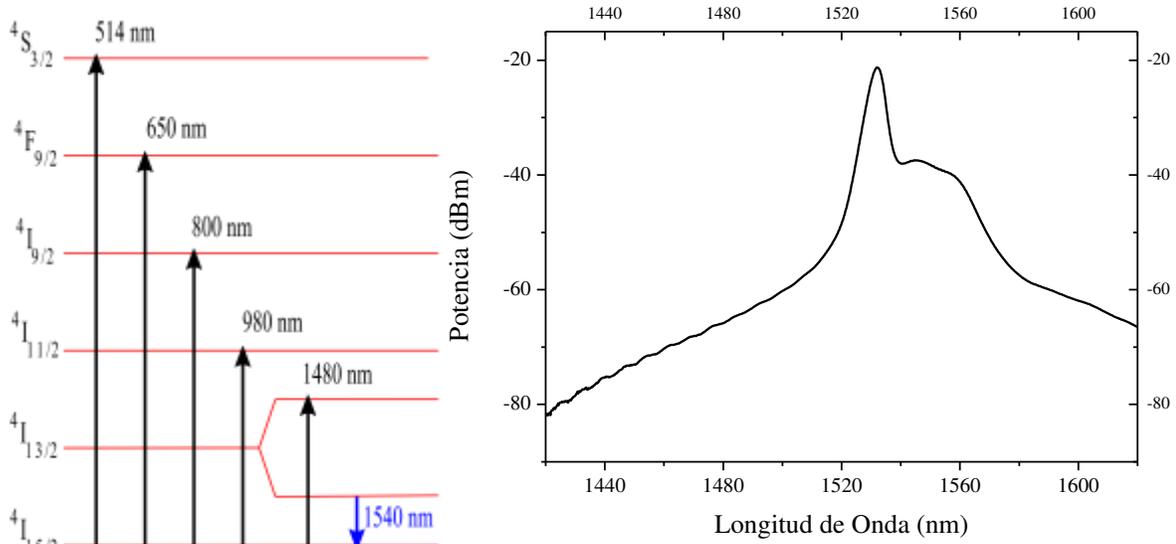


Figura 2.10: Izquierda: Niveles de energía del erbio (Er^{+3}) [48]. Derecha: Espectro de emisión de 3.5 metros de fibra dopada con erbio (Er^{+3}) (LIEKKI™ Er 16 - 8 / 125) utilizando 980 nm como longitud de onda de bombeo (QPHOTONICS QFBGLD-980-200).

Por medio de este proceso se generan múltiples longitudes de ondas provocadas por los saltos de los iones entre los niveles de energía y se obtiene un espectro amplio como el mostrado a la derecha de la Figura 2.10, que abarca longitudes de onda entre los 1420 nm y los 1620 nm [48]. El espectro de ganancia, conocido como Ruido ASE, de un amplificador de fibra dopada con erbio es su característica más importante y está determinado por la naturaleza amorfa del silicio y por la presencia de otros co-dopantes en el núcleo de la fibra como pueden ser el germanio (Ge) y el aluminio (Al) [47,57]. También está determinado por la concentración de iones de erbio, el radio del núcleo y la potencia de bombeo [48].

2.4.1.3 Generación de Supercontinuo.

Se conoce como generación de supercontinuo al ensanchamiento espectral producido a partir del bombeo de un material no lineal adecuado con un haz coherente, típicamente un láser pulsado [58]. En la siguiente figura se muestra un esquema

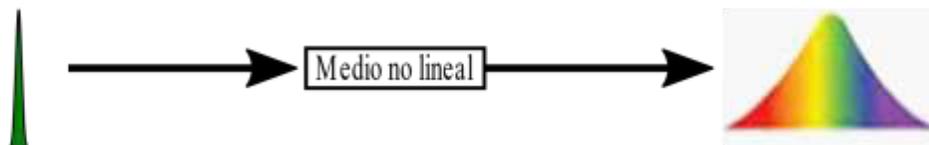


Figura 2.11: Esquema básico para la generación de supercontinuo.

La generación de supercontinuo se reportó por primera vez en 1970 por Alfano y Shapiro [58], quienes lograron generar un espectro que se extendía desde los 400 nm hasta los 700 nm aproximadamente, utilizando un bombeo de un láser de Nd: Glass y como medio no lineal usaron un vidrio de borosilicato. Desde entonces se han realizado muchos estudios en esta rama [59,60]. El desarrollo de sistemas basados en el aprovechamiento de la no linealidad de la fibra óptica ha sido espectacular en los últimos años, particularmente después de la aparición de las fibras de cristal fotónico (PCF: Photonic Crystal Fiber) o fibras ópticas microestructuradas [61], ya que éstas últimas constituyen un medio con alta no linealidad [62,63].

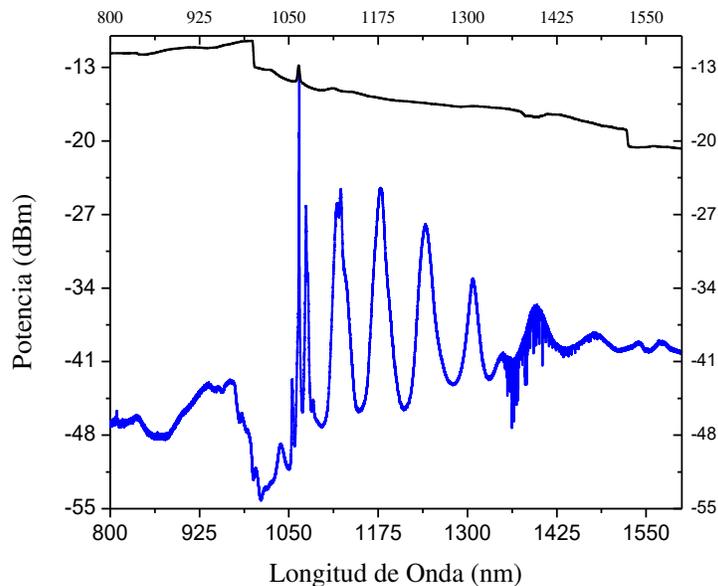


Figura 2.12: Ejemplos de espectros supercontinuos obtenidos en el laboratorio.

En la Figura 2.12 se muestran dos espectros supercontinuos obtenidos en el laboratorio utilizando láseres de bombeo de 1064 nm y diferentes fibras ópticas como medios no lineales. La curva azul corresponde a 1000 metros de fibra convencional, la cual presenta dispersión normal para la longitud de onda del bombeo, mientras que la curva negra corresponde con la respuesta de aproximadamente 2 metros de una fibra fotónica que presenta dispersión anómala para la longitud de onda del bombeo. En el régimen de dispersión normal el fenómeno predominante, como se aprecia en la figura anterior, es la Dispersión Raman. En el régimen de dispersión anómala, por su parte, se presenta el fenómeno de inestabilidad modulacional, que normalmente es el que desencadena todo el proceso, y la generación de solitones. Posteriormente se presentan otros fenómenos como la automodulación de fase, la

mezcla de cuatro ondas, entre otros. Las aplicaciones de supercontinuo producidos por láseres de fibra óptica son muy numerosas y entre ellas destacamos: su uso como fuente de luz blanca, espectroscopía, biomedicina, metrología de frecuencias, amplificadores Raman de ganancia plana, tomografía de coherencia óptica (OCT: optical coherence tomography) [64], sensores y en las comunicaciones.

2.4.2 Detectores.

Los fotodiodos o fotodetectores son dispositivos que generan una corriente determinada por la luz que absorben en su región de operación. Son dispositivos que presentan respuestas rápidas y altamente lineales lo que permite su utilización en una gran variedad de aplicaciones diferentes. Los fotodetectores de silicio son muy utilizados debido a que trabajan en las regiones del visible hasta el infrarrojo cercano (NIR: near infra-red), tienen una respuesta muy rápida y son de bajo costo. Existen otros fotodetectores en el mercado que presentan diferentes características tales como Germanio (baja velocidad, NIR, bajo costo) e Indio-Arseniuro de Galio (InGaAs) que presenta una velocidad de respuesta rápida en la región del infrarrojo cercano, pero su costo varía de moderado a alto [65].

2.4.3 Elementos pasivos.

Para la implementación de los sistemas utilizados en este trabajo es imprescindible la interconexión de diferentes componentes pasivos que se integraron al arreglo por fusión mediante empalmes de arco eléctrico. La preparación de las fibras para realizar el empalme consiste en realizar un corte perpendicular en el extremo de cada una de ellas mediante una cortadora comercial y colocarlas en la máquina empalmadora comercial que de forma automática realiza la alineación de los núcleos de las fibras y la fusión de las mismas. La fusión se produce al unir los extremos de las fibras mientras se les aplica calor mediante una descarga de arco eléctrico. Estos empalmes ofrecen bajas pérdidas y uniones resistentes entre las fibras y permite implementar sistemas totalmente de fibras ópticas [57]. En esta subsección se describe el funcionamiento los elementos pasivos que fueron utilizados durante esta investigación.

2.4.3.1 Aislador

En algunos arreglos de fibras ópticas las reflexiones generadas (por ejemplo, las reflexiones de Fresnel al extremo de conectores) pueden tener consecuencias negativas en el

funcionamiento del sistema [57]. Los aisladores de fibra óptica (ver Figura 2.13) son dispositivos magneto-ópticos que transmiten la luz preferentemente hacia la salida, mientras que la absorben en la dirección contraria [66] y se utilizan en algunos casos para proteger las fuentes de luz de reflexiones o señales que puedan dañarlas.

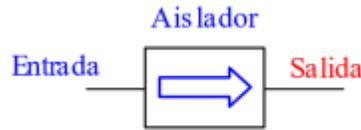


Figura 2.13: Diagrama de un aislador de fibra óptica [66].

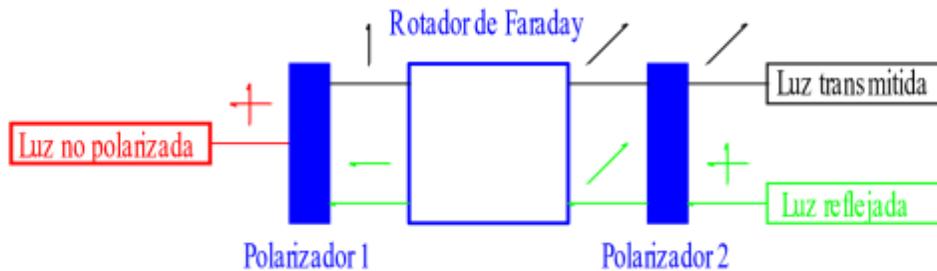


Figura 2.14: Esquema básico de un aislador óptico dependiente de la polarización [66].

La Figura 2.14 muestra un esquema que permite entender el funcionamiento de este dispositivo. Como se observa en el esquema, la luz puede entrar al dispositivo tanto por la derecha como por la izquierda. La luz de entrada no está polarizada por lo que al encontrarse el primer polarizador sólo pasará la parte de la luz que esté polarizada verticalmente. Luego, el rotador de Faraday gira 45 grados a la derecha la polarización de la luz que lo atraviese independientemente de la polarización que tenga. El segundo polarizador transmite únicamente la luz cuya polarización esté 45 grados desplazada hacia derecha respecto de la vertical, por lo que la luz que proviene de la entrada del aislador cumple esta condición, y por tanto, se transmite a la salida del aislador. Al analizar el caso en que la señal entre por la derecha del aislador óptico (marcada como salida en la Figura 2.13), como se ve esta no saldrá por el otro extremo ya que el polarizador número 1 transmite la luz polarizada verticalmente y la señal proveniente de una reflexión llega a éste con polarización horizontal, por lo que queda bloqueada [66,67].

2.4.3.2 Multiplexor por división de longitud de onda.

Los multiplexores por división de longitud de onda (WDM: wavelength division multiplexor) (ver diagrama en la Figura 2.15) son dispositivos bidireccionales que se pueden utilizar como combinadores de dos señales (el bombeo 980 nm y la señal 1550 nm)

permitiendo la co-propagación de ambas en una fibra (Salida) que permita introducirla en el arreglo donde se utiliza, y también pueden ser utilizados para separar dos señales (980 nm y 1550 nm) provenientes de una fibra (Entrada). Estos dispositivos proveen un alto grado de aislamiento entre ambos caminos utilizando para ello rotadores de Faraday y polarizadores internos [57].

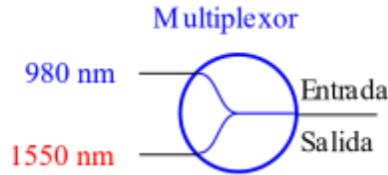


Figura 2.15: Diagrama de un multiplexor por división en longitud de onda [68].

2.4.3.3 Acoplador

Los acopladores de fibra óptica son dispositivos que permiten que una sola entrada de fibra se divida en dos salidas. Los acopladores están disponibles en el mercado con varias longitudes de onda centrales y con diferentes rangos de acoplamiento, por ejemplo: 50:50, 75:25, 90:10, 99:1.

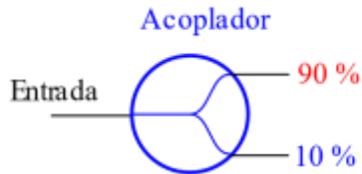


Figura 2.16: Diagrama de un acoplador de fibra óptica de tres puertos [69].

Estos dispositivos se fabrican fusionando dos fibras ópticas en un proceso que es monitoreado utilizando un analizador de espectros ópticos (OSA: optical spectrum analyzer) y que se detiene en el momento en que se alcanza la razón de acoplamiento deseada. En la siguiente figura se muestra un esquema de un acoplador cuya relación de acoplamiento es 90:10, lo que significa que la señal de entrada es dividida en proporcionalmente, teniéndose el 90 % de la misma en una salida y el 10 % restante en la otra salida.

2.4.3.4 Circulador.

El circulador es un componente pasivo formado por la unión de varias fibras donde la señal que entra por una de ellas es enrutada a la siguiente fibra en sentido horario con muy pocas pérdidas, mientras que en sentido contrario experimentan una gran cantidad de pérdidas [57]. Esto se logra mediante el uso de placas birrefringentes, divisores de haz y rotadores de Faraday.

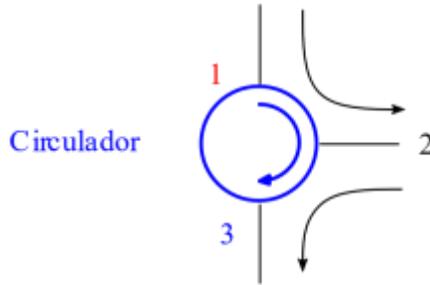


Figura 2.17: Diagrama de un circulator de fibra óptica de tres puertos [70].

2.4.3.5 Controlador de polarización

En algunos sistemas implementados totalmente con fibras ópticas se hace necesario utilizar controladores manuales de polarización. Estos dispositivos utilizan la birrefringencia inducida mediante estrés para modificar la polarización de la luz que circula a través de la fibra óptica que se enrolla alrededor de tres bobinas independientes que sirven como placas retardadoras. La cantidad de birrefringencia inducida en la fibra es una función del diámetro del revestimiento de la fibra, el diámetro de la bobina (fijo), el número de vueltas de fibra por bobina y la longitud de onda de la luz [71], obteniéndose un controlador de polarización de tres placas en serie ($\lambda/4, \lambda/2, \lambda/4$) que transforma un estado de polarización arbitrario de entrada en otro estado de polarización. La primera placa de cuarto de onda transforma el estado de polarización de entrada en un estado de polarización lineal, la placa de media onda rota el estado de polarización lineal, y la última placa de cuarto de onda transforma el estado lineal en un estado de polarización arbitrario.



Figura 2.18: Diagrama de un controlador de polarización manual de tres placas [71].

Capítulo 3 Proceso de fabricación del interferómetro.

3.1 Introducción.

En este capítulo se describe el proceso de fabricación del interferómetro detalladamente y se analiza su principio de operación. El interferómetro propuesto se obtiene al realizar el empalme mediante la técnica de arco eléctrico de dos fibras ópticas con simetrías diferentes. Las fibras ópticas utilizadas en este procedimiento fueron una fibra óptica para comunicaciones (convencional) y un fragmento de fibra óptica convencional estrechada. Ambas fibras son empalmadas mediante arco eléctrico y finalmente se obtiene una punta al aplicarle descargas eléctricas a la fibra óptica estrechada. Este procedimiento permite obtener un interferómetro completamente de fibra óptica que puede ser operado en reflexión.

3.2 Fabricación de la fibra estrechada.

El primer paso de la fabricación consiste en la obtención de la fibra óptica estrechada utilizando una máquina para la fabricación de fibra óptica estrechada mediante fusión y estiramiento (MFFOE) controlada por un software con interfaz gráfica. La MFFOE, cuyo diagrama simplificado se muestra en la Figura 3.1, está compuesta por un banco de estiramiento conformado por diferentes elementos mecánicos (motores, bases de fijación de la fibra, soplete, etc.) y un módulo de control que determina el movimiento de los motores y la mezcla de gases (oxígeno y butano) en el soplete.

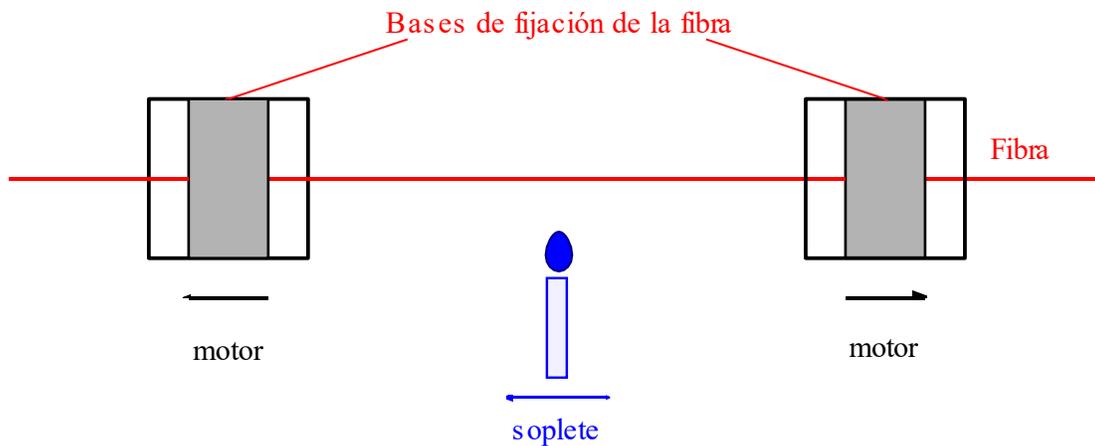


Figura 3.1: Diagrama simplificado de la máquina para la fabricación de fibra óptica estrechada mediante fusión y estiramiento (MFFOE) [72].

Mediante esta técnica la fibra óptica convencional (SMF-28) que se desea estrechar (sin el recubrimiento plástico), se sujeta mediante las dos bases de fijación motorizadas que

forman parte del banco de estiramiento de la máquina. La flama del soplete se coloca debajo de la fibra y se desplaza de un lado a otro con el objetivo de hacerla moldeable mientras es estirada suavemente por ambos extremos.

En una fibra óptica convencional, una parte de la luz que viaja a través del núcleo se escapa al revestimiento (campo evanescente) y viaja por éste, pero decae rápidamente luego de una cierta distancia de penetración. Esta distancia está determinada por la Ecuación 3.1 [73,74], donde λ es la longitud de onda de la fuente de luz utilizada, n_1 representa el índice de refracción del núcleo, n_2 representa en índice de refracción del revestimiento y θ representa el ángulo de incidencia de la luz en la interfaz núcleo/revestimiento.

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta - n_2^2}} \quad 3.1$$

Esta máquina permite obtener en el laboratorio una fibra estrechada con una sección central (cuello) cuyo diámetro es más pequeño y uniforme, y dos transiciones simétricas cuyo diámetro varía gradualmente. El esquema ideal de la fibra óptica estrechada se presenta en la Figura 3.2, la longitud del cuello de la fibra óptica estrechada se representa por el valor L en la figura, mientras que las longitudes de ambas transiciones están representadas por el valor L_t . El radio inicial de la fibra óptica es r_0 y el radio del cuello uniforme de la fibra óptica estrechada se representa como r_c y representa el diámetro de cuello para $L_t < z < L_t + L$.

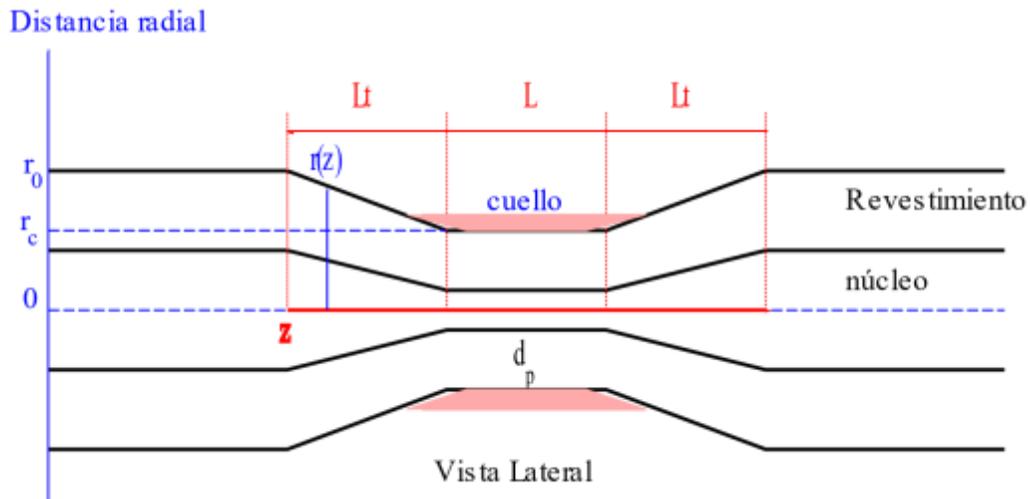


Figura 3.2: Esquema de la geometría de una fibra estrechada. r_0 : radio inicial de la fibra óptica, r_c : radio del cuello uniforme de la fibra óptica estrechada, L : longitud del cuello de la fibra óptica estrechada, L_t : longitud de ambas transiciones de la fibra óptica estrechada, z : dirección de propagación de la luz, $r(z)$: radio de la transición en función de la distancia, d_p : profundidad de penetración [72].

La fibra estrechada tendrá una geometría determinada por la Ecuación 3.2 [72]:

$$r(z) = r_0 \left[1 + \frac{2\alpha z}{(1-\alpha)L_0} \right]^{-1/2\alpha}, 0 < z < t, \quad 3.2$$

donde r es el radio de la fibra y z la distancia medida a lo largo de la transición, siendo r_0 el radio inicial de la fibra el valor correspondiente a $z = 0$. El parámetro α determina la variación lineal del estrechamiento, puede tomar valores entre -1 y 1 y determina la forma geométrica de la transición. La longitud del cuello de la fibra óptica estrechada está determinada por $L = L_0 + \alpha x$, siendo x el estiramiento de la fibra y L_0 la anchura del barrido inicial del soplete.

En realidad, el material del núcleo de la fibra en el cuello y las regiones de transición no tienen límites tan claros con el material del revestimiento debido a su mezcla después del calentamiento [74]. En esta zona, el núcleo de la fibra casi se mezcla con el revestimiento circundante para formar un medio cuyo índice de refracción es muy cercano al del revestimiento. Este medio puede tomarse como un núcleo de revestimiento de aire, que tiene un radio más grande que el del núcleo de fibra monomodo por lo que funciona como una fibra multimodo que admite múltiples modos y alrededor del cual se genera un campo evanescente y parte de la energía de la luz se propaga en la interfaz de revestimiento de aire para luego reacoplarse en el otro extremo de la región de transición.

El programa de la MFFOE tiene como datos de entrada el radio del cuello deseado (r_c), la longitud de barrido inicial del soplete (L_0) y el parámetro que determina la forma geométrica de la transición (α), El valor de α utilizado para este trabajo fue de 0, que corresponde con una transición suave exponencial. A partir de estos datos, calcula los valores finales de la longitud del cuello (L) y de la longitud de las transiciones (t). Para este diseño, se escogieron los parámetros de la MFFOE para obtener un diámetro de cuello de 120 μm y la longitud del cuello mayor a 500 μm , ya que, de toda la estructura, el cuello será la única parte que se utilizará.

3.3 Esquema experimental para la fabricación del interferómetro de punta.

Para monitorear el proceso de fabricación, se montó un esquema como el mostrado en la Figura 3.3, en el cual se utilizó un circulador óptico de tres puertos para interconectar todos los elementos del arreglo. La fuente de luz utilizada fue un diodo superluminiscente y la señal generada por el interferómetro es estudiada mediante un analizador de espectros ópticos

(OSA: Optical Spectrum Analyzer, Yokogawa, AQ6370) que se colocó en el puerto 3 del circulador de fibra óptica. El OSA permite monitorear cambios en intensidad y de longitud de onda que ocurran en el sistema, por lo que este esquema permite monitorear constantemente el proceso de fabricación, lo que permite mejorar la respuesta del interferómetro mediante la aplicación de descargas.

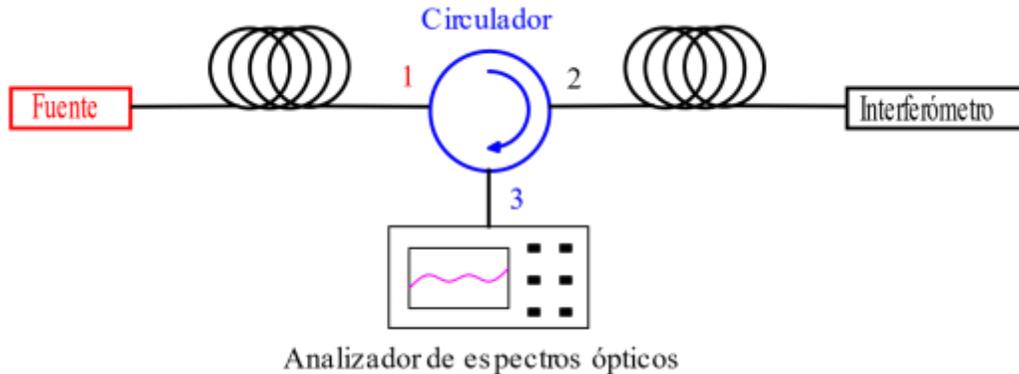


Figura 3.3: Esquema del sistema implementado para la fabricación y caracterización del interferómetro.

El diodo utilizado como fuente de luz en este experimento y en algunos de los otros experimentos que se describirán en próximas secciones de este trabajo fue el QSDM-1550-1, de la marca QPHOTONICS. Un diodo superluminiscente es un dispositivo semiconductor que emite luz al hacer pasar una corriente a través de su estructura. Son dispositivos intermedios entre un diodo emisor de luz y un diodo láser, ya que presentan una anchura espectral menor que los primeros y mayor que los segundos. En la hoja de datos del diodo [75], el fabricante establece que la longitud de onda central del espectro de emisión es 1534 nm, pero puede oscilar entre 1510 nm y 1560 nm, adicionalmente, queda definido que el ancho espectral mínimo es de 25 nm, siendo el ancho espectral típico de 35 nm. La corriente de operación del diodo es de 120 mA y la potencia de salida óptica es de 0.35 mW.

En la Figura 3.5 se muestra el espectro de emisión del diodo medido en el laboratorio. Como se mencionó anteriormente, estos diodos son muy sensibles a la temperatura de la unión p-n, lo que influye directamente en su espectro de emisión. Para realizar la caracterización del diodo en el laboratorio, se tomaron los espectros de emisión del mismo a partir del instante de su inicio cada dos minutos hasta completar cinco muestras, notándose que la longitud de onda central del espectro de emisión variaba entre 1532.8 nm y 1540.6 nm, lo que queda dentro de los parámetros reportados por el fabricante (mínima: 1510 nm, típica:

1534 nm y máxima: 1560 nm). Los espectros obtenidos guardan gran similitud con los ofrecidos por el fabricante y mostrados en la Figura 3.4 b) de esta sección.

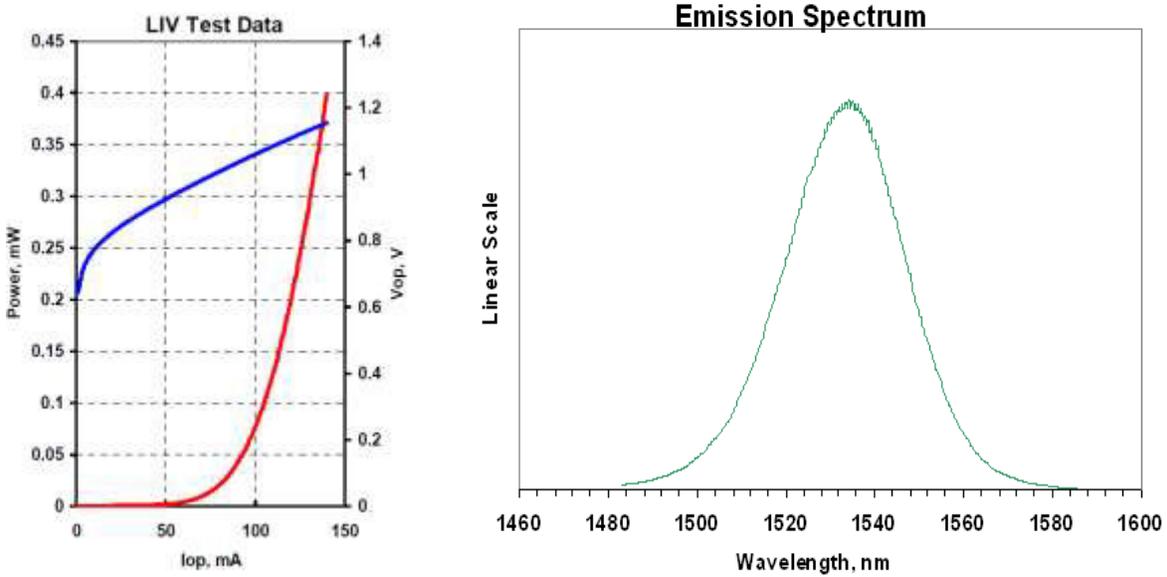


Figura 3.4: Caracterización del diodo superluminiscente QSDM-1550-1 (gráficos tomados de la hoja de datos del fabricante [75]): a) Respuesta de potencia y voltaje dependientes de la corriente de operación, b) Espectro de emisión del diodo.

