

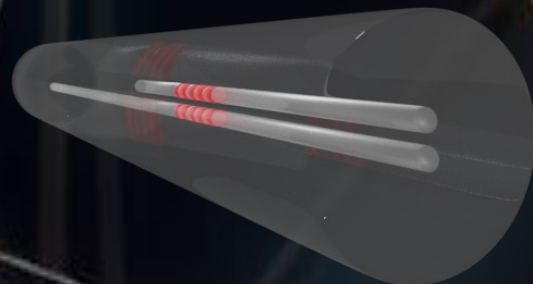
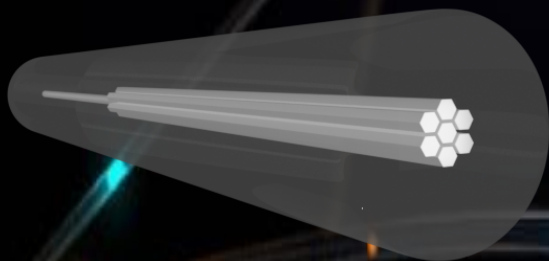
Nuevos esquemas de sensores puntuales de fibra óptica para la detección simultánea de múltiples parámetros

José Angel Flores Bravo

Doctorado en Electrónica y Telecomunicaciones

En la

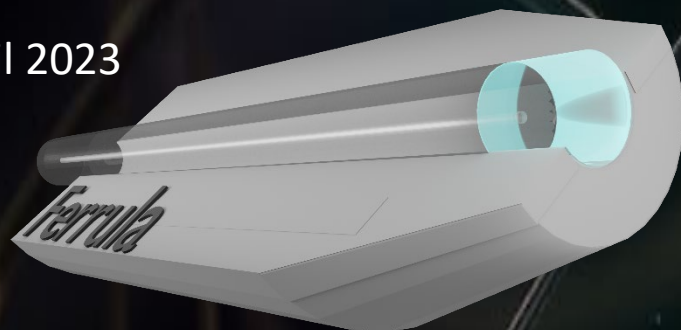
Universidad del País Vasco UPV/EHU



eman ta zabal zazu



Bilbao, Abril 2023



Nuevos esquemas de sensores puntuales de fibra óptica para la detección simultánea de múltiples parámetros

José Angel Flores Bravo

Doctorado en Electrónica y Telecomunicaciones

En la

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

Universidad del País Vasco UPV/EHU

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Directores

Agustín Joel Villatoro Bernardo

Joseba Andoni Zubia Zaballa

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi agradecimiento al investigador Joel Villatoro por su confianza y apoyo incondicional durante estos años de formación, por compartir sus conocimientos de manera profesional e invaluable, por su dedicación perseverancia y pasión. Gracias por la oportunidad de crecimiento profesional, por su correcta orientación, cambio mi vida de forma positiva, estoy agradecido y orgulloso de haber concluido el presente trabajo con tan ejemplar persona.

Mi más sentir de gratitud por creer en mí.

A Joseba Zubia por darme la oportunidad de formar parte del Grupo de Fotónica Aplicada APG-FAT y por el apoyo incondicional para mi formación doctoral. Así mismo, quiero agradecer a los miembros del Grupo de Fotónica Aplicada APG-FAT, en especial Asun Illarramendi por su aportación a la presente tesis, me ha ayudado y aconsejado siempre de forma positiva.

A mis padres, por ser mis pilares y mi fuerza de seguir adelante, ustedes han sido siempre el motor que impulsa mis sueños y esperanzas, gracias por siempre estar a mi lado en los días más difíciles, por todo su apoyo incondicional. Siempre han sido mis mejores guías de vida. Les dedico a ustedes este logro amados padres, como una meta más conquistada. Orgulloso de tenerlos como mis padres y que estén a mi lado en cada etapa de mi vida.

A mis abuelos, por sus sabios consejos y estar en todo momento para mí y conmigo, la distancia no ha sido una limitante para estar siempre conmigo. A ustedes les dedico esta meta, que sin duda sin mis queridos abuelos no estaría en este punto. Gracias desde el fondo de mi corazón.

Para concluir, no puedo terminar sin mencionar a mi prometida. Me siento afortunado de tenerte como mi compañera de vida. Eres una persona muy especial y genuina, por tu amor, atención, apoyo y cada esfuerzo que estás haciendo para crecer juntos. Gracias por compartir sueños y metas. Te amo.

Resumen

Los sensores basados en fibra óptica han alcanzado una madurez en entornos industriales gracias a su mayor versatilidad y rendimiento frente a los sensores tradicionales, por lo que se han convertido en una alternativa viable y prometedora. Estos sensores tienen aplicaciones en sectores tan diversos como la salud, telecomunicaciones, seguridad, espaciales, aeronáuticas, entre otras, por lo tanto, los sensores de fibra óptica se han vuelto prácticamente indispensables para todas las ramas de la industria. De hecho, no hay área industrial que pueda prescindir de la medición, las pruebas, la supervisión o la automatización.

En esta tesis se presenta como un compendio de artículos publicados. Su estructura consta de una primera sección de síntesis que incluye una introducción al tema de la investigación, la descripción del marco teórico y las herramientas metodológicas utilizadas para tal fin, la definición de la hipótesis y los objetivos que se persiguen. Así mismo un resumen y discusión de los resultados. En la segunda sección se presentan las conclusiones de la investigación realizada durante la tesis, así como las futuras líneas de investigación. Por último, en la tercera sección, se mencionan las contribuciones durante la tesis que incluyen una patente europea, trabajos presentados en congresos internacionales, tres artículos publicados en revistas especializadas. Esto es lo que ha permitido presentar esta tesis como un compendio de artículos.

La investigación descrita en esta tesis se divide en dos líneas, en ambas se explican en detalle el diseño, fabricación y prueba de cada sensor. En la primera, se explica el desarrollo de un sensor de índice de refracción con un gran rango de medición e independencia a la temperatura basado en un interferómetro Fabry Perot. Dicha investigación y sus resultados han dado lugar a una patente europea y a un artículo científico que se incluyen en el Artículo 1 del Anexo.

En la segunda parte se describen dos sensores basados en fibras multi-núcleo fuertemente acopladas, MCF por sus siglas en inglés. Esta tecnología consiste en excitar y recombinar solo dos modos de luz en un segmento corto de fibra óptica MCF. El primer sensor es capaz de medir dos variables simultáneamente (temperatura e índice de refracción). El segundo sensor se basa en la inscripción de redes de Bragg en una fibra MCF, el cual tiene la capacidad de medir curvatura con independencia a la temperatura, con una aplicación en la monitorización de vibraciones (curvatura cíclica). Sus respectivos resultados se incluyen en los artículos 2 y 3 del Anexo.

Motivación de la tesis

La principal motivación de la presente tesis es realizar sensores de fibra óptica que sean innovadores y de vanguardia a nivel internacional, para ello se hizo un estudio exhaustivo en su diseño, simulación y fabricación. Dando como resultados sensores de alta calidad y reproducibilidad, con propiedades como la fiabilidad, robustez, fáciles de operar, bajo coste, reutilizables, interrogación simultánea, no necesitan otro sensor de referencia, nuevas formas de procesar la señal, eliminar la ambigüedad y capaces de ofrecer un mejor rendimiento en comparación con soluciones ópticas o electrónicas actuales. Uno de los grandes retos actuales en sensores de fibra óptica es conseguir compensar los efectos de la temperatura. Actualmente se utiliza otro sensor u otro mecanismo de referencia para compensar la temperatura. Consiguiendo así una nueva generación de sensores de fibra óptica que proporcionarán otra manera de ver los sensores actuales.

Contenido de la investigación

En la presente tesis se centra en el diseño, fabricación y pruebas de diferentes sensores interferométricos puntuales innovadores y de vanguardia a nivel internacional.

En la actualidad existen dos mecanismos principales para implementar sensores interferométricos de fibra óptica puntuales. En uno de ellos, la luz guiada en la fibra óptica se divide y se recombina mediante acopladores o circuladores de fibra óptica, estos interferómetros son versiones de fibra de los interferómetros clásicos Fabry-Perot y Mach-Zehnder. El otro mecanismo más reciente, consiste en excitar y recombinar dos o más modos en un segmento corto de fibra óptica multimodal. En este último caso, los interferómetros se denominan interferómetros modales y son excelentes candidatos para diferentes aplicaciones de detección.

En el marco teórico abordaremos los conceptos básicos de los sensores interferométricos aquí propuestos; se discutirán varios ejemplos, desde el interferómetro clásico Mach Zehnder, Michelson, Sagnac y Fabry-Perot. Así como las diferentes técnicas de modulación de la luz. Se brindará una descripción general de los diferentes tipos de sensores de fibra interferométricos clásicos junto con estructuras multinúcleo con sus diversas aplicaciones.

Continuará con una discusión de diferentes técnicas para implementar interferómetros Fabry-Perot microscópicos, así mismo, interferómetros modales compactos con fibras multinúcleo. Se discutirá el principio de operación de tales interferómetros junto con su fabricación y aplicaciones para monitorizar diferentes parámetros físicos. Así como sus diferentes

mecanismos para procesar los patrones de interferencia generados por sensores interferométricos Fabry-Perot, multinúcleo en combinación con redes Bragg. Se discutirán los avances con la generación de dichos sensores interferométricos puntuales que destacan sobre todo por ser fiables, de bajo coste, no necesitan otro sensor de referencia y cuentan con alta reproducibilidad.

En esta tesis se describe el principio de operación, el diseño, la fabricación, las aplicaciones, la posible comercialización y los desafíos futuros de los sensores interferométricos de fibra óptica puntuales. Dichos sensores se caracterizan principalmente por su ultra alta sensibilidad, lo que puede ser determinantes para detectar parámetros críticos incluso en entornos desafiantes, son importantes en una gran variedad de aplicaciones, y se pueden combinar con el internet de las cosas IoT. Dada la viabilidad comercial para configuraciones de detección de fibra óptica más maduras como los sensores interferométricos Fabry-Perot (FPI), así como el futuro de las estructuras de fibra óptica multinúcleo (MCFI), como sensores con capacidad de detección simultánea de dos o más parámetros a medir. Además se pueden fabricar dependiendo la necesidad, esto es sin duda una tecnología clave y muy prometedora.

Tabla de contenido

1	Sección 1. Síntesis	1
1.1	Introducción	1
1.2	Marco teórico.....	2
1.2.1	Sensor de fibra óptica	2
1.2.2	Interferómetro Mach Zehnder, Michelson, Sagnac y Fabry-Perot .	7
1.2.3	Técnicas de modulación en función del parámetro a medir.	15
1.2.4	Tipos de fibras ópticas para sensores interferométricos.....	17
1.2.5	Sensores de fibra óptica puntuales.....	19
1.3	Refractómetro Fabry-Perot de ultra amplio rango	20
1.3.1	Introducción	20
1.3.2	Hipótesis y objetivos.....	22
1.3.3	Fabricación del dispositivo y montaje de interrogación.....	22
1.3.4	Principio de operación	24
1.3.5	Resumen y discusión	28
1.4	Sensores basados en fibras con núcleos fuertemente acoplados....	29
1.5	Sensor de detección dual con fibra óptica multinúcleo	30
1.5.1	Introducción	30
1.5.2	Hipótesis y objetivos.....	31
1.5.3	Fabricación del Dispositivo y montaje de interrogación	31
1.5.4	Resumen y discusión	37
1.6	Sensor con dos núcleos y rejillas FBG inscrita	38
1.6.1	Introducción	39
1.6.2	Hipótesis y objetivos.....	40
1.6.3	Fabricación del dispositivo	40
1.6.4	Principio de operación	42
1.6.5	Resumen y discusiones	48
2	Sección 2. Conclusiones de la tesis	57
3	Sección 3. Anexos.....	60

1 Sección 1. Síntesis

1.1 Introducción

Un sensor es un dispositivo que permite percibir cantidades físicas y produce una transducción a la salida, donde la salida del sensor es en función de la variable a medir, comúnmente se emplea transductor y sensor como sinónimos, sin embargo, un transductor es un medio donde la salida y la entrada no son señales homogéneas, aunque una es función de la otra, estas no son iguales. Generalmente se amplía el término sensor para referirse al transductor de entrada y actuador para referirse al transductor de salida. Algunas de sus principales características de cualquier sensor son:

Exactitud: Se refiere a que tan cerca del valor real se encuentra el valor medido. En términos estadístico, la exactitud está relacionada con el sesgo de una estimación. Cuanto menor es el sesgo más exacto es una estimación.

Precisión: Precisión se refiere a la dispersión del conjunto de valores obtenidos de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad es la desviación estándar de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella.

Repetitividad: Diferencia entre varias medidas realizadas en las mismas condiciones en un periodo de tiempo.

Resolución: Detección del mínimo cambio en un parámetro por medio del sensor.

Según el tipo de variable que pueda percibir e interpretar un sensor, se pueden definir varios tipos. Cada uno de ellos tiene propiedades únicas que los hacen útiles en escenarios muy específicos. Por ejemplo los sensores de temperatura, presión, flujo, nivel, distancia, índice de refracción, humedad, posición, proximidad, sonido, velocidad, magnéticos, ópticos, por mencionar algunos. Por lo tanto, al planificar un sistema de detección se deben estudiar para cada caso de forma independiente que tipo de sensor, la fuente de alimentación y su interrogación necesaria para dicho sistema. Los sensores juegan un papel vital en la industria, ya que recopilan e implementan datos precisos en los procesos de fabricación o procesos de monitorización, para mejorar la calidad del producto en la industria o coleccionar datos en tiempo real para toma de decisiones.

Los sensores de fibra óptica suelen ser mucho más caros que los sensores electrónicos y su equipo de interrogación suele ser más complejo que el de los sensores electrónicos. En el

presente trabajo proponemos nuevos esquemas y formas de detección disminuyendo los costes de interrogación y fabricación de los sensores de fibra óptica.

1.2 Marco teórico

1.2.1 Sensor de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica son aquellos que en la medida de la magnitud se realiza desde el cambio que produce en la señal luminosa. De este modo se distinguen distintos tipos de sensores ópticos atendiendo a la actuación de la magnitud sobre la amplitud, intensidad, longitud de onda, fase e interferometría.

Los sensores de fibra óptica sirven para coleccionar datos (información) del ambiente o de los dispositivos donde están colocados y mediante la emergente tecnología de internet de las cosas (IoT) pueden proporcionar dicha información en tiempo real. Los sensores hacen inteligentes, seguros, eficientes energéticamente a los dispositivos, maquinas o estructuras. Por estas razones, los sensores son la base del emergente mundo inteligente.

Los sensores basados en fibras ópticas han tenido una gran aceptación en los últimos años. De acuerdo a recientes estudios realizados por BCC Research, el mercado global de los sensores de fibra óptica se estima en unos 4.9 billones de dólares en el año 2025 [1]. Por lo que es una tecnología clave para el siglo 21.

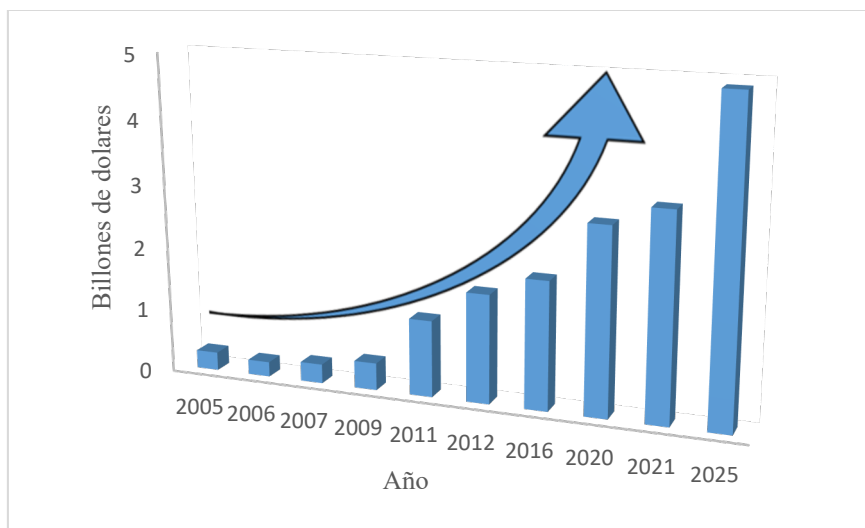


Tabla 1. Mercado global de los sensores de fibra óptica

En los últimos años, los interferómetros de fibra óptica han pasado a ser la base de una nueva generación de sensores ópticos. El sensor interferométrico de fibra óptica se basa en la medida de un parámetro físico por medio de la modulación de fase que este parámetro produce en la señal óptica.

El cambio en la fase óptica de un haz que se propaga por una fibra óptica de longitud L está definido por:

$$\phi = \beta L \quad (1)$$

Donde β es la constante de propagación y se denota en la siguiente ecuación

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad (2)$$

Donde n es el índice efectivo del modo y λ la longitud de onda de la luz en el vacío. Al aplicar un estímulo a la fibra, la fase varía y esta variación es de la forma

$$\Delta\phi = \beta\Delta L + L\Delta\beta \quad (3)$$

Donde $\beta\Delta L$ es la variación de fase que se produce al cambiar físicamente la longitud de la fibra en consecuencia a una expansión o compresión de la fibra. $L\Delta\beta$ es la variación de fase que producen los cambios de tensión inducida en la constante de propagación.

Así mismo para la variación de temperatura tenemos

$$\frac{\Delta\phi}{L\Delta T} = \beta \frac{\partial L}{\partial T} + L \frac{\partial \beta}{\partial T} \quad (4)$$

Y de la ecuación (2);

$$\frac{\Delta\phi}{L\Delta T} = \frac{2\pi n}{\lambda} \left[\left(\frac{\partial L}{\partial T} \right) \left(\frac{n}{L} \right) + \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \right] \quad (5)$$

El primer término corresponde a la expansión térmica de la fibra y el segundo al cambio que se produce en el índice de refracción debido al cambio de temperatura.

En el proceso de detección, es vital utilizar una tecnología de interferencia adecuada que permita una medición precisa del parámetro de detección, mientras que al mismo tiempo el rendimiento de un sensor de fibra (sensibilidad, resolución, etc.) también depende de los elementos de detección, es decir, la fibra óptica utilizada.

Para ellos realizamos un estudio acerca de la luz que se propaga a lo largo de una fibra óptica, se puede caracterizar por sus diferentes propiedades: intensidad, fase, longitud de onda y polarización. Cuando la luz al interactuar con el entorno, experimenta un cambio, al menos uno de estos parámetros cambia en consecuencia. Al analizar este cambio, se puede obtener información relacionada al parámetro a medir. Entonces, la eficiencia de un sensor de fibra óptica depende de su capacidad para discernir la variable en cuestión de manera confiable y precisa a esto se le conoce comúnmente como fiabilidad de un sensor.