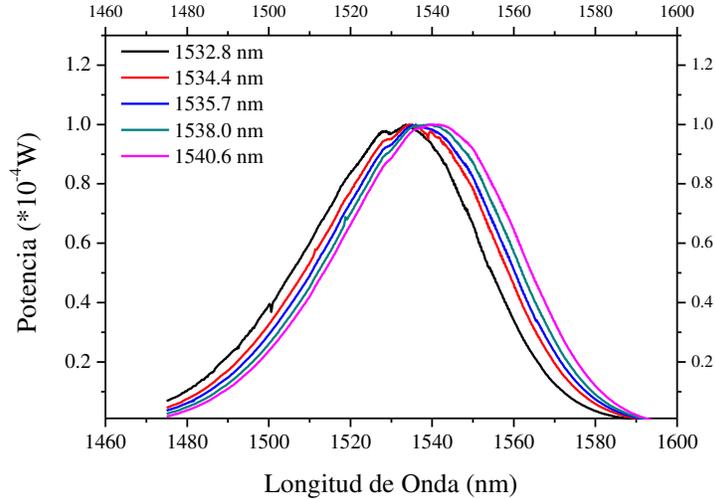


Figura 3.5: Caracterización en el laboratorio del diodo superluminiscente QSDM-1550-1.

El circulador es un componente pasivo formado por la unión de varias fibras donde la señal que entra por una de ellas es enrutada a la siguiente fibra en sentido horario. El comportamiento del circulador de fibra óptica para 1550 nm puede observarse en la Figura 3.6. La fuente de luz utilizada para la caracterización de este dispositivo fue una fuente de amplio espectro supercontinua y los espectros se obtuvieron utilizando un analizador de

espectros óptico. La señal de amplio espectro que entra por el puerto 1 del circulador es transmitida al puerto 2 del circulador (curva negra de la Figura 3.6) con muy pocas pérdidas

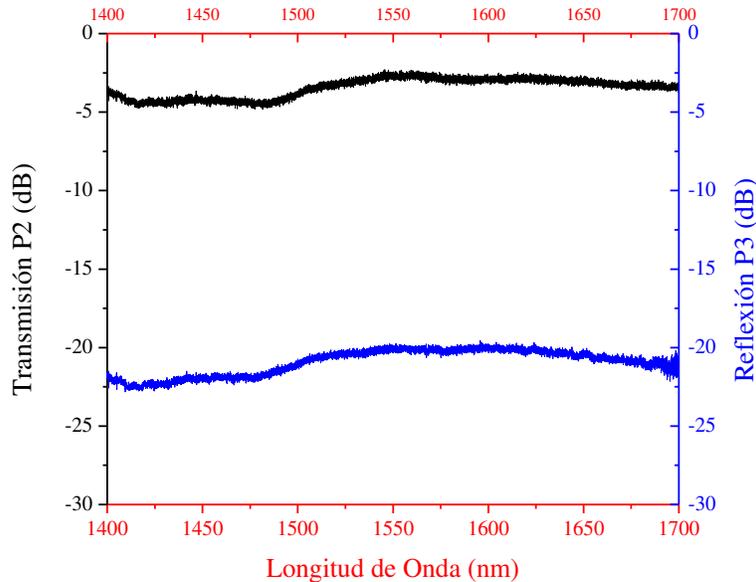


Figura 3.6: Caracterización del circulador de fibra óptica de tres puertos de 1550 nm. Curva negra: espectro de transmisión obtenido en el puerto 2, curva azul: espectro de reflexión obtenido en el puerto 3.

En el extremo de la fibra del puerto 2 se realiza un corte recto que actúa como espejo, garantizando que se refleje una parte de la señal (reflexión de Fresnel). Esta reflexión entra al puerto 2 del circulador de fibra óptica y es transmitida al puerto 3 del dispositivo y corresponde con la curva azul de la Figura 3.6. Las pérdidas en este caso corresponden a que se refleja sólo un 4 % de la señal y no a pérdidas introducidas por el circulador de fibra óptica.

3.4 Proceso de fabricación.

Una vez que se tiene la fibra estrechada (región del cuello de la fibra óptica convencional estrechada), el resto del proceso de fabricación del interferómetro se lleva a cabo en el puerto 2 del circulador de fibra óptica. Para fabricar el interferómetro, debemos realizar la unión mediante empalme de la fibra convencional y la porción del cuello de la fibra estrechada obtenida anteriormente. Ambos extremos son cortados apropiadamente y colocados en la empalmadora comercial de arco eléctrico FITEL S-175 V.2000 con la que se realiza un proceso de alineación manual de las fibras, desplazando los extremos de las fibras como se muestra en la Figura 3.7 una distancia aproximada de 100 μm del eje de los electrodos (líneas verticales y paralelas de color verde). Este diagrama representa lo que se

observa en la pantalla de la empalmadora en esta etapa del proceso de fabricación. La línea horizontal punteada azul representa la línea imaginaria que une el centro radial de la fibra óptica convencional y la fibra estrechada utilizada luego de ser manualmente alineadas entre sí para garantizar que la mayor cantidad de la luz que viaja por el núcleo de la fibra óptica convencional monomodo (SMF-28) pase a la microfibra generando la menor cantidad de pérdidas posible. Las líneas verticales verdes representan el eje de los electrodos que pueden verse en la pantalla de la empalmadora manual que sirven como guía durante el proceso de fabricación de la zona donde se aplicarán las descargas eléctricas.

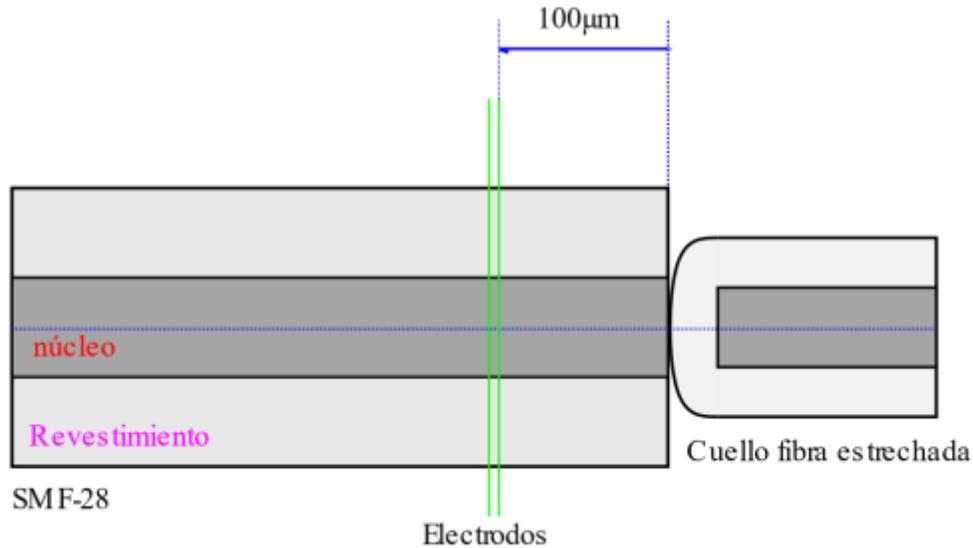


Figura 3.7: Diagrama descriptivo del proceso de fabricación: posición relativa de la fibra óptica convencional y la microfibra en la empalmadora manual para realizar el empalme. Línea horizontal punteada azul: línea imaginaria que une el centro radial de ambas fibras. Líneas verticales verdes: eje de los electrodos de la empalmadora manual.

Posteriormente, se adecuan los parámetros de la empalmadora (ver Tabla 3.1) y se aplican tres descargas (limpieza, pre-fusión y fusión) sobre la superficie de la fibra óptica convencional. La fusión entre esta última y la fibra estrechada se produce porque el calor generado por las descargas de arco eléctrico, que se propaga por la fibra monomodo, es lo suficientemente intenso para hacer ambas fibras moldeables en sus extremos, sin embargo, no es suficiente para provocar que la fibra estrechada se deforme. Este procedimiento se empleó por la efectividad que ha demostrado en trabajos que se han generado en el Laboratorio de fotónica y fibras ópticas del Departamento de Electrónica de la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato [41,42], para realizar empalmes entre fibras ópticas convencionales y fibras ópticas microestructuradas,

que, al igual que las fibras estrechadas utilizadas en esta investigación, podían ser afectadas por el calor generado por las descargas de arco eléctrico.

Tabla 3.1: Parámetros utilizados en la empalmadora FITEL S-175 V.2000 para realizar el empalme entre la fibra convencional y la fibra estrechada.

Potencia de Arco		94
Tiempo de Prefusión	ms	0
Duración de Arco	msg	0

La imagen de la Figura 3.8 muestra el empalme entre la fibra óptica convencional y la fibra óptica estrechada que se puede apreciar en la pantalla de la empalmadora FITEL S-175 V.2000 durante el proceso de fabricación.

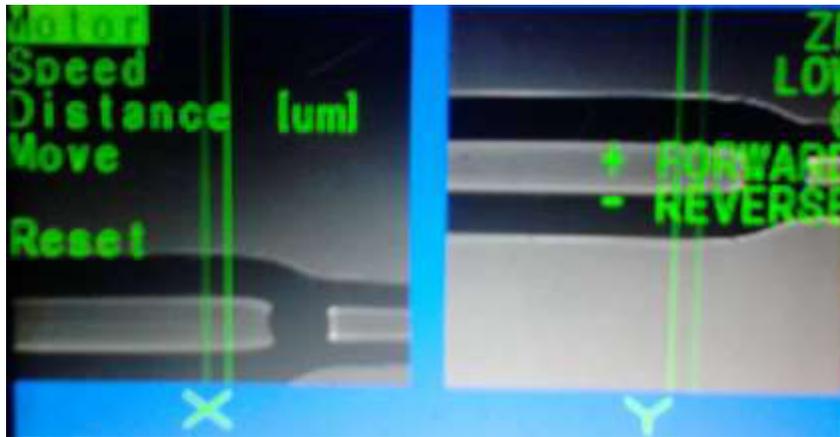


Figura 3.8: Imagen tomada durante el proceso de fabricación luego de realizar el empalme entre la fibra convencional y la fibra estrechada. Las líneas verticales verdes representan el eje de los electrodos de la empalmadora manual.

Finalmente, se desplaza la unión unos 500 μm alejándola del eje de los electrodos de la empalmadora y se aplican descargas eléctricas, usualmente siete u ocho descargas, hasta que se produce el corte de la fibra estrechada, quedando la punta del interferómetro con una forma redondeada. En la Figura 3.9, se muestra un diagrama que representa este desplazamiento, sin embargo, en la pantalla de la empalmadora (recuadro rojo) sólo se observa la zona de la fibra estrechada que será cortada mediante la aplicación de descargas. Como en los diagramas anteriores, la línea horizontal punteada azul representa la línea imaginaria que une el centro radial de la fibra óptica convencional y la fibra estrechada utilizada luego de ser manualmente alineadas entre sí y las líneas verticales verdes representan el eje de los electrodos que pueden verse en la pantalla de la empalmadora manual que sirven como guía durante el proceso de fabricación de la zona donde se aplicarán las descargas eléctricas.

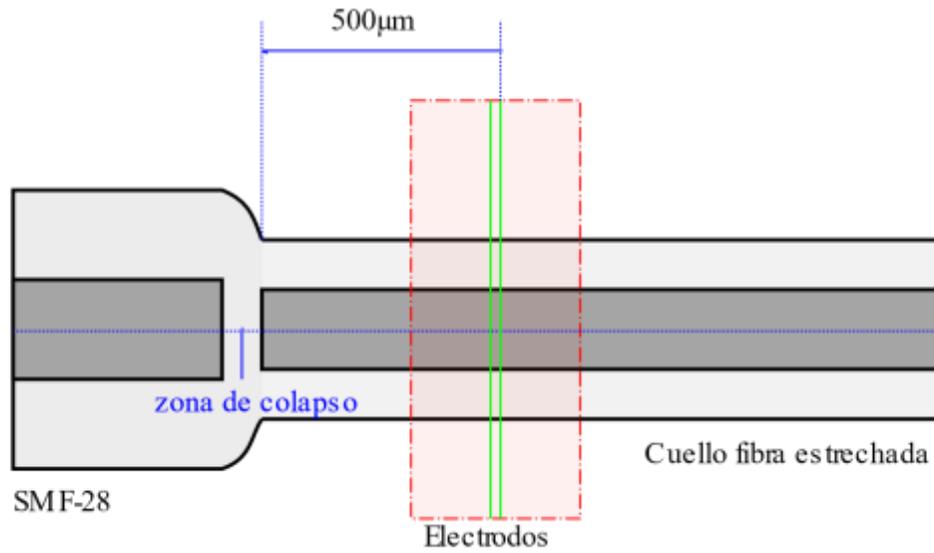


Figura 3.9: Diagrama descriptivo del proceso de fabricación: posición relativa de la estructura para realizar el corte mediante arco eléctrico de la fibra estrechada. Línea horizontal punteada azul: línea imaginaria que une el centro radial de ambas fibras. Líneas verticales verdes: eje de los electrodos de la empalmadora manual. Recuadro rojo: fracción del diagrama observada en la pantalla de la empalmadora.

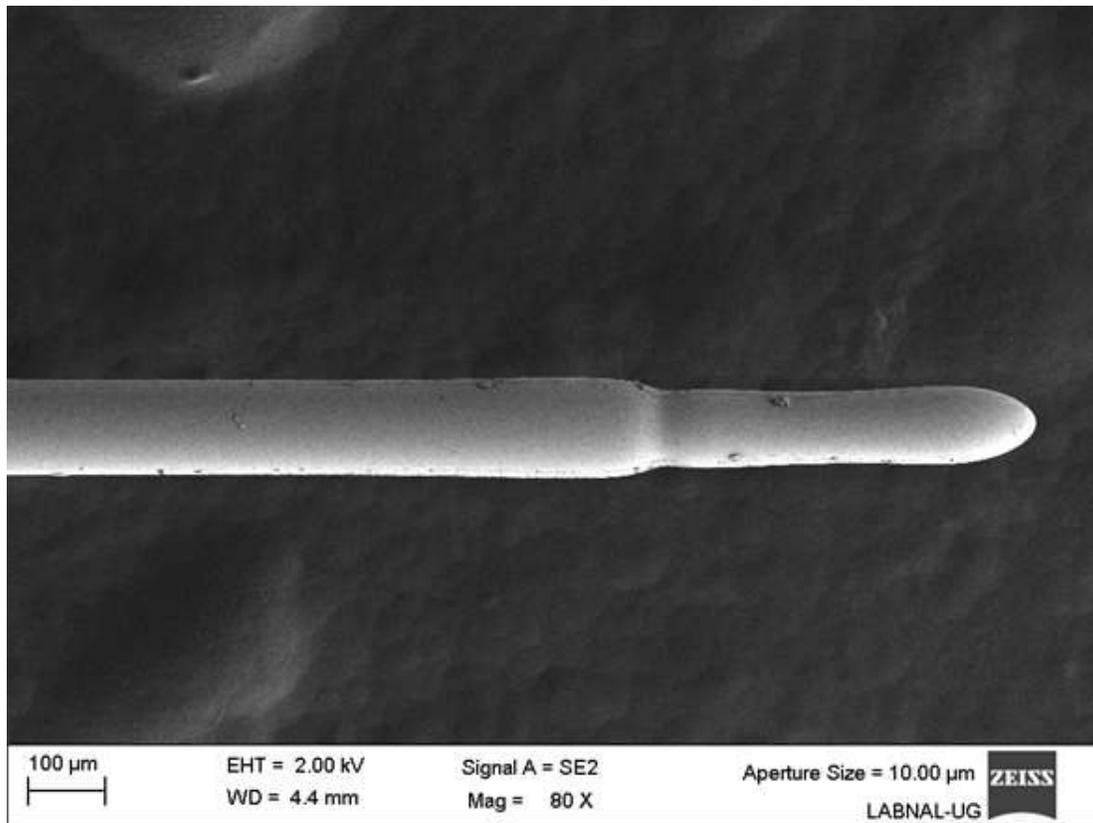


Figura 3.10: Imagen de un interferómetro fabricado tomada con el microscopio electrónico del Laboratorio Nacional de la Universidad de Guanajuato.

La Figura 3.10 muestra la imagen de uno de los interferómetros fabricados, tomada con el microscopio electrónico del Laboratorio Nacional de la Universidad de Guanajuato. La distancia aproximada de ambas zonas de colapso es de $50\ \mu\text{m}$ y la longitud de la fibra estrechada entre ellas es de aproximadamente $400\ \mu\text{m}$.

3.5 Caracterización del interferómetro.

En la Figura 3.11 se muestran los espectros de reflexión de algunos de los interferómetros fabricados siguiendo el método propuesto en la sección anterior. Algunas de las características más importantes de los mismos son las pérdidas de inserción que presenta en el rango de longitudes de onda de interés y sus características en cuanto a rango espectral libre (FSR: free spectral range) y el contraste de franjas del patrón de interferencias. El FSR es la diferencia de longitud de onda que existe entre dos crestas o dos valles subsecuentes del espectro, en los casos que se muestran, este valor oscila entre $1.30\ \text{nm}$ y $1.80\ \text{nm}$. El contraste de franjas está dado por la diferencia en potencia entre un máximo y un mínimo del espectro continuos, en los ejemplos mostrados en la Figura 3.11 los valores de contraste de franja máxima registrada se encuentran entre $5\ \text{dB}$ y $11\ \text{dB}$. Teniendo en cuenta estos resultados y considerando que el proceso de fabricación propuesto es completamente manual, se puede decir que los resultados obtenidos siguiendo esta metodología son repetibles.

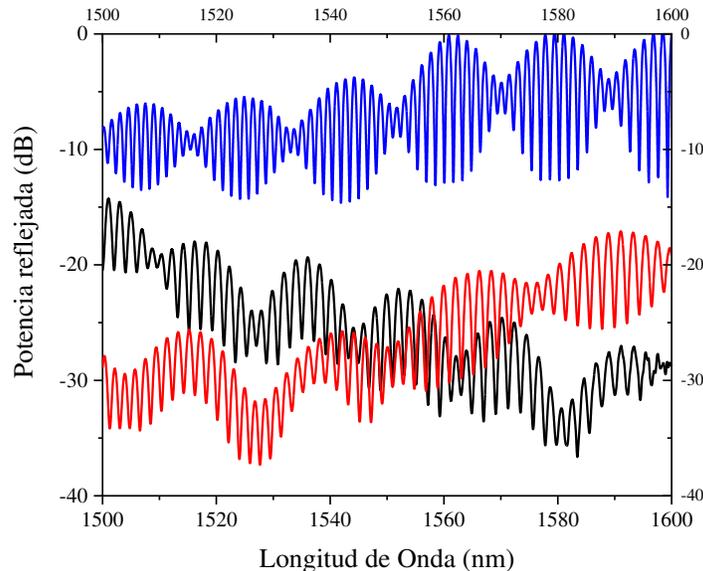


Figura 3.11: Espectro de reflexión de tres interferómetros fabricados.

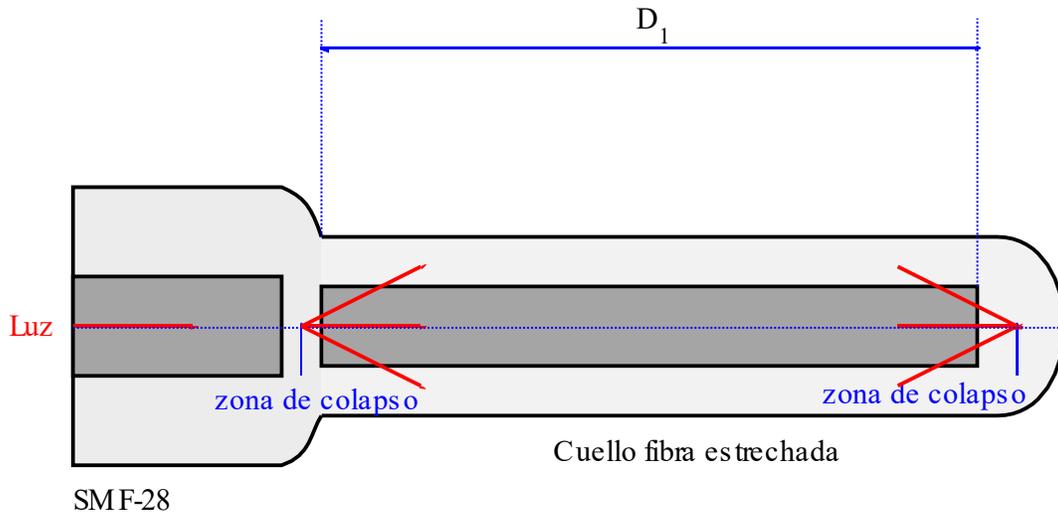


Figura 3.12: Diagrama del interferómetro fabricado. D_1 : longitud de la fibra estrechada.

Si se analiza la Figura 3.12, se puede observar que la estructura del interferómetro propuesto presenta dos zonas de colapso. La primera zona de colapso está compuesta fundamentalmente por material del recubrimiento de la fibra óptica convencional, cuyo índice de refracción es ligeramente inferior al del núcleo de la fibra, y es la responsable de al menos dos reflexiones, una al comienzo y otra al final siguiendo la trayectoria de la luz en el interferómetro. La otra parte de la luz se separa en diferentes caminos que viajan por el núcleo (modo fundamental) y por el revestimiento de la fibra estrechada hasta la punta del interferómetro. De la estructura física del interferómetro se puede deducir además que una parte de esta luz que se separa se escapa de la fibra estrechada, generando una onda evanescente. En la punta una parte de la luz se escapa, pero el área de colapso provoca que la otra parte se recombine y se refleje, viajando nuevamente tanto por el núcleo como por el revestimiento de la fibra estrechada. La interacción de estas señales provoca que se generen los patrones de interferencia mostrados anteriormente en la Figura 3.11.

Utilizando la Ecuación 3.3 podemos realizar el cálculo predictivo del patrón de interferencia que tendrá el interferómetro fabricado, donde R_1 es la reflexión que ocurre en la primera zona de colapso y R_{k+1} representa las otras reflexiones producidas en la punta del interferómetro.

$$E_R = \left[\sqrt{R_1} + \sum_{k=1}^n \left(\exp \left[-2j \left(\sum_{i=1}^k \phi_i \right) \right] \sqrt{R_{k+1}} \prod_{i=1}^k (1 - R_i) \right) \right] E_0. \quad 3.3$$

La reflexión se puede expresar mediante $R = \left| \frac{n_x - n_y}{n_x + n_y} \right|^2$, la fase entre los modos generados se expresa como $\phi = \frac{4\pi n_{x,y} L}{\lambda}$, donde $n_{x,y}$ es el índice de refracción efectivo de cada sección analizada y L es el largo de cada sección; λ por su parte, representa la longitud de onda de trabajo. En la Figura 3.13 se muestra el espectro teórico obtenido utilizando este método (curva negra) y se muestra el espectro de reflexión azul de la Figura 3.11 normalizado con el objetivo de compararlo y validarlo. Podemos apreciar que el valor de FSR predictivo (1.58 nm) se encuentra muy cercano al obtenido de forma práctica (1.53 nm). Las diferencias entre ambos pueden estar dadas porque el modelo utilizado no considera las pérdidas y porque en la zona de la fibra estrechada el núcleo de la fibra casi se mezcla con el revestimiento circundante y el índice de refracción puede modificarse ligeramente debido a su mezcla después del calentamiento [74].

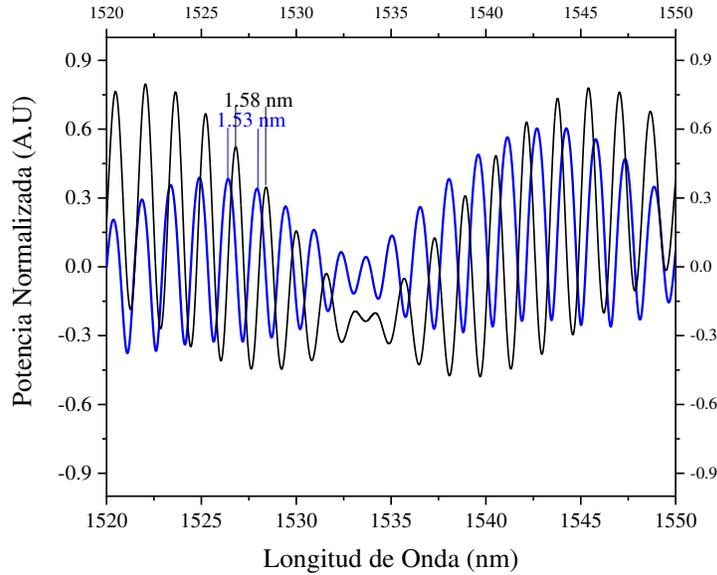


Figura 3.13: Comparación entre la respuesta espectral del interferómetro fabricado (curva azul) y la predicción teórica de su comportamiento (curva negra).

Para validar el principio de operación anteriormente descrito se aplica la Transformada rápida de Fourier (FFT: Fast Fourier Transform) a los espectros de reflexión de dos interferómetros fabricados. Los resultados de la transformada de Fourier corresponden con las líneas azules de la Figura 3.14, mientras que en la parte superior derecha se muestran los

espectros que sirvieron de base para este análisis. Estos resultados muestran que existen múltiples modos interactuando y que contribuyen en la generación del espectro del interferómetro. La componente centrada en cero representa el modo fundamental y las otras frecuencias representan los modos de alto orden excitados. Estos modos están agrupados fundamentalmente en dos grupos que corresponden con las dos zonas de colapsos de la estructura.

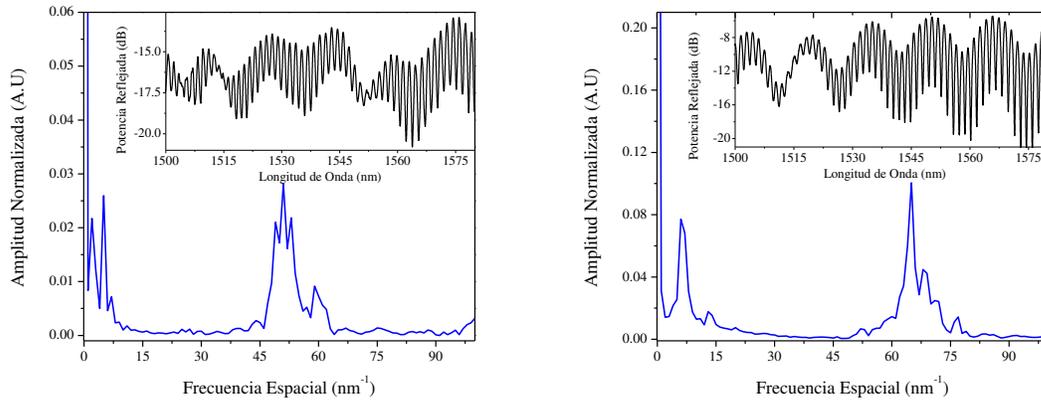


Figura 3.14: Análisis mediante FFT de los espectros de dos de los interferómetros fabricados (línea azul). En la esquina superior derecha se muestra el espectro que corresponde al resultado obtenido en cada caso.

Los resultados mostrados en esta sección fueron publicados para su difusión en [76,77]

Capítulo 4 Aplicaciones

4.1 Introducción.

En este capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas para establecer las posibles aplicaciones como sensor del dispositivo cuya técnica de fabricación se describió en el capítulo anterior. La primera etapa del trabajo estuvo encaminada a la detección de cambios de índice de refracción de disoluciones acuosas y cambios de temperatura, utilizando para ello el mismo esquema empleado para la fabricación de los dispositivos interferométricos, debido a que es de fácil implementación y permite analizar en tiempo real los cambios producidos en la respuesta del sistema ante los cambios del medio. Utilizando este mismo esquema, se trabajó en la detección de cambios de concentración en disoluciones acuosas ya que está estrechamente relacionada con los cambios de índice de refracción de estas. En esta etapa se trabajó con algunos dispositivos que fueron recubiertos con una fina capa de cobre buscando ampliar el rango de detección para cambios de concentración de soluto en disoluciones acuosas. Finalmente se implementó un láser de fibra óptica en cavidad de anillo utilizando como filtro los dispositivos presentados en este trabajo de investigación, y se realizaron pruebas para la detección de temperatura e índice de refracción de disoluciones acuosas.

4.2 Detección de cambios de índice de refracción en disoluciones acuosas.

Después de la fabricación de varios interferómetros con el método propuesto en el Capítulo 3, se procedió a realizar las pruebas para determinar si podrán ser utilizados para detectar cambios de índice de refracción. Este parámetro está definido como la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y en el medio que se analiza. Existe una dependencia del índice de refracción con la temperatura, la longitud de onda de trabajo y la composición del medio. La determinación del índice de refracción es una aplicación muy utilizada actualmente en diversas ramas de investigación y para aplicaciones industriales. Las ventajas que ofrece el uso de estructuras de fibra óptica en la determinación de este parámetro aprovechando el fenómeno de la interferencia han sido ampliamente estudiadas y demostradas mediante el empleo de estructuras que utilizan fibras ópticas estrechadas [78,79], estructuras de fibras de cristal fotónico [80], rejillas de período largo [81], etc. Una de las alternativas que más se ha estudiado en los últimos años para la obtención de sensores

de índice de refracción es la fabricación de interferómetros por la técnica de arco eléctrico [32,80]. Los procesos de detección de estos sensores se han basado tanto en la modulación de fase [28,79], como en la modulación de intensidad [82,83].