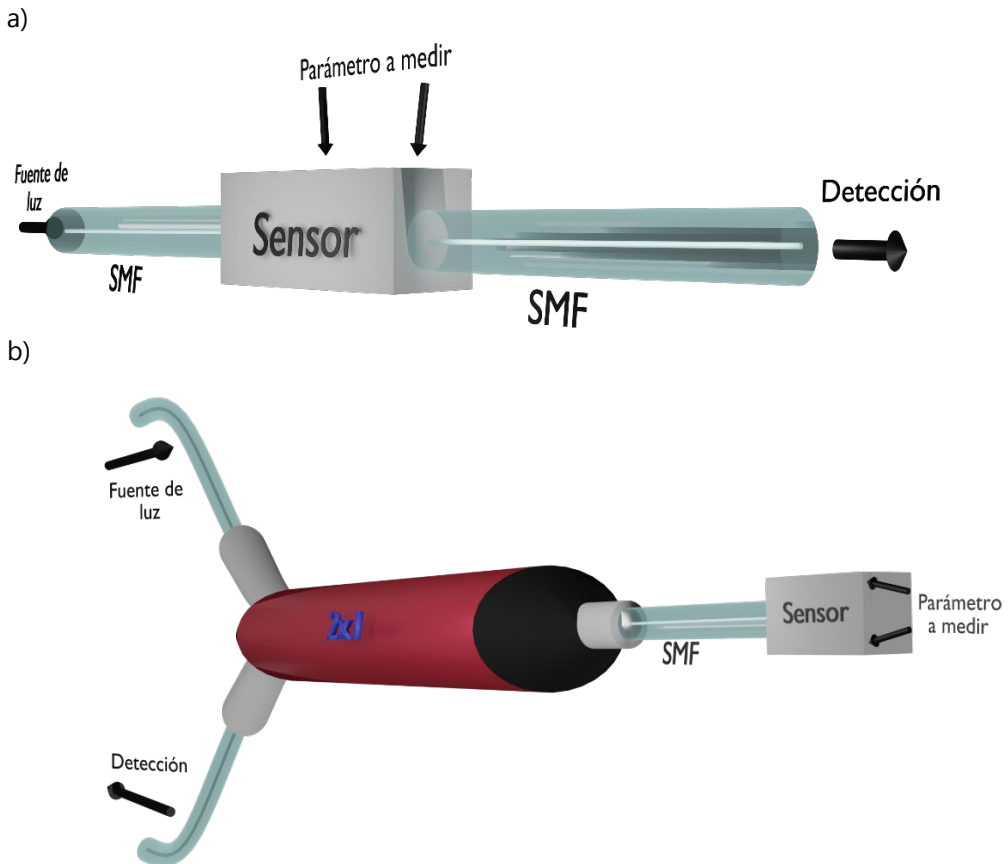
Los sensores de fibra óptica se pueden distinguir, en base a su topografía y a la configuración que adoptan, como sensores: puntuales, quasi-distribuidos (sensores puntuales multiplexados) o sensores distribuidos. Un sensor puntual normalmente tiene una porción sensitiva situada en alguna zona específica de la fibra óptica. Un sensor multiplexado consiste en dos o más regiones sensitivas puntuales a lo largo de la fibra donde cada parte puede detectar el mismo o diferente parámetro. Los sistemas distribuidos emplean la longitud completa de la fibra óptica para medir uno o más parámetros externos los cuales pueden estar en el orden de varias decenas de kilómetros.

Además se puede hacer una clasificación sobre los sensores de fibra óptica separando los sensores intrínsecos y extrínsecos. Por un lado, en los sensores intrínsecos, la alteración o modulación de la luz se produce por un efecto interno en la fibra. Comúnmente, estos efectos son absorción, dispersión o fluorescencia [2]. En cambio, en los sensores extrínsecos puntuales, en los cuales nos centraremos en la presente tesis, la alteración o modulación de la luz está provocada por un efecto (o efectos) desde el exterior de la fibra.

Para diseñar sensores de fibra extrínsecos puntuales, existen algunas tecnologías bien establecidas, que incluyen redes de Bragg, interferometría de Fabry-Perot y la más reciente tecnología de fibras multinúcleos. Con dichas tecnologías se pueden medir con precisión parámetros como la temperatura, vibración, rotación, desplazamiento, índice de refracción, velocidad, aceleración, torsión, entre otros. La fabricación, el principio de funcionamiento y las aplicaciones de los sensores basados en tales técnicas se analizan con detalle en la literatura [3].

La estructura general de un sistema sensor de fibra óptica en transmisión y reflexión puntual se muestra en la Figura 1. Consta de una fuente de luz (láser, LED, diodo láser, etc.), fibra

óptica, elemento sensor o modulador del haz de luz (que puede transducir la medida y una señal óptica), un fotodetector y electrónica de procesamiento de señales (osciloscopio, analizador de espectro óptico OSA, etc.).



Figuras 1 La estructura general de un sistema sensor de fibra óptica en (a) transmisión (b) Reflexión

En el presente trabajo nos enfocaremos en los sensores puntuales como se representa en la figura 1 b), estos presentan ventajas que los hacen únicos; éstas incluyen peso ligero, tamaño pequeño en el orden de micrómetros, alta sensibilidad, amplio rango dinámico, mayor resolución, inmunidad a la corrosión, gran ancho de banda, dureza, elasticidad, inmunidad a la interferencia electromagnética, pueden trabajar con altas temperaturas debido al punto de fusión del sílice, alrededor de 1500°C. Sin embargo, actualmente tienen retos aun por superar, los principales son reducir sus costes de interrogación y fabricación, otro sensor de referencia, nuevas formas de procesar la señal, alta reproducibilidad de fabricación, medir dos

parámetros simultáneamente, nuevos equipos de medición de alta resolución con bajo precio, fiabilidad, robustez, fáciles de operar, reutilizables. Otro de los grandes retos actuales es conseguir compensar los efectos de la temperatura. Actualmente se utiliza otro sensor u otro mecanismo de referencia para compensar la temperatura. En esta tesis presentaremos diferentes alternativas que permiten solucionar los problemas de los sensores de fibra óptica puntuales antes mencionados.

Los sensores de fibra óptica interferométricos son los más empleados como sensores locales por su alta sensibilidad que proporcionan en la medida. Esta técnica está basada en la detección del cambio de fase inducido en la luz que se propaga a lo largo de una fibra óptica. De este modo, la luz emitida por una fuente se divide en dos caminos guiados a través de una única fibra o de dos fibras, dependiendo de la configuración del interferómetro; uno de ellos es empleado como referencia, mientras que el otro sirve para medir la magnitud en cuestión. Los haces de luz se recombinan para interferir coherentemente dando lugar a un patrón de interferencia el cual, está relacionado directamente con la diferencia de fase experimentada en ambos caminos ópticos. Las configuraciones más comunes son Fabry-Perot, Michelson, Mach-Zehnder y Sagnac.

1.2.2 Interferómetro Mach Zehnder, Michelson, Sagnac y Fabry-Perot

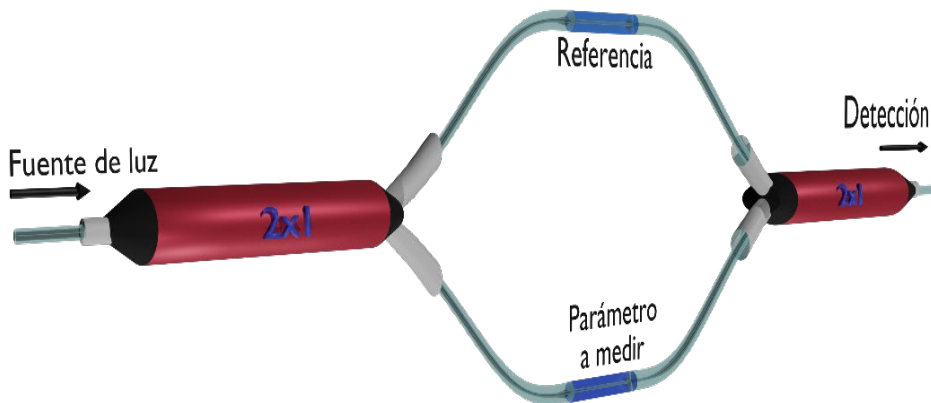
Interferómetro Mach Zehnder

El dispositivo fue creado por los físicos Ludwig Zehnder y Ludwig Mach hace más de un siglo. En su versión de fibra óptica, la luz proveniente de una fuente que se acopla en una fibra óptica; la luz guiada se divide en amplitud por medio de un acoplador, consiguiéndose así dos brazos de fibra óptica, cada uno con decenas o cientos de metros de longitud. Un brazo es expone al parámetro a medir y otro se usa como referencia. Con un segundo acoplador se recombinan los dos haces para interferir coherentemente para finalmente tener la parte de detección, el brazo de referencia se mantiene aislado de la variación externa y con condiciones iniciales estables y solo el brazo sensor (Parámetro a medir) está expuesto a la variación. Luego, la variación en el brazo de detección es inducida por variaciones de temperatura, tensión, índice de refracción, entre otros, que se puede detectar fácilmente analizando la variación en la señal de interferencia. Estas intensidades de salida, en el brazo 1 y 2 del interferómetro, son de la forma;

$$I_1 = I_0 [1 - V \cos(\phi)] \quad (6)$$

$$I_2 = I_0 [1 + V \cos(\phi)] \quad (7)$$

Donde I_0 es la intensidad acoplada a la entrada del interferómetro, V es la visibilidad y ϕ la diferencia de fase entre los dos brazos; esta fase es la que puede variar a causa de estímulos externos. Una característica de dicho dispositivo es que se necesita un brazo de referencia.

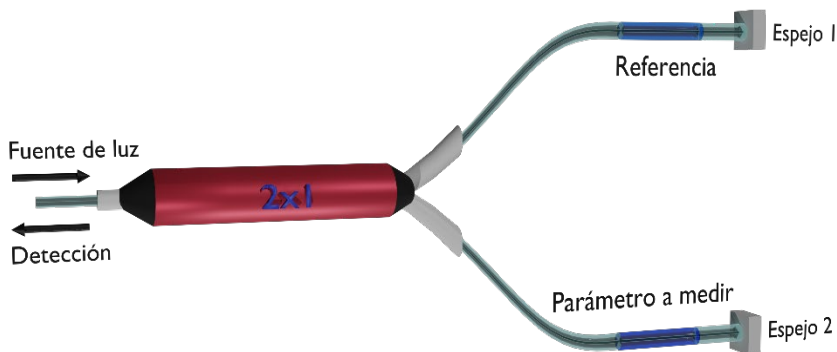


Figuras 2 Estructura de un interferómetro Mach Zehnder

En un interferómetro de Mach-Zehnder, los caminos ópticos se recorren solo una vez y utilizan dos divisores de haz, para dividir primero la intensidad incidente de la luz en dos haces que luego se recombinan como se muestra en la Figura 2. Los cambios de amplitud y frecuencia en el espectro de interferencia se pueden correlacionar con cambios ambientales y, después de la calibración, se obtiene un sensor.

Interferómetro de Michelson.

Fue inventado por Albert Abraham Michelson en 1887. En este interferómetro al igual que la configuración de Mach-Zehnder es necesario un brazo de referencia. El interferómetro de Michelson utiliza un solo acoplador direccional, la diferencia de la distancia recorrida por la luz guiada crea una diferencia de fases. Dicha diferencia de fase introducida da lugar a un patrón de interferencia entre las ondas inicialmente idénticas. Una vez establecida la referencia de fase, si un único haz es dividido en dos trayectorias (parámetro a medir y referencia), entonces, la diferencia de fase del brazo que mide el parámetro y la referencia, cualquier cambio producido a lo largo de las trayectorias es el resultado del cambio producido por la variable en cuestión. Puede ser un cambio físico en la longitud de la trayectoria o un cambio del índice de refracción sobre el haz que se propaga en la fibra óptica.



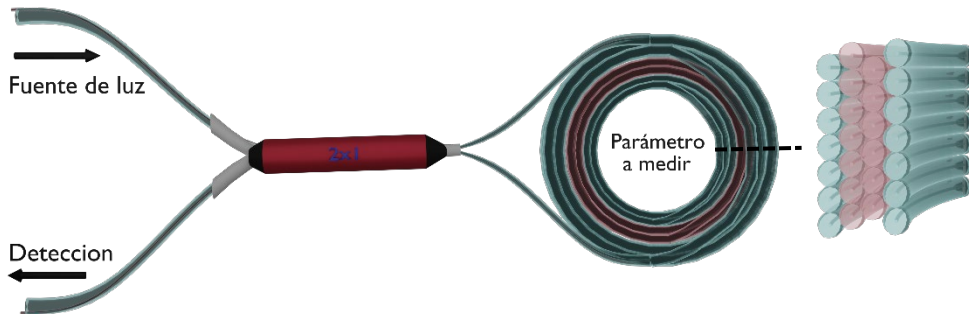
Figuras 3 Estructura de un interferómetro Michelson

Un interferómetro de Michelson se compone de una fuente de luz, un divisor de haz y dos espejos de Faraday para reflejar la luz en cada brazo como se muestra en la Figura 3. La luz que incide desde la fuente de luz se divide en dos caminos que se reflejan en los espejos. Luego, ambos haces se recombinan en el mismo divisor de haz y se crea un patrón de interferencia. En esta configuración, los caminos son atravesados dos veces por cada haz.

Una característica de este tipo de configuraciones al igual que el interferómetro Mach Zehnder es que necesitan un brazo de referencia para poder realizar una medición y esto a su vez se ve afectado por variables externas, principalmente la temperatura, entre otros.

Interferómetro de Sagnac

Los interferómetros de fibra óptica Sagnac se pueden construir usando un solo acoplador 50:50, donde dos de los extremos están conectados para formar un bucle como se aprecia en la figura 4.



Figuras 4 Estructura de un interferómetro Sagnac.

En el interferómetro de Sagnac todo el bucle se usa como sensor, el bucle puede llegar a medir desde 10 metros hasta 5 km. Un acoplador divide el modo entrante en dos haces que luego se propagan en sentidos opuestos antes de recombinarse en el mismo acoplador. Si los dos haces acumulan el mismo cambio de fase, la interferencia resultante es constructiva. Cualquier variación de fase, por ejemplo, por la rotación del bucle en un marco giratorio externo o por birrefringencia, produce una diferencia de fase y crea una interferencia, es decir, una oscilación de intensidad que depende tanto de la longitud de onda como del desfase inducido. Estos interferómetros son muy sensibles a la rotación, por ello han encontrado uso como giroscopios en varias aplicaciones [4].

La intensidad detectable en un interferómetro Sagnac se puede expresar como:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (8)$$

Se puede interpretar el efecto del bucle de Sagnac en el contexto de la ecuación (8) donde, en este caso, I_1 e I_2 son las intensidades de los haces que se propagan en el sentido de las agujas del reloj y en el sentido contrario a las agujas del reloj ϕ_1 y ϕ_2 son las fases acumuladas

después de un tránsito por el lazo. El acoplador de 3 dB produce intensidades casi idénticas en ambas direcciones de propagación de forma $I_1 = I_2 = I_0/2$ de la Ecuación (8) se reduce a:

$$I = I_0 [1 + \cos (\phi_1 - \phi_2)] \quad (9)$$

Despreciando la rotación del marco de referencia, por ejemplo, debido a la rotación de la Tierra, la diferencia de fase depende de la birrefringencia, B

$$\phi_1 - \phi_2 = \Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} BD \quad (10)$$

Por lo tanto, la birrefringencia está dado por la siguiente ecuación

$$B = n_r(n_s) - n_l(n_s) \quad (11)$$

La birrefringencia B, es la diferencia entre los índices de refracción a lo largo de los ejes rápido (n_r) y lento (n_l), respectivamente. Si el dispositivo se utiliza como sensor de índice de refracción, los caminos de luz que se propagan en sentido contrario y deben diferenciarse induciendo un cambio de fase en un camino que depende del índice de refracción de la muestra externa, n_s . Para lograr esto, generalmente se incorpora una sección de fibra birrefringente en el bucle, junto con un controlador de polarización. Los dos haces de contra propagación se diferencian luego por el estado de polarización y el índice de refracción del eje lento o rápido de la fibra birrefringente se puede modificar mediante la exposición a una muestra. Aquí, se supone que los índices de refracción del eje rápido y del eje lento tienen una dependencia diferente del índice de refracción de la muestra externa, n_s . Se puede demostrar que la transmisión del espejo de bucle de fibra viene dada por [5].

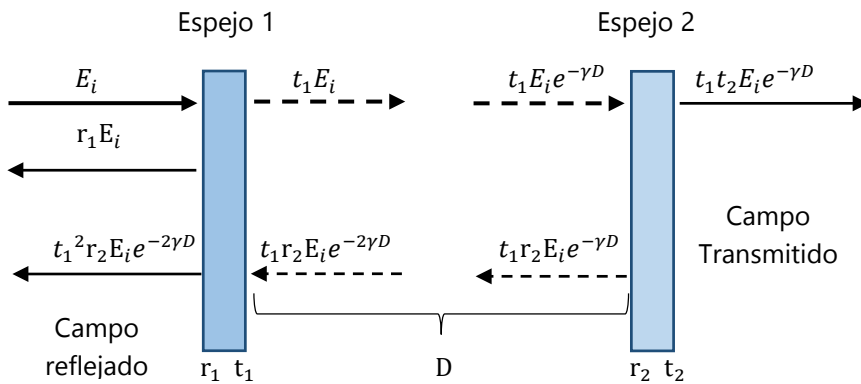
$$Y = \left[\sin \left(\frac{(n_r(n_s) - n_l(n_s))D}{\lambda} \right) \cos (\theta_1 + \theta_2) \right]^2 \quad (12)$$

Donde θ_1 y θ_2 son los ángulos entre la polarización de la luz que se propaga en sentidos opuestos y el eje rápido o lento de la fibra birrefringente.

De la ecuación (12), se deduce que la intensidad transmitida variará, en una longitud de onda dada, con n_s , de forma equivalente, la longitud de onda de un máximo (o mínimo) de transmisión cambiará con respecto a n_s .

Interferómetro Fabry-Perot

El sensor interferométrico Fabry-Perot, también conocido como interferómetro de haces múltiples, es un dispositivo de gran precisión utilizado en muchas aplicaciones. Su principal ventaja como sensor es su alta resolución. Un Fabry-Perot en su configuración más simple está constituido por un medio homogéneo con dos superficies planas, paralelas, altamente reflectantes y separadas por una distancia D . El espacio comúnmente de aire, o cualquier otro medio donde se propague la luz entre los dos espejos, generalmente varía entre algunos micrómetros a varios milímetros cuando el dispositivo se utiliza para interferometría.



Figuras 5 Esquema de un Fabry-Perot

Donde E_i es el campo incidente, r_1 y r_2 es la reflexión del campo en los espejos 1 y 2 respectivamente, t_1 y t_2 son los campos transmitidos al incidir en los espejos 1 y 2 respectivamente y D es la distancia de separación entre los dos espejos.

En la Figura 5 se representa un esquema Fabry-Perot el cual está formado por una cavidad cerrada por dos espejos, uno al menos semitransparente para permitir que parte de la luz salga al exterior. La cavidad tiene una determinada longitud D , el cual es fundamental para determinar los máximos y mínimos de la señal de interferencia del campo transmitido y

reflejado. Estos a su vez se producen por la fase de las señales transmitidas y reflejadas por medio de la siguiente ecuación:

$$D = \frac{\lambda}{2n} i \quad (13)$$

Donde i es un número entero ($i = 1, 2, 3, \dots$), λ es la longitud de onda, n es el índice de refracción del medio comprendido entre los dos espejos

La diferencia de fase en un Fabry-Perot es:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2nD \cos\theta \quad (14)$$

Donde θ es el ángulo con que incide el haz de luz en la cavidad. Cuando los dos espejos que cierran la cavidad Favry-Perot tienen la misma reflectividad se puede definir el concepto de Finura (F) entendiendo este como un factor de calidad del dispositivo al hacer referencia a lo estrecho que es el campo óptico a la salida del Fabry-Perot, este se expresa con la siguiente ecuación:

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2} \quad (15)$$

Si los dos espejos que forman la cavidad tienen la misma reflectividad, la relación entre la intensidad incidente (I_i) y la intensidad transmitida (I_t) se puede expresar como:

$$\frac{I_t}{I_i} = \frac{1}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (16)$$

La salida de un dispositivo Fabry-Perot la luz es constructiva o destructivamente dependiendo de la longitud de la cavidad y la longitud de onda incidente. De acuerdo a la ecuación (16), si se desea seleccionar una nueva longitud de onda que no sea múltiplo de la primera se debe

variar el camino óptico del haz de luz, esto puede realizarse variando la longitud de la cavidad "D", o bien, modificando su índice de refracción.