4.2.1 Caracterización.

Para realizar la caracterización de la respuesta de los interferómetros ante los cambios de índice de refracción del medio circundante, se implementó el mismo arreglo que el utilizado para la fabricación (ver Figura 3.3), aprovechando las ventajas ya mencionadas de este arreglo que permite monitorear en tiempo real los cambios espectrales del sistema. Todos los experimentos descritos en esta sección se realizaron en una habitación con temperatura controlada debido a que los espectros de reflexión analizados pudieran verse afectados por incrementos mayores de 2 °C en la temperatura ambiente [84]. Los experimentos se realizaron en una habitación con luz natural ya que ha quedado demostrado que para determinar la concentración de glicerina en una mezcla acuosa, la luz blanca de una habitación tiene muy poca influencia en comparación con una habitación oscura [24].

Inicialmente, se sumergió uno de los interferómetros escogido al azar en un recipiente que contenía agua destilada cuyo índice de refracción medido utilizando un refractómetro comercial (Refracto 30GS METTLER TOLEDO) era de 1.3326 RIU (RIU: Refractive Index Unit). Este instrumento permite obtener el valor del índice de refracción de las muestras analizadas en un rango desde 1.32 hasta 1.65, con una temperatura de trabajo desde los 10 °C hasta los 40 °C, utilizando un LED de 589.30 nm. Se pudo observar que se reducía el contraste de franjas 2.97 dB y adicionalmente se producía un desplazamiento del patrón de interferencia hacia el rojo de 0.35 nm.

Con el objetivo de verificar esta respuesta, se repitió esta operación cada dos minutos, modificando en cada ocasión la profundidad de inmersión del interferómetro en el recipiente. Al analizar los resultados se pudo determinar que la profundidad de inmersión no determina los cambios reflejados en el espectro ya que se obtuvieron respuestas similares en cada oportunidad, tal como puede apreciarse en la Figura 4.1.

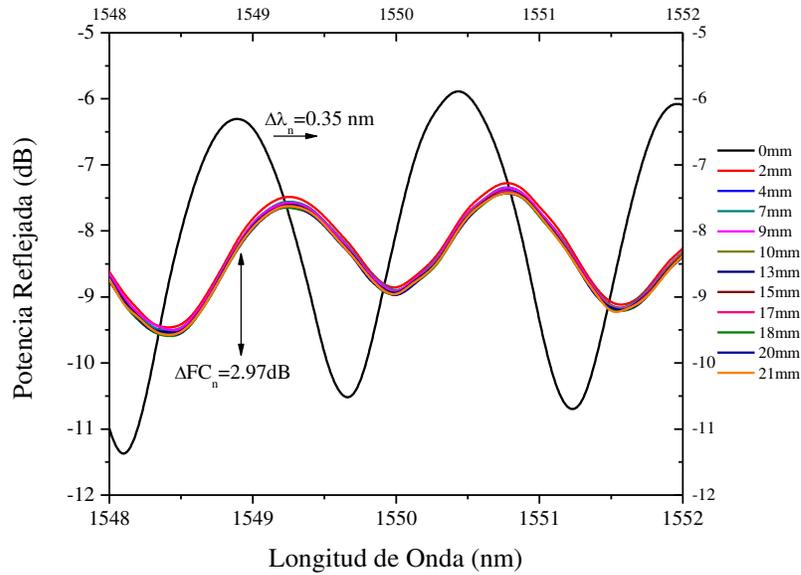


Figura 4.1: Respuesta espectral de interferómetro inmerso en agua destilada (1.3326 RIU) a diferentes profundidades.

Se analizó la respuesta de dos interferómetros ante los cambios de índice de refracción del medio acuoso en el que se encontraban inmersos. Se utilizaron mezclas de agua-glicerina en diferentes proporciones con el objetivo de obtener diferentes valores de índice de refracción. Para evitar los posibles efectos del cambio en la curvatura de la fibra, que pudieran generar ambigüedad en los resultados, se decidió ir agregando la glicerina a la mezcla donde estaba inmerso el interferómetro y de esta forma aumentar su índice de refracción en cada medición. El valor de índice de refracción fue medido en cada ocasión utilizando el refractómetro comercial que además del valor de índice de refracción nos brinda la temperatura en cada medición, con el objetivo de controlar que los cambios de este parámetro durante el experimento no fueran superiores a 2 °C. Las mezclas de agua-glicerina fueron preparadas meticulosamente con incrementos de índice de refracción de aproximadamente 0.003 RIU desde 1.3373 RIU hasta 1.3904 RIU. Los efectos del aumento del índice de refracción pueden verse en la Figura 4.2.

Se puede apreciar la disminución del contraste de franjas del patrón de interferencia en ambos casos a medida que se aumenta el índice de refracción de la disolución. La modulación de intensidad en este caso está relacionada con los efectos del campo evanescente que está presente en la zona de la fibra estrechada que compone el interferómetro, que se modifica al variar el índice de refracción de la mezcla. Los valores de sensibilidad obtenidos fueron de 95.6 dB / RIU y 112.2 dB / RIU. En el caso del interferómetro que presenta mejor

sensibilidad (112.2 dB / RIU), la reducción del contraste de franjas del patrón de interferencia afecta el rango de medición, factor que se incrementa en el caso del dispositivo cuya sensibilidad es menor (95.6 dB / RIU).

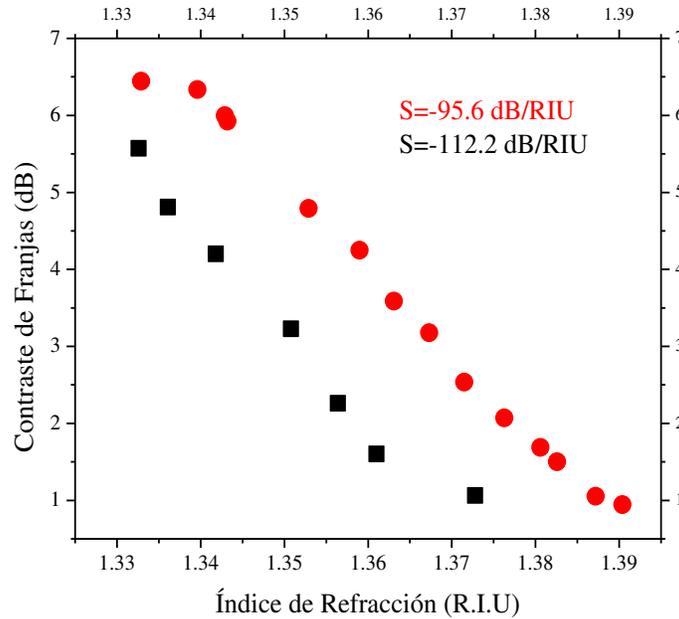


Figura 4.2: Análisis de sensibilidad de dos dispositivos ante cambios de índice de refracción.

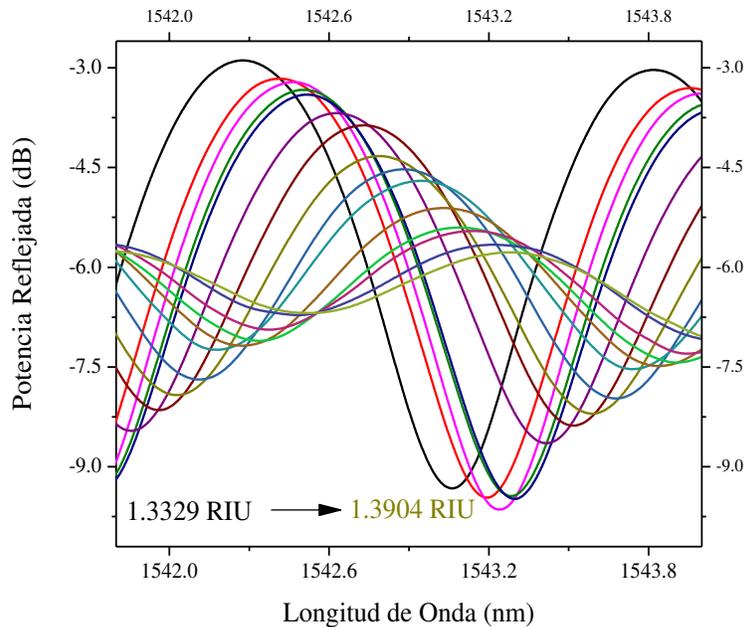


Figura 4.3: Respuesta espectral del interferómetro ante cambios de índice de refracción.

En la Figura 4.3 se muestra la respuesta espectral que fue registrada al realizar este experimento. En esta imagen puede verse además de la modulación de intensidad analizada anteriormente, la modulación de fase que se produce al aumentar el índice de refracción del

líquido donde se encuentra sumergido el interferómetro. Podemos apreciar que el máximo del patrón de interferencia que se encontraba inicialmente centrado en 1542.30 nm se desplaza aproximadamente 1.12 nm, por lo que la sensibilidad que se pudo obtener realizando el análisis mediante la modulación de fase es de 21.25 nm / RIU.

Al aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT: Fast Fourier Transform) a los espectros de reflexión obtenidos al modificar el índice de refracción de la mezcla que rodea a los interferómetros circundantes se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 4.4 en los que se analizan únicamente los modos de alto orden que se encuentran en la región comprendida entre los 50 y 60 nm^{-1} . En la misma, puede verificarse que existe una disminución lineal de la intensidad a medida que aumenta el índice de refracción de la muestra cercana a los 0.08 (A.U) (ver la gráfica interior), lo que corresponde con los resultados obtenidos al analizar la respuesta espectral y se debe a las pérdidas producidas por la interacción de la luz con el medio circundante, por lo que otra forma de determinar los cambios de índice de refracción puede ser analizando los cambios en la intensidad de los picos centrados en 53 nm^{-1} y 55 nm^{-1} .

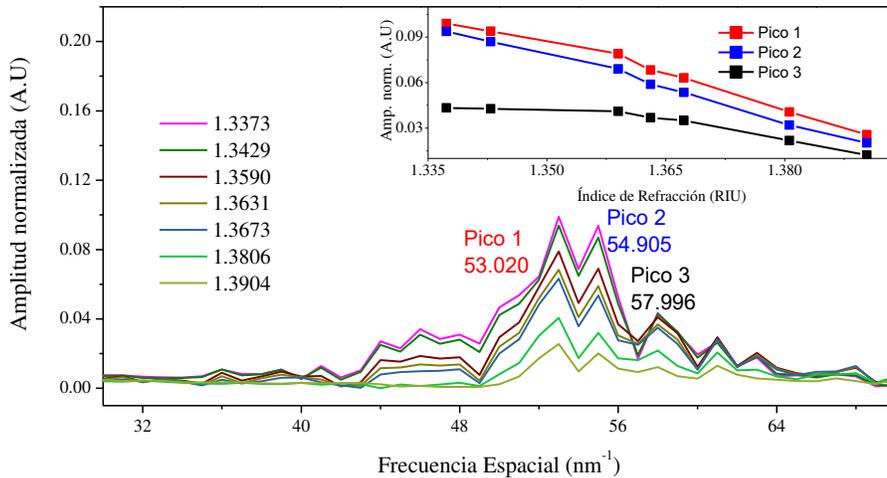


Figura 4.4: Análisis mediante FFT de los espectros obtenidos al modificar el índice de refracción del medio. En la esquina superior derecha se muestra el análisis de la respuesta en cada pico.

Es importante determinar si las estructuras obtenidas ofrecen respuestas estables en el tiempo. Para ello, se guardaron los espectros de respuesta de los interferómetros cada tres minutos durante un lapso de una hora, manteniendo la temperatura de la disolución constante a 30°C. Se utilizó agua destilada cuyo índice de refracción medido con el refractómetro comercial (Refracto 30GS METTLER TOLEDO) era de 1.3326 RIU (RIU: Refractive Index

Unit) y se obtuvo que la variación máxima en longitud de onda era de 0.15 nm y en intensidad de 0.398 dB para el máximo centrado en 1544.02 nm. Teniendo en cuenta estos resultados se puede estimar que la medición del índice de refracción pudiera llegar a afectarse como máximo 7×10^{-3} RIU / h, por lo que se considera que los dispositivos tienen una respuesta estable para detección de índice de refracción.

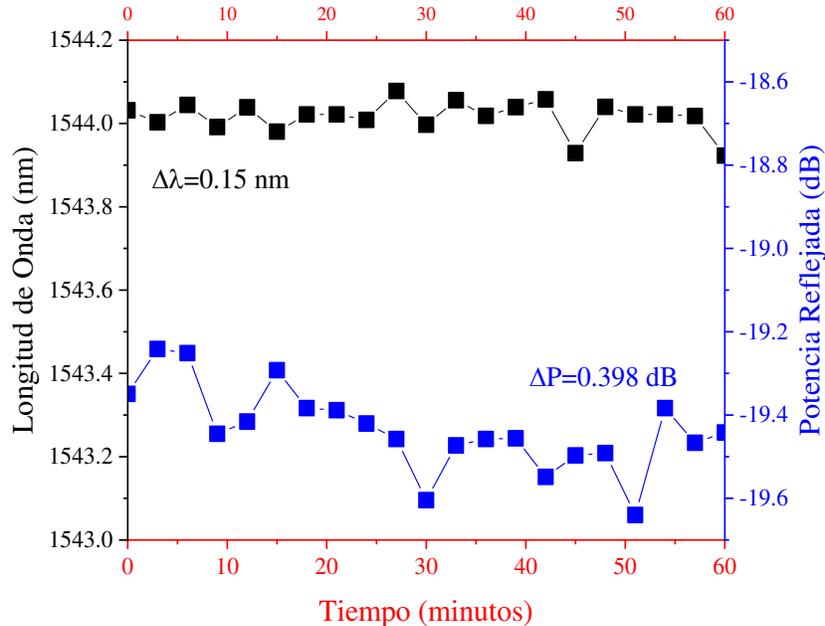


Figura 4.5: Análisis de estabilidad del máximo centrado en 1544.02 nm durante 60 minutos con temperatura e índice de refracción constantes ($T=30^{\circ}\text{C}$, $n=1.3326$ RIU). Variación en longitud de onda: negro, variación en potencia: azul.

La respuesta espectral de los dispositivos analizados ante los cambios del índice de refracción de la disolución donde se encontraban inmersos presentaba cambios notables del contraste de las franjas de interferencia. Los procesos de detección basados en la modulación de intensidad pueden presentar errores en las mediciones debido a variaciones en la intensidad de la fuente de luz utilizada o pérdidas producidas por diferentes curvaturas en la fibra óptica utilizada. Sin embargo, para mejorar la confiabilidad del proceso de detección pudiera implementarse un sistema mediante el cual una fracción de la luz de entrada se emplee como referencia de intensidad para monitorear la fluctuación de la potencia de entrada y realizar la compensación [1]. Las sensibilidades obtenidas en este trabajo son moderadas en comparación con otros trabajos publicados recientemente [82,83], sin embargo, la técnica de fabricación del interferómetro propuesto es simple y de bajo costo. Para su obtención se utiliza fibra para comunicaciones (convencional) cuyo diámetro es de $125 \mu\text{m}$ y un tramo de aproximadamente $500 \mu\text{m}$ de fibra estrechada, con $60 \mu\text{m}$ de diámetro,

obtenida en el laboratorio a partir de fibra convencional. El proceso de detección reportado resulta costoso debido a la necesidad de utilizar un analizador de espectros ópticos, sin embargo, es posible diseñar un sistema de detección que utilice un fotodetector en lugar de este instrumento, reduciendo enormemente el costo del sistema. Los resultados mostrados en esta sección fueron publicados para su difusión en [76].

4.3 Detección de temperatura.

La detección de la temperatura de un medio o una muestra tiene diversas aplicaciones tanto en la industria como en la vida cotidiana. En los últimos años se ha trabajado arduamente en aras de desarrollar sensores de temperatura de fibras ópticas, obteniéndose una gran variedad de estructuras diseñadas para este propósito. Algunos ejemplos de ellas utilizan fibras ópticas estrechadas [85], fibras de cristal fotónico [42], fibras ópticas recubiertas con diversos materiales [77], fibras ópticas de diversas geometrías [19], etc. [86], y son obtenidas por diversos métodos, uno de los más destacados por su facilidad de implementación es la fabricación de interferómetros por la técnica de arco eléctrico [19,87].

4.3.1 Caracterización.

El arreglo mostrado en la Figura 3.3 se utilizó para monitorear en tiempo real la respuesta de los interferómetros ante los cambios de temperatura del medio circundante. Todos los experimentos descritos en esta sección se realizaron en una habitación con temperatura controlada. Al aumentar el valor de la temperatura se observa un cambio de fase, desplazando el espectro obtenido hacia longitudes de onda mayores (Figura 4.6 y Figura 4.7).

En el proceso de detección mediante modulación de fase, si el rango espectral libre (FSR) del interferómetro es muy pequeño, tal como el que hemos obtenido mediante esta técnica, la respuesta espectral se puede solapar o superponer durante el proceso de detección, limitando el rango de medición de las pruebas realizadas de 30 °C a 150 °C. Las modificaciones en la temperatura se realizaron de forma gradual y controlada y se obtuvo una sensibilidad de 12 pm / °C. El análisis de la respuesta espectral de los interferómetros analizados bajo estas condiciones (Figura 4.7) muestra que la máxima variación de intensidad registrada durante estos estudios fue de -10.7×10^{-3} dB / °C, lo que ofrece sensibilidades cruzadas de 5×10^{-8} RIU / °C para intensidad y 0.9×10^{-6} RIU / °C para fase.

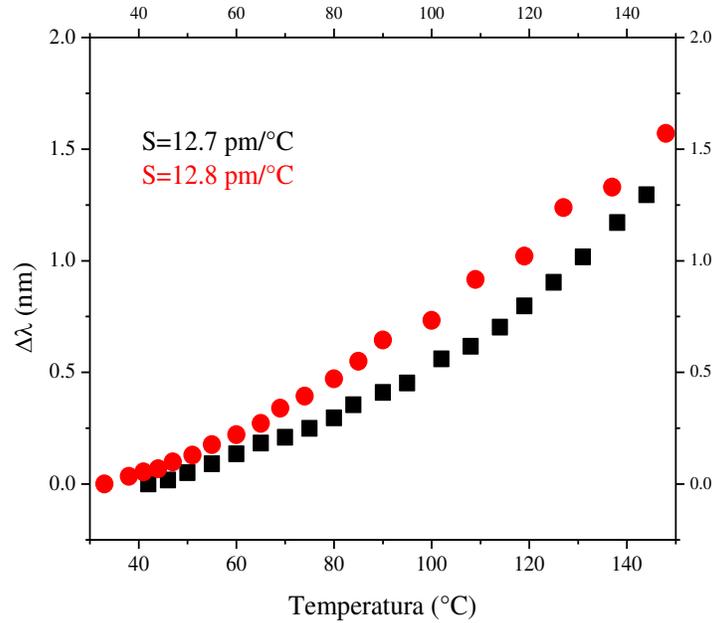


Figura 4.6: Análisis de sensibilidad de dos dispositivos ante cambios de temperatura.

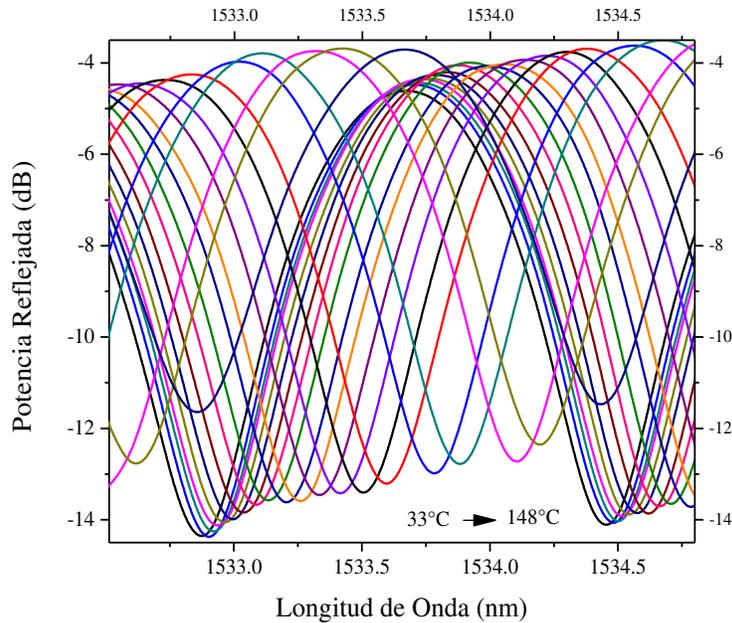


Figura 4.7: Respuesta espectral de un interferómetro ante cambios de temperatura.

Al aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT) a los espectros de reflexión obtenidos mientras se modificaba de manera controlada la temperatura del medio se observó que estos cambios no afectan la intensidad de los modos generados debido a que en la respuesta espectral sólo existen cambios de fase y los cambios de intensidad no son apreciables. Para poder determinar los cambios de fase utilizando la FFT sería necesario realizar el procesamiento de las señales [88]

Aplicaciones

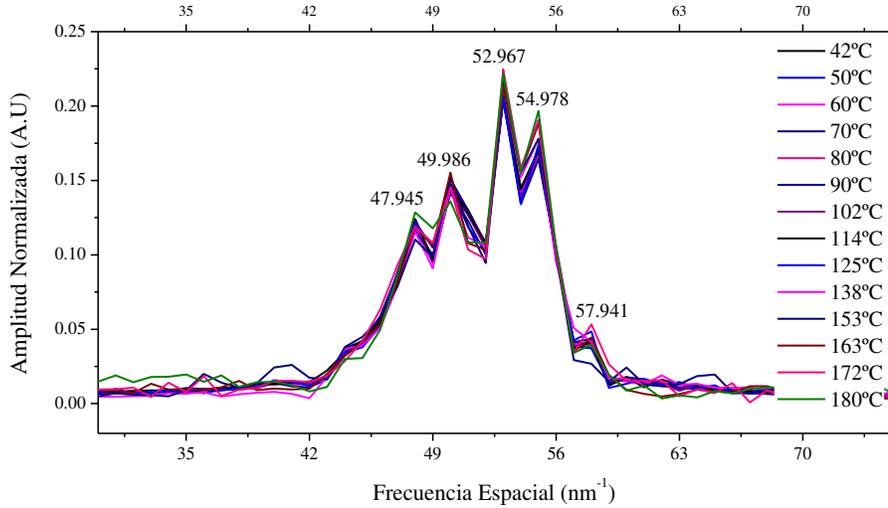


Figura 4.8: Análisis mediante FFT de los espectros obtenidos al modificar la temperatura del medio.

Finalmente, se realizaron los estudios necesarios para determinar si la respuesta de los interferómetros resultaba estable en el tiempo. Para ello se guardaron los espectros de respuesta de los interferómetros cada tres minutos durante un lapso de una hora, manteniendo la temperatura constante a 30 °C. La Figura 4.9 muestra este análisis para el máximo centrado en 1533.99 nm constatándose que las variaciones de longitud de onda durante este período se pueden estimar de 0.01 nm y las fluctuaciones en intensidad máxima no sobrepasan los 0.27 dB.

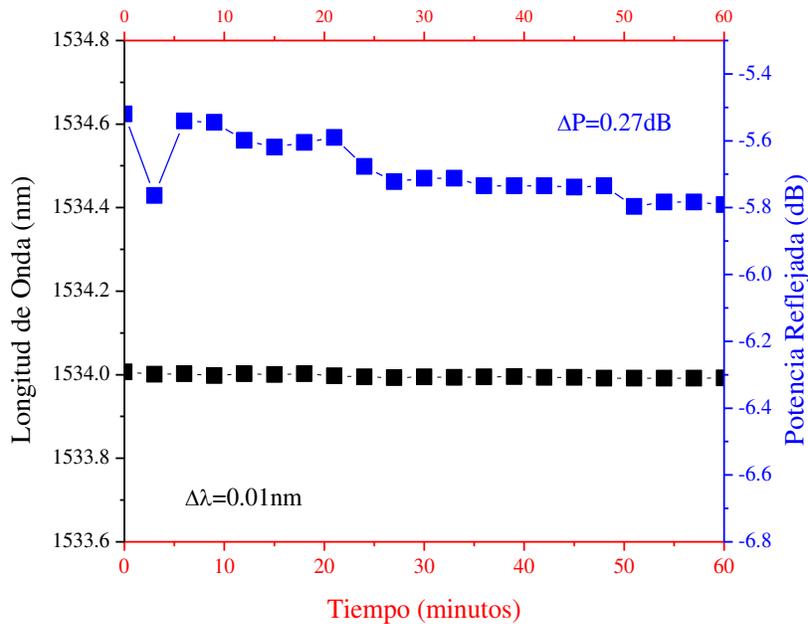


Figura 4.9: Análisis de estabilidad del máximo centrado en 1533.99 nm durante 60 minutos con temperatura de 30°C.

La respuesta espectral de los dispositivos analizados ante los cambios de temperatura presentaba pequeños cambios de fase permitiendo variar la temperatura desde 30 °C hasta 150 °C sin cambios notables en el contraste de las franjas de interferencia. Los procesos de detección basados en la modulación de fase generalmente se ven limitados en el rango de medición debido a la superposición de los espectros lo que genera mediciones ambiguas si se va más allá de lo que permite el FSR del interferómetro. Los resultados obtenidos para cambios de temperatura ofrecen valores de sensibilidad bajos comparados con otros trabajos publicados, sin embargo, la variación de intensidad máxima registrada durante estos estudios garantiza que no hay prácticamente interferencia con su uso como detector de índice de refracción, ofreciendo valores de sensibilidades cruzadas de 5×10^{-8} RIU / °C para intensidad y 0.9×10^{-6} RIU / °C para fase. Además, la técnica propuesta para obtener estas estructuras sólo emplea fibra óptica convencional y un tramo de aproximadamente 500 μm de fibra estrechada, obtenida en el laboratorio a partir de fibra convencional. Otra ventaja es que los dispositivos fabricados presentan una respuesta estable en el tiempo. Los resultados mostrados en esta sección fueron publicados para su difusión en [76].

4.4 Detección de concentración de soluto en disoluciones acuosas.

En muchos procesos de laboratorio e industriales es necesario determinar la concentración de algún soluto en una disolución acuosa. La mayoría de los trabajos publicados están enfocados en la detección de cambios de índice de refracción [76,82,88–90], sin embargo, algunos investigadores también han estudiado la forma de detectar cambios en la concentración de soluto en disoluciones acuosas [24,84,88,91,92]. Algunos métodos que se han utilizado para determinar la concentración de soluto están basados en la relación que existe entre el índice de refracción y la concentración de las disoluciones analizadas [84,91–93]. Se han propuesto muchos sensores de fibras ópticas para detectar cambios en la concentración de soluto en disoluciones acuosas utilizando diferentes estructuras tales como: fibras ópticas estrechadas (tapers) [88], acopladores de fibras ópticas estrechadas [91], combinaciones de secciones de fibras con diferentes geometrías y rejillas de Bragg [92], también aprovechando diferentes fenómenos tales como: resonancia de plasmón de superficie (SPR: Surface plasmon resonance) [24], la reflexión de Fresnel [84], etc. Algunos de los métodos propuestos tienen como inconvenientes que los procedimientos descritos son complicados o los materiales utilizados resultan bastante costosos [82,88,91,92].

En esta etapa del trabajo se describirá el procedimiento llevado a cabo con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos para detección de cambios de concentración de disoluciones acuosas. Con el objetivo de ampliar el rango de detección de los interferómetros al sumergirlos en las disoluciones de prueba, se aplicó una fina capa de cobre sobre algunos de los interferómetros fabricados utilizando la técnica de deposición física de vapor por haz de electrones (EBPVD: Electron-beam physical vapor deposition). La técnica de detección mediante la modulación de intensidad anteriormente utilizada [76] permite un proceso de detección de bajo costo, pero las mediciones pueden verse fácilmente afectadas por ligeras variaciones de la intensidad de la fuente utilizada en el proceso o como consecuencia de las pérdidas producidas por curvaturas que se presenten aleatoriamente en la fibra óptica utilizada en el sistema. La respuesta espectral de los dispositivos recubiertos analizados al aumentar la concentración del soluto de la disolución donde se encontraban inmersos no se afecta de manera apreciable al analizar el contraste de las franjas, sin embargo, presenta cambios en longitud de onda. La detección utilizando técnicas de modulación de fase presenta inmunidad ante las variaciones de intensidad de la fuente, sin embargo, puede producirse ambigüedad en los resultados debido a la sensibilidad térmica y el proceso de demodulación es más complicado. Se realizaron pruebas comparativas de las respuestas de los interferómetros iniciales y luego de ser recubiertos al sumergirlos en medios con diferentes concentraciones de soluto y se pudo apreciar que, a pesar de que la sensibilidad de detección de estos cambios disminuía, se incrementaba considerablemente el rango de medición.

4.4.1 Recubrimiento de la estructura inicial con una fina capa de cobre.

Con el objetivo de ampliar el rango de detección de los interferómetros al sumergirlos en las disoluciones de prueba, se seleccionaron algunos de los interferómetros previamente fabricados y caracterizados y se les aplicó una fina capa de cobre utilizando la técnica de deposición física de vapor por haz de electrones (EBPVD: Electron-Beam Physical Vapor Deposition). Esta técnica permite obtener finas capas ya que es una forma de deposición física de vapor en la que un ánodo objetivo es bombardeado con un haz de electrones emitido por un filamento de tungsteno cargado a alto vacío. El haz de electrones hace que los átomos del objetivo se transformen en la fase gaseosa. Estos átomos luego precipitan en forma sólida, cubriendo todo en la cámara de vacío (dentro de la línea de visión) con una capa delgada del

material del ánodo. Para llevar a cabo este procedimiento se utilizó el Sistema de Depósito de Películas Delgadas en Alto Vacío marca Intercovamex, modelo H2. La corriente de trabajo se fijó en 130 A durante un minuto, aplicándose una fina capa de cobre en una cara del dispositivo para nuevamente aplicar la misma técnica a la otra cara de los dispositivos, lográndose que los mismos quedaran completamente recubiertos del metal. Este proceso se llevó a cabo en el Departamento de Estudios Multidisciplinarios de la División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato que tiene su sede en Yuriria, México. La estructura final de los interferómetros luego de aplicar esta técnica se muestra en la Figura 4.10, donde puede observarse una representación de la sección transversal de la estructura y las líneas de color naranja representan la capa de cobre que recubre todo el interferómetro. El índice de refracción del cobre para la longitud de onda de 1550 nm a temperatura ambiente es 0.71576 RIU [94,95].

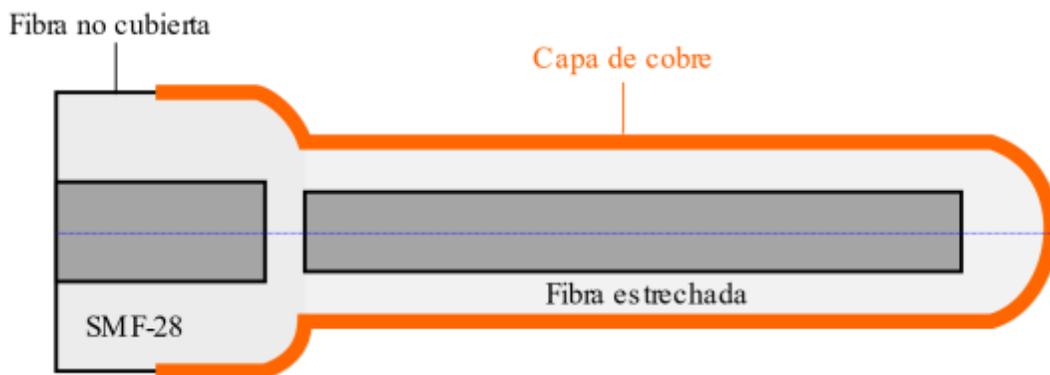


Figura 4.10: Diagrama del interferómetro de punta recubierto. La línea de color naranja representa la capa de cobre que recubre la estructura.

4.4.2 Esquema experimental.

El esquema experimental implementado para realizar la caracterización de los interferómetros modificados con la capa metálica fue el mostrado anteriormente para documentar el proceso de fabricación y la respuesta de los interferómetros ante los cambios de índice de refracción del medio circundante (ver Figura 3.3). Ya se ha mencionado que esta configuración permite monitorear en tiempo real los cambios espectrales del sistema. Es importante mencionar que durante todo el tiempo en que se realizó esta investigación los elementos principales de este arreglo (fuente de luz y circulador) no se removieron de su posición, cambiándose solamente el elemento sensor que estaba siendo analizado. Los interferómetros fabricados fueron operados en reflexión, debido a su diseño de punta. Todos

los experimentos descritos en esta sección se realizaron en una habitación con temperatura controlada para contrarrestar los efectos térmicos no deseados [84].

En la Figura 4.11 se superponen los espectros obtenidos para un mismo interferómetro antes y después de ser recubierto con cobre en el rango de 1500 nm a 1580 nm. La curva negra muestra el interferómetro inicial, en este caso, el contraste de franjas máximo obtenido en el rango analizado es de 4 dB y el rango espectral libre (FSR: Free Spectral Range) es de 1.50 nm. El espectro mostrado en color rojo corresponde al mismo interferómetro luego de ser recubierto con una fina capa de cobre y ser reconectado al esquema para su caracterización. Se puede observar que el espectro obtenido luego de este procedimiento presenta un contraste de franjas mayor, el valor máximo registrado en el rango de análisis fue de 12 dB, y no se observan modificaciones apreciables en el FSR. El desplazamiento en longitud de onda que se nota en esta figura debe estar relacionado con los cambios en las características de polarización del arreglo luego de remover la estructura y empalmarla nuevamente después de recubrirla. Es importante destacar que para recubrir las estructuras fue necesario quitarlas del arreglo experimental luego de su fabricación y caracterización inicial.

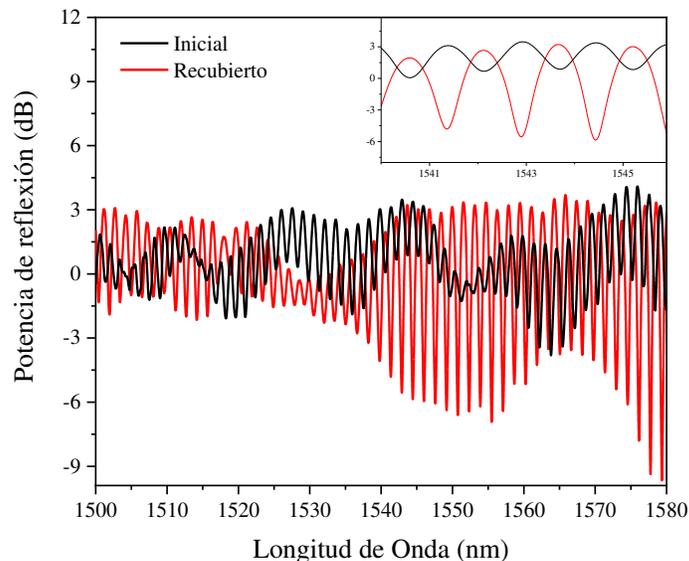


Figura 4.11: Comparativa de los espectros de reflexión del interferómetro original (curva negra) y del interferómetro recubierto con una fina capa de cobre (curva roja). Figura interior: Región desde 1540 nm a 1546 nm.

Tal como se esperaba, la capa de cobre incrementó la reflectividad del dispositivo minimizando las pérdidas producidas por el campo evanescente, lo cual provoca el mejoramiento del patrón de interferencia en cuanto a su contraste de franjas y sin modificar

sus características en cuanto a FSR. Estos efectos son aún más evidentes al analizar la gráfica de frecuencia espacial que puede extraerse de ambos espectros (ver Figura 4.12), donde se aprecia que la frecuencia espacial dominante está centrada en 51 nm^{-1} tanto para la respuesta del interferómetro original como para el interferómetro recubierto, sin embargo, para el interferómetro recubierto es mucho más intensa. Adicionalmente, se puede apreciar que para el caso del interferómetro recubierto existen otros picos de interferencias centrados en 102 nm^{-1} y 122 nm^{-1} .

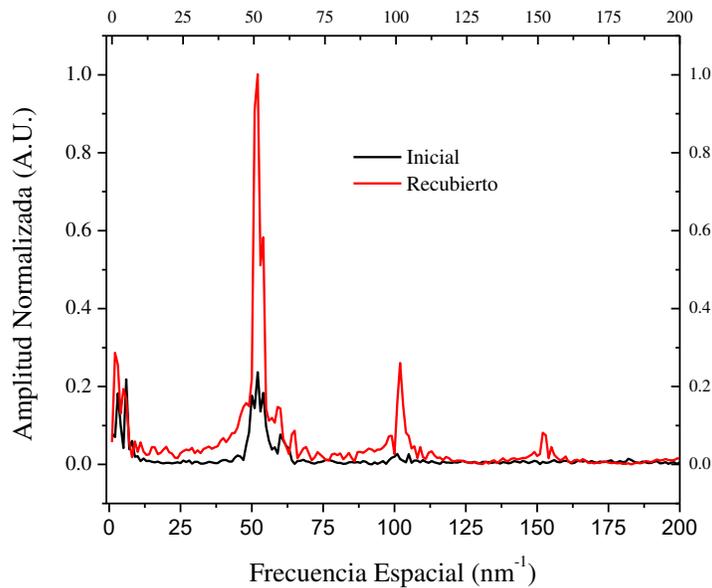


Figura 4.12: Análisis mediante FFT de los espectros de reflexión del interferómetro original (curva negra) y del interferómetro recubierto con una fina capa de cobre (curva roja).

4.4.3 Respuesta ante cambios de concentración.

En esta sección se describirán las pruebas realizadas para estudiar la respuesta de las estructuras recubiertas con cobre ante cambios de la concentración de soluto en la disolución acuosa en la que se encuentra sumergido. La fuerte relación que existe entre el índice de refracción y la concentración de una disolución ha sido estudiada con anterioridad [84,91–93], lo que sirvió de base para esta etapa de estudio. La técnica empleada en una etapa previa de este trabajo (modulación de intensidad) [76], permite un proceso de detección de bajo costo, pero las mediciones pueden verse fácilmente afectadas por ligeras variaciones de la intensidad de la fuente utilizada en el proceso o como consecuencia de las pérdidas producidas por curvaturas que se presenten aleatoriamente en la fibra óptica utilizada en el sistema, por ello, es necesario emplear fuentes de luz más estables, como por ejemplo una

fuentes láser en la longitud de onda específica de trabajo, lo que encarece un poco el sistema final. La técnica de detección utilizada en esta etapa del trabajo (modulación de fase) presenta inmunidad ante las variaciones de intensidad de la fuente, sin embargo, puede producirse ambigüedad en los resultados debido a la sensibilidad térmica y se hace necesario el empleo de fuentes de luz de amplio espectro. En el proceso de detección mediante modulación de fase, si el rango espectral libre (FSR) del interferómetro es muy pequeño, tal como el que hemos obtenido mediante esta técnica, la respuesta espectral se puede solapar o superponer durante el proceso de detección, limitando el rango de medición; por el contrario, si el FSR resultara muy grande, podría darse el caso de que no existieran máximos o mínimos en el patrón de interferencia en el rango de medición de la fuente empleada, obligando a implementar sistemas con fuentes de amplio espectro más costosas.

Se busca comparar las respuestas de los interferómetros iniciales sumergidos en concentraciones acuosas con diferentes concentraciones con las respuestas de los interferómetros recubiertos bajo las mismas condiciones con el objetivo de aumentar el rango de medición. Las disoluciones de agua-glicerina preparadas cubrían un rango de índice de refracción desde 1.3330 RIU hasta 1.39089 RIU (RIU: refractive index unit) y fueron medidas utilizando un refractómetro comercial (Refracto 30GS METTLER TOLEDO). A partir de las tablas de equivalencia presentadas en [93] se obtuvo que las concentraciones de las muestras preparadas variaban desde 0 % de glicerina por peso (agua pura) hasta 45 % de glicerina por peso.

El mismo esquema experimental utilizado para la fabricación, para la caracterización de los interferómetros iniciales y recubiertos con la capa de cobre, y para analizar la respuesta de los interferómetros iniciales ante los cambios de índice de refracción del medio circundante (ver Figura 3.3), se utilizó para el estudio de la respuesta de los interferómetros cubiertos con una fina capa de cobre ante cambios de concentración por las ventajas y facilidades antes mencionadas que brinda esta configuración. Las condiciones de temperatura e iluminación del laboratorio donde se desarrollaron las pruebas fueron monitoreadas para contrarrestar los efectos térmicos no deseados. [24,84].

Al comparar las respuestas espectrales del interferómetro inicial y final mientras se incrementa la concentración de glicerina en la disolución se observa un desplazamiento del patrón de interferencia hacia longitudes de onda mayores en ambos casos. Debemos recordar

que en el caso de los interferómetros iniciales se observaba una gran modulación de intensidad que sirvió como base para los primeros resultados obtenidos [76]. Este efecto provocaba que al aumentar el índice de refracción, y por ende la concentración de soluto disuelto en el agua que rodeaba a los interferómetros, el espectro de salida se tornaba cada vez más plano, llegando a ser imposible continuar con el proceso de medición, incluso antes de que se presentara la sobreposición de los espectros debido al FSR pequeño que presentan los interferómetros analizados, lo que limitaba el rango de medición, pudiéndose llegar solamente hasta 31 % de glicerina por peso. Al realizar el análisis de estos primeros resultados con relación a la fase, se obtuvo una sensibilidad de hasta 27 pm/% de glicerina por peso y una buena respuesta lineal como puede observarse en la Figura 4.13 (línea negra). La ecuación lineal de ajuste obtenida es $\Delta\lambda = -0.00911 + 0.02683C$, donde $\Delta\lambda$ representa el desplazamiento en longitud de onda que se expresa en nanómetros (nm) y C representa la concentración de soluto (% de glicerina por peso).

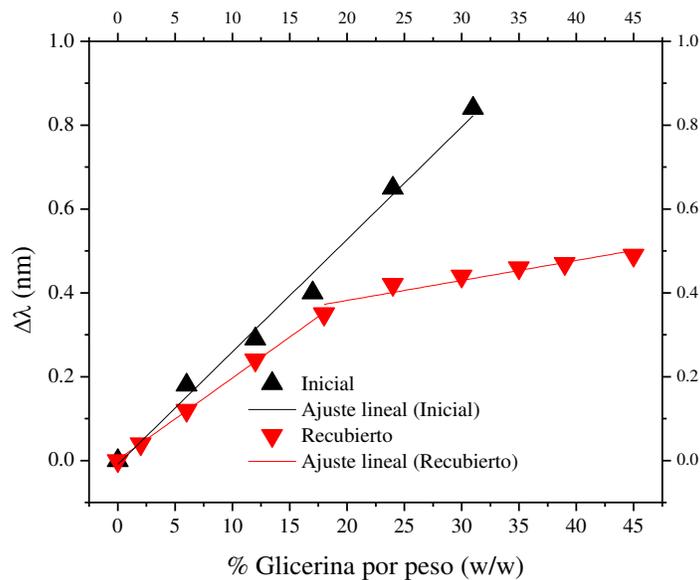


Figura 4.13: Análisis de la respuesta del interferómetro original (curva negra) y del interferómetro recubierto con una fina capa de cobre (curva roja) ante cambios en la concentración de la disolución.

Al realizar el análisis de las respuestas de los interferómetros recubiertos ante los cambios de concentración de la disolución en la que se encontraban inmersos se encontró que el contraste de franjas del patrón de interferencia apenas se afectaba, lo que permitió incrementar el rango de medición hasta 45 % de glicerina por peso o incluso mayor. Al

analizar el cambio de longitud de onda de acuerdo a los cambios de concentración registrados se obtuvo curva representada en la Figura 4.13 (rojo) que se puede dividir en dos secciones lineales: de 0 a 18 % de glicerina por peso y de 18 a 45 % de glicerina por peso, cuyas ecuaciones lineales son:

$$\text{de 0 a 18 \%} \quad \Delta\lambda = 0.00161 + 0.01953C, \quad 4.1$$

$$\text{de 18 a 45 \%} \quad \Delta\lambda = 0.28668 + 0.00476C. \quad 4.2$$

Los resultados obtenidos estuvieron relacionados a las secciones anteriormente mencionadas, para la sección de 0 a 18 % de glicerina por peso se obtuvo una sensibilidad de 19 pm/% de glicerina por peso y de 4.7 pm/% de glicerina por peso para la sección de 18 a 45 %. Estas sensibilidades son menores que la obtenida con la estructura sin recubrir, pero este efecto resulta beneficioso para conseguir el objetivo principal que consistía en aumentar el rango de medición, permitiendo aumentar la concentración de las disoluciones sin que se presente solapamiento de los espectros. O sea, que al recubrir el interferómetro inicial con una fina capa de metal (cobre) se consiguió aumentar la reflectividad del dispositivo, minimizando las pérdidas del campo evanescente, se consigue aumentar el contraste de franjas del patrón de interferencia e incluso mediante el análisis de la FFT se observan nuevos modos interactuando. Sin embargo, al existir menos luz que escapa del interferómetro, existe menos luz interactuando con el medio circundante, lo que provoca que disminuya la sensibilidad del dispositivo a los cambios de concentración de las disoluciones en las que se encuentra inmerso.

Los interferómetros de fibra óptica fabricados mediante la metodología propuesta en este trabajo y tratados con la técnica de deposición física de vapor por haz de electrones (EBPVD) para aplicarles una fina capa de cobre presentaron una mejora sustancial en el contraste de franjas del patrón de interferencia, obteniéndose hasta 12 dB, lo que representa un 200 % superior comparado con el valor que presentaba el mismo interferómetro antes de recubrir. Se propone que esta estructura mejorada puede ser utilizada para la detección de cambios de concentración de soluto en disoluciones acuosas, o también para cambios de índice de refracción, ya que, a pesar de que la sensibilidad antes dichos cambios es menor con el recubrimiento, se puede incrementar el rango de medición hasta valores previamente no alcanzados debido a la modulación de intensidad provocada por las pérdidas del campo evanescente que se producían en las estructuras iniciales. La detección de la concentración

de soluto en disoluciones acuosas es un proceso muy utilizado en una gran cantidad de procesos industriales. El logro principal de esta etapa del estudio fue la ampliación del rango de medición de este parámetro, dejando la puerta abierta para futuras investigaciones en las que se logre cubrir todo el rango de 0 % a 100 % de glicerina por peso.

4.5 Láser para detección de índice de refracción y temperatura.

Los láseres de fibra óptica que emiten en varias longitudes de onda han sido estudiados desde hace varios años debido a la inmensa cantidad de aplicaciones para los que pueden destinarse tales como: sensores de fibra óptica [23,38,96–100], telecomunicaciones [5], medicina [4,101], etc. La mayoría de los arreglos están basados en interferómetros de fibra óptica Fabry-Perot [102], Mach-Zehnder [44], Michelson [103] y Sagnac [104], filtros combinados [105], etc. Los láseres de fibra óptica presentan ventajas sobre los láseres convencionales debido a que son compactos, presentan buena estabilidad, buena relación señal a ruido, etc. Teniendo en cuenta la importancia de los láseres de fibra óptica y sus múltiples aplicaciones, se decidió utilizar los dispositivos interferométricos fabricados en un arreglo de láser de fibra óptica en configuración de anillo con el objetivo de obtener un láser de múltiples longitudes de onda y se estudió su respuesta ante cambios del índice de refracción del medio y su respuesta ante cambios de la temperatura circundante.

4.5.1 Esquema experimental.

El esquema implementado para el láser de anillo se muestra en la Figura 4.14. La fuente de bombeo utilizada, un diodo láser que emite a 980 nm, se introduce en la cavidad de anillo a través del puerto de 980 nm del multiplexor por división de longitud de onda (WDM: Wavelength Division Multiplexer). Esta señal se hace pasar por el medio de ganancia de la cavidad láser, 4.5 metros de fibra dopada con Erbio, lo que provoca que se produzca el fenómeno de emisión espontánea amplificada (ASE: Amplified Spontaneous Emission). A la salida de la fibra dopada con Erbio se coloca un controlador de polarización de tres placas que utiliza la birrefringencia inducida por estrés para modificar el estado de polarización arbitrario de la luz de entrada en otro estado de polarización arbitrario que consiga incrementar la estabilidad del sistema. El espectro proveniente de la fibra dopada con erbio se hace llegar al interferómetro utilizando un circulador de fibra óptica. En este caso, el interferómetro se coloca en el puerto 2 del circulador de fibra óptica y la luz que se refleja se

introduce en la cavidad a través del puerto 3 de este dispositivo. La luz reflejada se divide convenientemente en dos partes utilizando un acoplador óptico 90:10. El 10 % se toma como la salida del sistema y es monitoreada utilizando un analizador de espectros óptico (OSA: Optical Spectrum Analyzer, Yokogawa AQ6370). El otro 90 % de la luz continúa dentro de la cavidad, se hace pasar por un aislador de fibra óptica independiente de la polarización para 1550 nm (Thorlabs IO-F-1550), que garantiza que la luz viaje en la dirección deseada dentro de la cavidad, y se cierra el anillo conectando la salida del aislador óptico a la entrada de 1550 nm del multiplexor de fibra óptica.

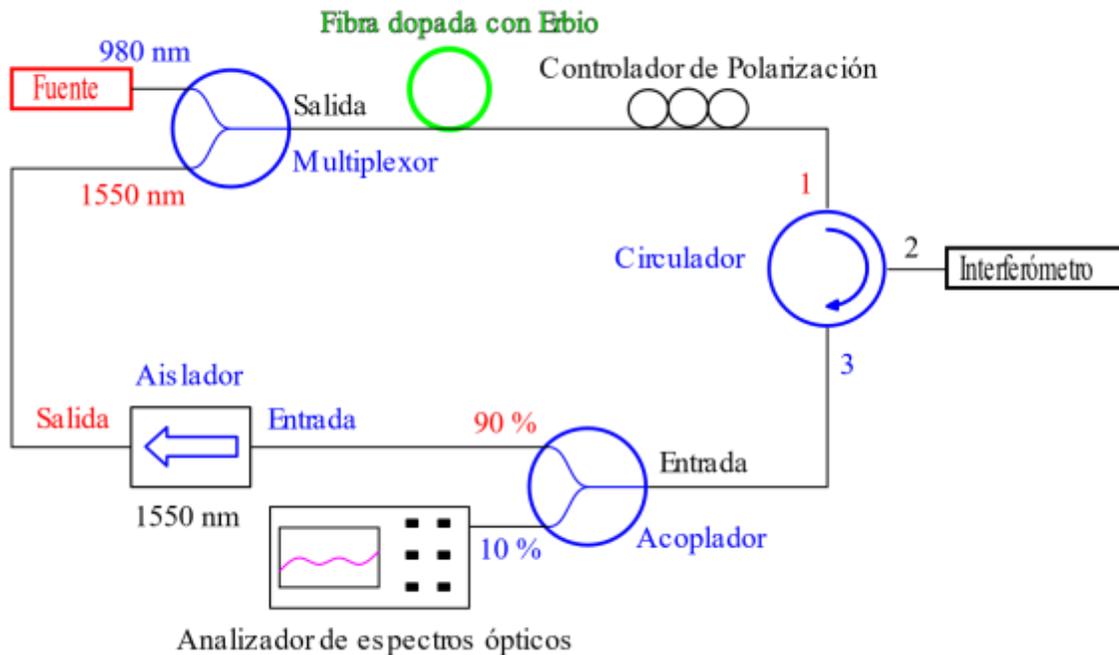


Figura 4.14: Esquema experimental del láser de anillo.

La fuente de 980 nm utilizada como bombeo de la fibra dopada con erbio en este arreglo, fue el QFBGLD-980-500, de la marca QPHOTONICS. En la hoja de datos del diodo [106] viene definido que la longitud de onda central del espectro de emisión es 974.30 nm con un ancho espectral de 0.35 nm. La corriente de operación típica del diodo es de 733 mA y la potencia de salida óptica es de 500 mW (ver Figura 4.15). En la Figura 4.16 se muestra el espectro de emisión del diodo medido en el laboratorio con una corriente de bombeo de 60 mA. Nótese que, en esta figura, el rango de longitudes de onda mostrado es menor que el mostrado por el fabricante en la Figura 4.15 con el objetivo de apreciar con mayor detalle la

línea espectral. Se comprobó que la longitud de emisión era de 974.3 nm y su ancho espectral era de 0.30 nm.

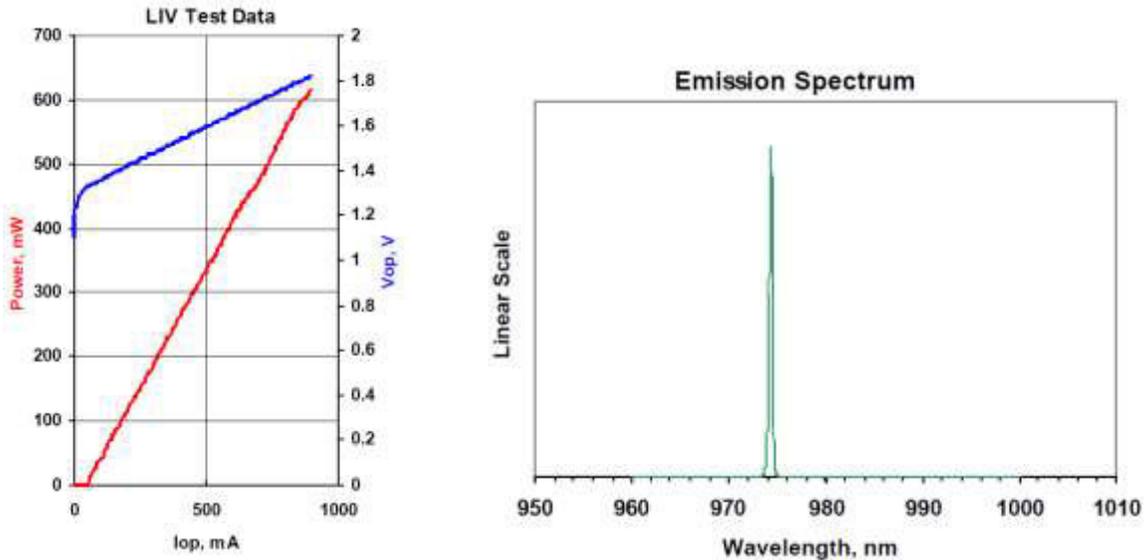


Figura 4.15: Caracterización del diodo láser QFBGLD-980-500 (gráficos tomados de la hoja de datos del fabricante [106]): a) Respuesta de potencia y voltaje dependientes de la corriente de operación, b) Espectro de emisión del diodo.

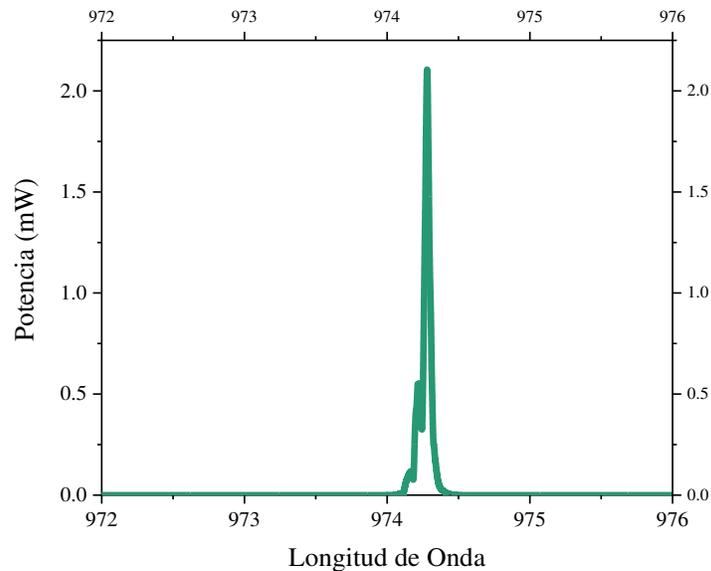


Figura 4.16: Caracterización en el laboratorio del diodo láser QFBGLD-980-500.

La caracterización del multiplexor por longitud de onda de 980 nm / 1550 nm se realizó introduciendo por la fibra de entrada del dispositivo una fuente de amplio espectro supercontinua y los espectros se obtuvieron utilizando un analizador de espectros óptico colocado en cada puerto del multiplexor por división en longitud de onda para observar el

aislamiento entre ambos caminos. La curva roja de la Figura 4.17 corresponde al espectro obtenido a la salida del puerto de 1550 nm y puede observarse que en el rango de longitudes de onda de 1350 a 1600 nm no presenta pérdidas apreciables, siendo considerables en la vecindad de 980 nm (zona marcada con el recuadro azul). A la salida del puerto de 980 nm se obtuvo el espectro representado por la curva azul de la misma figura, el que muestra que en la vecindad de 1550 nm (zona marcada con el recuadro rojo) existen pérdidas de aproximadamente un 80 % de la señal. Las pérdidas observadas en ambos espectros es lo que garantiza el aislamiento entre ambos caminos.

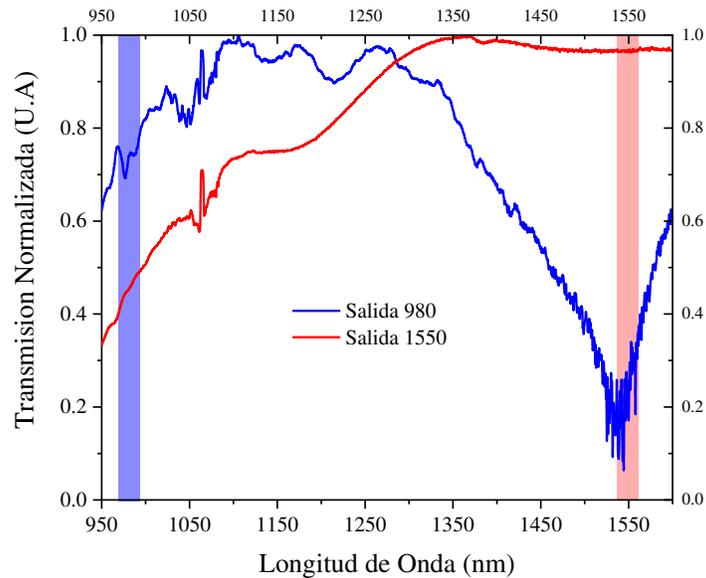


Figura 4.17: Caracterización del multiplexor por división en longitud de onda de fibra óptica de 980 nm / 1550 nm [68]. Recuadro azul: vecindad de 980 nm, recuadro rojo: vecindad de 1550 nm, curva azul: espectro obtenido en el puerto de 980 nm, curva roja: espectro obtenido en el puerto de 1550 nm.