La pequeña longitud de interacción es la mayor ventaja que presentan los Fabry-Perot lo que le otorga la facilidad de monitorizar puntualmente los cambios de los parámetros a medir. Además, este tipo de sensores implementados con fibras ópticas, debido las dimensiones microscópicas de éstas últimas, pueden ser insertados en pequeñas estructuras. La amplia respuesta en frecuencia de un FP es limitada por la electrónica encargada del procesamiento de la señal en el fotodetector. Uno de los mayores inconvenientes de estos dispositivos es la inestabilidad de las fuentes de bombeo, ya que cualquier fluctuación en intensidad puede causar cambios en la salida del Fabry-Perot. Así como su baja reproducibilidad e inestabilidad debido a la temperatura.

En la literatura encontraremos diferentes sensores de fibra óptica con tecnología madura como se muestran en la tabla 2, Sin embargo, en la mayoría se necesita un segundo sensor como referencia.

Tabla2. Sensores interferométricos de fibra óptica

Parámetro a medir	Fabry-Perot	Sagnac	Mach-Zehnder	Michelson	Polarización
Temperatura	x		x	x	x
Índice de refracción	x				
Presión	x				x
Acústicos	x	x	x	x	x
Doblamiento	x	x	x	x	x
Aceleración	x	x	x		x
Campo magnético	x	x	x	x	
corriente		x	x		
Humedad	x				
Rotación	x	x			

1.2.3 **Técnicas de modulación en función del parámetro a medir.**

Modulación de la luz basada en la intensidad.

Los sensores de fibra óptica basados en la intensidad dependen de que el parámetro a medir induzca alguna pérdida de potencia. Hay una variedad de mecanismos como la pérdida por micro doblamiento, la atenuación y los de campo evanescente que utiliza la energía de la luz que se propaga desde el núcleo hacia el revestimiento mediante fibras estrechas [6]. Otra forma de atenuar la señal es a través de la absorción o dispersión de un objetivo. El sensor basado en la intensidad requiere más luz y, por lo tanto, generalmente se utilizan fibras multimodo.

Las ventajas de estos dispositivos son la sencillez de implementación, bajo coste, posibilidad de ser multiplexados y capacidad de funcionar como sensores distribuidos reales. Sin embargo, las medidas relativas y las variaciones en la intensidad de la fuente de luz pueden dar lugar a lecturas falsas a menos que se utilice un sistema de referencia.

Modulación de luz basada en longitud de onda.

Los sensores de longitud de onda modulada utilizan cambios en la longitud de onda de la luz para la detección. Los sensores de fluorescencia, los sensores de cuerpo negro y el sensor de red de Bragg son ejemplos de sensores de longitud de onda modulada. Los sensores de fibra fluorescente se utilizan ampliamente para aplicaciones médicas, detección química y mediciones de parámetros físicos como la temperatura, la viscosidad y la humedad. Se utilizan diferentes configuraciones para estos sensores. El sensor basado en longitud de onda más utilizado es el sensor de red de Bragg [7]. La principal ventaja de estos sensores es que pueden multiplexarse a lo largo de una sola fibra y desplegarse y/o integrarse fácilmente en grandes estructuras, una aplicación práctica es el monitoreo de la salud estructural. Probablemente, la solución más popular entre estos sensores es la basada en rejillas de Bragg de fibra (FBG por sus siglas en inglés), que es una tecnología muy madura que ha estado disponible comercialmente durante años. Sin embargo, su principal desventaja es su elevado coste dado que se requieren espectrómetros de alta resolución o láseres sintonizables.

Modulación de luz basada en la fase.

Estos sensores utilizan cambios en la fase de la luz para la detección. La fase óptica de la luz que atraviesa la fibra es modulada por el parámetro a detectar. Esta modulación de fase luego se detecta interferométricamente. Esta interferencia de dos o más haces de luz que son emitidos desde una misma fuente de luz, se propaga en la fibra óptica que se divide y se recombina mediante acopladores o circuladores de fibra óptica y llegan simultáneamente a un punto en el espacio o en la superficie de un objeto. La diferencia de camino óptico (OPD) debido a la perturbación introducida en el sensor influye en la diferencia de fase que se codifica directamente en los patrones de interferencia en el espectro adquirido. Por lo tanto, al medir los cambios en el espectro de interferencia, se puede obtener información sobre los cambios en los caminos ópticos en un sistema de medición óptica. Un ejemplo de estos son los sensores de fibra óptica Mach-Zehnder, Michelson y Fabry-Perot con escalas micrométricas. Otro ejemplo a gran escala es el detector de ondas gravitacionales, el interferómetro LIGO [8].

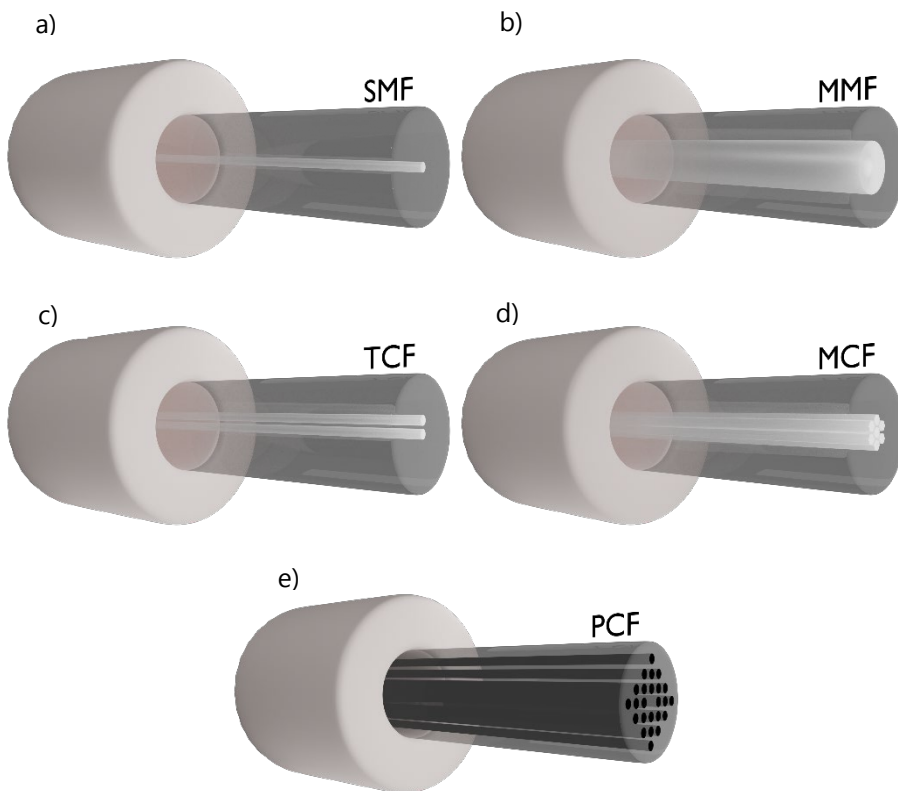
Se han desarrollado muchos métodos especiales de adquisición de datos, algoritmos de procesamiento de señales digitales y técnicas de demodulación para recuperar las señales de fase medidas. Entre los ejemplos más conocidos se encuentran:

Técnicas de demodulación	Referencias
Demodulación de la portadora generada en fase (PGC)	[9] [10]
Interferometría de cambio de fase (PSI)	[11]
Interferometría de luz blanca (WLI)	[12] [13]

Sin embargo, WLI basado en fuentes de luz de banda ancha o láseres sintonizables puede medir directamente la interferencia en el dominio del espectro, y es ampliamente aceptado como el método más avanzado debido a su resolución sub-nanométrica e independencia de la fluctuación de intensidad de la señal, mientras que proporciona la capacidad de realizar fácilmente la multiplexación del sensor.

1.2.4 Tipos de fibras ópticas para sensores interferométricos

Las fibras ópticas han evolucionado en muchas formas desde las pruebas que supusieron su amplia introducción en los años 70 como fibras convencionales. En la actualidad existen diferentes tipos de sensores de fibra óptica interferométricos clásicos diseñados con fibra estándar monomodo (SMF) y multimodo (MMF), hasta los diseños más modernos como las fibras multinúcleo (MCF), de cristal fotónico (PCF), etc. La figura 2 muestra los diferentes tipos de fibras.



Figuras 6 . Fibra óptica a) monomodo b) multimodo c) doble núcleo d) siete núcleos y e) cristal fotónico

Se muestran diferentes tipos de fibras ópticas desde la más común, la fibra monomodo SMF, la cual propaga solo un modo, ver figura 1 (a), si se cumple el valor de la frecuencia normalizada de $V \leq 2.405$, de lo contrario se les denominan multimodales, ver figura 6 (b). La frecuencia normalizada o también llamada longitud de onda de corte, está dada por la siguiente ecuación

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (17)$$

Donde r es el radio del núcleo, λ es la longitud de onda, n_1 es el índice de refracción del núcleo y n_2 es el índice de refracción del revestimiento

Las fibras de núcleo acoplado tienen un núcleo en su centro geométrico y uno o más núcleos cerca del núcleo central. La corta separación entre los núcleos permite el acoplamiento óptico entre ellos, ver figuras 6 c) y d), respectivamente. Esto proporciona a las fibras de núcleo acoplado interesantes propiedades ópticas que pueden aprovecharse para aplicaciones de detección. En Fig. 6 e) un ejemplo de una fibra de cristal fotónico (PCF) donde la luz es guiada por efecto de reflexión total interna modificada por un patrón de huecos de aire.

Una de las ventajas más importantes que tiene las fibras MCF y PCF respecto a la fibra convencional SMF y MMF es la alta flexibilidad del diseño, es decir que cambiando parámetros geométricos como son: la dimensión del diámetro de los orificios o la distancia de separación entre ellos, así como el índice de refracción es posible obtener fibras con propiedades ópticas específicas. Una de sus principales desventajas de este tipo de fibras es la atenuación, la cual aún es mayor que en la fibra convencional SMF.

1.2.5 Sensores de fibra óptica puntuales

Los sensores puntuales se emplean en la medición de los cambios sucedidos en puntos específicos, así interactúan puntualmente con la estructura o parámetro a monitorizar, por lo regular se basan en la detección del cambio de intensidad de la señal, tales como los sensores basados en micro curvaturas y los sensores de fibra óptica de tipo interferométricos.

Los sensores de fibra óptica puntuales de tipo interferométricos presentan una gran sensibilidad y se emplean en la medición de los cambios sucedidos en puntos específicos, comúnmente para medir parámetros tales como la temperatura, tensión o presión. Así interactúan puntualmente con la estructura o parámetro a monitorizar, por lo regular se basan

en la detección del cambio de intensidad de la señal, tales como los sensores basados en micro curvaturas y los sensores de fibra óptica de tipo interferométricos. El diseño del sensor puede variar dependiendo del parámetro objeto de la medida, pero siempre conservando el mismo principio básico de los dispositivos interferométricos. La acción del parámetro a medir como la temperatura, índices de refracción, desplazamiento, presión, etc. hace que produzcan un cambio en su interferometría.

En las últimas dos décadas, muchos grupos han construido interferómetros de fibra basados en una gran variedad de diseños. Solo desde 2008 hasta 2020, se han publicado varios cientos de artículos que describen el rendimiento de varios interferómetros en fibra y sensores basados en cavidades de fibra [14]. Un ejemplo de estos son los refractómetros de fibra óptica. Desde los primeros refractómetros de fibra reportados en los años 1976 [15].

1.3 Refractómetro Fabry-Perot de ultra amplio rango

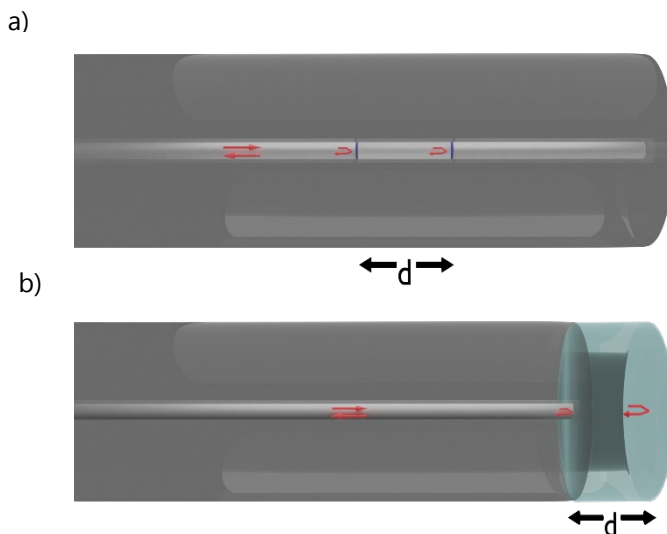
1.3.1 Introducción

Los refractómetros son dispositivos que miden el índice de refracción de una muestra. Entendiéndose al índice de refracción como una relación de velocidades entre dos medios. En la actualidad los refractómetros comerciales miden el índice de refracción de un líquido depositado en un prisma de índice de refracción conocido. El rango de medición de los refractómetros basados en prismas se limita a los índices que son más pequeños que los del prisma, que generalmente es de alrededor de 1.7. Los refractómetros comerciales son precisos porque usan varios componentes opto-mecánicos y tienen un sistema para mantener la muestra a temperatura constante durante las mediciones. Otra gran desventaja es la dificultad y el alto coste de miniaturización de dicho prisma y en consecuencia del refractómetro, por ello los refractómetros basados en fibras ópticas son buenos candidatos porque se logra dimensiones en miniatura además de un amplio rango de medición, resolución comparable o superior a los de los refractómetros comerciales e idealmente independencia de temperatura. Además, la fabricación del refractómetro debe ser altamente reproducible y el coste del dispositivo bajo.

La interferometría de Fabry-Perot en fibra (FOFPI) es una tecnología de detección precisa y bien establecida que se utiliza para monitorear una amplia gama de parámetros físicos y químicos, como tensión, temperatura, vibración, presión, concentración e índice de refracción. Los sensores FOFPI tienen varias características atractivas, como alta sensibilidad, alta resolución, bajo coste, tamaño pequeño y respuesta lineal, y pueden tolerar altas

presiones y tensiones, mientras que se ven menos afectados por la corrosión y la fase de la señal de interferencia.

Un interferómetro de Fabry-Perot (FPI) de fibra óptica consta principalmente de dos factores primordiales. El primero formado por dos superficies reflectantes paralelas separadas por una distancia específica (d) y el segundo factor relevante lo da una cavidad homogénea. La interferencia se produce debido a las múltiples superposiciones de los haces reflejados y transmitidos en las dos superficies paralelas y el medio en el que se propaga la luz. En la fibra óptica se forman simplemente construyendo reflectores intencionalmente dentro o fuera de las fibras. Por lo tanto, los sensores FP se pueden clasificar dos categorías: una es extrínseca y la otra es intrínseca.



Figuras 7 a) FOFPI intrínseco donde la cavidad está formada por dos componentes reflectantes dentro de la fibra b) FOFPI extrínseco donde la cavidad se forma fuera de la fibra.

Los sensores de fibra FPI intrínsecos tienen componentes reflectantes dentro de la propia fibra. Por ejemplo, cuando los reflectores se forman dentro de una fibra por cualquier medio. La cavidad local del FPI intrínseco se puede formar mediante muchos métodos, como el micromecanizado [16], con redes de Bragg de fibra (FBG) [17], grabado químico [18] y la deposición de película delgada [19], etc. Sin embargo, todavía tienen el problema de usar equipo de fabricación de alto coste para la formación de la cavidad.

La estructura extrínseca es útil para obtener una señal de interferencia de alta visibilidad, dado que puede utilizar espejos altamente reflectantes, además, la fabricación es relativamente

simple y no necesita ningún equipo de alto coste. Una de las diversas aplicaciones de estos sensores es para medir el índice de refracción RI de un líquido, estos sensores son apropiados porque la muestra puede acceder fácilmente a la cavidad. Se ha intentado medir el líquido RI sensor extrínseco basada en cristal fónico (PCF) [20], refractómetro de gas [21], refractómetro de campo evanescente [22], por medio de capas delgadas [23]. Sin embargo, los sensores FPI extrínsecos tienen desventajas de baja eficiencia de acoplamiento, alineación cuidadosa y problemas de empaquetamiento. Estas desventajas han sido radicadas por nuestro método de fabricación de sensores interferométricos extrínsecos Fabry-Perot el cual presenta un rango de medición de índice de refracción ultra amplio, de 1 a 2 aproximadamente y además con independencia a la temperatura.

1.3.2 Hipótesis y objetivos

Hipótesis: Es posible fabricar un refractómetro fiable con la capacidad de medir en un amplio rango el índice de refracción, alta reproducibilidad, robustez, de bajo coste, gran ancho de banda de operación (800 nm a 1600 nm) e independencia a la temperatura.

Objetivo: Innovar un refractómetro FP con un rango de medición de índice de refracción ultra amplio, de 1 a 2 aproximadamente y además con independencia a la temperatura.

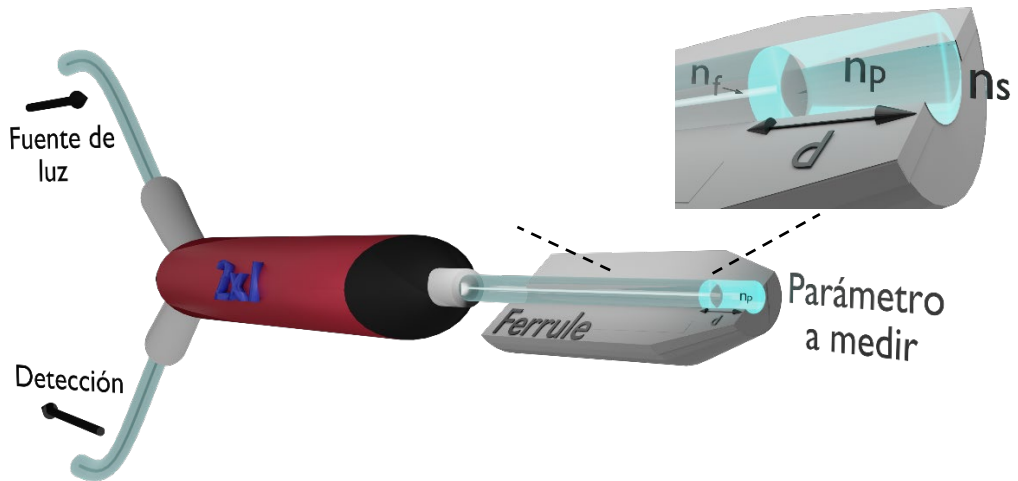
1.3.3 Fabricación del dispositivo y montaje de interrogación.

El refractómetro propuesto es fácil de fabricar y su interrogación es simple. Una representación esquemática del dispositivo se muestra en la Fig. 8.

Los pasos de fabricación son los siguientes:

- 1.- Primero, se inserta un SMF cortado o pulido al final de la férula que tiene un vacío interno con un diámetro igual al de la fibra.
- 2.- Se deposita una pequeña cantidad de polímero NOA81 curable por UV en la punta de la férula que se mantiene en posición vertical.
- 3.- Se utiliza una etapa de transducción motorizada, la fibra se mueve lentamente una distancia d hacia el interior de la férula.
- 4.- Se forma una cavidad de longitud d con precisión nanométrica llena de polímero en el extremo distal de la férula; ver Fig. 8.

5.- La cavidad con polímero se cura con luz UV.



Figuras 8 Esquema de un refractómetro basado en interferometría Fabry-Perot

Todos los pasos mencionados anteriormente son fáciles de llevar a cabo y son reproducibles. Esta es una ventaja importante sobre otros FPI con cavidades de polímero propuestas en la literatura en las que la forma y las dimensiones de la cavidad no pueden controlarse fácilmente, suelen tener ambigüedad y necesitan un sistema para compensar la temperatura. Esto lo erradicamos con el innovador refractómetro Fabry Perot.

La cavidad está diseñada para lograr patrones de interferencia con visibilidades y períodos controlables, por lo tanto, para controlar el rendimiento del refractómetro. Mediante la amplitud y la fase de la transformada rápida de Fourier de los espectros de interferencia, se obtiene una señal que se correlaciona inequívocamente con el índice de refracción. El refractómetro aquí descrito puede operar en un amplio rango de longitud de onda, de 800 a 1600 nm aproximadamente. Este novedoso método ha obtenido reivindicaciones de patentes favorables las cuales se encuentran en la parte de anexos en la presente tesis.

1.3.4 Principio de operación

Para explicar la propagación de la luz en nuestro dispositivo, es importante comprender la interferencia producida entre los dos haces de luz gaussianos. El primer haz se refleja internamente desde la interfaz fibra monomodo SMF y el polímero y el segundo haz se refleja

desde la interfaz polímero y la muestra La reflexión de la interfaz SMF y el polímero está dada por la ecuación:

$$r_1 = \frac{(n_f - n_p)}{(n_f + n_p)} \quad (18)$$

Donde n_f es el índice de refracción del núcleo SMF y n_p es el índice de refracción del polímero. La reflexión de la interfaz del polímero con la muestra esta denotado por la siguiente ecuación;

$$r_2 = \frac{(n_p - n_s)}{(n_p + n_s)} \quad (19)$$

Donde n_s es el índice de la muestra. Como la cavidad es homogénea, el haz gaussiano que se refleja desde la interfaz de la muestra y el polímero volverá más amplio al SMF debido a la difracción de la luz. Una observación critica en este dispositivo es cuando $n_s > n_p$, los máximos de los espectros cambian a mínimos, y viceversa, debido a un cambio de fase π de la luz reflejada.

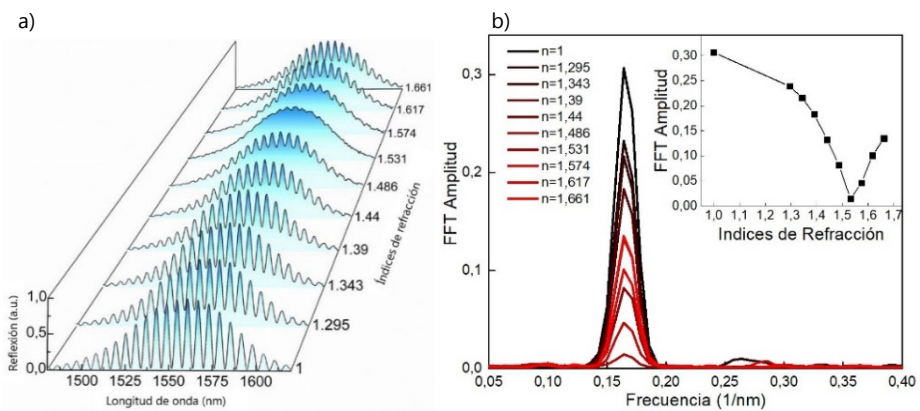
La intensidad total reflejada del dispositivo es la superposición de dos haces gaussianos, uno más amplio que el otro. La intensidad medida por un espectrómetro o un fotodetector será periódica en longitud de onda (λ). Se expresa como:

$$I_r = r_1^2 + \eta^2 r_2^2 (1 - r_1)^4 + 2\pi r_1 r_2 (1 - r_1)^2 \cos(2\phi) \quad (20)$$

Donde $\phi = 2\pi d n_p / \lambda$ es la diferencia de fase entre los dos haces gaussianos. El factor η se denomina coeficiente de acoplamiento o coeficiente de superposición de los dos haces gaussianos. Tal factor puede expresarse como

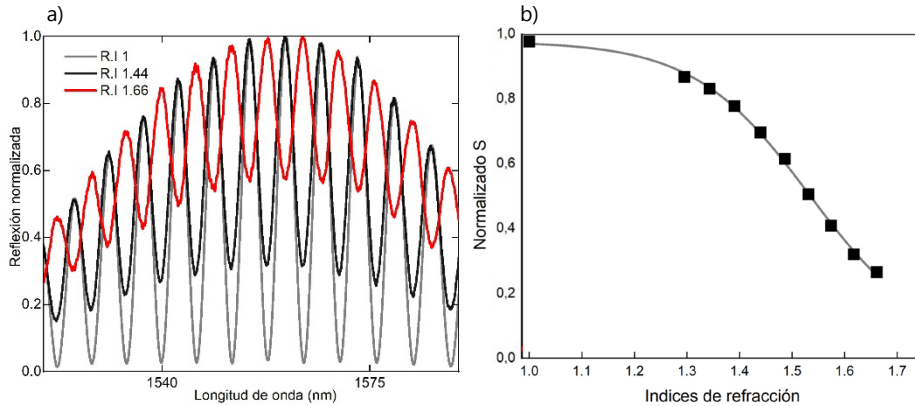
$$\eta = \frac{(n_p w_0^2)^2}{[d^2 \lambda^2 + (n_p w_0^2)^2]} \quad (21)$$

El factor de acoplamiento es crítico para el desempeño del refractómetro. Para obtener máxima visibilidad del patrón de interferencia en función del índice de refracción externo (n_s) para diferentes valores de n_p . Se establecen las condiciones iniciales de fabricación, es decir, conociendo las variables w_0^2 el cual es el radio del haz gaussiano a la salida del SM, el material de la cavidad n_p y la fuente de luz (λ). Podemos deducir que el parámetro crítico para controlar el rendimiento del refractómetro es el tamaño de la cavidad o " d ". Dicho parámetro puede controlarse con precisión nanométrica con una etapa motorizada controlada por computadora. Por medio de la simulación y experimentación obtuvimos máxima visibilidad con una cavidad de 125 μm .



Figuras 9 (a) Espectros de reflexión de un refractómetro FPI, (b) Amplitud correspondiente de la FFT en función de cambios del índice de refracción.

En la Figura 9 se comprueba que la visibilidad se reduce gradualmente a medida que n_s aumenta y alcanza un valor mínimo cuando n_s es aproximadamente igual a n_p . Luego, la visibilidad aumenta gradualmente cuando $n_s > n_p$ pero debido a un cambio de fase de la luz reflejada, los máximos cambiaron a mínimos observe la figura 9 (a).

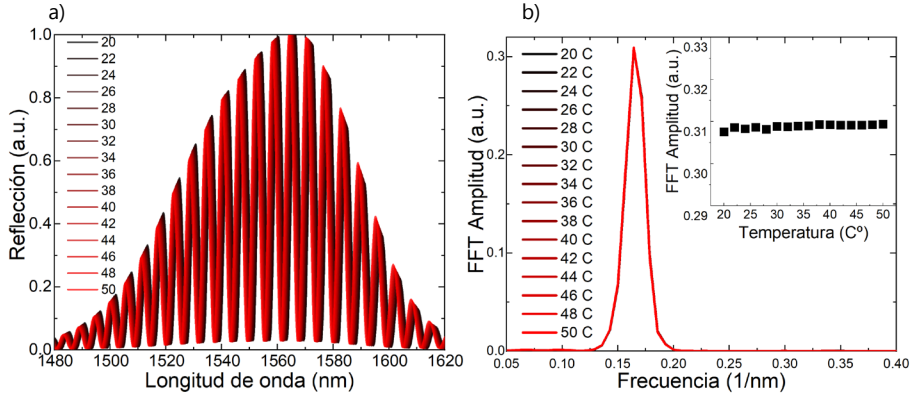


Figuras 10 (a) Espectros de reflexión con cambio de fase. (b) Ajuste de calibración del refractómetro

Como en el caso de la visibilidad, dos valores de n_s pueden dar el mismo valor de A_F como es el caso del índice de refracción de 1.44 y 1.661 respectivamente, como se muestra en la figura 10 (a). Esta ambigüedad puede eliminarse si tenemos en cuenta la fase de la FFT (ϕ_F), que se proporciona en el resultado de la FFT. Debido a los cambios de fase, el valor de $\cos(\phi_F)$ -o $\sin(\phi_F)$ - tiene el mismo signo para todos los valores de n_s que son más pequeños que n_p y el signo opuesto para todos los valores de n_s más grandes que n_p . Por lo tanto, al normalizar el valor de $\cos(\phi_F)$, para tener en cuenta exclusivamente su signo, es posible determinar n_s sin ambigüedad con la siguiente ecuación:

$$S = -A_F * \cos(\phi_F) / |\cos(\phi_F)| \quad (22)$$

En la Fig. 10 (b). Se aprecia la curva de calibración de nuestro refractómetro. Por medio de la FFT, los valores de A_F y $\cos(\phi_F)$, por lo tanto de S , se pueden calcular fácilmente para cualquier valor de n_s , los cuales son aceites de índice de refracción calibrados de los laboratorios Cargille. Los puntos sólidos son puntos experimentales y la línea continua es un ajuste que se extrapola a $n_s = 1.7$, existe una relación uno a uno entre S y n_s . Como la FFT se puede determinar con alta precisión, la resolución estimada de nuestro refractómetro es de alrededor de 2.3×10^{-5} , que es lo suficientemente alta para la mayoría de las aplicaciones industriales. El gráfico de recuadro muestra solo los valores de "S" obtenidos



Figuras 11 (a) Espectros de reflexión de un FPI fabricado con $d = 125 \mu\text{m}$ y $n_p = 1.5409$ para diferentes temperaturas. (b) Amplitud correspondiente de la FFT en función de cambios de temperatura.

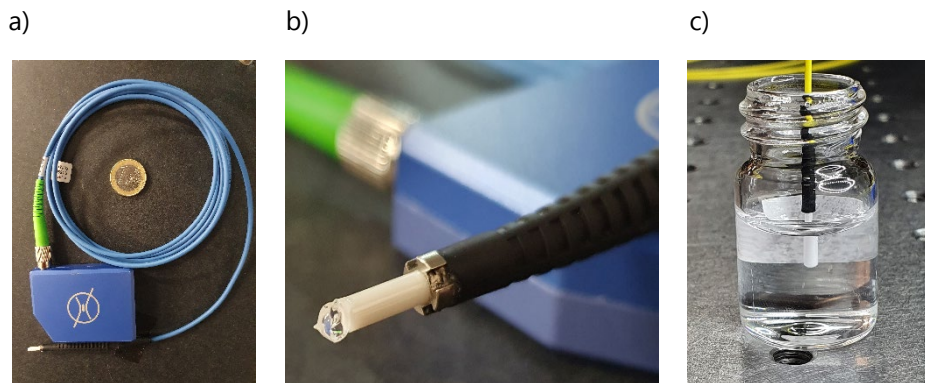
Para demostrar que nuestro refractómetro no requiere sensores de referencia adicionales o un mecanismo para mantener constante la temperatura. Realizamos un barrido de temperatura con nuestro refractómetro con máxima visibilidad (en aire) ver Fig. 11 a). Los patrones de interferencia muestran un desplazamiento en longitud de onda debido a que el polímero sufre una micro-expansión y al enfriarse se contrae por lo que la cavidad es sensible a la temperatura. Sin embargo por medio del procesamiento de la señal y la amplitud de la FFT no cambia con la temperatura, ver Fig. 11 b). Es importante tener en cuenta que la amplitud de la FFT (A_F) disminuye cuando $n_s < n_p$ y aumenta cuando $n_s > n_p$. La amplitud de la FFT se correlaciona fácilmente con n_s .

Como potencial aplicación a nuestro dispositivo se investigó la capacidad para medir índices de refracción de muestras viscosas. Para ello, el dispositivo descrito anteriormente se sumergió en un gel de índice comercial (G608N3 adquirido de Thorlabs) ver figura 12 b) cuyo índice de refracción es de 1.4382 (a 1550 nm) y un TOC $-3.5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. El dispositivo y el gel se expusieron a temperaturas entre 10 °C y 35 °C en una cámara de temperatura. Como resultado obtuvimos que el índice de refracción del gel era $n_s = 1.4468$ y un TOC de $-3.0411 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Los cuales son valores muy cercanos a los proporcionados por el fabricante

1.3.5 Resumen y discusión

Podemos diseñar y fabricar cualquier refractómetro FP extrínseco puntual conociendo tres variables; la distancia de la cavidad Fabry-Perot (d), el índice de refracción del polímero (n_p) siempre que cumpla la condición de tener diferente índice de refracción que el del núcleo de la SMF. Por último la longitud de onda (λ).

La sensibilidad del sensor está dada por la precisión con la que se puede leer la amplitud y la fase de un pico de Fourier. Como resultado, este sensor de fibra FPI extrínseco basado en una fibra SMF y un polímero NOA81 es simple pero muy preciso y no es necesario compensar la temperatura, por lo que es útil para mediciones RI en tiempo real de varias muestras líquidas, y es reutilizable.

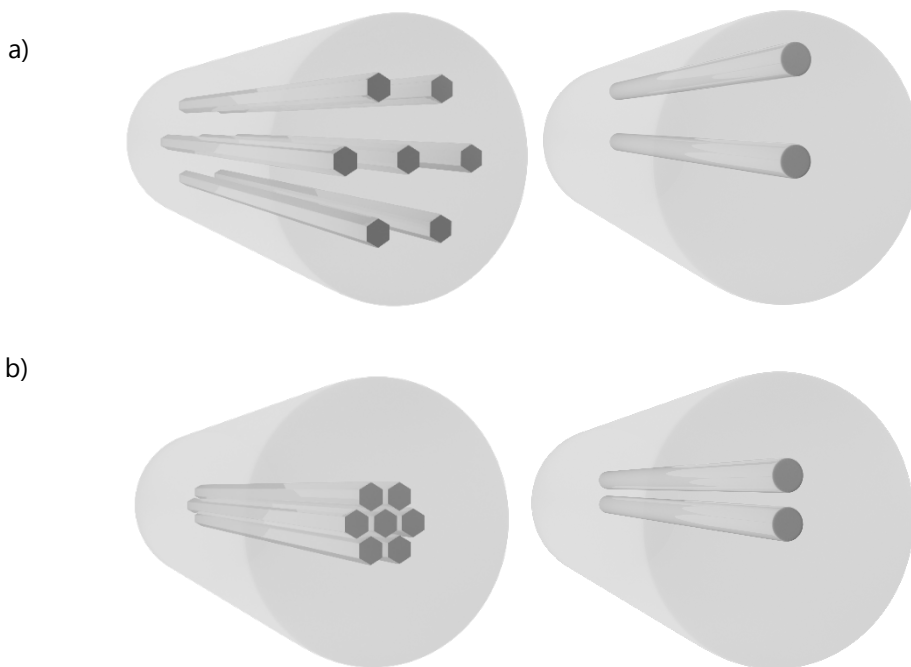


Figuras 12. Fotografías a) del refractómetro patentado que incluye el sistema de detección, b) de un Gel en contacto con FPI, c) y de agua en contacto con FPI

En la Figura 12 se muestra la foto de un refractómetro interferométrico puntual de fibra óptica Fabry-Perot, este dispositivo es de pequeñas dimensiones, portátil y reutilizable. B) Observamos un gel en contacto con el sensor FP puntual, concluimos que el TOC del gel medido con nuestro dispositivo fue de $-3.4011 \times 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. La diferencia con el valor dado por el fabricante es de $9.89 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Por lo que nuestro dispositivo sin usar un sensor de referencia de temperatura se puede utilizar para calcular, con buena aproximación, el TOC de diferentes geles o líquidos. c) Ejemplo de medición del índice de refracción de diversos líquidos.

1.4 Sensores basados en fibras con núcleos fuertemente acoplados

Las fibras ópticas tienen una sensibilidad intrínseca a la temperatura y la tensión, dicha sensibilidad cruzada puede ser difícil de manejar cuando se requiere monitorear uno o más parámetros de interés, por ejemplo, índice de refracción de una muestra, temperatura, vibraciones, etc. En los últimos años, el desarrollo de fibras ópticas especiales ha proporcionado nuevas alternativas para desarrollar sensores de fibra óptica. Este progreso ha sido especialmente por el uso de las fibras multi-núcleo (MCF), que consisten en múltiples núcleos integrados en un revestimiento en común ver Fig. 13. Las desventajas actuales de los sensores de fibra óptica convencionales representan oportunidades para introducir sensores multi-núcleo con nuevas arquitecturas o nuevos mecanismos de interrogación. Con este objetivo y así superar la sensibilidad cruzada, se pueden diseñar estructuras con fibras especiales que sean capaces de detectar múltiples parámetros simultáneamente y además de bajo costo.



Figuras 13 Fibra óptica multi-núcleo MCF (a) Núcleos aislados (b) Núcleos fuertemente acoplados.

Dependiendo de su disposición geométrica, se pueden reconocer dos grupos de MCF; los débilmente acoplados y fuertemente acoplados [24] [25]. Por un lado, no existe diafonía si los núcleos están desacoplados, en otras palabras, la compartición de energía es casi nula entre ellos, esto sucede si los núcleos están lo suficientemente alejados entre sí, ver Fig. 13 a). Estas fibras se utilizan comúnmente para fines de telecomunicaciones, ya que permiten tener múltiples canales independientes en el mismo medio físico multiplexadas por cada modo fundamental (Linealmente polarizado LP_{01}), asignando una tasa de transmisión a cada modo de propagación en el sistema (SDM) [26] [27]. Por otro lado, cuando los núcleos están lo suficientemente cerca como para interactuar entre sí, se denominan MCF con núcleos fuertemente acoplados, tienen un núcleo en su centro geométrico y uno o más núcleos cerca del núcleo central. La corta separación entre los núcleos permite el acoplamiento óptico entre ellos. Es decir, la cantidad de supermodos que admiten dichas fibras depende de la cantidad de núcleos que tenga la fibra y la cantidad de modos que admita cada núcleo. Sin embargo, bajo condiciones de lanzamiento específicas, y cuando los núcleos están diseñados para ser monomodo, solo se pueden excitar dos supermodos en la fibra. Esto proporciona a las fibras de núcleo acoplado interesantes propiedades ópticas que pueden aprovecharse para aplicaciones de detección como se muestra en la figura 13 (b).

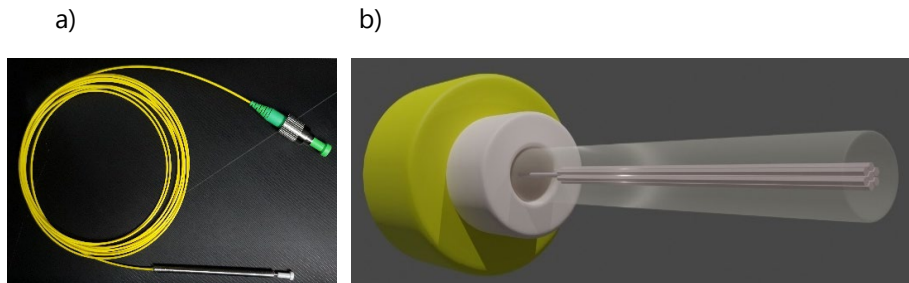
1.5 Sensor de detección dual con fibra óptica multinúcleo

1.5.1 Introducción

Los sensores interferométricos multiparámetro han atraído la atención recientemente debido a la creciente demanda en los procesos industriales que a menudo requieren la detección de más de un parámetro físico o químico simultáneamente [28]. Para evitar la sensibilidad cruzada entre las medidas, por ejemplo, la dependencia de la temperatura en las medidas de RI, la solución se encuentra con los sensores basados en fibras multi-núcleo fuertemente acoplados. Que además proporcionan solución a una amplia variedad de aplicaciones por ejemplo en ambientes potencialmente explosivos, en aquellos que puedan corroer componentes de base metálica o donde existan campos electromagnéticos, por mencionar algunos.

Actualmente se están investigando diferentes arquitecturas de detección o combinaciones de diferentes plataformas con el objetivo de detectar múltiples parámetros simultáneamente [29] [30]. La principal desventaja de la mayoría de estas arquitecturas de detección son los procesos de fabricación elaborados y de varios pasos, que pueden comprometer la reproducibilidad y fiabilidad del sensor. Además, la interrogación y multiplexación de sensores multi componente tiende a ser compleja en su fabricación y por ende es costosa. En esta

sección de la tesis abordaremos nuevos conocimientos que dan solución en el campo de los sensores de fibra óptica multiparámetro dando como resultado una alta reproducibilidad y fiabilidad como se muestra en la siguiente figura.