Antes de conectar en interferómetro en el arreglo mostrado en la Figura 4.14, se realizó un corte recto a la fibra del puerto 2 del circulador de fibra óptica con el objetivo de tener una reflexión del 4 % (Reflexión de Fresnel) que regresara al anillo. Bajo estas condiciones, se obtuvo el espectro que se muestra en la curva roja de la Figura 4.18, donde pueden apreciarse diversas líneas de emisión en el rango de 1529 nm a 1533 nm. Estas líneas eran altamente inestables tanto en longitud de onda como en intensidad, debido a la competencia modal que se genera dentro de la cavidad y se encontraban agrupadas en la zona de 1530 a 1532 nm, que corresponde con la zona de mayor intensidad del espectro del Erblio. Al conectar el interferómetro en el arreglo, se realizaron pruebas modificando la corriente de

operación del diodo, observándose que a partir de 60 mA (20 mW) se obtenía una línea de emisión en 1542.79 nm, con SMSR (SMSR: Side Mode Suppression Ratio) de 24 dB, sin embargo, la salida no era estable. Al subir la corriente del diodo de bombeo hasta 400 mA (230 mW) se obtuvo el espectro que se muestra en la curva negra de la Figura 4.18, se puede apreciar que en este caso se obtienen cuatro líneas de emisión. Al continuar aumentando la corriente del diodo no se apreciaban mejoras en el espectro de emisión del sistema láser ni en la estabilidad del sistema. La señal obtenida presenta unas pérdidas de aproximadamente 10 dB, relacionadas con las pérdidas de inserción propias del interferómetro, a pesar de esto, al ajustar las placas del controlador de polarización del arreglo de manera conveniente se consigue incrementar la estabilidad del sistema, obteniéndose algunas líneas de emisión que presentan valores de SMSR mayores de 40 dB.

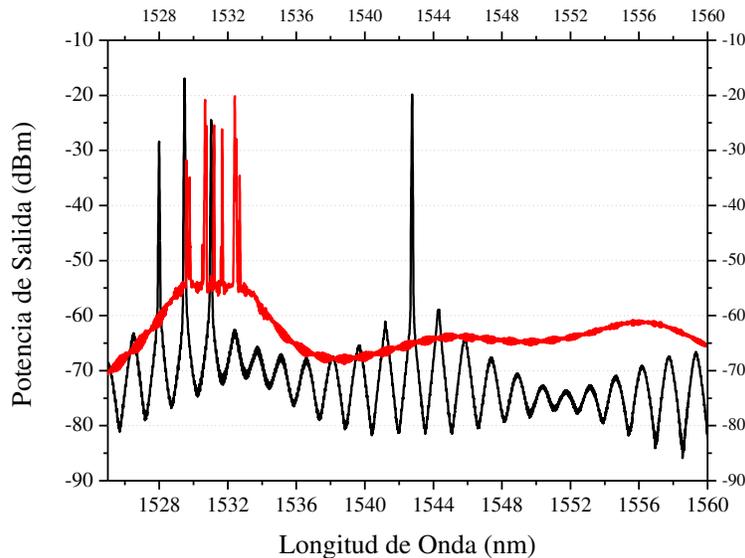


Figura 4.18: Espectro de salida del láser de anillo. Curva roja: sin filtro. Curva negra: con filtro.

En la Figura 4.19 se muestran el espectro del interferómetro escogido para realizar estas pruebas (curva roja) y el espectro de emisión del láser (curva negra). Al compararlos podemos observar que las longitudes de onda de emisión del láser están claramente dominadas por los modos generados por el interferómetro usado como filtro en el arreglo. El patrón de interferencia de la punta utilizada presenta un rango espectral libre de 1.6 nm y una zona donde tiene muy poco contraste de franjas, en la cual no se obtienen picos de emisión láser. Las tres primeras líneas de emisión se encuentran separadas entre sí aproximadamente 1.60 nm, lo que está relacionado con el FSR que presenta el interferómetro, y se encuentran

separadas 11.70 nm de la cuarta línea de emisión. Las emisiones están localizadas en: 1527.99 nm (P_1), 1529.49 nm (P_2), 1531.02 nm (P_3) y 1542.75 nm (P_4). La potencia máxima y el SMSR de cada emisión es de: -26.16 dBm y 33 dB para P_1 , -16.72 dBm y 43 dB para P_2 , -22.90 dBm y 35 dB para P_3 y -19.85 dBm y 41 dB para P_4 .

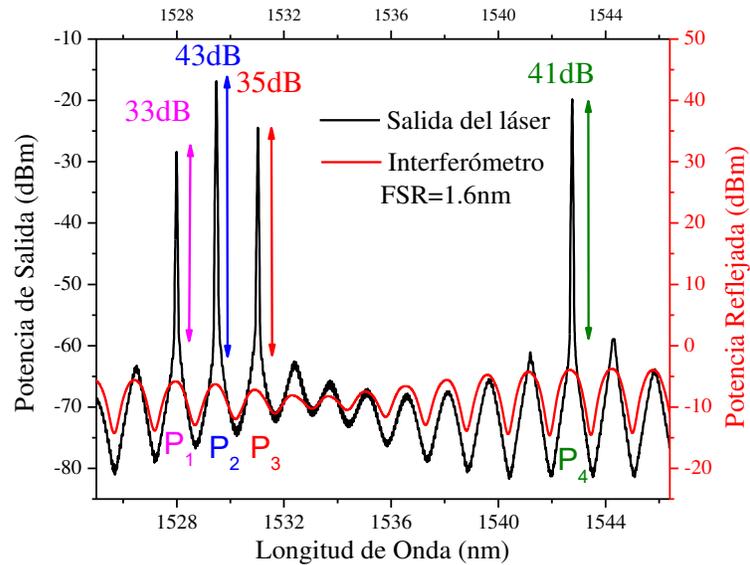


Figura 4.19: Espectro de emisión del láser.

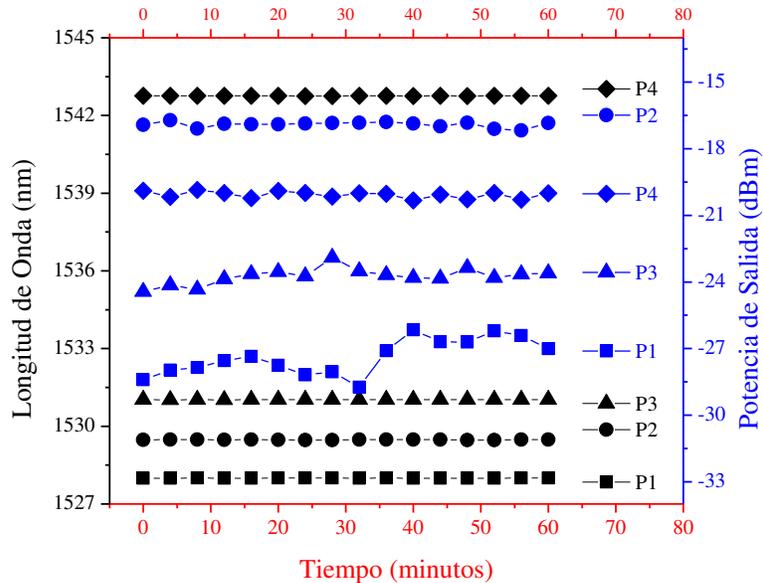


Figura 4.20: Análisis de estabilidad del láser.

Con el objetivo de analizar la estabilidad del láser que se presenta, se realizó un estudio comparativo de los espectros de salida del láser guardados cada tres minutos, durante una hora (Figura 4.20). Estas pruebas se realizaron con una temperatura controlada [57] y el interferómetro se mantuvo al aire cuyo índice de refracción es de 1 RIU, cuidando además

de no modificar sus condiciones de curvatura, tensión, etc. Los resultados mostraron que el sistema presenta una gran estabilidad con relación a la longitud de onda central de cada pico de emisión, en este caso, se pudo estimar que los picos P_1 , P_3 y P_4 presentan unas variaciones de sólo 0.01 nm y el pico P_2 es el menos estable de todos con variaciones de 0.02 nm. Con relación a las fluctuaciones de potencia de las emisiones se obtuvo que el pico más estable es el P_2 ya que la mayor variación observada fue de 0.46 dB, sin embargo, la fluctuación máxima registrada durante el estudio fue en el pico P_1 con 2.5 dB.

4.5.2 Respuesta ante cambios de índice de refracción.

El siguiente objetivo de este trabajo estuvo dirigido a demostrar la factibilidad de utilizar el sistema láser previamente mostrado para la detección de cambios de índice de refracción. Todos los experimentos descritos en esta sección se realizaron en una habitación con temperatura controlada previendo que los cambios en la temperatura ambiente pudieran provocar errores en el registro de datos [57] y utilizando luz natural que facilita el trabajo dado que no influye en el valor de índice de refracción de las mezclas de agua-glicerina en comparación con una habitación oscura [23]. Los valores de índice de refracción de las mezclas fueron determinados utilizando un refractómetro comercial.

Al introducir el interferómetro en el agua destilada ($n = 1.3323$ RIU) se obtuvo el espectro que se muestra en la Figura 4.21, donde pueden observarse cuatro picos de emisión láser.

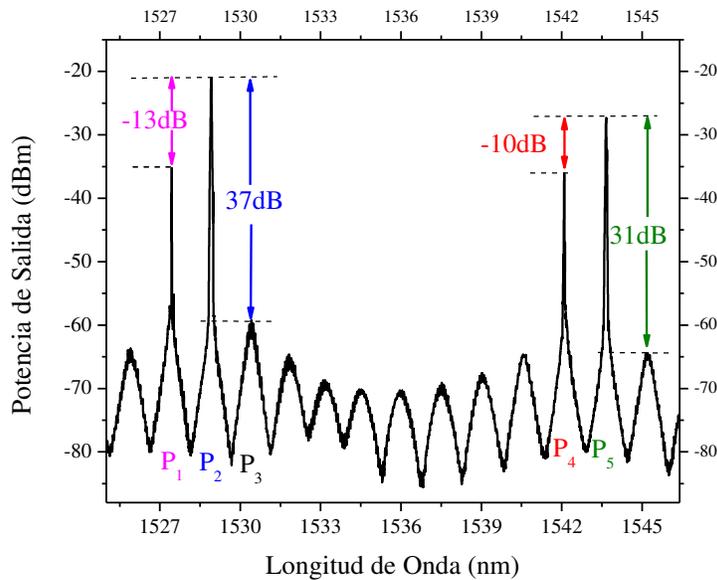


Figura 4.21: Respuesta a cambios de índice de refracción ($n=1.3323$ RIU).

Al comparar este espectro con el obtenido con el sistema en las condiciones iniciales se observa que se mantienen los picos P_1 , P_2 y P_4 , con una pequeña variación de 0.40 nm. La emisión denominada P_3 anteriormente desaparece y se obtiene una nueva línea (P_5) centrada en 1543.79 nm que presenta una intensidad de -21.25 dBm y SMSR superior a 30 dB. En este caso, las líneas de emisión láser están organizadas en dos pares, los cuales están separados entre sí 13.20 nm. Como en el caso inicial, las líneas adyacentes, se encuentran separadas aproximadamente 1.60 nm.

El análisis de la estabilidad del láser bajo estas nuevas condiciones se llevó a cabo durante una hora y los resultados se muestran en Figura 4.22. Los datos fueron guardados cada tres minutos y el análisis de éstos muestra que se presentaron fluctuaciones menores a 0.10 nm para todas las emisiones láser. Con relación a la potencia, los picos P_2 y P_5 presentan bajas fluctuaciones, sin embargo, los picos P_1 y P_3 tienen fluctuaciones de intensidad mayores a 7 dB.

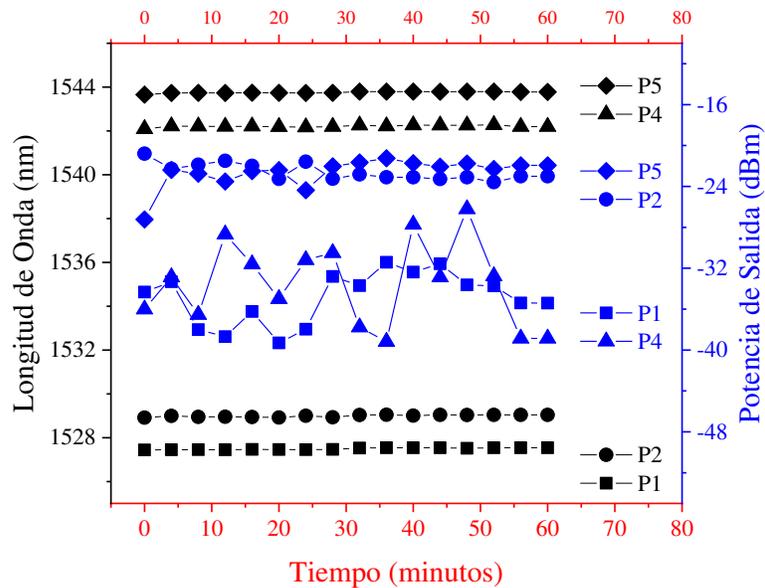


Figura 4.22: Análisis de estabilidad del láser para $n=1.3323$ RIU.

Posteriormente, se procedió a modificar el valor del índice de refracción del líquido alrededor del interferómetro utilizado como filtro en el láser, con el objetivo de analizar los efectos que estos cambios generan en el espectro de emisión del láser. Para evitar los posibles efectos del cambio en la curvatura de la fibra, que pudieran generar ambigüedad en los resultados, se decidió ir agregando la glicerina a la mezcla donde estaba inmerso el interferómetro y de esta forma aumentar su índice de refracción en cada medición, en lugar

de introducir el interferómetro en diferentes mezclas previamente preparadas. Los valores de índice de refracción de las mezclas de agua-glicerina preparadas varían desde 1.3323 RIU (agua destilada) hasta 1.3799 RIU, los incrementos de índice de refracción de una muestra a otra son de aproximadamente 0.003 RIU. Al aumentar el valor del índice de refracción de manera controlada, la respuesta del láser se altera produciendo un desplazamiento uniforme hacia longitudes de onda mayores como se puede apreciar en la Figura 4.23. Adicionalmente se observa que se produce una disminución del contraste de franjas del espectro del láser relacionadas con el patrón del interferómetro. Estos resultados son consistentes con los mostrados en la Figura 4.3 donde se analizó la respuesta de este interferómetro ante cambios de índice de refracción.

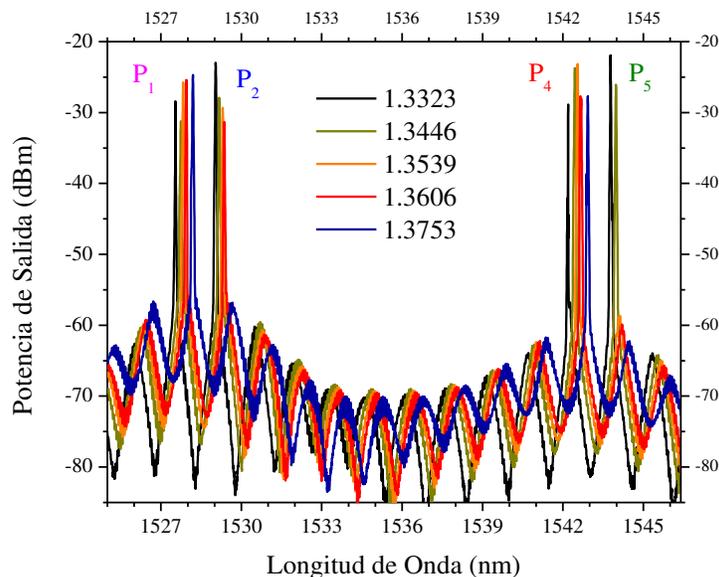


Figura 4.23: Respuesta a cambios de índice de refracción ($n=1.3323-1.3799$ RIU).

En la Figura 4.24 se muestra el análisis de los datos de los espectros obtenidos ante cambios del índice de refracción para cada línea de emisión. La sensibilidad calculada para cada pico es de 15.71 nm / RIU (P_1), 14.33 nm / RIU (P_2), 16.13 nm / RIU (P_4) y 13.77 nm / RIU (P_5). A pesar de que las sensibilidades obtenidas son bajas, la respuesta del sistema es altamente lineal ante los cambios provocados de índice de refracción del medio acuoso en el que se encontraba sumergido el interferómetro: $R^2 = 0.97609$ (P_1), $R^2 = 0.98706$ (P_2) $R^2 = 0.98426$ (P_3) y $R^2 = 0.8756$ (P_4). En esta figura se puede apreciar que cada línea de emisión tiene un rango dinámico diferente. La línea de emisión con menor longitud de onda (P_1) es la que se mantuvo presente durante todo el experimento. La línea de

emisión con mayor longitud de onda (P_5) desaparece para valores de índice de refracción superiores a 1.3476 RIU. Las líneas denominadas P_2 y P_4 a lo largo de este trabajo, están presentes en la mayor parte del rango de valores de índice de refracción analizado. La variación del rango dinámico de cada línea está relacionada con la respuesta del interferómetro ante cambios de índice de refracción (ver Figura 4.3), el aumento del índice de refracción del líquido alrededor del interferómetro provoca que las franjas se desplacen hacia longitudes de onda mayores (redshifting), así como la disminución de los valores de contraste de franjas del patrón, lo que provoca que las líneas desaparezcan.

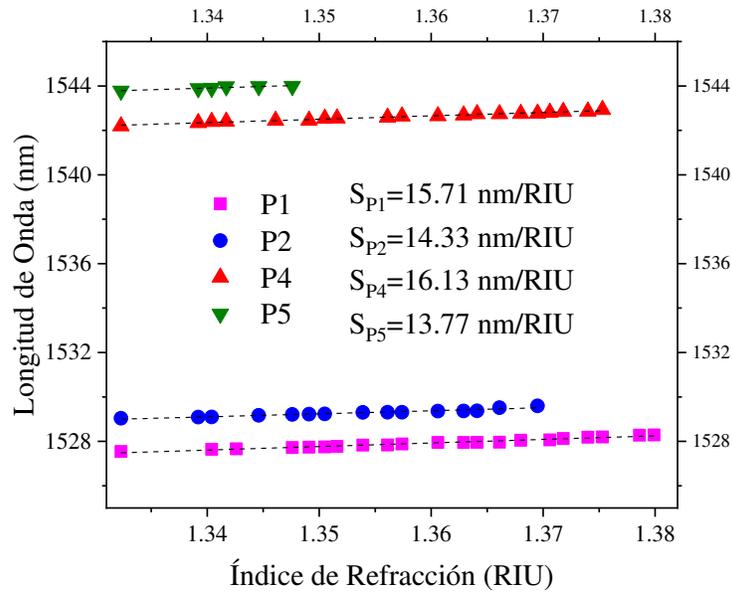


Figura 4.24: Análisis de sensibilidad del láser ante cambios de índice de refracción.

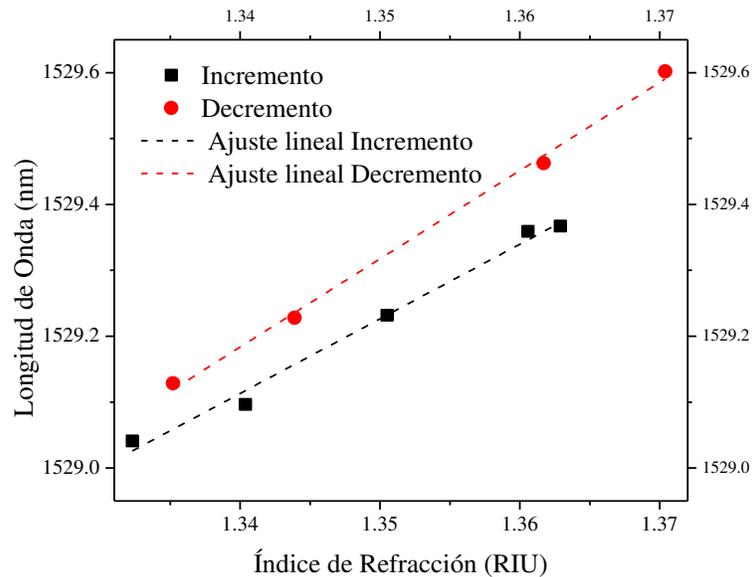


Figura 4.25: Histéresis del arreglo ante cambios de índice de refracción.

Al analizar la respuesta de la línea P_2 ante el aumento y disminución del índice de refracción del medio, se puede observar un bajo valor de histéresis que pudiera estar relacionado con pequeñas fluctuaciones de intensidad del diodo de bombeo y cambios en la birrefringencia del sistema inducidas por curvaturas no controladas de las fibras ópticas del arreglo.

4.5.3 Respuesta ante cambios de temperatura.

El esquema experimental utilizado para analizar los cambios del sistema láser ante cambios de temperatura fue el mismo que se utilizó en la sección anterior (Figura 4.14), únicamente se colocó el interferómetro sobre una parrilla mediante la cual se podía modificar controladamente la temperatura desde $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $210\text{ }^{\circ}\text{C}$. Todos los experimentos descritos en esta sección se realizaron en una habitación con temperatura ambiente controlada para garantizar que los resultados no fueran alterados por la variación de este parámetro. La salida del láser cuando la temperatura se fija a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ está conformada por tres líneas de emisión: P_2 , P_3 y P_6 (ver Figura 4.26). P_6 es el pico de mayor intensidad con -17.04 dBm , se encuentra centrado en 1543.33 nm con SMSR de 43 dB y separado 13.23 nm de P_2 y P_3 con SMSR de 37 dB y 41 dB respectivamente.

La respuesta ante cambios de temperatura puede apreciarse en la figura siguiente, donde se observa que a medida que aumenta la temperatura se produce un desplazamiento de los picos de emisión hacia longitudes de onda mayores, llegando a obtenerse hasta cuatro líneas de emisión en las temperaturas comprendidas entre $145\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $165\text{ }^{\circ}\text{C}$. Producto de este corrimiento, algunas líneas de emisión desaparecen (P_2 , P_3 y P_6) y aparecen otras nuevas (P_0 , P_1 , P_4 y P_5). Estas nuevas líneas presentan características similares a las anteriores en cuanto a intensidad con SMSR entre 38 dB y 41 dB . Debido a esto, el rango dinámico de cada línea de emisión es diferente, siendo las líneas P_2 , P_3 y P_6 las que más se mantienen durante el experimento (rango de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$), como puede apreciarse en la Figura 4.27. Al analizar estos resultados, se obtuvieron sensibilidades de $21.01\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ (P_2), $16.99\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ (P_3), y $16.97\text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ (P_6). Estos valores son bajos, sin embargo, la respuesta de estas emisiones ante los cambios de temperatura presenta una muy buena aproximación lineal de 0.96306 (P_2), 0.99507 (P_3) y 0.9890 (P_6).

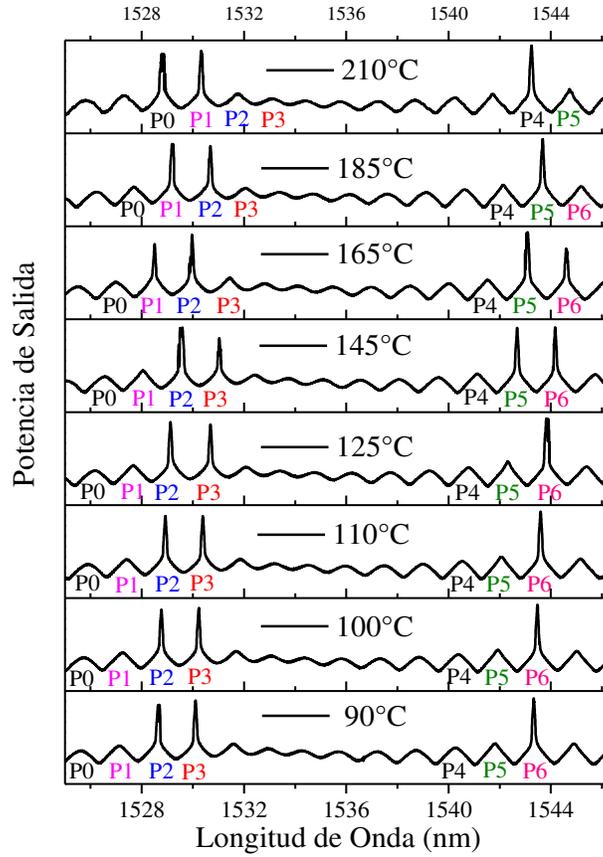


Figura 4.26: Espectro de salida del láser para diferentes temperaturas de 90 °C a 210 °C.

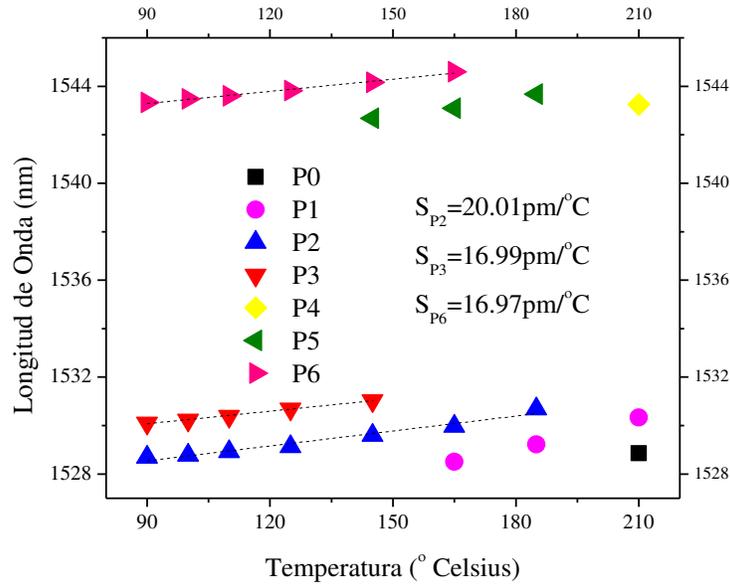


Figura 4.27: Análisis de la respuesta ante cambios de temperatura de las líneas de emisión P₀ a P₆.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta sección, se pudiera utilizar tanto la modificación del índice de refracción como la modificación de la temperatura del medio

circundante al interferómetro para lograr la sintonización de diferentes longitudes de onda de emisión del láser propuesto. El láser obtenido en este trabajo presenta buenas características de estabilidad de sus emisiones que pueden ser triples o cuádruples, y se encuentran localizadas fundamentalmente en dos zonas que están gobernadas por el patrón de interferencia del interferómetro usado como filtro en el arreglo, el cual presenta un rango espectral libre de 1.60 nm. En el caso de las pruebas variando el índice de refracción se obtuvo una sintonización de aproximadamente 1.00 nm, resultados comparables con los reportados en otros trabajos [107–109]. Otros trabajos presentan un rango de sintonización mayor [110–115], sin embargo, presentan espectros irregulares, baja resolución, etc. En el caso de las pruebas modificando la temperatura se alcanzó una sintonización de 2.00 nm, sin embargo, la temperatura determina el rango dinámico de detección, siendo el valor máximo obtenido de 95 °C. Este sistema pudiera emplearse como una forma alternativa de detección remota de índice de refracción y temperatura debido a su sencillez y bajo costo de implementación.

Los resultados mostrados en esta sección fueron publicados para su difusión en [116,117]. Además, las estructuras diseñadas durante este trabajo han sido utilizadas también para la sintonización de láseres modificando la curvatura [118].

Capítulo 5 Conclusiones

La técnica de fabricación del interferómetro propuesto es simple y de bajo costo. Para su obtención se utiliza fibra para comunicaciones (convencional) cuyo diámetro es de 125 μm y un tramo de aproximadamente 500 μm de fibra estrechada cuyo diámetro es de aproximadamente 60 μm . La fibra estrechada se obtiene en el laboratorio a partir de fibra convencional utilizando una máquina para la fabricación de fibra óptica estrechada mediante fusión y estiramiento (MFFOE) controlada por software que utiliza una flama para aplicar calor a la sección de fibra óptica convencional que se desea estrechar y mediante el estiramiento consigue el estrechamiento deseado. Al analizar las respuestas de los interferómetros fabricados podemos afirmar que el método propuesto garantiza la repetitividad de los resultados ya que los patrones de interferencia obtenidos son similares.

Las caracterizaciones realizadas para proponer las posibles aplicaciones de los dispositivos fabricados se basaron en el análisis de las respuestas de los interferómetros fabricados ante cambios de índice de refracción y de concentración de soluto de las disoluciones acuosas en las que estaban inmersos y ante cambios de temperatura. Para cambios de índice de refracción de mezclas de agua-glicerina las sensibilidades obtenidas en este trabajo son moderadas en comparación con otros trabajos publicados recientemente.

Se propuso un sistema para obtener un láser de múltiples emisiones todo de fibra óptica utilizando una de estas estructuras como filtro cuya respuesta fue muy estable en longitud de onda, las cuatro líneas generadas presentaron SNSR por encima de 30 dB, dos de ellas por encima de 40 dB y además se probó que podía ser sintonizado aprovechando su respuesta ante cambios de índice de refracción previamente estudiados.

Durante la estancia de investigación se investigó acerca de la generación de efectos no lineales en fibras ópticas, específicamente la observación experimental de Inestabilidad Modulacional por Polarización en fibras con dispersión normal para todas las longitudes de onda de guiado y con baja birrefringencia. Las bandas de Anti-stokes y Stokes obtenidas centradas en 1026 nm and 1105 nm respectivamente, corresponden con los cálculos teóricos realizados y pudo demostrarse de manera experimental que las bandas generadas presentaban una polarización ortogonal con relación a la polarización del bombeo, además de los efectos que tenía sobre el espectro obtenido la modificación de la potencia del láser de bombeo. Esta investigación forma parte del proyecto “Láser de fibra óptica sintonizable basado en Mezcla

de Cuatro Ondas” del Laboratorio de Fibras Ópticas de la Universidad de Valencia (LFO-UV). Una etapa posterior del trabajo incluye el estudio de la sintonización mediante curvatura de las franjas de Anti-Stokes y Stokes obtenidas, de las que se realizaron unas primeras pruebas durante este período, lo cual pudiera derivar en su posible aplicación como sensor de curvatura.

Anexo I: Observación Experimental de Inestabilidad Modulacional por Polarización en fibras con dispersión normal para todas las longitudes de onda de guiado y birrefringencia residual.

AI.1 Introducción.

Durante la primera etapa de la Estancia de Investigación en la Universidad de Valencia se realizaron las pruebas de laboratorio con el objetivo de aprender hasta dominar una de las técnicas utilizadas para la medición experimental de la dispersión y la birrefringencia de las fibras fabricadas en el laboratorio de fibras ópticas para validar que las mismas cumplen con los valores esperados según su diseño.