Figuras 14. a) Foto de un refractómetro multi-núcleo, b) Esquema de una estructura SMF-MCF

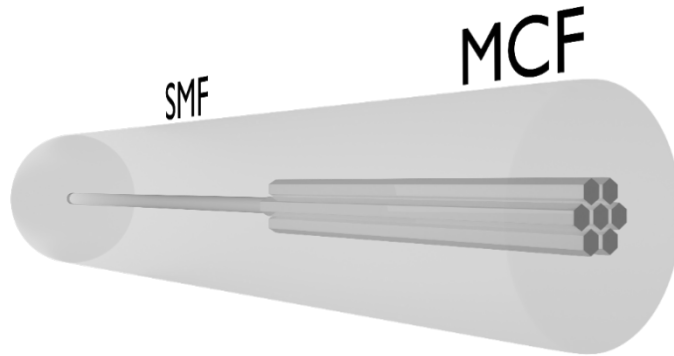
1.5.2 Hipótesis y objetivos

Hipótesis: Es posible desarrollar interferómetros MCF compactos que pueden detectar el índice de refracción de una muestra y la temperatura del ambiente simultáneamente.

Objetivo: Diseñar, simular y fabricar un interferómetro de supermodos para detectar el índice de refracción y temperatura simultáneamente de forma simple, con alta sensibilidad y reproducibilidad.

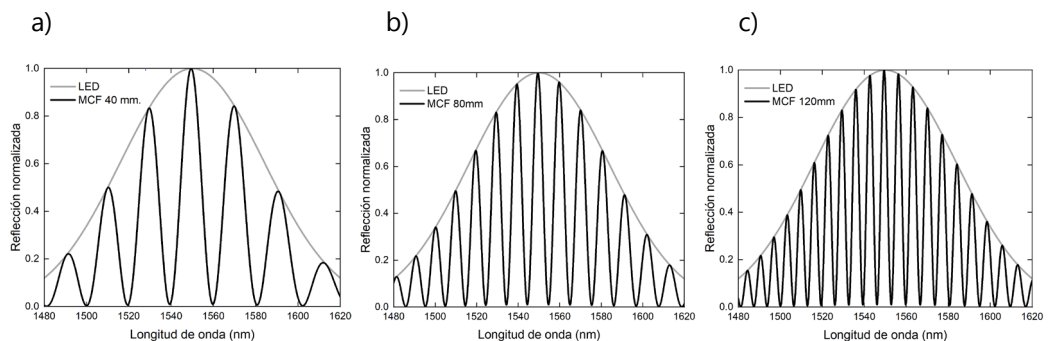
1.5.3 Fabricación del Dispositivo y montaje de interrogación

Para la fabricación del sensor multiparamétrico usamos una fibra de 7 núcleos MCF el cual se empalma por fusión a una fibra monomodo convencional SMF, El final de MCF es pulido para obtener una cara MCF plana, de esta manera se comporta como reflector como se muestra en la figura 15. Como resultado obtendremos un fuerte acoplamiento entre la luz que se propaga a lo largo del núcleo central y los núcleos adyacentes, dando como resultado un batido entre los supermodos periódico provocando así un patrón de interferencia, el cual es extremadamente sensible a varios efectos físicos y mecánicos aplicados a la fibra y la razón por la cual este tipo de fibras se aprovechan para aplicaciones de detección tan diversas como alta temperatura [31], [32], doblamiento [33] [34] [35] vibración [36] [37], índice de refracción [38] y distancia [39] [40].



Figuras 15 Sensor SMF-MCF multiparamétrico

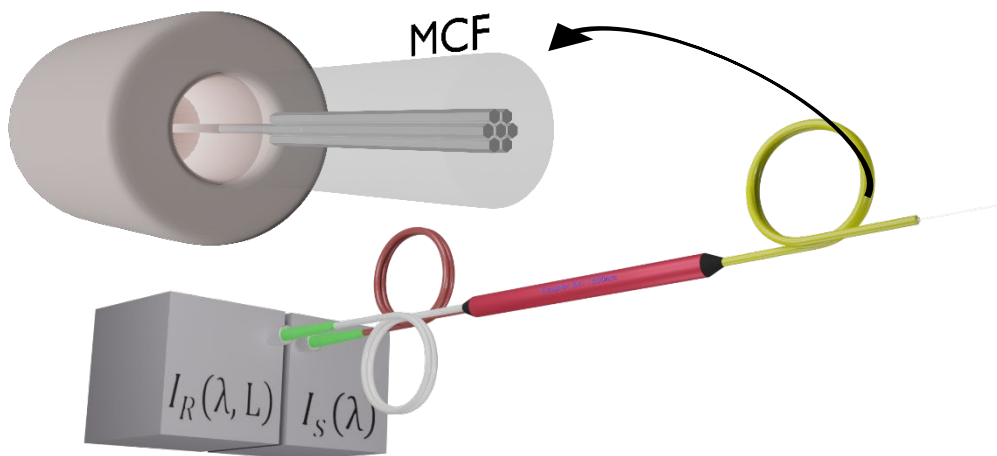
En la anterior figura el núcleo único del SMF y el núcleo central del MCF están alineados axialmente y en contacto físico directo. La SMF opera en el régimen monomodo y la MCF debe tener núcleos acoplados idénticos; uno de ellos está ubicado en el centro geométrico de la fibra y los otros 6 núcleos están alrededor del núcleo central. Los núcleos se encuentran lo suficientemente cerca entre sí para inducir a los modos a través de cada núcleo individual al superponerse entre ellos, causando un acoplamiento cíclico entre núcleos [41]. Los modos resultantes, que se denominan supermodos (SP), son la combinación lineal de los modos que se propagan a través de cada guía de ondas individual [42], [43] Cuando dicha estructura multi-núcleo es excitada en su núcleo central por el modo LP_{01} entrante desde un SMF estándar, los dos supermodos ortogonales que tienen potencia en el núcleo central se acoplan [44]. El batido entre los supermodos da lugar a un espectro de reflexión sinusoidal bien definido que es fácil de rastrear y analizar sin importar la longitud transversal del segmento MCF, como se muestran en los siguientes espectros simulados en reflexión.



Figuras 16. Simulación de espectros en reflexión SMF-MCF con diferentes dimensiones longitudinales de fibra multi-núcleo a) 40 mm, b) 80 mm y c) 120 mm respectivamente.

Por lo tanto, la longitud transversal de la fibra multi-núcleo no determina el funcionamiento del sensor multiparamétrico. Los elementos cruciales para la fabricación y diseño de estos sensores interferométricos multi-núcleo (MCF) extrínsecos puntuales son los siguientes;

- Dependen de la longitud de onda (λ) de la luz incidente
- El tamaño de los núcleos
- Separación entre núcleos
- Índices de refracción de los núcleos y del revestimiento.



Figuras 17. Esquema de interrogación para el sensor multiparamétrico SMF-MCF

Como se explicó anteriormente, en sensores extrínsecos puntuales, la alteración o modulación de algunas características de la luz son provocadas por un efecto desde el exterior de la fibra. Las fibras MCF fuertemente acoplados ofrecen algunas ventajas significativas para desarrollar sensores ópticos extrínsecos puntuales. Este sensor no requiere configuraciones complejas para operar, solo se necesitan cuatro cosas, un segmento corto de MCF, un circulator, un espectrómetro o un fotodetector y una fuente de luz de banda ancha ver Figura 17. Por lo cual dicho sistema se convierte tan atractivo, no requieren alineaciones exhaustivas y son fáciles de manejar e implementar, con alta reproducibilidad, fiabilidad y reutilizables, se limpia la cara de la fibra MCF para realizar la siguiente medición.

1.5.4 Principio de operación

Es crucial entender cómo se propaga la luz en este sensor interferométrico multi-núcleo (MCF) extrínseco puntual. Al propagarse la luz por medio de la SMF-MCF se excitan dos supermodos los cuales son denominados como SP_{01} y SP_{02} . Las constantes de propagación de tales supermodos se pueden indicar como β_1 y β_2 .

El espectro en reflexión de este interferómetro se puede describir con la ecuación. (23).

$$I_R(\lambda, L) = I_S(\lambda)R_F \left[I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{4\pi\Delta nL}{\lambda}\right) \right] \quad (23)$$

El patrón de interferencia se puede caracterizar por su visibilidad (V), que se define como:

$$V = 2 \sqrt{\frac{I_1 I_2}{I_1 + I_2}} \quad (24)$$

Por lo tanto, después de la normalización, la reflexión de la estructura que se muestra en la figura 19 a), resulta de la siguiente ecuación:

$$R_a(\lambda, L) = I_{ns}(\lambda) \left[1 + V \cos\left(\frac{4\pi\Delta nL}{\lambda}\right) / (1 + V) \right] \quad (25)$$

Donde $I_{ns}(\lambda)$ es el espectro de potencia normalizado de la fuente de luz de excitación fue un SLED cuyo perfil espectral fue gaussiano, por lo que se expresó como:

$$I_{ns}(\lambda) = \exp[-(\lambda - \lambda_0)^2 / (2\Delta\lambda^2)] \quad (26)$$

Donde λ_0 es la longitud de onda pico central del SLED y $\Delta\lambda$ el ancho espectral del mismo.

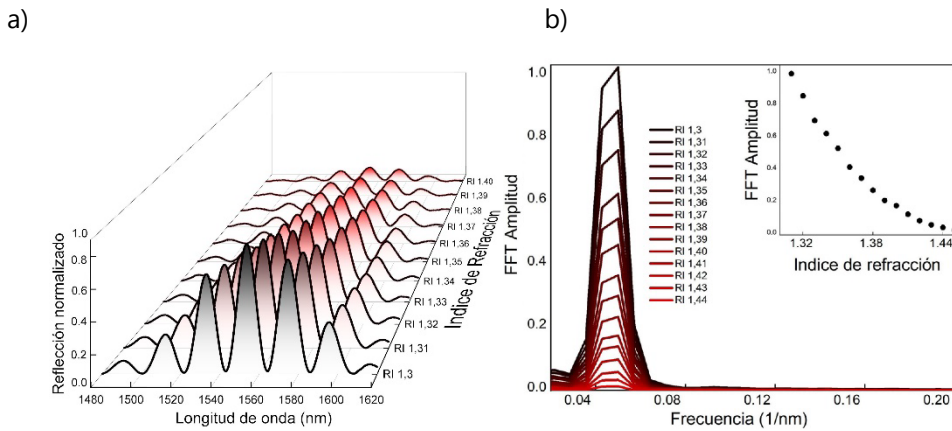
Para predecir el patrón de interferencia de un interferómetro MCF supermodo, es necesario calcular la dependencia de la longitud de onda de ΔN . Como se ha mencionado anteriormente este es un parámetro crítico para predecir su funcionamiento. Estos dos supermodos tienen

una intensidad máxima en el núcleo central del MCF. La dependencia de ΔN con la longitud de onda es lineal. Tal dependencia de la longitud de onda se puede expresar como

$$\Delta N(\lambda) = a\lambda + b \quad (27)$$

Donde a y b son los coeficientes de ajuste lineal [45].

En base a la simulación y los resultados que se muestran en la figura 18, sugieren la viabilidad de nuestro interferómetro supermodo ya que la visibilidad del patrón de interferencia alcanza valores cercanos a 1.

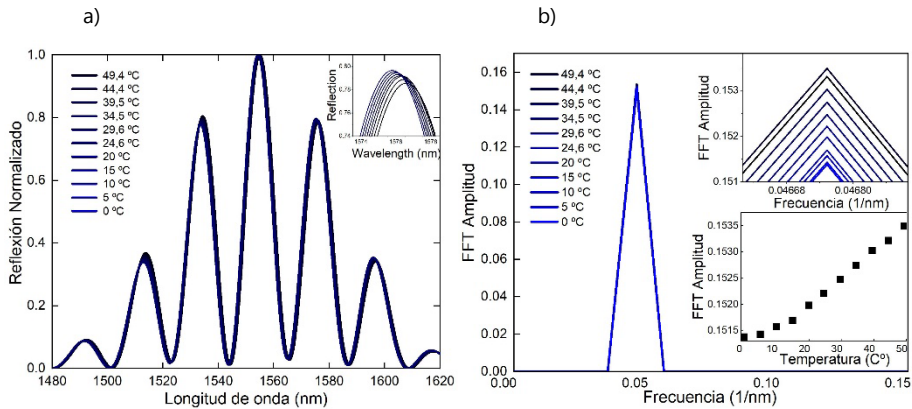


Figuras 18. a) Espectros de reflexión observados cuando la punta MCF de un interferómetro MCF con longitud de 40 mm se sumergió en diferentes índices de refracción calibrados. b) Curva de calibración que muestra la amplitud de la FFT en función del índice de refracción.

Se comprobó que la reflexión disminuye a medida que aumenta el índice de refracción del líquido. Esto se debe a cambios en la reflectividad de la interfaz MCF-muestra que afectan a los dos supermodos interferentes y en consecuencia, al patrón de interferencia en reflexión, Fig. 18 a). Para el procesamiento de datos calculamos la transformada rápida de Fourier (FFT) de cada espectro. Luego, la altura de la amplitud FFT, la cual se correlacionó con el índice de los líquidos Fig. 18 b). Para ello usamos la siguiente ecuación:

$$n_s = a + b_1 A_F + b_2 A_F^2 \quad (28)$$

Donde n_s es el índice de refracción de la muestra, a , b_1 y b_2 son valores de ajuste, y A_F es la amplitud de la FFT que puede medirse experimentalmente.



Figuras 19. a) Espectros en reflexión normalizados a diferentes temperaturas b) Las amplitudes de FFT a diferentes temperaturas con procesamiento de señal cuando n_s era 1 (aire).

En la Figura 19 a) observamos los espectros en reflexión normalizados y su respuesta a la temperatura cuando el medio externo era aire. Se encontró que la sensibilidad de temperatura calculada del interferómetro era de $22,86 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, que es similar a la sensibilidad cuando el MCF estaba en contacto con un fluido. Esto sugiere que un líquido en contacto con la cara de la MCF no afecta la sensibilidad a la temperatura del interferómetro.

En la Fig. 19 b), calculamos las fluctuaciones de la amplitud de FFT en el rango de temperatura de 15 a 35 °C. Se encontró que eran de $\pm 0.198\%$ con respecto al valor de la amplitud de la FFT a 25 °C. Estas fluctuaciones inducen errores en las mediciones del coeficiente de expansión térmico (TOC). Dicho error se disminuye con un mayor procesamiento de señal, aumentando su costo computacional, pero disminuyendo el error. Así, se encontró que el TOC del fluido, el cual es $-3,29 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, lo que concuerda mejor con el valor dado por los laboratorios Cargille.

1.5.5 Resumen y discusión

En muchos procesos industriales actuales, la temperatura no se puede controlar durante las mediciones o procesos. Así, llevamos a cabo experimentos para determinar que tanto el índice de refracción de un líquido es afectado por la temperatura. Concluimos que el cambio del patrón de interferencia depende linealmente en temperatura (~ 22 pm por grado Celsius) y que la visibilidad del mismo patrón cambia. El cambio del patrón de interferencia se debe a cambios de Δn de los supermodos, por lo tanto son sensibles a la temperatura. Los cambios en la visibilidad del patrón de interferencia son debido a cambios en la reflectividad de la interfaz MCF-líquido que afecta a la intensidad de los supermodos, por lo tanto en su visibilidad y de esta manera podemos discriminar una variable con respecto a la otra y así obtener un sensor que es capaz de medir dos parámetros simultáneamente.

Se encontró que el índice de refracción inducía errores de alrededor de 50 pm al encontrar el cambio del patrón de interferencia; mientras que la temperatura indujo errores de $\pm 0,198\%$ en la búsqueda de la amplitud de la FFT. Creemos que la sensibilidad a la temperatura del índice de refracción cruzada puede reducirse aún más, en otras palabras, reducir el error cruzado, por ejemplo, proponemos un mejor procesamiento de los patrones de interferencia, así como promediar un número de patrones en una sola medida. También un mejor procesamiento en la FFT aumentando el coste computacional para realizar un centro de gravedad de la misma con ayuda de filtros para calcular la FFT. Con el fin de mayor precisión para encontrar su altura y así disminuir el error.

Hasta el momento, varios grupos de investigación han reportado sobre diferentes sensores de fibra óptica para la medición simultánea, ver tabla 3. Sin embargo, en estos casos, la temperatura y la segunda variable en cuestión se miden mediante dos sensores, uno de ellos se utiliza como referencia. En nuestro caso, se utiliza un único interferómetro de supermodos.

Tabla 3 Tecnologías actuales para detectar dos parámetros simultáneamente.

Esquemas de detección Dual	Tecnologías	Referencias
Presión y temperatura	Fabry Perot Interferometry MZI FBG FP/FBG FBG/PCG	[46] [47] [48] [49] [50] [51] [52]
Índice de refracción y Presión	FP FP/FBG	[53] [54]

Índice de Refracción y Temperatura	FP	[55]
	MZI	[56]
	FBG	[57]
	FP/FBG	[58]
	SPR	[59]
Tensión y Temperatura	FPI	
	FP/MZI	[60]
	FP/FBG	[61]

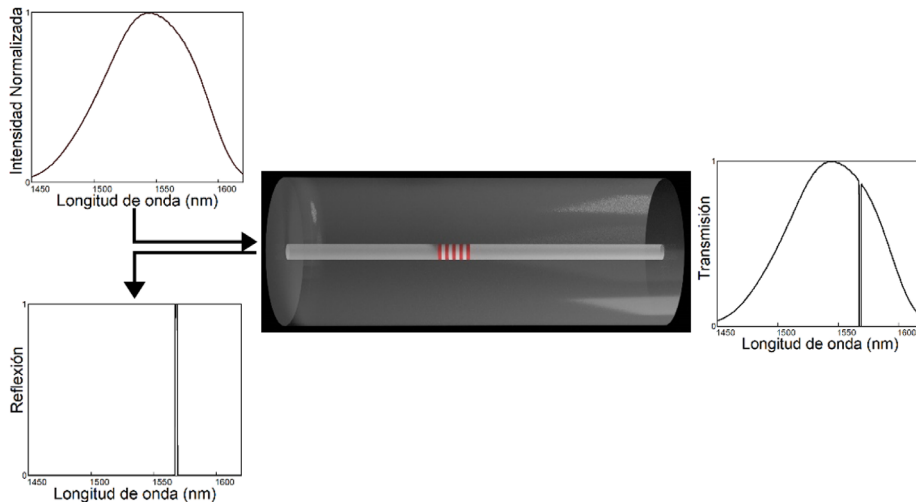
1.6 Sensor con dos núcleos y rejillas FBG inscrita

En esta sección de la tesis demostramos que se puede combinar tecnología madura de redes de Bragg inscritas (FBG) con la tecnología emergente de fibra multinúcleo fuertemente acoplado que detallamos anteriormente. Aprovecharemos la reflectividad de las redes de Bragg inscritas en las fibras de núcleo acoplado para desarrollar sensores de parámetros duales que se pueden monitorizar fácilmente. Nuestro sensor de doblamiento o curvatura es notablemente más simple que otros sensores de doblamiento FBG que necesitan dos o más redes de Bragg y una interrogación costosa para discriminar la dirección de doblamiento y compensar el efecto de la temperatura.

La fabricación es simple, con alta reproducibilidad, fiabilidad, interrogación novedosa con decodificación de los espectros complejos de nuestros sensores, Por lo que lo hace tan atractivo y novedoso. Pero sobre todo de muy bajo coste.

1.6.1 Introducción

Para esta parte de la tesis es fundamental comprender los conceptos en fibras ópticas con rejillas de Bragg (FBG), El funcionamiento del sensor de red de Bragg dependiente de la longitud de onda que se forma introduciendo una estructura de índice de refracción periódica, con una separación del orden de una longitud de onda de luz, dentro del núcleo de una fibra óptica. Siempre que un haz de luz de amplio espectro incida sobre la rejilla, una parte de su energía se transmitirá y otra se reflejará, como se muestra en la Fig. 20. La señal de luz reflejada será muy estrecha y estará centrada en la longitud de onda de Bragg que corresponde al doble de la unidad periódica de separación Λ . Cualquier cambio en el índice modal o el paso de rejilla de la fibra causado por cambios de tensión, temperatura o polarización dará como resultado un cambio de longitud de onda de Bragg [62].



Figuras 20. Espectros de una SMF con redes de Bragg (FBG)

La longitud de onda central de la banda reflejada o banda prohibida, llamada longitud de onda de Bragg, λ_B está determinada por el período espacial de la modulación del índice de refracción, Λ , y por el índice de refracción efectivo de la fibra óptica n , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (29)$$

Estas rejillas de período corto se conocen como FBG [[63], [64]]. Muchas de las tecnologías de sensores de fibra puntual más utilizadas se basan en FBG y varias decenas de empresas en todo el mundo comercializan soluciones de detección comercialmente viables con dicha tecnología.

Aquí proponemos el uso de una fibra óptica que consta de dos núcleos acoplados con rejillas FBG para el desarrollo de sensores de bajo coste. El espectro de reflexión de nuestro dispositivo es un pico angosto similar al de las FBG inscritas en fibras ópticas convencionales, ver figura 20. Observamos que la intensidad relativa de la FBG cambia cuando la fibra de núcleo acoplado se somete a doblamiento o curvatura puntual o periódica, pero no con la temperatura. También se observó que el sensor proporcionó tanto la amplitud como la dirección del doblamiento o curvatura.

Los sensores FBG de intensidad modulada son buenos candidatos para monitorear eventos dinámicos como vibración y curvatura. Aunque en el último caso, es importante discriminar la dirección de la curvatura.

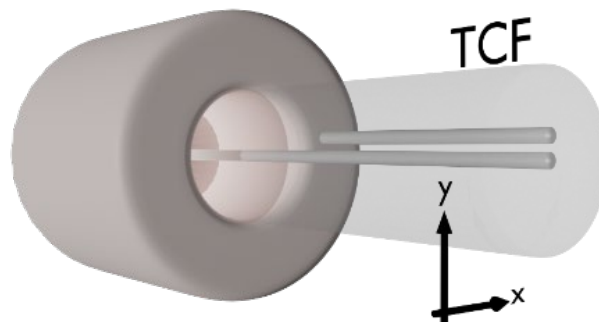
1.6.2 Hipótesis y objetivos

Hipótesis: Es posible desarrollar sensores de curvatura, flexión o vibraciones independientes de la temperatura basados en fibra de núcleo acoplado con redes de Bragg.

Objetivo: Desarrollar un sensor con redes de Bragg inscritas en una fibra óptica de núcleo acoplado para la detección rápida de doblamiento o vibración, bajo coste e independencia a la temperatura.

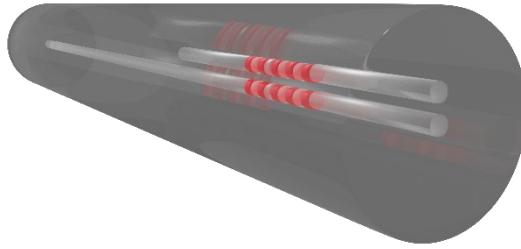
1.6.3 Fabricación del dispositivo

Utilizamos una fibra de núcleo acoplado, el cual tiene dos núcleos monomodo idénticos cada uno con un diámetro de $8\ \mu\text{m}$ y una apertura numérica de 0,12. Los cuales son dimensiones similares a la fibra monomodo SMF. Uno de los núcleos está ubicado en el centro geométrico de la fibra y el segundo núcleo se encuentra a unos $15\ \mu\text{m}$ aproximadamente de separación del núcleo central. Por lo que se puede analizar con el principio de fibras multi-núcleo fuertemente acopladas.



Figuras 21. Fibra óptica SMF-TCCF orientada en el eje y

En esta figura observamos un empalme por fusión a una fibra óptica monomodo convencional (SMF) que tenía una apertura numérica de 0,14 con un segmento corto de la fibra de núcleo doble acoplado (TCCF). En estas condiciones, el núcleo central del TCCF y el núcleo único del SMF se alinearon axialmente. Como el TCCF y el SMF tienen aperturas numéricas similares, la pérdida de empalme es prácticamente despreciable.



Figuras 22. Fibra óptica que consta de dos núcleos fuertemente acoplados con redes FBG

Mediante la técnica de máscara de fase bien establecida se inscribieron las redes de Bragg en los núcleos del TCCF, ver figura 22. Primero se hidrogenó a temperatura ambiente durante 14 días a una presión constante de 50 bar aproximadamente. Se inscribió una rejilla de 2 mm de largo con $\lambda_B = 1552.5$ nm. De esta manera, los dos núcleos tenían rejillas con el mismo período, longitud y reflectividad. Cabe mencionar que las redes de Bragg se inscribieron en el ITEAM de la Universidad Politécnica de Valencia.

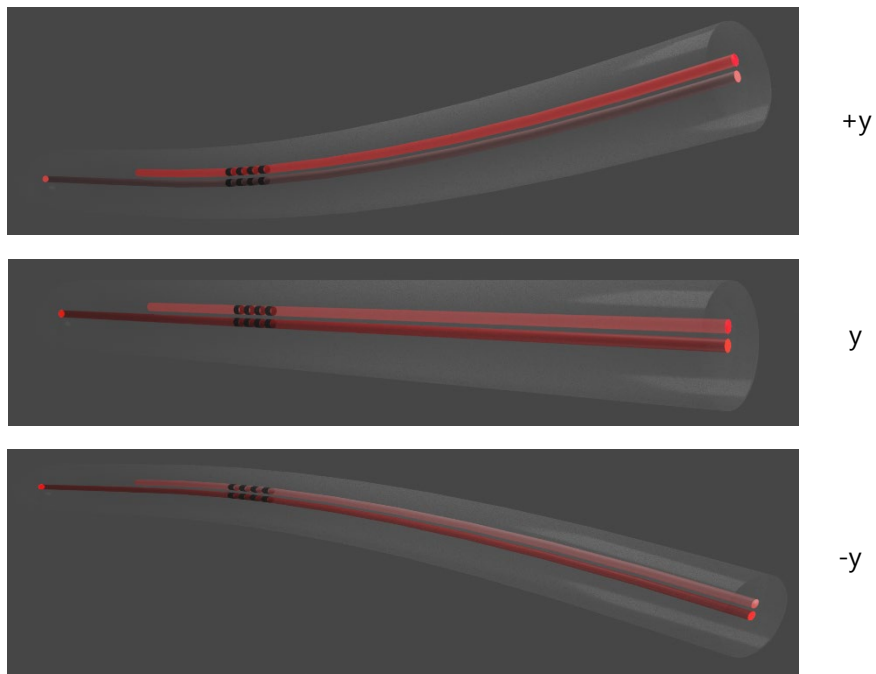
1.6.4 Principio de operación

Para entender el principio de operación debemos comprender como se propaga la luz a través de esta estructura. Debido a la simetría axial de la estructura SMF-TCCF, la fibra SMF propaga el modo fundamental LP_{01} , este modo excita dos supermodos en la estructura TCCF, los cuales se propagan a diferentes velocidades. Como los dos núcleos de la fibra son idénticos y la luz se lanza al núcleo central, la potencia óptica normalizada en el núcleo central (P_c) del TCCF a una longitud L desde la unión SMF-TCCF es:

$$P_c(L, \lambda) = \cos^2\left(\frac{\pi \Delta n_{eff} L}{\lambda}\right) \quad (21)$$

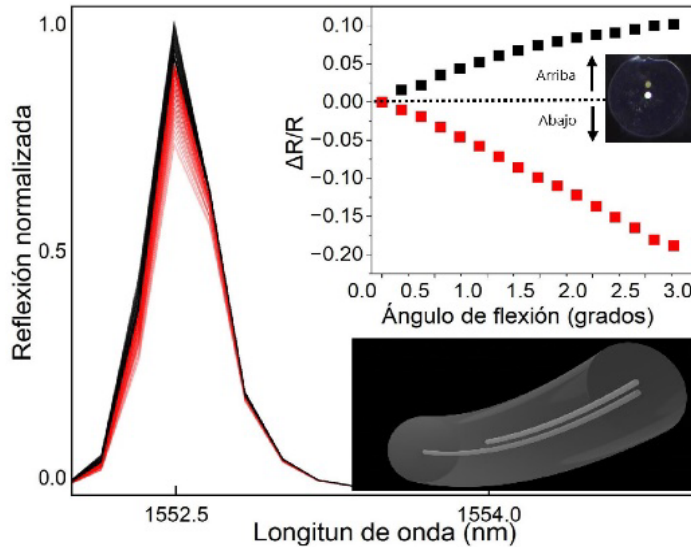
Donde, Δn_{eff} es la diferencia entre los índices de refracción efectivos de los supermodos excitados en el TCCF y λ es la longitud de onda de la fuente óptica. Por tanto, si se mide la red de Bragg indica que se reflejará una longitud de onda específica y que la reflexión máxima depende del coeficiente de acoplamiento de los supermodos. Si el TCCF se dobla en la dirección y , de acuerdo con el sistema de coordenadas que se muestra en la Fig. 21, el núcleo

descentrado experimentará más o menos tensión que el central dependiendo de la dirección del doblamiento. La tensión en el TCCF inducirá una diferencia en los índices de refracción de los núcleos. En consecuencia, el índice de refracción efectivo de los supermodos excitados en el TCCF cambiará cuando se doble la fibra. Por lo tanto, se pueden esperar cambios en la reflectividad máxima de la red.



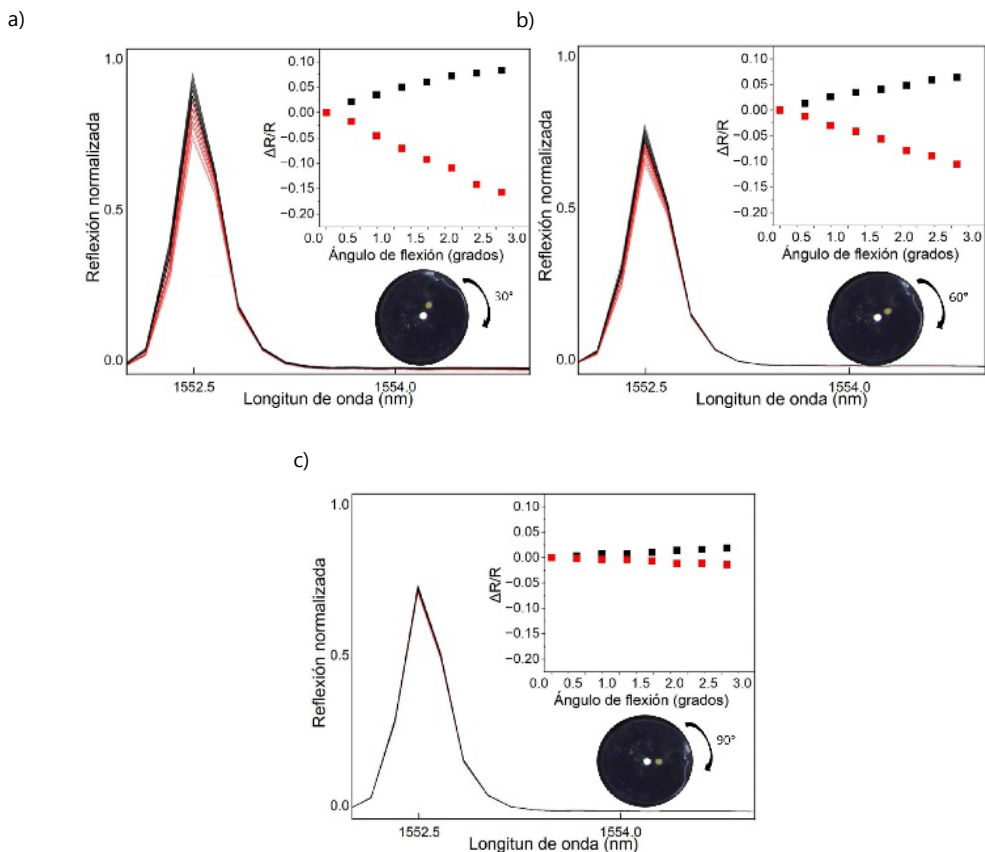
Figuras 23. Reflectividad de la red de Bragg en TCCF de acuerdo al sistema de coordenadas en la fig. 22.

La distribución de intensidad del supermodo en la fibra de dos núcleos doblada da lugar a cambios en la reflectividad de la red de Bragg, ya que depende de la cantidad de luz en el núcleo. Para obtener máxima sensibilidad es importante que los núcleos estén orientados en la dirección del doblamiento. Esto se debe a la compresión que experimenta un núcleo de este tipo cuando el TCCF se dobla en la dirección +y. Si se dobla al contrario la curvatura está en la dirección -y. En este caso, el núcleo central está comprimido, por lo que tiene más intensidad que el núcleo descentrado, ver Figura 23. La razón de este comportamiento se debe a la asimetría de la TCCF. Los índices de los núcleos de TCCF aumentan o disminuyen dependiendo de la dirección de la flexión debido a la tensión experimentada por el material del que están hechos los núcleos [65].



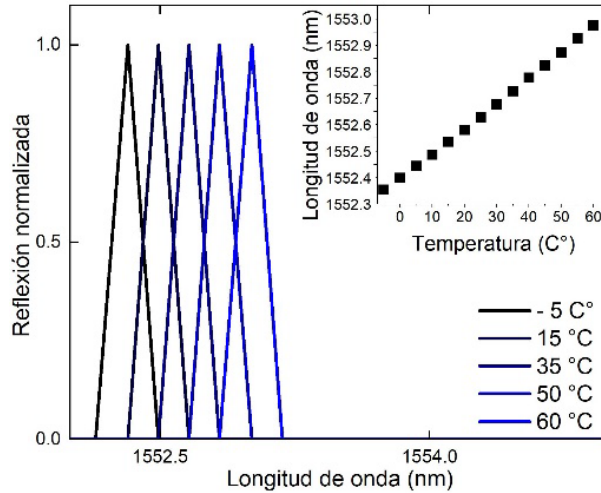
Figuras 24. Espectros de reflexión para una rejilla de Bragg de 2 mm de longitud inscrita en el TCCF en diferentes ángulos de flexión en la dirección $-y$ (rojo) y $+y$ (negro). El gráfico de inserción muestra la curva de calibración

Para determinar el rendimiento de nuestros dispositivos como sensores de curvatura, los núcleos del TCCF se orientaron como se muestra en la Fig. 21, después de eso, la fibra se dobló en las direcciones $+y$ y $-y$. Durante los experimentos, se fijó la unión SMF-TCCF y se dobló el TCCF en un punto ubicado a 31 mm del punto de fijación, ver Fig. 23. El TCCF se cortó en ángulo para evitar reflexión de Fresnel que podrían afectar las mediciones de reflectividad. Se utilizó una etapa de traducción motorizada para doblar la fibra de doble núcleo de manera controlada. En cada ángulo de flexión, se recogió el espectro de la rejilla. Se encontró que las sensibilidades a la flexión en las direcciones $+y$ y $-y$ eran, 0,043 y -0,067 a. u. por grado respectivamente. La diferencia en las sensibilidades puede deberse a la asimetría del TCCF. Vale la pena señalar que en ambos casos $\Delta R/R$ cambia linealmente con el ángulo de flexión y su signo puede indicar la dirección de la flexión.



Figuras 25. Espectros de reflexión con diferentes orientaciones de los núcleos de TCCF con respecto a la dirección de flexión que estaba en las direcciones +y -y, a) 30°, b) 60° y c) 90° respectivamente. Los gráficos de inserción muestra la curvas de calibración +y (negro) -y (rojo)

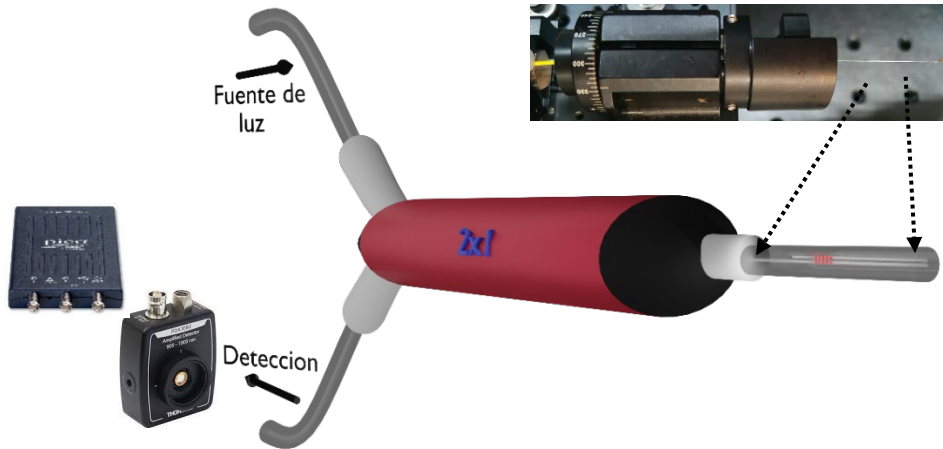
Los resultados de la figura 25 indican que la sensibilidad a la flexión disminuye gradualmente con la orientación del núcleo descentrado de la fibra con respecto a la dirección de la flexión. Se observan diferentes orientaciones de los núcleos de fibra, el TCCF se giró en el sentido de las agujas del reloj en pasos de 30°, en cada ángulo, la fibra se dobló en las direcciones (+y, -y). Por tanto, si se requiere máxima sensibilidad es importante que los núcleos estén orientados en la dirección de la flexión como se muestran en la figura 24.



Figuras 26. Reflexión de la rejilla de Bragg de fibra de núcleo acoplado a diferentes temperaturas. Los gráficos insertados muestran la posición (puntos sólidos) de la longitud de onda de Bragg en función de la temperatura.

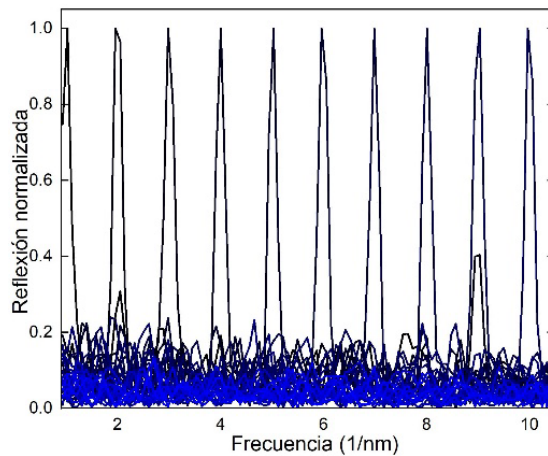
Se estudió el efecto de la temperatura en las rejillas en un rango de temperaturas entre -5 °C y 60 °C. Los resultados de nuestros experimentos se muestran en la Figura 26. El pico de reflexión normalizado de la rejilla no cambió con la temperatura, pero la posición de la longitud de onda de Bragg cambió linealmente. La sensibilidad a la temperatura es de 9.56 pm/ °C.

Una aplicación del dispositivo fabricado es la monitorización de vibraciones (flexión cíclica). Para comprobar dicha aplicación, el TCCF se orientó con los núcleos en la dirección de vibración de mayor sensibilidad ver Figura 24. La fibra se hizo vibrar con un transductor piezoeléctrico conectado a un generador de funciones. Para interrogar a nuestro sensor, la luz reflejada se controló con un único fotodetector amplificado de germanio (modelo PDA30B2 adquirido de Thorlabs) conectado a un osciloscopio de PC en miniatura alimentado por USB (Picoscope, serie 2000, adquirido de Pico Technologies) como se muestra en la Figura 27.