La segunda etapa de este trabajo está relacionada con la observación experimental del efecto de mezcla de cuatro ondas, específicamente la Inestabilidad Modulacional por Polarización que se presenta en fibras que tienen dispersión normal y birrefringencia residual.

El fenómeno de la Mezcla de Cuatro Ondas degenerado ocurre cuando se transfiere parte de la energía de un pulso de bombeo intenso en cierta frecuencia al interactuar con un medio no lineal, como es el caso de una fibra óptica, y se crean otras dos nuevas frecuencias ($\Omega_s = \omega_1 - \omega_3 = \omega_4 - \omega_1, \omega_3 < \omega_4$) [47]. El desplazamiento en frecuencia de ambas bandas está determinado por la longitud de onda de bombeo y por algunas de las características de la fibra utilizada: la birrefringencia y el valor del parámetro de dispersión por velocidad de grupo (β_2) para la longitud de onda de bombeo [47].

La inestabilidad modulacional por polarización (PMI: Polarization Modulation Instability) es una variante del fenómeno de inestabilidad modulacional que se presenta al bombear una fibra con una señal intensa y se generan dos nuevas bandas que están polarizadas ortogonalmente con relación al bombeo. Este fenómeno se considera un caso especial de Mezcla de Cuatro Ondas (FWM: Four-wave Mixing).

AI.2 Caracterización de la Fibra.

La fibra fotónica utilizada en los experimentos descritos en este capítulo (FUT: Fiber Under Test) fue fabricada en la torre de estiramiento de fibra óptica del Laboratorio de Fibras Ópticas de la Universidad de Valencia mediante la técnica de apilamiento de capilares (stack-

and-draw) y se muestra en las imágenes de la Figura AI.1. Los parámetros físicos de la fibra fueron medidos utilizando un microscopio electrónico de la Universidad de Valencia determinándose que el diámetro de los agujeros (d) tenía un valor de $0.525 \pm 0.005 \mu m$ mientras que la separación entre ellos (Λ) era de $1.000 \mu m$.

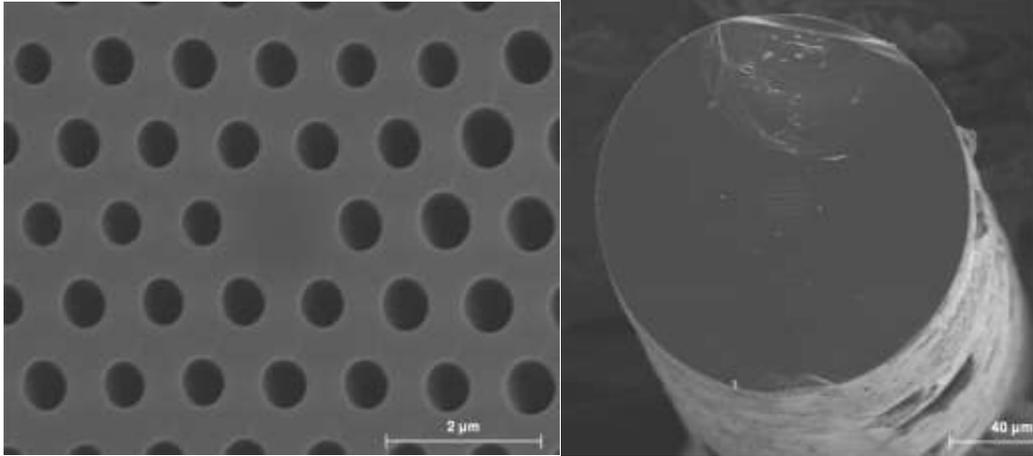


Figura AI.1: Imágenes de la sección transversal de un tramo de la fibra utilizada obtenidas con el microscopio electrónico de la Universidad de Valencia.

AI.2.1 Cálculo de la dispersión teórica de la fibra.

La dispersión juega un papel fundamental en la propagación de los pulsos ópticos a través de la fibra debido a que las diferentes componentes espectrales del mismo viajan a diferentes velocidades, lo que provoca un ensanchamiento del pulso a medida que viaja a través de la fibra, incluso cuando las potencias que se manejen sean bajas y los efectos no lineales prácticamente no estén presentes, lo que incide directamente en la calidad de las comunicaciones ópticas.

Los efectos de la dispersión en fibras pueden calcularse mediante la expansión en series de Taylor de la constante de propagación (β) con relación a la frecuencia ω_0 del láser de bombeo [47]:

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1 (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2 (\omega - \omega_0)^2 + \dots, \quad AI.1$$

donde:

$$\beta_m = \left(\frac{\partial^m \beta}{\partial \omega^m} \right)_{\omega=\omega_0}, \quad (m = 0, 1, 2, \dots). \quad AI.2$$

Los parámetros β_1 y β_2 están relacionados con el índice de refracción $n(\omega)$ mediante las Ecuaciones AI.3 y AI.4 [47].

$$\beta_1 = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} = \frac{1}{v_g} = \frac{n_g}{c} = -\frac{1}{c} \left(n + \omega \frac{\partial n}{\partial \omega} \right), \quad \text{AI.3}$$

$$\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = \frac{1}{c} \left(2 \frac{\partial n}{\partial \omega} + \omega \frac{\partial^2 n}{\partial \omega^2} \right). \quad \text{AI.4}$$

La velocidad de grupo (v_g) se refiere a la velocidad en que se mueve la envolvente del pulso óptico y está inversamente relacionada con el parámetro β_1 . El parámetro que caracteriza la dispersión por velocidad de grupo (GVD: Group Velocity Dispersion), la cual es la responsable del ensanchamiento del pulso corresponde con β_2 . La dispersión de la fibra puede obtenerse a partir de estos parámetros mediante las ecuaciones:

$$D = \frac{d\beta_1}{d\lambda} = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = -\frac{\omega^2}{2\pi c} \beta_2. \quad \text{AI.5}$$

La dispersión y del parámetro β_2 varían con la longitud de onda y a una determinada longitud de onda, conocida como la longitud de onda de dispersión cero (λ_z), son cero.

Cuando $D < 0$ se conoce como régimen de Dispersión Normal, en este caso, el pulso, al propagarse por la fibra se ensancha. El caso contrario, se conoce como régimen de Dispersión Anómalo y en este caso, el pulso al propagarse se estrecha. En ambos casos, también influye el fenómeno de auto-modulación de fase en el ensanchamiento del pulso.

El conocimiento de la dispersión cromática de una fibra óptica es clave por la influencia que ésta tiene en la propagación de un pulso óptico por la fibra. En lo que se refiere a la generación de procesos no lineales en una fibra óptica, las características de dispersión de la fibra determinan en gran medida qué procesos de óptica no lineal se pueden generar en ella, o bien cuáles lo harán de manera más eficiente, por ejemplo, en el caso de la dispersión normal, es la Dispersión Raman, la que en muchos casos desencadena el proceso de la generación de supercontinuo, mientras que en el régimen de dispersión anómala, la inestabilidad modulacional es el primer fenómeno que aparece.

Para obtener las características dispersivas de una fibra de manera experimental en el laboratorio, se utiliza una técnica basada en interferómetros que requiere un montaje relativamente sencillo y que además permite medir la dispersión cromática con secciones de fibra relativamente cortas [119–122].

La dispersión teórica de la fibra de prueba, teniendo en cuenta sus parámetros físicos fue calculada utilizando un software en MATLAB que reproduce los resultados obtenidos por Masanori Koshiba y Kunimasa Saitoh en el año 2000 [123] y se muestra en la Figura AI.2.

Este método empírico permite obtener una muy buena aproximación de la dispersión cromática teórica de fibras ópticas de sílice con microestructura triangular de agujeros de aire y núcleo sólido. En la Figura AI.2 la curva azul representa el cálculo de la dispersión teórica de la fibra que se está analizando y la línea vertical roja representa la longitud de onda de 1064 nm, que se utilizará como bombeo en los experimentos de este capítulo. Estos resultados nos muestran que la fibra presenta dispersión normal para todas las longitudes de onda de guiado (ANDi: All-normal Dispersion) y el valor teórico de la dispersión para la longitud de onda de bombeo es de $-104.15 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$.

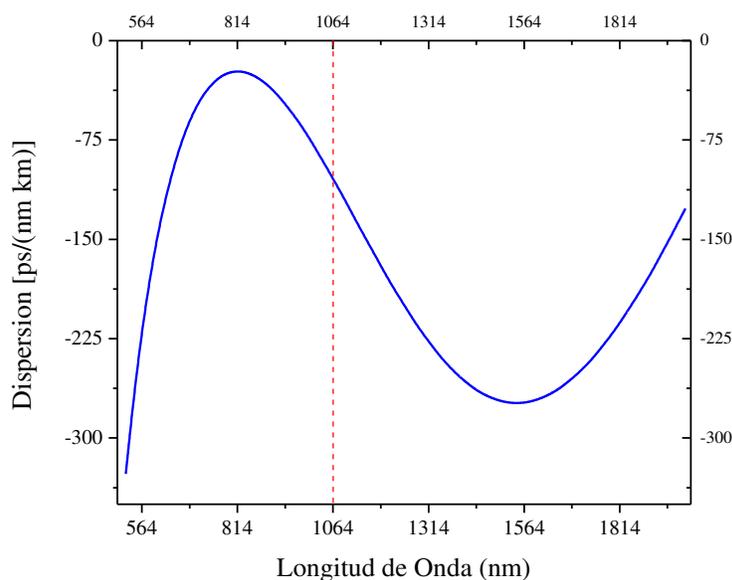


Figura AI.2: Dispersión teórica calculada de la fibra analizada.

AI.2.2 Medida de la dispersión cromática a partir del punto de inflexión de fase.

AI.2.2.1 Esquema experimental.

El esquema implementado para el cálculo de la dispersión cromática de una fibra en el laboratorio se basa en un interferómetro en configuración tipo Michelson, donde se utilizó un acoplador de fibra óptica 50/50 como divisor de haz y como combinador de los rayos reflejados para producir la interferencia (ver Figura AI.3). En una entrada del acoplador se conecta la fuente de luz, que para este análisis se utilizó una fuente de supercontinuo comercial (SCT1000, FYLA) con el objetivo de analizar un amplio rango de longitudes de onda. En la otra entrada del acoplador se coloca un analizador de espectros óptico (AQ6370C, YOKOGAWA) con el que se monitorea el espectro obtenido por la interferencia. En el brazo

de referencia se ha empalmado un colimador pigtail a una de las salidas del acoplador 50/50 para 1064 nm, y se ha colocado un arreglo de espejos (PF10-03-M01, THORLABS), uno de ellos montado sobre una plataforma motorizada controlada por software (HPT User Utility, THORLABS) para variar la longitud de dicho brazo. En el otro brazo de salida del acoplador se empalma un tramo, en nuestro caso de 44.4 cm, de la fibra que se desea analizar. El haz reflejado en este brazo se obtiene cortando en ángulo recto el extremo libre de la fibra de prueba con lo cual se garantiza una reflexión de un 4%, la cual es suficiente para generar la interferencia.

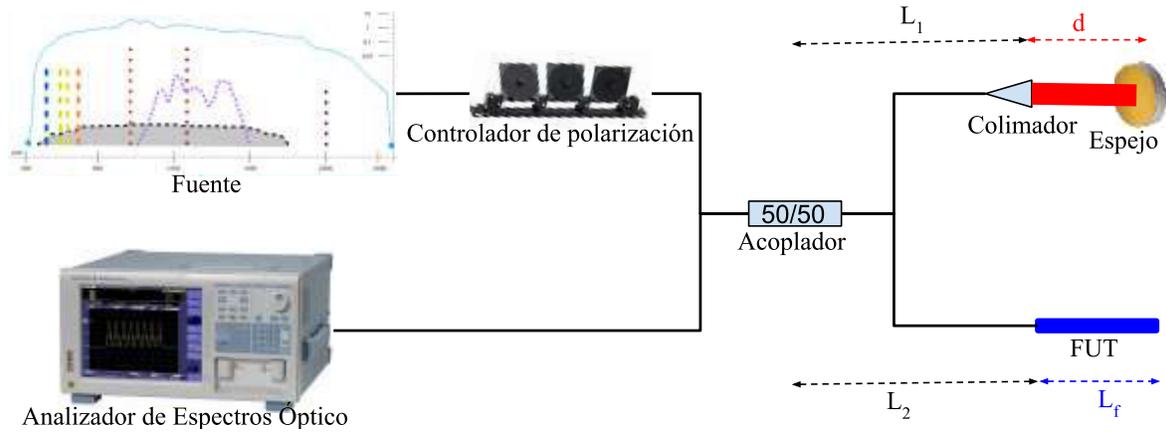


Figura AI.3: Esquema del montaje del interferómetro para la medida de la dispersión. FUT: fibra de prueba.

La señal resultante de la interferencia del haz de referencia y el haz de la fibra de prueba puede ser analizado con el objetivo de determinar la longitud de onda en función de la distancia d , para la cual se satisface que:

$$\frac{\partial \Delta \phi}{\partial \omega} = 0, \quad \text{AI.6}$$

teniendo en cuenta que:

$$\Delta \phi = (\phi_2 - \phi_1), \quad \text{AI.7}$$

$$\phi_1 = 2 (\beta_c L_2 + \beta_f L_f), \quad \text{AI.8}$$

$$\phi_2 = 2 (\beta_c L_1 + \beta_a d), \quad \text{AI.9}$$

donde β_c , β_f y β_a corresponden a los valores de este parámetro para la fibra del arreglo, para la fibra de prueba y para el aire respectivamente, se obtiene que:

$$\Delta \phi = 2 \left[\beta_c (L_2 - L_1) + \beta_f L_f - \frac{\omega}{c} d \right], \quad \text{AI.10}$$

sustituyendo AI.10 en AI.7:

$$\frac{\partial \Delta \phi}{\partial \omega} = 2 \left[\frac{\partial \beta_c}{\partial \omega} (L_2 - L_1) + \frac{\partial \beta_f}{\partial \omega} L_f - \frac{d}{c} \right] = 0, \quad \text{AI.11}$$

derivando se obtiene que:

$$\frac{\partial^2 \beta_c}{\partial \omega^2} (L_2 - L_1) + \frac{\partial^2 \beta_f}{\partial \omega^2} L_f - \left(\frac{1}{c} \right) \frac{\partial d}{\partial \omega} = 0, \quad \text{AI.12}$$

despejando de AI.5 se obtiene:

$$\beta_2 = \frac{\partial^2 \beta}{\partial \omega^2} = - \frac{2 \pi c}{\omega^2} D, \quad \text{AI.13}$$

realizando:

$$\frac{\partial d}{\partial \omega} = \frac{\partial \lambda}{\partial \omega} \frac{\partial d}{\partial \lambda} = - \frac{2 \pi c}{\omega^2} \frac{\partial d}{\partial \lambda}, \quad \text{AI.14}$$

sustituyendo AI.13 y AI.14 en AI.12 se obtiene:

$$D_c (L_2 - L_1) + D_f L_f - \left(\frac{1}{c} \right) \frac{\partial d}{\partial \lambda} = 0. \quad \text{AI.15}$$

En la Figura AI.4 se muestran los espectros obtenidos al desplazar la plataforma motorizada que modifica la longitud del brazo de referencia en tres posiciones diferentes, de donde puede obtenerse la longitud de onda λ_0 según la posición del carro del brazo de referencia.

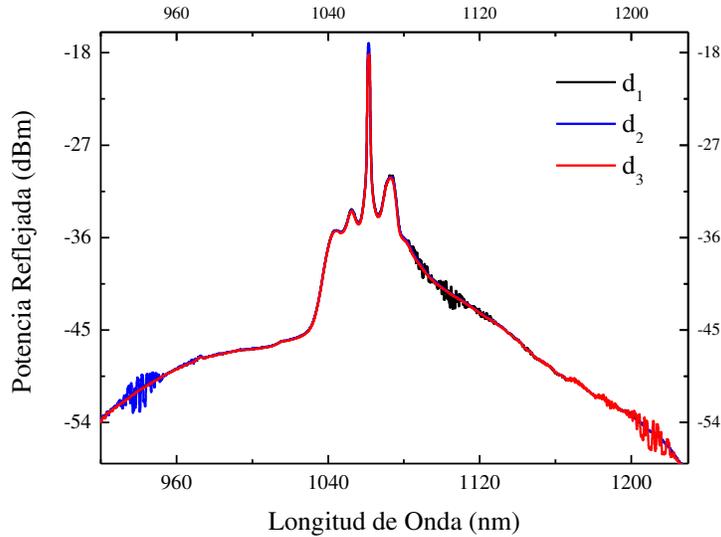


Figura AI.4: Espectro obtenido para tres diferentes posiciones del brazo de referencia.

AI.2.3.2 Procesamiento de datos recolectados.

Para proceder al cálculo de la dispersión de la fibra analizada, es imprescindible tener en cuenta los efectos que el sistema tiene sobre las medidas realizadas, por tanto, es necesario

realizar las mediciones del sistema sin incluir la fibra que se desea analizar ($L_f = 0$), lo que nos permite obtener el término de la ecuación $D_c(L_2 - L_1)$.

$$D_c(L_2 - L_1) = \frac{1}{c} \frac{\partial d_{sistema}}{\partial \lambda}, \quad \text{AI.16}$$

Al representar la variación de d en función de la longitud de onda tal como se muestra mediante los puntos en la Figura AI.5, se puede obtener una aproximación a una ecuación del tipo:

$$\Delta d = A x^4 + B x^2 + C + D x^{-4} + E x^{-2}, \quad \text{AI.17}$$

donde las líneas continuas en dicha figura representan la aproximación.

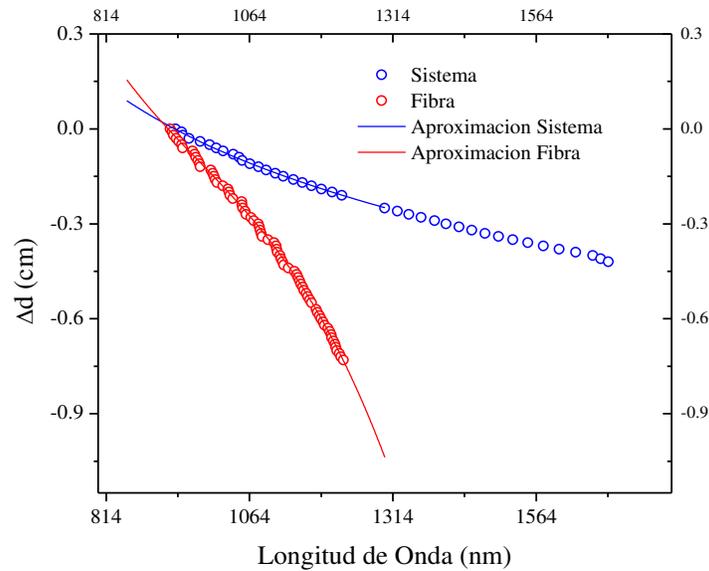


Figura AI.5: Δd en función de la longitud de onda. Los puntos corresponden a las mediciones en laboratorio y la línea continua muestra el ajuste a la función de Cauchy.

Finalmente se realiza la medición del sistema con la fibra de prueba sustituyendo el término obtenido $D_c(L_2 - L_1)$ para calcular la dispersión de la fibra y realizando un tratamiento similar al descrito previamente, obteniéndose la curva mostrada en la Figura AI.6, nótese que la dispersión obtenida mediante este procedimiento experimental para 1064 nm es de $-104.37 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$.

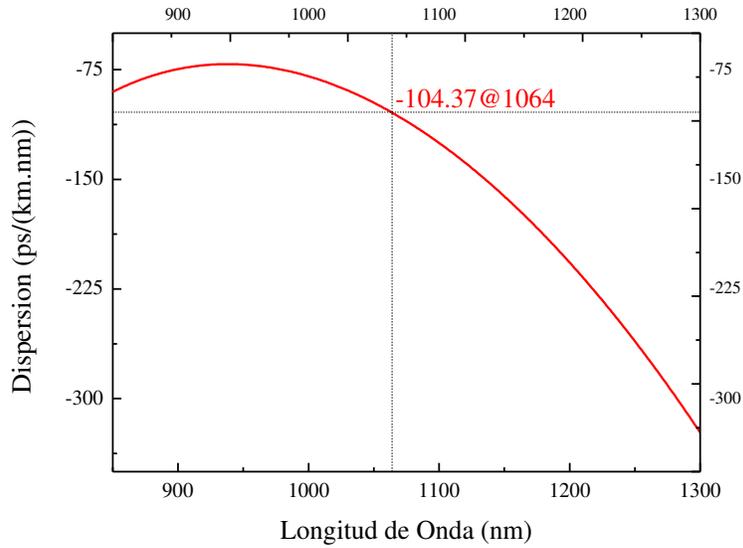


Figura AI.6: Obtención experimental de las características dispersivas de la fibra analizada.

Finalmente, se realizó el cálculo del parámetro de la dispersión por velocidad de grupo utilizando la Ecuación AI.13 y se obtuvo la gráfica que se muestra en la Figura AI.7.

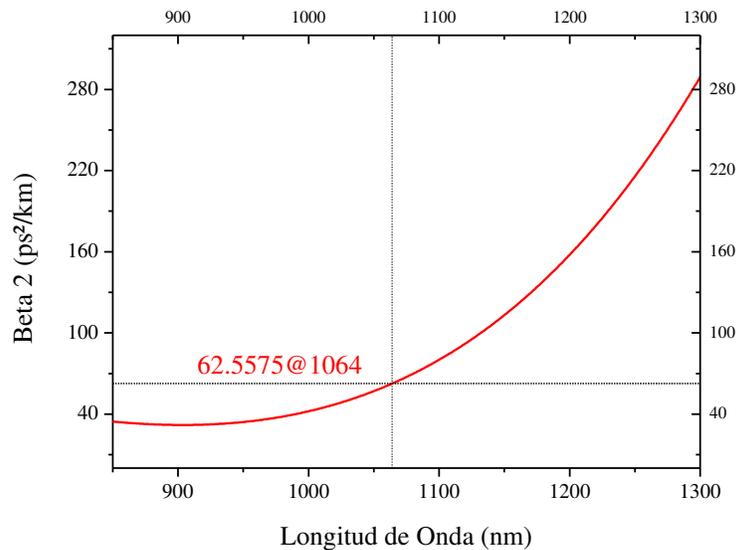


Figura AI.7: Curva experimental del parámetro de la dispersión por velocidad de grupo de la fibra analizada.

En general, la dispersión en fibras ópticas varía con la frecuencia, en el caso de la fibra que se analiza en este documento, se comprueba que presenta dispersión normal en el rango de frecuencias analizado ($D < 0$) ($\beta_2 > 0$) y se obtiene una correspondencia entre el valor de la dispersión teórica y el valor medido para la longitud de onda de trabajo. Además, tanto la curva teórica como la obtenida de forma experimental tienen el mismo comportamiento en

una vecindad de aproximadamente 60 nm con relación a la longitud de onda del bombeo de 1064 nm.

AI.2.3 Medida de la birrefringencia de fibras ópticas.

Matemáticamente, la constante de propagación (β) se vuelve ligeramente diferente para los modos polarizados en las direcciones x e y . Esta propiedad se conoce como birrefringencia modal (B_m) y se define como un parámetro adimensional [47]:

$$B_m = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y|, \quad 0.18$$

$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_x - \beta_y|} = \frac{\lambda}{B_m}, \quad 0.19$$

donde n_x y n_y son los índices de refracción modal de los dos estados polarizados ortogonalmente y L_B se conoce como longitud de repetición. La birrefringencia en una fibra se induce por problemas de simetría y la luz al pasar por ella encuentra dos caminos ópticos, por eso se puede decir que la fibra presenta 2 ejes, un eje lento y un eje rápido. El eje a través del cual el índice de refracción es menor, se conoce como eje rápido, debido a que la velocidad de grupo es mayor cuando la luz se propaga en esa dirección. La longitud de repetición puede ser de aproximadamente un centímetro en fibras altamente birrefringentes $B_m \sim 10^{-4}$ y mayor de un metro para fibras de baja birrefringencia $B_m \sim 10^{-6}$ [47].

AI.2.3.1 Esquema experimental.

Para realizar la medición de la birrefringencia de la fibra que se desea caracterizar se utiliza un esquema como el mostrado en la Figura AI.8. La fuente de luz que se utiliza es un láser sintonizable lineal de 1050 nm a 1075 nm (TLB-6300-LN, New Focus) cuya salida se conecta a un colimador (F220APC-1064, THORLABS). El haz pasa por una placa retardadora de $\lambda/2$ para 1064 nm (THORLABS), que modifica la orientación de la polarización del láser hasta lograr excitar por igual ambos modos de la fibra. Esta luz incide en un espejo dicróico de 1" 45° que refleja 1064 nm y finalmente se hace pasar por una lente de microscopio de 30x (New Focus) para enfocar el haz e introducirlo en la fibra que se desea analizar, en este caso se utilizó un tramo de aproximadamente 9.9 metros de largo. La salida de la fibra se coloca en un carril óptico (LINOS) que contiene una lente esférica (C260TME-

B, THORLABS) y un polarizador (GTH-10, THORLABS) cuya función dentro del arreglo es discriminar uno de los dos modos que viajan por la fibra debido a la birrefringencia.

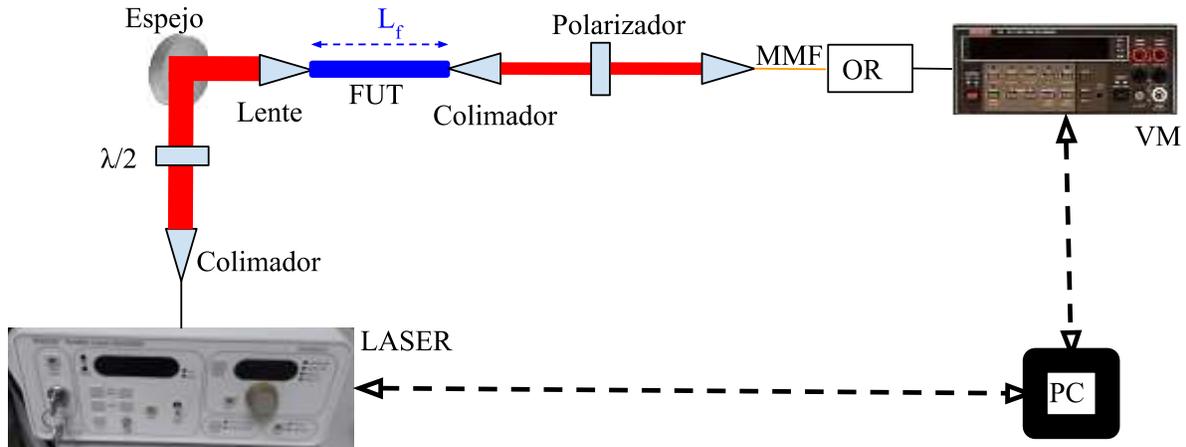


Figura AI.8: Esquema del montaje experimental para la medición de la birrefringencia de la fibra óptica. LASER: fuente de luz, MMF: fibra multimodo, OR: receptor óptico, VM: medidor de voltaje, PC: computadora personal.

La señal de salida del polarizador se introduce en una fibra, en este caso multimodo, que se encuentra conectada a un receptor óptico que convierte la señal óptica a eléctrica (2011, New Focus) que a su vez se encuentra conectado a un medidor de voltaje (199 System/DMM scanner, KEYLEIGHTH). Este último dispositivo y el láser se pueden controlar de forma remota mediante un software desarrollado en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Valencia mediante una computadora, garantizando que pueda realizarse un barrido de la frecuencia de emisión del láser y se realicen las mediciones de los valores de voltaje obtenidos durante dicho barrido.

AI.2.3.2 Procesamiento de datos recolectados.

Para medir la birrefringencia de la fibra graficaremos el valor de voltaje para cada longitud de onda obtenidos mediante el sistema mostrado anteriormente modificando las posiciones de la placa retardadora y el polarizador hasta encontrar las posiciones de ambas en que la señal obtenida sea más homogénea y presente mayor contraste de máximos y mínimos, tal como se muestra en la Figura AI.9. La birrefringencia de grupo se puede calcular mediante la ecuación:

$$B_g = \frac{\lambda^2}{L \delta\lambda}, \quad \text{AI.20}$$

donde λ representa la longitud de onda de trabajo, L corresponde con la longitud de la fibra analizada y $\delta\lambda$ se obtiene de la diferencia de longitud de onda entre dos crestas o dos valles

sucesivos. Mediante este procedimiento se obtuvo que el valor de la birrefringencia de esta fibra es de 12.3×10^{-6} , que representa un valor de birrefringencia bajo o de birrefringencia residual.

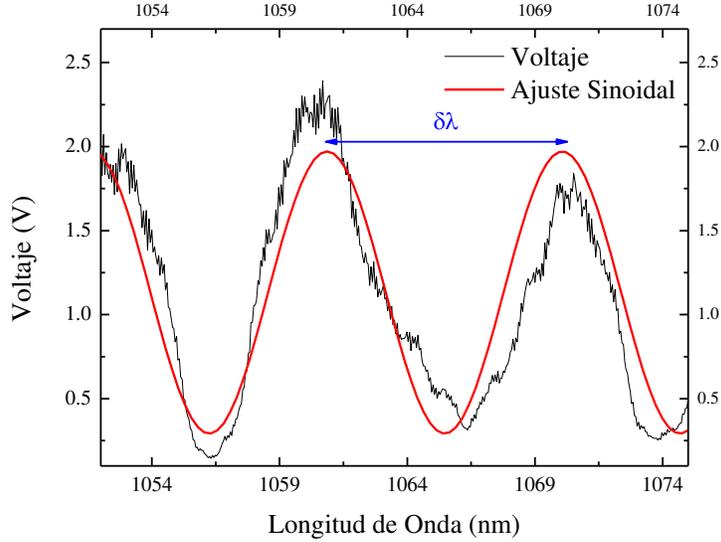


Figura AI.9: Salida del sistema implementado con el polarizador.

AI.3 Cálculo teórico de las bandas de FWM.

El cálculo teórico de las bandas de FWM mediante el procedimiento descrito anteriormente permite realizar la comparativa entre el efecto observado mediante la realización experimental. Por las características de la fibra que se utiliza ($\beta_2 > 0$) y su baja birrefringencia sólo se puede presentar el proceso cuya separación de las bandas está determinado por [47]:

$$\Omega_s = \sqrt{\frac{4 \pi \delta n}{(|\beta_2| \lambda_1)}}, \quad \text{AI.21}$$

donde λ_1 representa la longitud de onda de bombeo (1064 nm), $\delta n = \Delta n_x - \Delta n_y = B_g = 12.3 \times 10^{-6}$. Para realizar el cálculo se toma el valor medido de β_2 para la longitud de onda de bombeo ($62.5575 \text{ ps}^2/\text{km}$). Considerando que:

$$v_s = \frac{\Omega_s}{2 \pi}, \quad \text{AI.22}$$

$$c = \lambda v, \quad \text{AI.23}$$

derivando:

$$0 = \lambda \Delta v + \Delta \lambda v, \quad \text{AI.24}$$

$$\Delta\nu = \nu_s, \quad \text{AI.25}$$

$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{c} \nu_s, \quad \text{AI.26}$$

se puede obtener los valores de longitud de onda donde debemos encontrar las bandas y estos son 1035 y 1093 nm.

AI.4 Observación experimental de Inestabilidad Modulacional por Polarización.

Luego de realizadas las caracterizaciones de la fibra óptica microestructurada para determinar la viabilidad de su utilización para generar el fenómeno no lineal que se desea documentar, se procedió a la implementación del esquema experimental utilizado para la generación de las bandas PMI.

AI.4.1 Esquema experimental.

El montaje experimental utilizado para la observación experimental del fenómeno de mezcla de cuatro ondas en la fibra estudiada se muestra en la Figura AI.10.

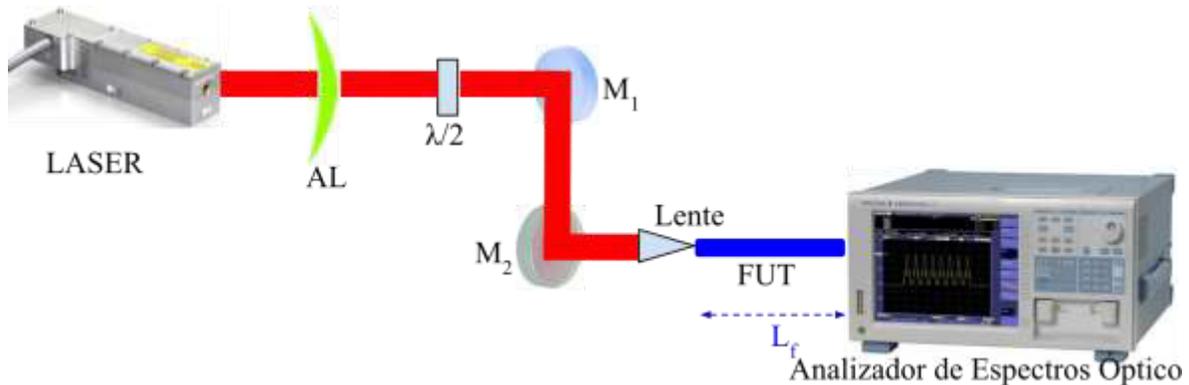


Figura AI.10: Esquema del montaje experimental para la observación experimental de FWM. LASER: fuente de luz, AL: lente esférica, $\lambda/2$: Placa retardadora, M_1 : espejo dieléctrico, M_2 : espejo de banda ancha, O: objetivo de microscopio, OSA: analizador de espectros óptico.

La fuente de luz que se utiliza es un láser de 1064 nm con frecuencia de repetición mayor a 19 kHz y ancho del pulso inferior a 1ns (SPN-20F-100, TEEM PHOTONICS), cuya potencia pico de este láser es de 10 kW y su potencia promedio es de 140 mW. El láser de bombeo incide en una lente esférica y posteriormente se hace pasar por una placa retardadora de $\lambda/2$ para 1064 nm (THORLABS). El haz posteriormente se dirige hacia un espejo dieléctrico para 1064 nm (HM-1037-45-P, CVI) y luego espejo de banda ancha 750-1100 nm (BB1-E03, Thorlabs) antes de pasar por una lente de microscopio de 30x (New Focus) para

enfocar el haz e introducirlo en la fibra que se desea analizar, en este caso se utilizaron diferentes tramos de longitudes entre 30 y 70 centímetros.

AI.4.2 Resultados experimentales.

En la siguiente figura se muestra el espectro obtenido a la salida de la fibra donde puede apreciarse la aparición de nuevas frecuencias. Pueden identificarse las bandas de RAMAN y dos bandas estrechas que se encuentran en 1026 nm y 1105 nm, a 40 nm aproximadamente del bombeo, que están relacionadas con la aparición del fenómeno de Inestabilidad Modulacional por Polarización (PMI: Polarization Modulation Instability).

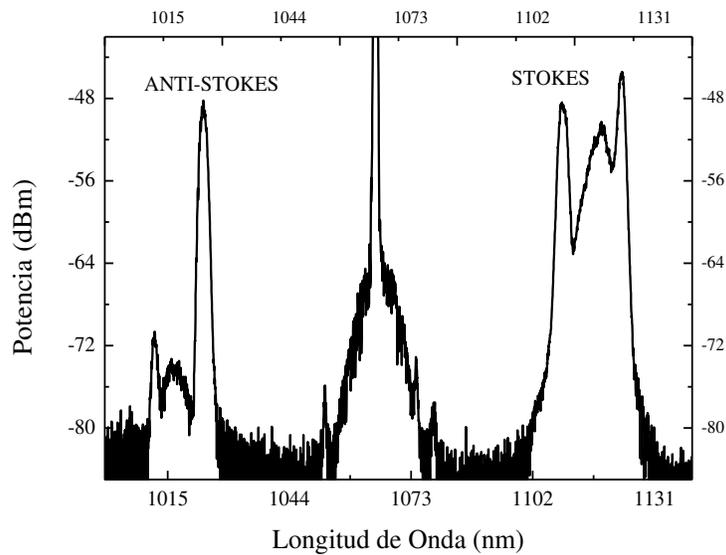


Figura AI.11: Espectro obtenido experimentalmente donde pueden observarse las bandas de RAMAN y las bandas estrechas de PMI.

Para verificar la presencia de PMI se procedió a comprobar que las bandas obtenidas presentan una polarización ortogonal con relación al bombeo colocando un polarizador a la salida de la fibra. En la Figura AI.12 se observa que al rotar el polarizador a una cierta posición puede obtenerse el espectro representado con la curva negra donde pueden verse claramente las dos bandas de PMI, sin embargo, al rotar nuevamente el polarizador 90 grados a partir de esa posición inicial, podemos observar que las dos bandas desaparecen y se ve que el bombeo presenta mayor intensidad y se ve claramente favorecido el efecto RAMAN. Esto sucede porque las bandas RAMAN presentan la misma orientación de la polarización que el bombeo, mientras que las bandas PMI están polarizadas ortogonalmente con relación al mismo.

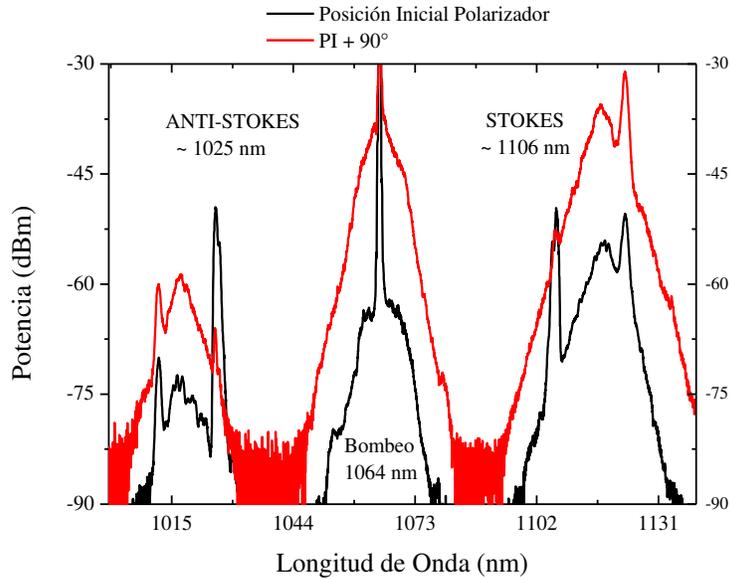


Figura AI.12: Espectro obtenido experimentalmente para dos polarizaciones ortogonales a la salida del sistema.

Posteriormente se realizaron otras pruebas con el objetivo de estudiar el efecto de la orientación de la polarización del bombeo. Al variar la orientación de la polarización del bombeo utilizando la placa retardadora, sin variar la intensidad del bombeo, se observaba que se modificaba la intensidad de las bandas de PMI obtenidas, hasta encontrarse las posiciones en las cuales se optimizaba la aparición de las bandas (Figura AI.13 curva negra) o se eliminaban las bandas (Figura AI.13 curva roja).

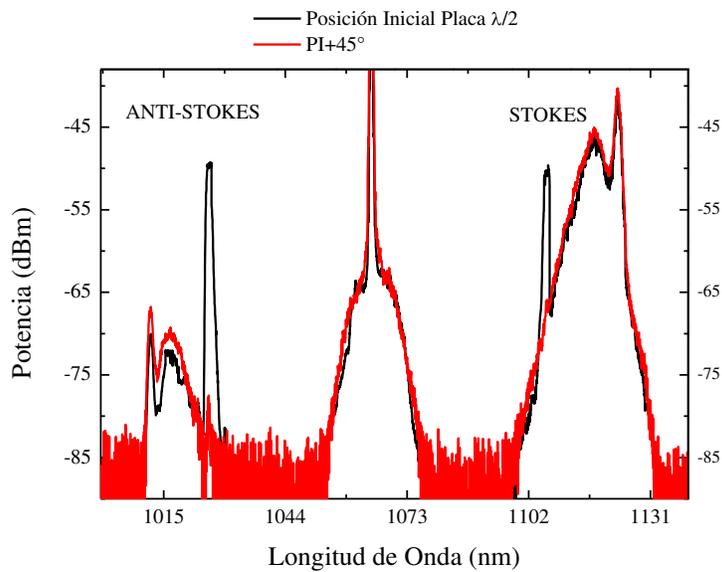


Figura AI.13: Espectros obtenidos experimentalmente para dos polarizaciones ortogonales del láser de bombeo.

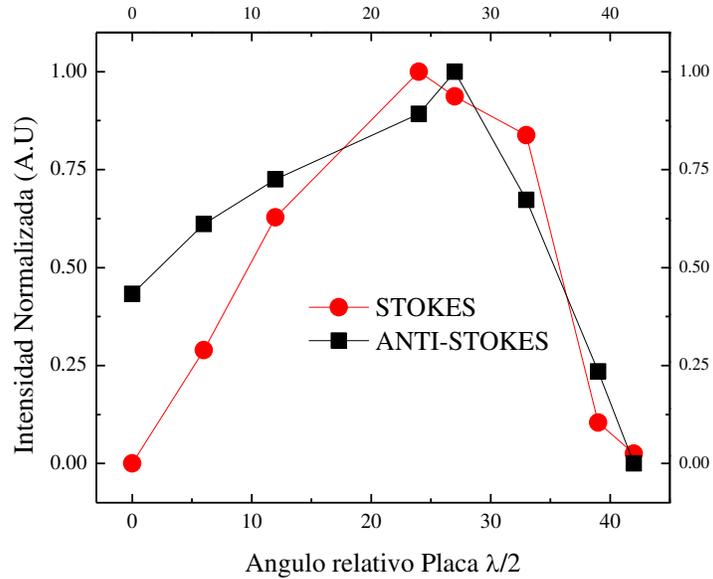


Figura AI.14: Análisis experimental del efecto de la polarización del láser de bombeo sobre las bandas PMI

Finalmente se realizaron pruebas modificando la intensidad del bombeo, los resultados se muestran en la Figura AI.15. Puede apreciarse que, al aumentar la intensidad del bombeo, aumenta la intensidad tanto del efecto RAMAN como de las bandas de PMI, sin embargo, también se observa que mientras que las bandas del efecto RAMAN se mantienen en la misma longitud de onda, las bandas de PMI se desplazan, separándose de la longitud de onda del bombeo.

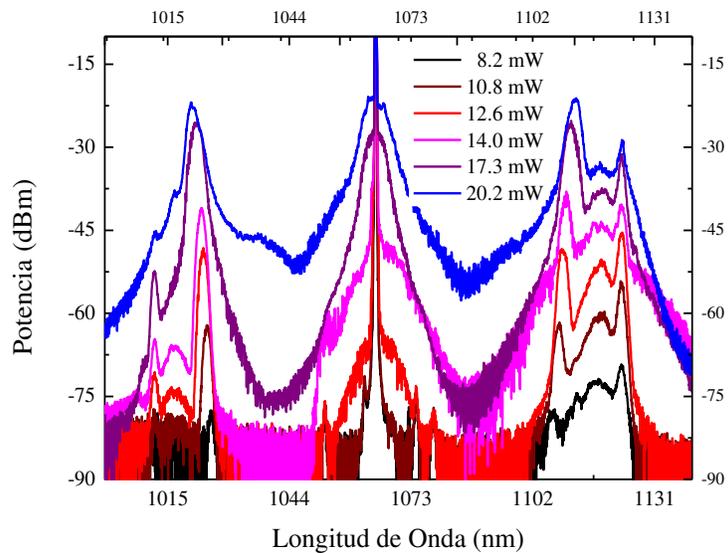


Figura AI.15: Efecto de la intensidad del bombeo en las bandas PMI.

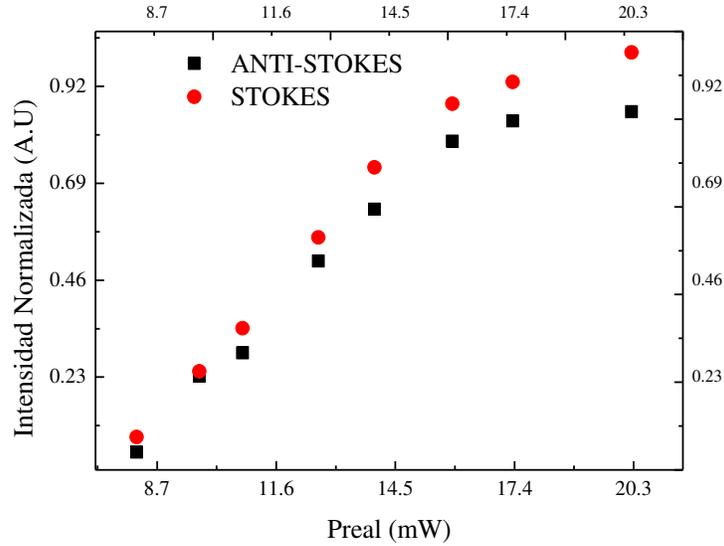


Figura AI.16: Efecto de la intensidad del bombeo en la intensidad de las bandas PMI.

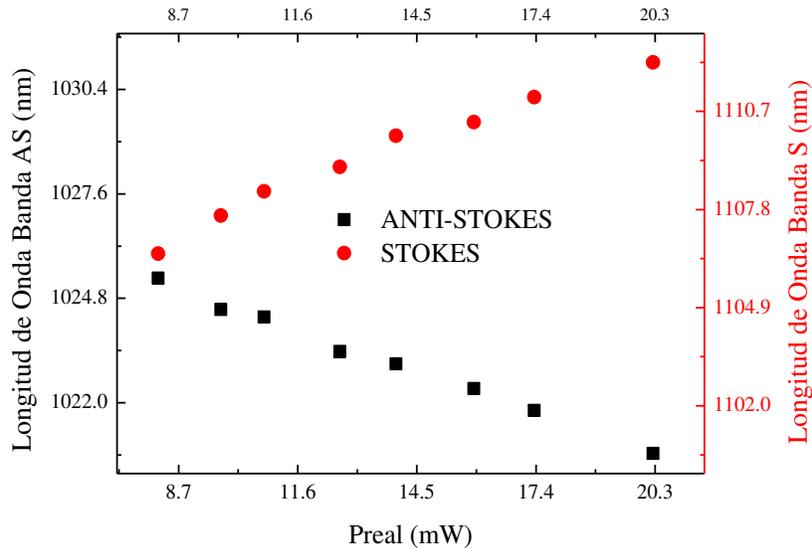


Figura AI.17: Efecto de la intensidad del bombeo en la longitud de onda de las bandas PMI.

Un análisis más exhaustivo del efecto de la intensidad del bombeo corrobora lo que se apreció en la figura anterior observando los espectros. La Figura AI.16 muestra el aumento en la intensidad de las bandas, mientras que la Figura AI.17 muestra la separación en longitud de onda de las bandas con respecto al bombeo al aumentar la potencia del bombeo.

La causa fundamental de este efecto se encuentra en el término resaltado en rojo de la ecuación de acoplamiento de fase (Ecuación AI.27) relacionado con la intensidad del bombeo.

$$\kappa_{sf} = 2\beta_{ps} - \beta_{ss} - \beta_{Ass} + \frac{\Delta n(\omega_s + \omega_{AS})}{c} + \frac{2}{3}\gamma_s(P_0). \quad \text{AI.27}$$

Este trabajo ha sido publicado para su difusión en [124–129].

Anexo II: Productos Generados

AII.1 Artículos JCR como primer autor

1. “Multi-mode all Fiber Interferometer based on Fabry-Perot Multi-cavity and its Temperature Response,” *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.*, vol. 147, pp. 232–239, Oct. 2017.
2. “Tip Fiber-Optic Intermodal Interferometer for Refractive Index Sensing,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 1135, no. c, pp. 1–1, 2017.
3. “Erbium Ring Fiber Laser Cavity Based on Tip Modal Interferometer and Its Tunable Multi-Wavelength Response for Refractive Index and Temperature.,” *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 1337, 2018.

AII.2 Colaboración en Artículos JCR

4. “Modified All-Fiber Fabry-Perot Interferometer and Its Refractive Index, Load, and Temperature Analyses,” *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 3, pp. 1–9, Jun. 2015.
5. “Multi-wavelength fiber laser based on a fiber Fabry-Perot interferometer,” *Appl. Phys. B*, vol. 121, no. 4, pp. 407–412, 2015.
6. “A multi-wavelength erbium-doped fiber ring laser using an intrinsic Fabry-Perot interferometer,” *Laser Phys.*, vol. 26, no. 10, p. 105105, 2016.
7. “A dual modality optical fiber sensor,” *J. Mod. Opt.*, vol. 340, no. October, pp. 1–6, 2017.
8. “Magnetic Field Sensing Based on Bi-Tapered Optical Fibers Using Spectral Phase Analysis,” *Sensors*, vol. 17, no. 10, p. 2393, Oct. 2017.
9. “Highly stable multi-wavelength erbium-doped fiber linear laser based on modal interference,” *Laser Phys.*, vol. 28, no. 35101, p. 7, 2018.
10. “Polarization Modulation Instability in All-Normal Dispersion Microstructured Optical Fibers with Quasi-Continuous Pump”, *IEEE Photonics J.* 866, p 1–1, 2019.

AII.3 Congresos Internacionales

11. “A tunable wavelength erbium doped fiber ring laser based on mechanically induced long-period fiber gratings,” *Proc. SPIE*, vol. 9586, pp. 958616–958618, 2015.
12. “Multi-parameter fiber optic sensing setup based on spectral-overlap using Fabry-Perot interferometers,” in *Proc. of SPIE*, 2017, vol. 10098, p. 100981Q.
13. “A switchable fiber laser based on an all-fiber Fabry-Perot filter,” *Proc. SPIE*, vol. 10083, p. 1008323, 2017.
14. “Experimental observation of polarization modulation instability in an all-normal Dispersion photonic crystal fiber,” *XII Reunión Nacional de Óptica*, ISBN (ed. digital): 978-84-09-03559-5, 2018.
15. “Multi-wavelength Fiber Laser Temperature Sensor Based on Modal Fiber Interferometer,” *Frontiers in Optics / Laser Science*, vol. 2, p. JTU3A.76., 2018
16. “Theoretical and Experimental Study of Polarization Modulation Instability in All-Normal Dispersion Photonic Crystal Fibers,” *Latin America Optics and Photonics Conference*, p. Tu4A.3, 2018.
17. “Polarization Modulation Instability in All-Normal Dispersion Microstructured Optical Fibers with Quasi-Continuous 1064 nm Pump”, 2019 Conf. Lasers Electro-

- Optics Eur. Eur. Quantum Electron. Conf., IEEE, 2019: pp. 1–1.
doi:10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8873134.
18. “Polarization modulation instability in all-normal dispersion microstructured optical fibers with sub-ns pumping”, Int. Conf. Transparent Opt. Networks, IEEE Computer Society, 2019. doi:10.1109/ICTON.2019.8840422.
 19. “Experimental observation of polarization modulation instability in all-normal dispersion photonic crystal fibers”, RIAO-OPTILAS-MOPM, 2019: pp. 110–111.
 20. “Tunable multiwavelength erbium-doped fiber ring laser selective by curvature”, RIAO-OPTILAS-MOPM, 2019: pp. 297–298

AII.4 Congresos Nacionales

21. “DISEÑO DE UN INTERFERÓMETRO MULTIMODAL,” Avance de la Ciencia en México, Centro de., M. E. Sánchez Morales, G. V. Vázquez García, A. Martínez García, C. E. Solano Sosa, and E. Gutiérrez Chávez, Eds. León, Guanajuato, México, 2017, pp. 3343–3348.

Referencias:

1. Rajan, G.; Semenova, Y.; Farrell, G.; Tofighi, S.; Bahrampour, A.; Pishbin, N.; Bahrampour, A. R.; Peters, K.; Pfeifer, K. B.; Thornberg, S. M.; Pinto, A. M. R.; Mathews, S.; Semenova, Y.; Chen, G. Y.; Brambilla, G.; Sengupta, D.; Webb, D. J.; Prado Pohl, A. de A.; Srinivaasan, B.; Venkitesh, D.; Izam Azmi, A.; Mohd Noor, M. Y.; Qi, H.; Liu, K.; Peng, G.-D.; Tao, S.; Mishra, V.; Rumakrishnan, M.; Culshaw, B. *Optical Fiber Sensors, Advanced Techniques and Applications*; Rajan, G., Ed.; CRS Press Taylor & Francis Group, 2015; ISBN 1482228254,9781482228250.
2. Song, W. Z.; Zhang, X. M.; Liu, a. Q.; Lim, C. S.; Yap, P. H.; Hosseini, H. M. M. Refractive index measurement of single living cells using on-chip Fabry-Pérot cavity. *Appl. Phys. Lett.* **2006**, *89*, 203901, doi:10.1063/1.2387965.
3. Wang, P.; Bo, L.; Semenova, Y.; Farrell, G.; Brambilla, G. Optical microfiber based photonic components and their applications in label-free biosensing. *Biosensors* **2015**, *5*, 471–499, doi:10.3390/bios5030471.
4. Galanzha, E. I.; Menyaev, Y. A.; Yadem, A. C.; Sarimollaoglu, M.; Juratli, M. A.; Nedosekin, D. A.; Foster, S. R.; Jamshidi-Parsian, A.; Siegel, E. R.; Makhoul, I.; Hutchins, L. F.; Suen, J. Y.; Zharov, V. P. In vivo liquid biopsy using Cytophone platform for photoacoustic detection of circulating tumor cells in patients with melanoma. *Sci. Transl. Med.* **2019**, *11*, eaat5857, doi:10.1126/scitranslmed.aat5857.
5. Xu, D.; Cao, Y.; Zhao, A.; Tong, Z. A microwave photonic filter based on multi-wavelength fiber laser and infinite impulse response. *Optoelectron. Lett.* **2016**, *12*, 325–328, doi:10.1007/s11801-016-6127-x.
6. Rodriguez Rodriguez, A. J.; Martínez Camacho, D. G.; Gonzalez Gutierrez, K.; May-Arrijoja, D. A.; Dominguez Cruz, R. F.; Matias Maestro, I. .; Ruiz Zamarreño, C. Rum adulteration detection using an optical fiber sensor based on multimodal interference (MMI) Detección de adulteración de ron empleando un sensor de fibra óptica. *Óptica pura y Apl.* **2013**, *46*, 345–352, doi:10.7149/OPA.46.4.345.
7. Massaroni, C.; Saccomandi, P.; Schena, E. Medical Smart Textiles Based on Fiber Optic Technology: An Overview. *J. Funct. Biomater.* **2015**, *6*, 204–221, doi:10.3390/jfb6020204.
8. Kepak, S.; Cubik, J.; Zavodny, P.; Siska, P.; Davidson, A.; Glesk, I.; Vasinek, V. Fibre optic track vibration monitoring system. *Opt. Quantum Electron.* **2016**, *48*, 354, doi:10.1007/s11082-016-0616-9.
9. Olyaei, S.; Naraghi, A.; Ahmadi, V. High sensitivity evanescent-field gas sensor based on modified photonic crystal fiber for gas condensate and air pollution monitoring. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **2014**, *125*, 596–600, doi:10.1016/j.ijleo.2013.07.047.
10. Chen, L. H.; Li, T.; Chan, C. C.; Menon, R.; Balamurali, P.; Shailender, M.; Neu, B.; Ang, X. M.; Zu, P.; Wong, W. C.; Leong, K. C. Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor. *Sensors Actuators, B Chem.* **2012**, *169*, 167–172, doi:10.1016/j.snb.2012.04.052.
11. Liu, Q.; Li, S.; Dou, C.; Wang, X. Defected-core photonic crystal fiber magnetic field sensor based on Sagnac interferometer. *Appl. Phys. B* **2017**, *123*, 65, doi:10.1007/s00340-017-6637-7.
12. Chan, T. H. T.; Yu, L.; Tam, H. Y.; Ni, Y. Q.; Liu, S. Y.; Chung, W. H.; Cheng, L. K. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation. *Eng. Struct.* **2006**, *28*, 648–659,

doi:10.1016/j.engstruct.2005.09.018.