Figuras 27. Esquema de interrogación de vibraciones con fibras de dos núcleos y rejillas FBG inscritas.

Las vibraciones inducidas en el segmento TCCF se detectaron como cambios periódicos de voltaje con el osciloscopio. A partir de tales oscilaciones de voltaje, calculamos la transformada rápida de Fourier (FFT) con el software proporcionado por el fabricante del osciloscopio y un procesamiento de la señal para normalizar la amplitud del pico de la FFT. Observamos el comportamiento de nuestro sensor a en un amplio rango de frecuencias de vibración, sin embargo nos enfocamos en vibración de baja frecuencia, ya que es la banda crucial que determina la fiabilidad de dispositivo.



Figuras 28. Amplitud normalizada de las FFT medidas a bajas frecuencias

La Figura 28 se muestran algunas de las FFT normalizadas, cuando el TCCF vibraba a bajas frecuencias. Se puede ver un pico dominante en cada frecuencia de entrada. Por lo tanto, podemos concluir que un TCCF con rejillas de Bragg se puede usar para monitorear vibración desde bajas frecuencias (Hz), hasta altas frecuencias (KHz), ver artículo ** en el Anexo **.

1.6.5 Resumen y discusiones

Se pueden desarrollar con fibras ópticas de núcleo acoplado y redes de Bragg sensores de doblamiento independientes a la temperatura, modulando en intensidad y que tienen la capacidad de distinguir la dirección del doblamiento. Para ello, el único requisito es orientar los núcleos del TCCF con respecto a la dirección de curvatura.

La fabricación es sencilla solo se requiere fibra estándar SMF empalmada con una sección de fibra de núcleo acoplado con redes de Bragg y un sistema de interrogación compacto, simple, rápido y de bajo coste.

Una aplicación potencial pero sencilla del sensor aquí propuesto es la monitorización de vibraciones (doblamiento cíclico). Las vibraciones inducidas en el segmento TCCF se detectaron como cambios periódicos de voltaje con un osciloscopio. Nuestro sensor fue capaz de medir frecuencias de vibración desde bajas frecuencias (Hz) hasta altas frecuencias (KHz).

Como trabajos futuros derivados de los resultados mostrados en esta tesis, se pueden ampliar las aplicaciones de las redes de Bragg en el campo de la detección y quizás en otras aplicaciones, por ejemplo, monitorear fenómenos rápidos como impactos, ultrasonidos, etc. debido a los cambios de intensidad se pueden monitorizar a altas velocidades. También es factible la multiplexación de sensores de redes de Bragg de fibra de núcleo acoplado. Los multiplexores y demultiplexores por división de longitud de onda están disponibles comercialmente; por lo tanto, monitorizar los cambios de reflexión de varias longitudes de onda de Bragg es sencillo y de bajo coste.

Referencias

- [1] «bcc Research,» 06 2021. [En línea]. Available: <https://www.bccresearch.com/market-research/photronics/fiber-optic-sensors-markets-report.html>. [Último acceso: 11 04 2023].
- [2] Tracey, P. M., Intrinsic fiber-optic sensors, vol. 27, IEEE Transaction on Industry Applications, 1991, pp. 96-98.
- [3] Matias, I. Del Villar and I. R., "Optical fibre sensors: fundamentals for development of optimized devices", Wiley-IEEE Press, 2020.
- [4] Choi, W S, Shim, K M, Chong, K H, An, J E, Kim, C J, y Park, B Y, «"Sagnac Effect Compensations and Locked States in a Ring Laser Gyroscope",» Snesors, vol. 23, nº 1718, p. 3, 2023.
- [5] O. Frazao, J. L. Santos, and J. M. Baptista,, «"Strain and temperature discrimination using concatenated high-birefringence fiber loop mirrors",» IEEE Photonics Technology Letters, vol. 19, nº 1260, pp. 13-16, 2007.
- [6] A. Prasanth, S.R. Meher, Z.C. Alex, «"Metal oxide thin films coated evanescent wave based fiber optic VOC sensor",» Sensors and Actuators A: Physical, vol. 338, 2022.
- [7] D. Barrera, V. Finazzi, J. Villatoro, S. Sales and V. Pruneri, «"Packaged Optical Sensors Based on Regenerated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Applications",» IEEE Sensors Journal, vol. 12, nº 1, pp. 107-112, 2012.
- [8] ABBOTT, B. P., et al, «"LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration (2016) Directly comparing GW150914 with numerical solutions of Einstein's equations for binary black hole coalescence",» Physical Review, vol. 94, 2016.
- [9] Suematsu, M.; Takeda, M., «"Wavelength-shift interferometry for distance measurements using the Fourier transform technique for fringe analysis",» Appl. Opt., vol. 30, p. 4046, 1991.
- [10] Fischer, E.; Dalhoff, E.; Heim, S.; Hofbauer, U.; Tiziani, H.J., «"Absolute interferometric distance measurement using a FM-demodulation technique",» Appl. Opt., vol. 34, p. 5589, 1995.

- [11] Liu, G.; Hou, W.; Han, M., «"Unambiguous Peak Recognition for a Silicon Fabry-Pérot Interferometric Temperature Sensor",» J. Light.Technol., vol. 36, pp. 1970-1978, 2018.
- [12] Han, M., «"Theoretical and Experimental Study of Low-Finesse Extrinsic Fabry-Perot Interferometric Fiber Optic Sensors",» de Thesis, VA, USA, 2006.
- [13] Yi, J., «"High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by the peak-to-peak",» Appl. Opt, vol. 47, pp. 925-932, 2008.
- [14] Aydin, D., Barnes, J. A., & Loock, H. P., «"In-fiber interferometry sensors for refractive index",» Applied Physics Reviews, vol. 10, n° 1, p. 011307, 2023.
- [15] D. J. David, D. Shaw, H. Tucker, et, «"Design, development, and performance of a fiber optics refractometer: Application to HPLC",» Rview of Scientific Instruments, vol. 58, 1987.
- [16] Zhaoxu Zhang, Huaping Gong, Changgui Yu, Kai Ni, Chunliu Zhao,, «"An optical fiber humidity sensor based on femtosecond laser micromachining Fabry-Perot cavity with composite film",» Optics & Laser Technology, vol. 150, 2022.
- [17] Cheng, Xu Sharif Khodaei, Zahra, «"Temperature calibration for guided wave hybrid system with FBG-based Fabry-Perot sensor",» Journal of Intelligent Material Systems and Structures, p. 1045389X221109251, 2022.
- [18] Paula A.R. Tafulo, P.A.S. Jorge, J.L. Santos, O. Frazão,, «"Fabry-Pérot cavities based on chemical etching for high temperature and strain measurement",» Optics Communications, vol. 285, n° 6, pp. 1159-1162, 2012.
- [19] Silva, D.; Monteiro, CS; Silva, SO; Frazão, O.; Pinto, JV; Raposo, M.; Ribeiro, Pensilvania; En serio, S., «"Sputtering Deposition of TiO2 Thin Film Coatings for Fiber Optic Sensors",» Photonics, vol. 9, n° 342, 2022.
- [20] G. Coviello, V. Finazzi, J. Villatoro, and V. Pruneri, «"Thermally stabilized PCF-based sensor for temperature measurements up to 1000°C",» Opt. Express, vol. 17, pp. 21551-21559, 2009.
- [21] Qiao, R. Wang and X., «"Gas Refractometer Based on Optical Fiber Extrinsic Fabry-Perot Interferometer With Open Cavity",» IEEE Photonics Technology Letters, vol. 27, n° 3, pp. 245-248, 2015.

- [22] O. Frazão, P. Caldas, J. Santos, P. Marques, C. Turck, D. Lougnot, and O. Soppera, «"Fabry-Perot refractometer based on an end-of-fiber polymer tip",» *Optics Letter*, vol. 34, pp. 2474-2476, 2009.
- [23] Aritz Ozcariz, Dafne A. Piña-Azamar, Carlos R. Zamarreño, René Dominguez, Francisco J. Arregui, «"Aluminum doped zinc oxide (AZO) coated optical fiber LMR refractometers—An experimental demonstration",» *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 281, pp. 698-704, 2019.
- [24] Brown, Z. Zhu and T. G., «"Full-vectorial finite-difference analysis of microstructured optical fibers",» *Opt. Express*, vol. 10, pp. 853-864, 2002.
- [25] M. Steel, T. White, C. Martijn de Sterke, R. McPhedran, and L. Botten,, «"Symmetry and degeneracy in microstructured optical fibers",» *Opt. Lett.*, vol. 26, pp. 488-490, 2001.
- [26] Lin, R., Udalcovs, A., Ozolins, O., Pang, X., Gan, L., Tang, M., ... & Chen, J., «"Telecommunication compatibility evaluation for co-existing quantum key distribution in homogenous multicore fiber",» *IEEE Access*, vol. 8, pp. 78836-78846, 2020.
- [27] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meade, «Photonic Crystals,» de Molding the Flow of Light, 2008.
- [28] Pevec, S.; Donlagić, D, «"Multiparameter fiber-optic sensors",» *Opt. Eng.*, vol. 58, p. 072009, 2019.
- [29] T. Liu, et al., «"Review of fiber mechanical and thermal multi-parameter measurement technologies and instrumentation.",» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, pp. 3724-3739, 2021.
- [30] C. Liu, et al., «"Multiparameter sensor based on micro/nano-structured optical fiber and composites",» *Heliyon*, vol. 8, p. ID: e10941, 2022.
- [31] J. E. Antonio-Lopez, Z. S. Eznavah, P. LiKamWa, A. Schülzgen, and R. Amezcua-Correa, «"Multicore fiber sensor for high-temperature applications up to 1000 °C",» *Opt. Lett.*, vol. 39, pp. 4309-4312, 2014.
- [32] J. Amorebieta, G. Durana, A. Ortega-Gomez, R. Fernández, J. Velasco, I. S.de Ocariz, J. Zubia, J. E. Antonio-López, A. Schülzgen, and R. Amezcua-Correa, «"Packaged multi-core fiber interferometer for high-temperature sensing",» *J. Lightwave Technol.*, vol. 37, pp. 2328-2334, 2019.

- [33] J. Amorebieta, A. Ortega-Gomez, G. Durana, R. Fernandez, E. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, J. Zubia, R. Amezcua-Correa, and J. Villatoro, «"Compact omnidirectional multicore fiber-based vector bending sensor."»,» *Sci. Rep.*, vol. 11, p. 5989, 2021.
- [34] A. V. Newkirk, J. E. Antonio-Lopez, A. Velazquez-Benitez, J. Albert, R. Amezcua-Correa, and A. Schulzgen, «"Bending sensor combining multicore fiber with a mode-selective photonic lantern",» *Opt. Lett.*, vol. 40, pp. 5188-5191, 2015.
- [35] J. Villatoro, A. Van Newkirk, E. Antonio-Lopez, J. Zubia, A. Schülzgen, and R. Amezcua-Correa, «"Ultrasensitive vector bending sensor based on multicore optical fiber",» *Opt. Lett.*, vol. 41, pp. 832-835, 2016.
- [36] J. Amorebieta, A. Ortega-Gomez, G. Durana, R. Fernández, E. Antonio-Lopez, A. Schülzgen, J. Zubia, R. Amezcua-Correa, and J. Villatoro, «"Highly sensitive multicore fiber accelerometer for low frequency vibration sensing",» *Sci. Rep.*, vol. 10, pp. 1-11, 2020.
- [37] J. Villatoro, E. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, and R. Amezcua-Correa, «"Miniature multicore optical fiber vibration sensor",» *Opt. Lett.*, vol. 42, pp. 2022-2025, 2017.
- [38] N. Cuando-Espitia, M. A. Fuentes-Fuentes, D. A. May-Arrijoja, I. Hernández-Romano, R. Martínez-Manuel, and M. Torres-Cisneros, «"Dual-point refractive index measurements using coupled seven-core fibers",» *J. Lightwave Technol.*, vol. 39, pp. 310-319, 2021.
- [39] M. C. Alonso-Murias, D. Monzon-Hernandez, O. Rodriguez-Quiroz, J. E. Antonio-Lopez, A. Schulzgen, R. Amezcua-Correa, and J. Villatoro, «"Longrange multicore optical fiber displacement sensor",» *Opt. Lett.*, vol. 46, pp. 2224-2227, 2021.
- [40] Monserrat Alonso-Murias, David Monzón-Hernández, Enrique Antonio-Lopez, Axel Schülzgen, Rodrigo Amezcua-Correa, Joel Villatoro, «"Hybrid optical fiber Fabry-Perot interferometer for nano-displacement sensing",» *Optics & Laser Technology*, vol. 155, p. 108426, 2022.
- [41] Y. Chunxia, D. Hui, D. Wei, X. J. S. Chaowei, and A. A., «"Weakly-coupled multicore optical fiber taper-based high-temperature sensor",» *Physical*, vol. 280, pp. 139-144, 2018.
- [42] Cen Xia, Neng Bai, Ibrahim Ozdur, Xiang Zhou, and Guifang Li,, «"Supermodes for optical transmission",» *Opt. Express*, vol. 19, pp. 16653-16664, 2011.
- [43] C. Xia et al., «"Supermodes in coupled multi-core waveguide structures",» *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, vol. 22, n° 2, pp. 196-207, 2015.

- [44] Huang, Wei-Ping, «"Coupled-mode theory for optical waveguides: an overview",» J. Opt. Soc. Am., vol. 11, n° 3, pp. 963-983, 1994.
- [45] Caucheteur, C., Villatoro, J., Liu, F., Loyez, M., Guo, T. y Albert, J., «"Mode-division and spatial-division optical fiber sensors.",» Advances in Optics and Photonics, vol. 1, n° 14, pp. 1-86, 2022.
- [46] Zhang, S., Mei, Y., Xia, T., Cao, Z., Liu, Z. y Li, Z., «"Simultaneous measurement of temperature and pressure based on Fabry-Perot Interferometry for marine monitoring",» Sensors, vol. 22, n° 13, p. 4979, 2022.
- [47] al., C. Pang et, «"MEMS Fabry-Perot sensor interrogated by optical system-on-a-chip for simultaneous pressure and temperature sensing",» Opt. Express, vol. 21, n° 19, pp. 21829-2139, 2013.
- [48] Eftimov, W. J. Bock and T. A., «"Simultaneous hydrostatic-pressure and temperature-measurement employing an Lp(01)-Lp(11) fiberoptic",» IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 43, n° 2, pp. 337-340, 1994.
- [49] L. Htein et al., «Bragg grating in novel two-core holey fiber for simultaneous measurement of pressure and temperature,» de Opto-Electron. and Commun. Conf. (OECC) and Photonics Global Conf. (PGC), 2017.
- [50] Liu, Y., Guo, Z., Zhang, Y., Chiang, K. S., & Dong, X., «"Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre Bragg grating.",» Electronics letters, vol. 1, p. 36, 2000.
- [51] S. N. Wu et al., «"FBG incorporated side-open Fabry-Perot cavity for simultaneous gas pressure and temperature measurements",» J. Lightwave Technol., vol. 34, pp. 3761-3767, 2016.
- [52] W. A. S. A. M. I. A. & I. A. Ali, «"Temperature and pressure monitoring of the human body based fiber Bragg grating and optical crystal fiber.",» de In AIP Conference Proceedings (Vol. 2660, No. 1, p. 020094), 2022.
- [53] Donlagic, S. Pevec and D., «"Miniature fiber-optic sensor for simultaneous measurement of pressure and refractive index",» Opt. Lett., vol. 39, pp. 6221-6224, 2014.
- [54] Liu, Y. G., Liu, X., Zhang, T., & Zhang, W., «"Integrated FPI-FBG composite all-fiber sensor for simultaneous measurement of liquid refractive index and temperature",» Optics and Lasers in Engineering, vol. 111, pp. 167-171, 2018.

- [55] S. Pevec and D. Donlagic, «"High resolution, all-fiber, micro-machined sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature",» *Opt. Express*, vol. 22, pp. 16241-16253, 2014.
- [56] X. Q. Ni et al., «"A hybrid Mach–Zehnder interferometer for refractive index and temperature measurement",» *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 28, pp. 1850-1853, 2016.
- [57] H. Z. Yang et al., «"Cladless few mode fiber grating sensor for simultaneous refractive index and temperature measurement",» *Snes. Actuators A*, vol. 228, pp. 62-68, 2015.
- [58] Y. G. Liu et al., «"Micro-structured optical fiber sensor for simultaneous measurement of temperature and refractive index",» *Opt. Fiber Technol.*, vol. 41, pp. 168-172, 2018.
- [59] Teng, C., Shao, P., Li, S., Li, S., Liu, H., Deng, H., ... y Deng, S., «"Double-side polished U-shape plastic optical fiber based SPR sensor for the simultaneous measurement of refractive index and temperature",» *Optics Communications*, vol. 525, p. 128844, 2022.
- [60] Su, B., Qi, B., Zhang, F., Zhong, L., Xu, O., & Qin, Y., «"Hybrid fiber interferometer sensor for simultaneous measurement of strain and temperature with refractive index insensitivity.",» *Optics Communications*, vol. 522, p. 128637, 2022.
- [61] Zhang, X., Peng, W., Shao, L. Y., Pan, W., & Yan, L., «"Strain and temperature discrimination by using temperature-independent FPI and FBG.",» *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 272, pp. 134-138, 2018.
- [62] Méndez, A.,, «Overview of fiber optic sensors for NDT applications,» de IV NDT Panamerican Conference, 2007.
- [63] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki,, «"Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication",» *Appl. Phys.Lett.*, vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- [64] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, «"Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method",» *Opt. Lett.*, vol. 15, pp. 823-825, 1989.
- [65] Dong, X., Shao, L.-Y., Fu, H., Tam, H. Y. & Lu, C., «"Intensity-modulated fiber Bragg grating sensor system based on radio-frequency",» *Opt. Lett.*, vol. 33, pp. 482-484, 2008.
- [66] D. R. e. a. Hjelme, «Optical sensing of measurands». U.S. Patente 7,440,110., 21 Octobre 2008.

- [67] F. M.-P. G. G. P.-S. J. A. Flores-Bravo, «A comparison of approximate and exact modes in few-mode micro-optical fibers», de Proc. SPIE 10404, Infrared Sensors, Devices, and Applications VII, San Diego, California , 2017.
- [68] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bahtia, T. Erdogan, and J. E., «"Long-period fiber gratings as band-rejection filters",» J. Lightwave Technologie, n° 14, pp. 58-65, 1996.
- [69] Gengsong Li, Zhen Liu, Jianxun Feng, Guiyao Zhou, Xuguang Huang,, «"Pb2+ fiber optic sensor based on smart hydrogel coated Mach-Zehnder interferometer",» Optics & Laser Technology, p. 145, 2022.
- [70] Jenny, R.,, Fundemantals of Fiber Optics: An Introduction for Beginners, New York: Volpi Manufacturing USA, 2000.
- [71] K. O. Hill, B. Malo, K. A. Vineberg, F. Bilodeau, D. C. Johnson, and I. Skinner,, «"Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written",» Electron. Lett., vol. 26, n° 16, pp. 1270-1272, 1990.
- [72] Liu, S.; Yang, K.; Wang, Y.; Qu, J.; Liao, C.; He, J.; Li, Z.; Yin, G.; Sun, B.; Zhou, J.; al., et, «"High-sensitivity strain sensor based on in-fiber rectangular air bubble",» Scientific Report, vol. 5, pp. 1-7, 2015.
- [73] Lu, C.; Dong, X.; Wu, C., «"Characteristics of Critical-Wavelength-Existed Fiber-Optic Mach-Zehnder Interferometers and Their Sensing Applications",» Photonics, vol. 378, p. 9, 2022.
- [74] Rosolem, Joao Batista, et al., «"Fiber optic bending sensor for water level monitoring: Development and field test: A review",» IEEE Sensors Journal, vol. 13, n° 11, pp. 4113-4120, 2013.
- [75] Waluyo, Tomi Budi, and Dwi Bayuwati., «Using a telecommunication-grade single mode patchcord as an optical extensometer based on bending loss», de International Seminar on Photonics, Optics, and Its Applications, Sanur,Bali, Indonesia, 2015.
- [76] Xiao Tan, Pengwei Guo, Xingxing Zou, Yi Bao,, «"Buckling detection and shape reconstruction using strain distributions measured from a distributed fiber optic sensor",» Measurement, vol. 200, 2022.