13. Berkoff, T. A.; Kersey, A. D. Experimental demonstration of a fiber bragg grating accelerometer. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **1996**, *8*, 1677–1679, doi:10.1109/68.544716.
14. Wolfbeis, O. S. Fiber-Optic Chemical Sensors and Biosensors. *Anal. Chem.* **2004**.
15. X. D. Fan; White, I. M.; Shopova, S. I. ANALITICAL AND BIOANALITYCAL CHEMISTRY. **2008**.
16. Villatoro, J.; Minkovich, V. P.; Pruneri, V.; Badenes, G. Simple all-microstructured-optical-fiber interferometer built via fusion splicing. *Opt. Express* **2007**, *15*, 1491–1496, doi:10.1364/OE.15.001491.
17. Yuan, L.; Yang, J.; Liu, Z. A Compact Fiber-Optic Flow Velocity Sensor Based on a Twin-Core Fiber Michelson Interferometer. *IEEE Sens. J.* **2008**, *8*, 1114–1117, doi:10.1109/JSEN.2008.926873.
18. Choi, H. Y.; Park, K. S.; Park, S. J.; Paek, U.-C.; Lee, B. H.; Choi, E. S. Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Perot interferometer. *Opt. Lett.* **2008**, *33*, 2455–2457, doi:10.1364/OL.33.002455.
19. Nguyen, L. V.; Hwang, D.; Moon, S.; Moon, D. S.; Chung, Y. High temperature fiber sensor with high sensitivity based on core diameter mismatch. *Opt. Express* **2008**, *16*, 11369–11375, doi:10.1364/OE.16.011369.
20. Gao, X.; Yang, M.; Peng, J.; Lv, D. Miniature fiber-optic temperature sensor based on optical coating interference. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **2017**, *130*, 1014–1020, doi:10.1016/j.ijleo.2016.11.114.
21. Frazao, O.; Jesus, C.; Baptista, J. M.; Santos, J. L.; Roy, P. Fiber-optic interferometric torsion sensor based on a two-LP-mode operation in birefringent fiber. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2009**, *21*, 1277–1279, doi:10.1109/LPT.2009.2025870.
22. Jali, M. H.; Rahim, H. R. A.; Johari, M. A. M.; Hamid, S. S.; Yusof, H. H. M.; Thokchom, S.; Wang, P.; Harun, S. W. Optical characterization of different waist diameter on microfiber loop resonator humidity sensor. *Sensors Actuators A Phys.* **2019**, *285*, 200–209, doi:10.1016/j.sna.2018.11.025.
23. Liu, Z.; Li, Y.; Liu, Y.; Tan, Z.-W.; Jian, S. A Static Axial Strain Fiber Ring Cavity Laser Sensor Based on Multi-Modal Interference. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2013**, *25*, 2050–2053, doi:10.1109/LPT.2013.2280755.
24. Zhao, Y.; Deng, Z. Q.; Wang, Q. Fiber optic SPR sensor for liquid concentration measurement. *Sensors Actuators, B Chem.* **2014**, *192*, 229–233, doi:10.1016/j.snb.2013.10.108.
25. Guozhen, Y.; Yongqian, L.; Zhi, Y. A novel fiber Bragg grating acceleration sensor for measurement of vibration. *Optik (Stuttg).* **2016**, *127*, 8874–8882, doi:10.1016/j.ijleo.2016.06.105.
26. Bai, Y.; Yan, F.; Liu, S.; Wen, X. All fiber Fabry-Pérot interferometer for high-sensitive micro-displacement sensing. *Opt. Quantum Electron.* **2016**, *48*, 206, doi:10.1007/s11082-015-0323-y.
27. Chen, W. P.; Wang, D. N.; Xu, B.; Zhao, C. L.; Chen, H. F. Multimode fiber tip Fabry-Perot cavity for highly sensitive pressure measurement. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 1–6, doi:10.1038/s41598-017-00300-x.
28. Pu, S.; Luo, L.; Tang, J.; Mao, L.; Zeng, X. Ultrasensitive Refractive-Index Sensors Based on Tapered Fiber Coupler with Sagnac Loop. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2016**, *28*, 1073–1076, doi:10.1109/LPT.2016.2529181.
29. Jha, R.; Villatoro, J.; Badenes, G.; Pruneri, V. Refractometry based on a photonic

- crystal fiber interferometer. *Opt. Lett.* **2009**, *34*, 617–619.
30. Zhang, L.; Wang, D. N.; Member, S.; Liu, J.; Chen, H. F. Simultaneous Refractive Index and Temperature Sensing With Precise Sensing Location. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2016**, *28*, 891–894.
 31. Li, Z.; Wang, Y.; Liao, C.; Liu, S.; Zhou, J.; Zhong, X.; Liu, Y.; Yang, K.; Wang, Q.; Yin, G. Temperature-insensitive refractive index sensor based on in-fiber Michelson interferometer. *Sensors Actuators, B Chem.* **2014**, *199*, 31–35, doi:10.1016/j.snb.2014.03.071.
 32. Li, J.; Qiao, X.; Wang, R.; Rong, Q.; Bao, W.; Shao, Z.; Yang, T. Temperature-independent refractometer based on fiber-optic Fabry-Perot interferometer. *Opt. Lasers Eng.* **2016**, *79*, 16–21, doi:10.1016/j.optlaseng.2015.11.007.
 33. Silva, S.; Frazão, O. Multimode interference-based fiber sensor in a cavity ring-down system for refractive index measurement. *Opt. Laser Technol.* **2017**, *91*, 112–115, doi:10.1016/j.optlastec.2016.12.029.
 34. Fuentes-Fuentes, M. A.; May-Arrijoja, D. A.; Guzman-Sepulveda, J. R.; Torres-Cisneros, M.; Sánchez-Mondragón, J. J. Highly Sensitive Liquid Core Temperature Sensor Based on Multimode Interference Effects. *Sensors (Basel)*. **2015**, *15*, 26929–39, doi:10.3390/s151026929.
 35. Udd, E.; Taylor, H. F.; Michie, C.; Zhang, L.; Zhang, W.; Bennion, I.; Yin, S.; Yu, F. T. S.; Lee, B.; Jeong, Y.; Ruffing, P. B.; Peng, G. ; Chu, P. ; Rao, Y. J.; Huang, S. *Fiber Optic Sensors*; Yu, F. T. S., Yin, S., Eds.; Marcel Dekker, INC.: New York, USA, 2002; Vol. 20020456; ISBN 978-0-8247-0732-3.
 36. Born, M.; Wolf, E. *Principles of Optics: Electromagnetic theory of propagation*; Cambridge University Press, Ed.; 7th (expan.; UK, 2003;
 37. Huang, J.; Huang, S.; Shen, C.; Jin, Y. Simultaneous bending-curvature and temperature measurements based on a fiber Bragg grating and a Mach–Zehnder interferometer. *Opt. Eng.* **2018**, *57*, 1, doi:10.1117/1.OE.57.2.020501.
 38. Sun, C.; Dong, Y.; Wang, M.; Jian, S. Liquid level and temperature sensing by using dual-wavelength fiber laser based on multimode interferometer and FBG in parallel. *Opt. Fiber Technol.* **2018**, *41*, 212–216, doi:10.1016/j.yofte.2018.01.026.
 39. Jauregui-Vazquez, D.; Estudillo-Ayala, J. M.; Rojas-Laguna, R.; Vargas-Rodr, E.; Sierra-Hernandez, J. M.; Hernandez-Garcia, J. C.; Mata-Chavez, R. I. An all fiber intrinsic Fabry-Perot interferometer based on an air-microcavity. *Sensors (Switzerland)* **2013**, *13*, 6355–6364, doi:10.3390/s130506355.
 40. Vargas-Rodriguez, E.; Guzman-Chavez, A. D.; Cano-Contreras, M.; Gallegos-Arellano, E.; Jauregui-Vazquez, D.; Hernandez-Garcia, J. C.; Estudillo-Ayala, J. M.; Rojas-Laguna, R. Refractive index sensor based on a taper and an intrinsic micro Fabry-Perot interferometer. *Sensors (Basel)*. **2015**, *15*, 26128–42, doi:10.3390/s151026128.
 41. Jauregui-Vazquez, D.; Lopez-Dieguez, Y.; Sierra-Hernandez, J. M. M.; Perez-Maciél, M.; Avila-Garcia, M. S. S.; Vargas-Rodriguez, E.; Rojas-Laguna, R.; Estudillo-Ayala, J. M. M. Modified All-Fiber Fabry-Perot Interferometer and Its Refractive Index, Load, and Temperature Analyses. *IEEE Photonics J.* **2015**, *7*, 1–9, doi:10.1109/JPHOT.2015.2437374.
 42. Lopez-Dieguez, Y.; Estudillo-Ayala, J. M.; Jauregui-Vazquez, D.; Sierra-Hernandez, J. M.; Herrera-Piad, L. A.; Cruz-Duarte, J. M.; Hernandez-Garcia, J. C.; Rojas-Laguna, R. Multi-mode all Fiber Interferometer based on Fabry-Perot Multi-cavity and its Temperature Response. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **2017**, *147*, 232–239,

doi:10.1016/j.ijleo.2017.08.091.

43. Sierra-Hernandez, J. M.; Rojas-Laguna, R.; Vargas-Rodriguez, E.; Estudillo-Ayala, J. M.; Mata-Chavez, R. I.; Jauregui-Vazquez, D.; Hernandez-Garcia, J. C.; Andrade-Lucio, J. A.; Gutierrez-Gutierrez, J. C. A tunable multi-wavelength laser based on a Mach-Zehnder interferometer with photonic crystal fiber. *Laser Phys.* **2013**, *23*, 055105, doi:10.1088/1054-660X/23/5/055105.
44. Sierra-Hernandez, J. M.; Rojas-Laguna, R.; Vargas-Rodriguez, E.; Estudillo-Ayala, J. M.; Jauregui-Vazquez, D.; Guzmán-Chávez, a D.; Zaca-Moran, P.; Guzmán-Chavez, A. D.; Zaca-Moran, P. A tunable multi-wavelength erbium doped fiber laser based on a Mach-Zehnder interferometer and photonic crystal fiber. *Laser Phys.* **2013**, *23*, 125103, doi:10.1088/1054-660X/23/12/125103.
45. Castillo-Guzman, A.; Antonio-Lopez, J. E.; Selvas-Aguilar, R.; May-Arriola, D. .; Estudillo-Ayala, J.; LiKamWa, P. Widely tunable erbium-doped fiber laser based on multimode interference effect. *Opt. Express* **2010**, *18*, 591–597.
46. Gonzalez-Reyna, M. A.; Alvarado-Mendez, E.; Estudillo-Ayala, J. M.; Vargas-Rodriguez, E.; Sosa-Morales, M. E.; Sierra-Hernandez, J. M.; Jauregui-Vazquez, D.; Rojas-Laguna, R. Laser temperature sensor based on a fiber bragg grating. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2015**, *27*, 1141–1144, doi:10.1109/LPT.2015.2406572.
47. Agrawal, G. P. *Nonlinear Fiber Optics*; Fifth Edit.; Elsevier, 2013; ISBN 9780123970237.
48. Agrawal, G. P. *Fiber-Optic Communications Systems*; Third.; Wiley-Interscience: London, UK, 2008; ISBN 9780470611388.
49. THORLABS Optical Fiber Available online: https://www.thorlabs.com/images/TabImages/Undamaged_Fiber_End-A1_350.jpg (accessed on Oct 12, 2018).
50. Cantú, L. L. *Electricidad y Magnetismo para estudiantes de ciencias e ingeniería*;
51. Haxha, S.; Jhoja, J. Optical Based Noninvasive Glucose Monitoring Sensor Prototype. *IEEE Photonics J.* **2016**, *8*, doi:10.1109/JPHOT.2016.2616491.
52. Santos, J. L.; Farahi, F. *Handbook of Optical Sensors*; 2015; ISBN 9781118547663.
53. Carr, J. J.; Brown, J. M. Sensor Terminology. In *Introduction to Biomedical Equipment Technology*; 2013; pp. 1–11 ISBN 0138494312.
54. Malacara, D. ÓPTICA TRADICIONAL Y MODERNA Available online: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htm/sec_6.htm (accessed on Aug 23, 2016).
55. Meng, Q.; Dong, X. Optical fiber laser salinity sensor based on multimode interference effect. In *International Conference on Optical Instruments and Technology: Optical Sensors and Applications*; 2013; Vol. 9044, p. 90441J.
56. Huang, Y.; Wang, T.; Deng, C.; Zhang, X.; Pang, F.; Bai, X.; Dong, W.; Wang, L.; Chen, Z. A Highly Sensitive Intensity-Modulated Optical Fiber Magnetic Field Sensor Based on the Magnetic Fluid and Multimode Interference. *Hindawi J. Sensors* **2017**, *2017*.
57. Becker, P. .; Olsson, N. A.; Simpson, J. R. *Erbium doped fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*; Kelly, P. L., Kaminow, I., Agrawal, G. P., Eds.; Academic Press, 1999; ISBN 978-0-12-084590-3.
58. Alfano, R. .; Shapiro, S. . Emission in the region 4000 to 7000 °A via four-photon coupling in glass. *Phys. Rev. Lett.* **1970**, *24*, 584–588.
59. Dudley, J. M.; Genty, G.; Coen, S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. *Rev. Mod. Phys.* **2006**, *78*, 1135–1184, doi:10.1103/RevModPhys.78.1135.

60. Alfano, R. R. *The Supercontinuum Laser Source. Fundamentals with Updated References*; Alfano, R. R., Ed.; Second Edi.; Springer: New York, 2013; Vol. 53; ISBN 978-0-387-25097-7.
61. Birks, T. A.; Knight, J. C.; Russell, P. S. J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber. *Opt. Lett.* **1997**, *22*, 961, doi:10.1364/OL.22.000961.
62. Coen, S.; Chau, A. H. L.; Leonhardt, R.; Harvey, J. D.; Knight, J. C.; Wadsworth, W. J.; Russell, P. S. J. White-light supercontinuum generation with 60-ps pump pulses in a photonic crystal fiber. *Opt. Lett.* **2001**, *26*, 1356, doi:10.1364/OL.26.001356.
63. Sukhoivanov, I. A.; Iakushev, S. O.; Shulika, O. V.; Andrade-Lucio, J. A.; Díez, A.; Andrés, M. Supercontinuum generation at 800 nm in all-normal dispersion photonic crystal fiber. *Opt. Express* **2014**, *22*, 30234, doi:10.1364/OE.22.030234.
64. Humbert, G.; Wadsworth, W.; Leon-Saval, S.; Knight, J.; Birks, T.; St. J. Russell, P.; Lederer, M.; Kopf, D.; Wiesauer, K.; Breuer, E.; Stifter, D. Supercontinuum generation system for optical coherence tomography based on tapered photonic crystal fibre. *Opt. Express* **2006**, *14*, 1596, doi:10.1364/OE.14.001596.
65. Thorlabs High-Speed Fiber-Coupled Detectors Available online: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1297 (accessed on May 3, 2019).
66. THORLABS IO-F-980 Fiber Isolator User Guide Available online: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=IO-F-1550> (accessed on Dec 4, 2018).
67. THORLABS Isolator tutorial Available online: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6155 (accessed on Nov 5, 2019).
68. THORLABS WDM 980/1550 Available online: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=375 (accessed on Apr 3, 2019).
69. THORLABS Fiber Optic Coupler Available online: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=2421 (accessed on Apr 3, 2019).
70. THORLABS Optic circulator Available online: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=373 (accessed on Apr 3, 2019).
71. Thorlabs Manual Fiber Polarization Controllers User Guide Available online: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FPC560> (accessed on Apr 4, 2019).
72. Birks, T. A.; Li, Y. W. The Shape of Fiber Tapers. *J. Light. Technol.* **1992**, *10*, 432–438, doi:10.1109/50.134196.
73. Taheri Ghahrizjani, R.; Sadeghi, H.; Mazaheri, A. A Novel Method for onLine Monitoring Engine Oil Quality Based on Tapered Optical Fiber Sensor. *IEEE Sens. J.* **2016**, *16*, 3551–3555, doi:10.1109/JSEN.2016.2523805.
74. Tian, Y.; Wang, W.; Wu, N.; Zou, X.; Wang, X. Tapered Optical Fiber Sensor for Label-Free Detection of Biomolecules. *Sensors* **2011**, *11*, 3780–3790, doi:10.3390/s110403780.
75. QPHOTONICS QSDM-1550-1 Available online: <http://www.qphotonics.com/Fiber-coupled-superluminescent-diode-0.2mW-1550nm.html> (accessed on Nov 27, 2018).
76. Lopez-Dieguez, Y.; Estudillo-Ayala, J. M.; Jauregui-Vazquez, D.; Herrera-Piad, L.

- A.; Sierra-Hernandez, J. M.; Hernandez-Garcia, J. C.; Bienchetti, M.; Reyes-Ayona, J. R.; Rojas-Laguna, R. Tip Fiber-Optic Intermodal Interferometer for Refractive Index Sensing. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2018**, *30*, 15–18, doi:10.1109/LPT.2017.2771409.
77. Lopez-Dieguez, Y.; Jauregui-Vazquez, D.; Estudillo-Ayala, J. M.; Herrera-Piad, L. A.; Sierra-Hernandez, J. M.; Hernandez-Garcia, J. C.; Rojas-Laguna, R. DISEÑO DE UN INTERFERÓMETRO MULTIMODAL. In *Avance de la Ciencia en México*; Sánchez Morales, M. E., Vázquez García, G. V., Martínez García, A., Solano Sosa, C. E., Gutiérrez Chávez, E., Eds.; León, Guanajuato, México, 2017; pp. 3343–3348 ISBN 978-607-95228-8-9.
78. Yadav, T. K.; Narayanaswamy, R.; Bakar, M. H. A.; Kamil, Y. M.; Mahdi, M. A.; Abu Bakar, M. H.; Kamil, Y. M.; Mahdi, M. A. Single mode tapered fiber-optic interferometer based refractive index sensor and its application to protein sensing. *Opt. Express* **2014**, *22*, 22802–22807, doi:10.1364/OE.22.022802.
79. Hernandez-Arriaga, M. V.; Bello-Jimenez, M. A.; Rodriguez-Cobos, A.; Lopez-Estopier, R.; Andres, M. V. High Sensitivity Refractive Index Sensor Based on Highly Overcoupled Tapered Fiber-Optic Couplers. *IEEE Sens. J.* **2017**, *17*, 333–339, doi:10.1109/JSEN.2016.2629281.
80. Gong, H.; Chan, C. C.; Zhang, Y.; Wong, W.; Dong, X. Miniature refractometer based on modal interference in a hollow-core photonic crystal fiber with collapsed splicing. *J. Biomed. Opt.* **2011**, *16*, 017004, doi:10.1109/JSEN.2011.2171481.
81. Tripathi, S. M.; Bock, W. J.; Mikulic, P. A wide-range temperature immune refractive-index sensor using concatenated long-period-fiber-gratings. *Sensors Actuators B Chem.* **2017**, *243*, 1109–1114, doi:10.1016/j.snb.2016.12.012.
82. Chen, P.; Shu, X.; Cao, H.; Sugden, K. Ultra-sensitive refractive index sensor based on an extremely simple femtosecond-laser-induced structure. *Opt. Lett.* **2017**, *42*, 1157, doi:10.1364/OL.42.001157.
83. Chen, P.; Shu, X.; Cao, H. Novel compact and low-cost ultra-weak Fabry-Perot interferometer as highly sensitive refractive index sensor. *IEEE Photonics J.* **2017**, *9*, 1–1, doi:10.1109/JPHOT.2017.2732957.
84. Su, H.; Huang, X. G. Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions. *Sensors Actuators B Chem.* **2007**, *126*, 579–582, doi:10.1016/j.snb.2007.04.008.
85. Raji, Y. M.; Lin, H. S.; Ibrahim, S. A.; Mokhtar, M. R.; Yusoff, Z. Intensity-modulated abrupt tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature. *Opt. Laser Technol.* **2016**, *86*, 8–13, doi:10.1016/j.optlastec.2016.06.006.
86. Zhang, Y.; Yuan, L.; Lan, X.; Kaur, A.; Huang, J.; Xiao, H. High-temperature fiber-optic Fabry-Perot interferometric pressure sensor fabricated by femtosecond laser. *Opt. Lett.* **2013**, *38*, 4609–4612, doi:10.1364/OL.38.004609.
87. Liu, X.; Jiang, M.; Sui, Q.; Song, F. Temperature sensitivity characteristics of HCPCF-based Fabry-Perot interferometer. *Opt. Commun.* **2016**, *359*, 322–328, doi:10.1016/j.optcom.2015.09.080.
88. Jauregui-Vazquez, D.; Haus, J. W.; Negari, A. B. H.; Sierra-Hernandez, J. M.; Hansen, K. Bitapered fiber sensor: Signal analysis. *Sensors Actuators B Chem.* **2015**, *218*, 105–110, doi:10.1016/j.snb.2015.04.109.
89. Zhou, J.; Wang, Y.; Liao, C.; Sun, B.; He, J.; Yin, G.; Liu, S.; Li, Z.; Wang, G.; Zhong, X.; Zhao, J. Intensity modulated refractive index sensor based on optical fiber

- Michelson interferometer. *Sensors Actuators, B Chem.* **2015**, *208*, 315–319, doi:10.1016/j.snb.2014.11.014.
90. Yee, S. S. J. R. C. A fiber optic chemical sensor based on surface plasmon resonance. *Sensors Actuators B Chem.* **1993**, *12*, 213–220, doi:10.1016/0925-4005(93)80021-3.
91. Hernández-Arriaga, M. V.; Bello-Jiménez, M. A.; Rodríguez-Cobos, A.; Andrés, M. V. Experimental Investigation of Fused Biconical Fiber Couplers for Measuring Refractive Index Changes in Aqueous Solutions. *IEEE Sens. J.* **2016**, *16*, 132–136, doi:10.1109/JSEN.2015.2475320.
92. Zhao, Y.; Cai, L.; Li, X. G.; Meng, F. C. Liquid concentration measurement based on SMS fiber sensor with temperature compensation using an FBG. *Sensors Actuators, B Chem.* **2014**, *196*, 518–524, doi:10.1016/j.snb.2014.01.075.
93. Segur, J. Physical properties of glycerol and its solutions. *Aciscience.Org* **1953**, 1–27.
94. Johnson, P. B.; R.W.Christy Optical Constants of the Noble Metals. *Phys. Rev. B* **1972**, *6*, 4370–4379, doi:10.1016/j.susc.2018.02.016.
95. Cu Refractive Index Database Available online: <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Cu&page=Johnson> (accessed on Dec 11, 2018).
96. Zuowei Yin; Liang Gao; Shengchun Liu; Liang Zhang; Feixiang Wu; Lin Chen; Xiangfei Chen Fiber Ring Laser Sensor for Temperature Measurement. *J. Light. Technol.* **2010**, *28*, 3403–3408, doi:10.1109/JLT.2010.2086046.
97. Xuekun Bai; Dengfeng Fan; Shaofei Wang; Shengli Pu; Xianglong Zeng Strain Sensor Based on Fiber Ring Cavity Laser With Photonic Crystal Fiber In-Line Mach–Zehnder Interferometer. *IEEE Photonics J.* **2014**, *6*, 1–8, doi:10.1109/JPHOT.2014.2332454.
98. Linjun Liang; Guobin Ren; Bin Yin; Wanjin Peng; Xiao Liang; Shuisheng Jian Refractive Index and Temperature Sensor Based on Fiber Ring Laser With STCS Fiber Structure. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2014**, *26*, 2201–2204, doi:10.1109/LPT.2014.2350151.
99. Liu, Z.; Tan, Z.; Yin, B.; Bai, Y.; Jian, S. Refractive index sensing characterization of a singlemode–claddingless–singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser. *Opt. Express* **2014**, *22*, 5037, doi:10.1364/OE.22.005037.
100. Zhang, Q.; Chang, J.; Wang, Q.; Wang, Z.; Wang, F.; Qin, Z. Acousto-Optic Q-Switched Fiber Laser-Based Intra-Cavity Photoacoustic Spectroscopy for Trace Gas Detection. *Sensors* **2017**, *18*, 42, doi:10.3390/s18010042.
101. Boroon, M.; Hitam, S.; Mahdi, M. A.; Sahbudin, R. K. Z.; Seyedzadeh, S. Performance of Multi-Wavelength Erbium Doped Fiber Laser on Free Space Optical Medium. In *IEEE 5th International Conference on Photonics*; 2014; pp. 2–4.
102. He, W.; Zhu, L.; Dong, M.; Lou, X.; Luo, F. Wavelength-switchable C-band erbium-doped fibre laser incorporating all-fibre Fabry–Perot interferometer fabricated by chemical etching. *J. Mod. Opt.* **2018**, *65*, 818–824, doi:10.1080/09500340.2017.1402965.
103. Salceda-Delgado, G.; Martínez-Rios, A.; Sierra-Hernandez, J. M.; Rodríguez-Carreón, V. C.; Toral-Acosta, D.; Selvas-Aguilar, R.; Álvarez-Tamayo, R. I.; Castillo-Guzman, A. A.; Rojas-Laguna, R. Reconfiguration of the multiwavelength operation of optical fiber ring lasers by the modifiable intra-cavity induced losses of an in-fiber tip probe modal Michelson interferometer. *Laser Phys.* **2018**, *28*, 035107, doi:10.1088/1555-

6611/aaa02e.

104. Mirza, M. A.; Stewart, G. Theory and design of a simple tunable Sagnac loop filter for multiwavelength fiber lasers. *Appl. Opt.* **2008**, *47*, 5242–52, doi:10.1364/AO.47.005242.
105. Sun, G.; Moon, D. S.; Lin, A.; Han, W.-T.; Chung, Y. Tunable multiwavelength fiber laser using a comb filter based on erbium-ytterbium co-doped polarization maintaining fiber loop mirror. *Opt. Express* **2008**, *16*, 3652, doi:10.1364/OE.16.003652.
106. QPHOTONICS, L. QFBGLD-980-500 Available online: <http://www.qphotonics.com/Wavelength-stabilized-single-mode-fiber-coupled-laser-diode-500mW-980nm-QFBGLD-980-500.html> (accessed on Feb 25, 2019).
107. Luo, A.-P.; Luo, Z.-C.; Xu, W.-C. Tunable and switchable multiwavelength erbium-doped fiber ring laser based on a modified dual-pass Mach-Zehnder interferometer. *Opt. Lett.* **2009**, *34*, 2135, doi:10.1364/OL.34.002135.
108. Chen, D.; Qin, S.; He, S. Channel-spacing-tunable multi-wavelength fiber ring laser with hybrid Raman and Erbium-doped fiber gains. *Opt. Express* **2007**, *15*, 930–935.
109. Han, M.; Li, X.; Zhang, S.; Han, H.; Liu, J.; Yang, Z. Tunable and channel spacing precisely controlled comb filters based on the fused taper technology. *Opt. Express* **2018**, *26*, 265, doi:10.1364/OE.26.000265.
110. Lee, H. J.; Kim, S.-J.; Ko, M. O.; Kim, J.-H.; Jeon, M. Y. Tunable, multiwavelength-swept fiber laser based on nematic liquid crystal device for fiber-optic electric-field sensor. *Opt. Commun.* **2018**, *410*, 637–642, doi:10.1016/j.optcom.2017.11.029.
111. Li, Y.; Tian, J.; Quan, M.; Yao, Y. Tunable Multiwavelength Er-Doped Fiber Laser With a Two-Stage Lyot Filter. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2017**, *29*, 287–290, doi:10.1109/LPT.2016.2644672.
112. Zhou, M.; Ren, F.; Li, J.; Ge, D.; Zhang, Y.; Chen, Z.; He, Y. Tunable Multi-Wavelength EDF Laser Based on Sagnac Interferometer with Weakly-Coupled FMF Delay Line. In *Optical Fiber Communication Conference*; 2018; pp. 7–9.
113. Ummy, M. A.; Madamopoulos, N.; Joyo, A.; Kouar, M.; Dorsinville, R. Tunable multi-wavelength SOA based linear cavity dual-output port fiber laser using Lyot-Sagnac loop mirror. *Opt. Express* **2011**, *19*, 3202, doi:10.1364/oe.19.003202.
114. Wang, Z.; Wang, T.; Ma, W.; Jia, Q.; Su, Q.; Zhang, P. Tunable multiwavelength Brillouin-Raman fiber laser in a linear cavity with spectrum reshaped by Rayleigh scattering. *Opt. Fiber Technol.* **2017**, *36*, 327–333, doi:10.1016/j.yofte.2017.04.004.
115. Yang, J.; Tjin, S. C.; Ngo, N. Q. Multiwavelength tunable fiber ring laser based on sampled chirp fiber Bragg grating. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **2004**, *16*, 1026–1028, doi:10.1109/LPT.2004.824632.
116. Lopez-Dieguez, Y.; Estudillo-Ayala, J.; Jauregui-Vazquez, D.; Herrera-Piad, L.; Sierra-Hernandez, J.; Garcia-Mina, D.; Gallegos-Arellano, E.; Hernandez-Garcia, J.; Rojas-Laguna, R. Erbium Ring Fiber Laser Cavity Based on Tip Modal Interferometer and Its Tunable Multi-Wavelength Response for Refractive Index and Temperature. *Appl. Sci.* **2018**, *8*, 1337, doi:10.3390/app8081337.
117. Lopez-Dieguez, Y.; Estudillo-Ayala, J. M.; Jauregui-Vazquez, D.; Herrera-Piad, L. A.; Sierra-Hernandez, J. M.; Garcia-Mina, D.; Hernandez-Garcia, J. C.; Gatelum-Barrios, A.; Rojas-Laguna, R. Multi-wavelength Fiber Laser Temperature Sensor Based on Modal Fiber Interferometer. In *Frontiers in Optics / Laser Science*; OSA: Washington, D.C., 2018; Vol. 2, p. JTU3A.76.

118. E Delacruz-Mendoza; Lopez-Diequez, Y.; Herrera-Piad, L. A.; Estudillo-Ayala, J. M.; Jauregui-Vazquez, D.; Sierra-Hernandez, J. M.; Hernandez-Garcia, J. C.; Rojas-Laguna, R. Tunable multiwavelength erbium-doped fiber ring laser selective by curvature. In *RAIO-OPTILAS-MOPM*; 2019; pp. 297–298.
119. Lee, J. Y.; Kim, D. Y. Versatile chromatic dispersion measurement of a single mode fiber using spectral white light interferometry. *Opt. Express* **2006**, *14*, 11608–11615.
120. Hlubina, P. Dispersive white-light spectral interferometry to measure distances and displacements. *Opt. Commun.* **2002**, *212*, 65–70.
121. Hlubina, P. White-light spectral interferometry with the uncompensated Michelson interferometer and the group refractive index dispersion in fused silica. *Opt. Commun.* **2001**, *193*, 1–7, doi:10.1016/S0030-4018(01)01235-4.
122. Pelayo, J.; Paniello, J.; Villuendas, F. Chromatic dispersion characterization in short single-mode fibers by spectral scanning of phase difference in a Michelson interferometer. *J. Light. Technol.* **1988**, *6*, 1861–1865, doi:10.1109/50.9256.
123. Saitoh, K.; Koshiba, M. Empirical relations for simple design of photonic crystal fibers. *Opt. Express* **2005**, *13*, 267, doi:10.1364/OPEX.13.000267.
124. Loredó-Trejo, A.; Lopez-Diequez, Y.; Velázquez, L.; Díez, A.; Andrés, M. V. Theoretical and Experimental Study of Polarization Modulation Instability in All-Normal Dispersion Photonic Crystal Fibers. In *Latin America Optics and Photonics Conference*; OSA: Washington, D.C., 2018; p. Tu4A.3.
125. Loredó-Trejo, A.; Lopez-Diequez, Y.; Velázquez-Ibarra, L.; Díez, A.; Silvestre, E.; Andrés, M. V. Experimental observation of polarization modulation instability in all-normal dispersion photonic crystal fibers. In *RAIO-OPTILAS-MOPM*; 2019; pp. 110–111.
126. Loredó-Trejo, A.; Lopez-Diequez, Y.; Velázquez-Ibarra, L.; Díez, A.; Silvestre, E.; Estudillo-Ayala, J. M.; Andrés, M. V. Polarization Modulation Instability in All-Normal Dispersion Microstructured Optical Fibers with Quasi-Continuous Pump. *IEEE Photonics J.* **2019**, *866*, 1–1, doi:10.1109/JPHOT.2019.2944063.
127. Loredó-Trejo, A.; Lopez-Diequez, Y.; Velázquez-Ibarra, L.; Díez, A.; Silvestre, E.; Andrés, M. V. Polarization modulation instability in all-normal dispersion microstructured optical fibers with sub-ns pumping. In *International Conference on Transparent Optical Networks*; IEEE Computer Society, 2019; Vol. 2019-July.
128. Loredó-Trejo, A.; Lopez-Diequez, Y.; Velázquez-Ibarra, L.; Díez, A.; Silvestre, E.; Andrés, M. V. Polarization Modulation Instability in All-Normal Dispersion Microstructured Optical Fibers with Quasi-Continuous 1064 nm Pump. In *2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*; IEEE, 2019; pp. 1–1.
129. Lopez-Diequez, Y.; Velázquez-Ibarra, L.; Loredó-Trejo, A.; Díez, A.; Andrés, M. V. *Experimental observation of polarization modulation instability in an all-normal dispersion photonic crystal fiber.*; 2018; ISBN 978-84-09-03559-5.