- [77] Yulan Zhang, Yongfeng Wu, Yang Han, Jing Wu, Jianxin Ren, Yaya Mao, Beibei Mao, Bo Liu,, «"High sensitivity strain sensor based on a novel offset-core single micro-tapered fiber-optic Mach-Zehnder interferometer",» Optical Fiber Technology, vol. 79, 2022.
- [78] Zahra Akbarpour, Vahid Ahmadi, Farzaneh Arabpour Roghabadi, «"Enhanced Mach-Zehnder interferometer multimode–single-mode–multimode fiber optic refractive index sensor based on surface plasmon resonance",» Optical Fiber Technology, vol. 73, 2022.

2 Sección 2. Conclusiones de la tesis

En conclusión, los resultados de esta tesis se resumen en lo siguiente. Actualmente, y con la ayuda de abogados especializados que colaboran con la UPV/EHU, se ha obtenido una **patente europea con número de aplicación 20382749.8**.

Se ha logrado satisfactoriamente avances en los sensores interferométricos Fabry-Perot y en aquellos basados en fibras especiales con núcleos fuertemente acoplados. Se publicaron 3 artículos científicos donde soy el primer autor. El primer trabajo se publicó en *Optics & Laser Technology* (IF = 4.939), el segundo en la revista *Journal of Lightwave Technology* (IF = 4.439) y el tercero en la revista **Scientific Reports** (IF = 4.997).

También se han presentado trabajos en congresos nacionales e internacionales como el **SPIE Photonics Europe 2022, Frontiers in Optics 2021, CLEO/EUROPE-EQEC 2021, y OPTOEL 2019**.

Así mismo se ha divulgado el trabajo de esta tesis en dos seminarios internos, uno más en el grupo de óptica en la universidad de Twente, Enschede the Netherlands. También di un seminario sobre comunicaciones ópticas en la Universidad Autónoma Metropolitana, Ciudad de México.

Los sensores realizados en la presente tesis son innovadores y resuelven algunos de los principales problemas a la fecha reportados, los cuales son, fiabilidad, alta sensibilidad, reproducibilidad, escalas micro y nano métricas, fabricación sencilla, interrogación simultánea, no necesitan otro sensor de referencia para compensar la temperatura, pueden medir dos variables simultáneamente, puede operar en un amplio rango de longitudes de onda (desde 800 a 1600 nm, aproximadamente) y su fabricación e interrogación son de bajo coste. Con todas estas cualidades hacen de estos sensores muy atractivos en el mercado actual.

El primer sensor presentado en esta tesis titulado "*Optical fiber interferometer for temperature-independent refractive index measuring over a broad range*" no solo tiene el respaldo científico por medio de una revista especializada en el área, también se ha solicitado una patente europea (EP3954983A1), se han obtenido positivos avances, para ello menciono textualmente la respuesta de la evaluación sobre el método de fabricación de dicho dispositivo:

"No se plantean objeciones con respecto a la novedad y la actividad inventiva contra la reivindicación. La combinación de características de la reivindicación no se conoce a partir del estado de la técnica disponible ni se hace evidente a partir del mismo. Se considera que la técnica anterior más cercana con respecto a la reivindicación es D1 [66], que describe un proceso de fabricación diferente en comparación con la reivindicación. D1 describe el llenado

*de polímero en una cavidad formada por una férula y una fibra óptica colocada dentro de la férula. Los demás documentos de la técnica anterior no describen ni insinúan las características inventivas de la reivindicación, a saber, introducir una fibra óptica en un extremo distal de una férula, aplicar un polímero en el extremo distal y retraer la fibra óptica a una posición dentro de la férula. Dado que el estado de la técnica no hace evidente el método de fabricación de la reivindicación, **se considera que el método satisface los requisitos de novedad y actividad inventiva, de conformidad con los Artículos 54 y 56 EPC.**"*

Por lo tanto, este enfoque brindará una base práctica y teórica para nuevos conceptos en biodetección y permitirá el diseño de nuevos dispositivos de bajo coste. Por lo tanto, el sensor aquí propuesto puede adaptarse dependiendo de las necesidades del mercado. Además, con la cualidad de compensan el efecto de la temperatura, alta reproducibilidad y bajo coste.

En el siguiente manuscrito presentado en esta tesis, titulado "*Simultaneous Sensing of Refractive Index and Temperature With Supermode Interference*".

Demostramos que un solo interferómetro supermodo es capaz de medir dos parámetros simultáneamente, temperatura e índice de refracción. Además de medir el coeficiente termo-óptico de una muestra. Para su óptimo desempeño es necesario que el extremo de la fibra multinúcleo sea plano, por lo que se comportaba como un espejo de baja reflectividad cuyo reflejo dependía del índice de refracción externo. Para el procesamiento de datos usamos la amplitud de la transformada rápida de Fourier FFTA, los cambios del patrón de interferencia se pueden decodificar fácilmente.



Otra ventaja importante del dispositivo es que la longitud de la fibra multinúcleo no es determinante en el rendimiento del sensor. Cuenta con alta fiabilidad, reproducibilidad y sensibilidad. Además, el dispositivo se puede reutilizar tantas veces como sean necesarias.

Finalmente, y no menos importante el manuscrito de investigación titulado "*Coupled-core fiber Bragg gratings for low-cost sensing*". Se propone y demuestra un sensor con rejillas de Bragg de fibra óptica de núcleo acoplado. Se encontró que la reflectividad relativa de dichas rejillas cambiaba cuando la fibra de núcleo acoplado se sometía a doblamiento puntual o periódico. Esta característica hace que la interrogación de tales rejillas sea simple, rápida y de bajo costo. Lo cual resuelve la necesidad de un sistema de interrogación sofisticado. Los cambios de reflectividad de las redes se atribuyen a las propiedades de los supermodos soportados por la fibra de núcleo acoplado. Como aplicaciones potenciales de las rejillas mencionadas, se demuestran el doblamiento vectorial de intensidad modulada y la detección de vibraciones. Tenemos certeza que los resultados pueden allanar el camino para el desarrollo de muchos sensores económicos. Además, las redes de fibra de Bragg de núcleo acoplado pueden ampliar el uso de la tecnología de rejilla en otras áreas.

Consideramos que estos nuevos enfoques de detección podría ser la clave para la fabricación de nuevos dispositivos basados en interferometría multinúcleo y/o Fabry-Perot dependiendo el escenario a medir. Por tanto, el objetivo de la tesis se ha cumplido. No obstante, existen mejoras en las que seguiremos trabajando para dotar a los dispositivos de un mayor potencial. Es importante tener en cuenta que las tecnologías presentadas aquí abren el camino para la fabricación de dispositivos sensores con capacidades y características importantes que los pueden hacer de utilidad en varios sectores industriales y para diversas aplicaciones de interés práctico.

3 Sección 3. Anexos

Patente Europea (Interferometric optical fiber refractometer)

(19) 	
	(11) EP 3 954 983 A1
(12) EUROPEAN PATENT APPLICATION	
(43) Date of publication: 16.02.2022 Bulletin 2022/07	(51) International Patent Classification (IPC): G01N 21/41^(2006.01) G01N 21/45^(2006.01)
(21) Application number: 20382749.8	(52) Cooperative Patent Classification (CPC): G01N 21/45; G01N 21/4133; G01N 2021/458
(22) Date of filing: 12.08.2020	
(84) Designated Contracting States: AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR Designated Extension States: BA ME Designated Validation States: KH MA MD TN	(72) Inventors: • Villatoro Bernardo, Agustin Joel 48940 LEIOA (ES) • Flores Bravo, José Ángel 48940 LEIOA (ES) • Zubia Zaballa, Joseba Andoni 48940 LEIOA (ES) (74) Representative: Balder IP Law, S.L. Paseo de la Castellana 93 5ª planta 28046 Madrid (ES)
(71) Applicant: Universidad del Pais Vasco - Euskal Herriko Unibertsitatea 48160 Leioa (Bizkaia) (ES)	
(54) INTERFEROMETRIC OPTICAL FIBER REFRACTOMETER	

(57) The invention refers to an interferometric fiber optic refractometer, to the manufacturing process of the interferometric optical fiber refractometer and to the method for measuring the refractive index of samples that makes use of the interferometric optical fiber refractometer. The interferometric fiber optic refractometer comprises a ferrule having a through hole, a SMF having a flat end facet that is inserted into the through hole, the

flat end facet being at a distance "d" from an end of the ferrule that defines a cavity within the ferrule, and a substance with a refractive index that is different from a refractive index of a core of the SMF filling the cavity. The interferometric fiber optic refractometer is configured to measure a refractive index of a sample in contact with the flat end tip of the ferrule from an interference pattern of the interferometric fiber optic refractometer.

3 Manufacturing method claim 6

No objections with respect to novelty and inventive step are raised against independent claim 6. The combination of features of claim 6 is neither known from, nor rendered obvious by, the available prior art. The closest prior art with respect to claim 6 is considered to be D1, which discloses a different manufacturing process compared to claim 6. D1 discloses filling polymer in a cavity formed by a ferrule and an optical fiber positioned inside the ferrule. The further prior art documents fail to disclose or hint the inventive features of claim 6, namely introducing an optical fiber to a distal end of a ferrule, applying a polymer at the distal end and retracting the optical fiber to a position inside the ferrule. Since the prior art does not render obvious the manufacturing method of claim 6, the method is considered to satisfy the requirements of novelty and inventive step, pursuant to Articles 54 and 56 EPC.

Artículo 1

Titulo:

Optical fiber interferometer for temperature-independent refractive index measuring over a broad range

Autores:

J.A. Flores-Bravo, M.A. Illarramendi, Joseba Zubia, Joel Villatoro

D.O.I.:

10.1016/j.optlastec.2021.106977.

Información sobre la revista y número de citas:

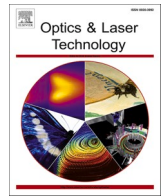
Optics & Laser Technology, vol.139, 2021.

Citas: 18

Indicadores de la Revista en 2023:

Factor de impacto: 4.939

Q1 en Ingeniería eléctrica y electrónica (104/708)



Full length article

Optical fiber interferometer for temperature-independent refractive index measuring over a broad range

J.A. Flores-Bravo^a, M.A. Illarramendi^b, Joseba Zubia^a, Joel Villatoro^{a,c,*}

^a Department of Communications Engineering, University of the Basque Country UPV/EHU, Bilbao 48013, Spain

^b Department of Applied Physics I, University of the Basque Country UPV/EHU, Bilbao 48013, Spain

^c KERBASQUE, Basque Foundation for Science, Bilbao 48013, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Optical fiber sensors
Fabry-Perot interferometers
Refractometers
Refractive index sensors
Chemical sensors
Polymer cavities
Thermo-optic coefficient

ABSTRACT

The present work relates to manufacturing of a simple interferometric optical fiber refractometer that features broad refractive index measuring range without ambiguity. The device consists of a cylindrical polymer cavity whose shape and dimensions are easily controllable. This in turn allows to control the performance of the refractometer. The signal processing is simple; it consists of calculating the amplitude and phase of the fast Fourier transform of the normalized interference spectra. In this manner, the refractive index value of the sample is obtained independently of the temperature. The refractometer can be used to measure the refractive index of liquids or viscous samples and can operate in a broad wavelength range. As an application, we demonstrate the measuring of the refractive index of gels at different temperatures from which the thermo-optic coefficient can be calculated.

1. Introduction

Refractometers are devices that measure the refractive index of a sample. They have been important in many industrial and scientific applications during centuries. Commercial refractometers measure the refractive index of a sample deposited on the lateral face of a prism of known refractive index. Such refractometers operate at the industry standard wavelength of 589 nm, but they can be modified to operate at infrared wavelengths [1,2]. The measuring range of prism-based refractometers is limited to indices that are smaller than that of the prism, which is typically around 1.5 or 1.7. Commercial refractometers are precise because they use several opto-mechanical components and have a system to keep the sample at constant temperature during the measurements.

Miniaturization and multiplexing of prism-based refractometers is complicated. Moreover, they cannot be used as refractive index sensors. Thus, they are not appropriate for refractometry in small spaces such as in microfluidics channels or in flowers *in vivo* [3–5]. For these applications, refractometers (index sensors) based on optical fibers are good candidates. The challenge in this case is to achieve devices that have not only miniature dimensions but that can measure indices in a broad measuring range, at least from 1.3 to 1.7; resolution comparable or

higher to that of commercial refractometers, which is on the order of 10^{-4} , and ideally temperature independence. In addition, the fabrication of the refractometer must be highly reproducible and the cost of the device must be low. To achieve all these features, the optical fiber sensing community has proposed a myriad of alternatives.

Up to date, different techniques have been proposed to measure the refractive index of a sample with optical fibers. In one of them, the sample under test alters the guided light through direct interaction with the evanescent waves [6–11] or by means of thin layers [12–15]. Another alternative is to use tilted Bragg gratings [16–19]. Refractometers based on evanescent wave interactions or on tilted gratings require an interaction length of several millimeters and can measure indices in a narrow range, typically between 1.3 and 1.45. Moreover, they are highly sensitive to temperature. Another technique exploits the Fresnel reflection of an optical-fiber-sample interface, which depends on the refractive index of the fiber core and that of the sample [20–24]. This technique requires a sophisticated interrogation system to compensate fluctuations of the light source or bending losses in the optical fiber. However, its main drawback is the fact that two values of refractive index can give the same result. In refractive index sensing, this issue is called ambiguity.

Fabry-Perot interferometry (FPI) is another powerful technique to

* Corresponding author at: Department of Communications Engineering, University of the Basque Country UPV/EHU, Bilbao 48013, Spain.

E-mail address: agustinjoel.villatoro@ehu.eus (J. Villatoro).

measure refractive index of a sample and it has reached commercial level [25]. In this technique, a microscopic cavity is fabricated on the facet of an optical fiber. The sample under test can be placed inside the cavity [26–28] or outside of the same [29–33]. In either case, the interference pattern of the interferometer changes in proportion of the refractive index of the sample. Such changes can be quantified in different manners. A drawback of commercial FPI-based refractometers is their limitation to liquid samples only since viscous samples cannot be inserted easily in a microscopic cavity. The issues of other FPI-based refractive index sensors reported until now [26–33] include complex, hence, costly fabrication processes, in some cases limited measuring range, ambiguity, or temperature sensitivity.

Here, we report on a simple refractometer based on a FPI with cylinder polymer cavity that may overcome the aforementioned issues. Our device consists of a conventional single mode fiber (SMF) inserted in a standard ceramic ferrule. A cylindrical cavity with controllable dimensions is achieved between the SMF facet and the end of the ferrule. The cavity is filled with a UV-curable polymer whose refractive index is different than that of the SMF core. The interference pattern is controlled with proper dimensions of the cavity. By means of the amplitude and phase of the fast Fourier transform, a value that correlates unambiguously with the refractive index of the sample is obtained. The optical fiber refractometer reported here can measure indices of liquids and viscous fluids such as gels. To the best of our knowledge, the measuring range of our interferometric refractometer is one of the broadest reported until now. The resolution of our device is around 4×10^{-4} , which is sufficient for a variety of practical applications.

2. Device fabrication and working mechanism

The proposed refractometer is easy to fabricate and its interrogation is simple. A schematic representation of the device and its interrogation as well as a photograph of a fabricated device are shown in Fig. 1. The fabrication steps are the following. First, a cleaved or polished SMF is inserted in a ferrule that has an internal void with diameter approximately equal to that of the fiber. The latter reaches the end of the ferrule. To ensure this, an USB microscope (from Dino-Lite) was used. Then, a small amount of UV-curable polymer is deposited on the tip of the ferrule that is held fixed and in vertical position. After that, the fiber is moved slowly a distance d towards the interior of the ferrule. To do so, a motorized translation stage was used. In this manner, d , i.e., the cavity size of the interferometer can be controlled with micrometer or nanometer precision. Due to surface tension, the fiber withdraws the polymer as it moves, thus, a cavity of length d filled with polymer is formed at the end of the ferrule; see Fig. 1(a). Immediately after this, the polymer is cured with UV light.

All the steps mentioned above are easy to carry out and are reproducible. This is an important advantage over other FPIs with polymer cavities proposed in the literature in which the shape and dimensions of the cavity cannot be controlled [34–38].

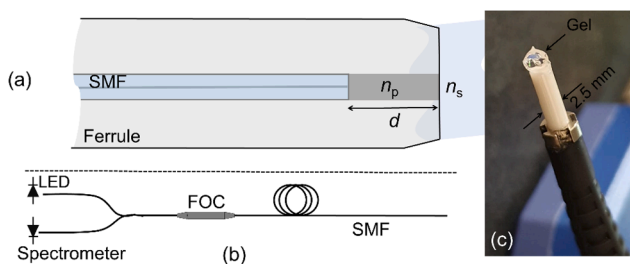


Fig. 1. (a) Diagram of the refractometer. SMF is single mode fiber, n_p and d are, respectively, the refractive index and length of the FPI cavity, n_s is the refractive index of the sample. (b) Scheme of the device interrogation. LED is the light source and FOC is fiber optic coupler or circulator. (c) Photograph of a fabricated sample with gel on top.

To fabricate our samples, we used a commercial polymer known as NOA81 (from Norland Optical Adhesives). The cavities were cured in 20 s. As recommended by the manufacturer, to improve the adhesion of the polymer to the fiber and the ferrule, the devices were cured at 60°C during 12 h. To achieve a flat surface at the tip of the ferrule, it was polished during 10 s with a conventional fiber polisher. In this manner, the polymer protruding from the ferrule was removed. Note that two flat parallel interfaces were achieved; one formed between the fiber end face and the polymer, and the other between the polymer and the external environment.

To explain the working mechanism of our device, it is important to understand the beams that participate in the interference. As the fiber used to fabricate the device shown in Fig. 1(a) is single mode, two Gaussian beams participate in the interference. A beam is internally reflected from the SMF-polymer interface and the other beam is reflected from the polymer-sample interface. The amplitude coefficient from the fiber core-polymer interface can be denoted as $r_1 = (n_f - n_p)/(n_f + n_p)$, where n_f and n_p are, respectively, the refractive index of the SMF core and of the polymer. The amplitude coefficient from the polymer-sample interface is $r_2 = (n_p - n_s)/(n_p + n_s)$, where n_s is the index of the sample. It is important to point out that the values of r_1 and r_2 are independent of the polarization of the light. As the FPI cavity has no core, the Gaussian beam that reflects from the polymer-sample interface will return broader to the SMF due to diffraction.

As demonstrated by some of the present authors, the total reflected intensity of the device depicted in Fig. 1(a) is the superposition of two Gaussian beams. The intensity will be periodic in wavelength (λ) whatever the polarization of the incident light. The reflected intensity can be expressed as [37,38]:

$$I_r = r_1^2 + \eta^2 r_2^2 (1 - r_1)^4 + 2\eta r_1 r_2 (1 - r_1)^2 \cos(2\phi) \quad (1)$$

In Eq. (1), $\phi = 2\pi d n_p / \lambda$ is the phase difference between the two Gaussian beams. In Eq. (1), the absorption of the NOA81 polymer was neglected, because, according to the manufacturer, the transmittance of such a polymer is approximately 95% from 500 to 1800 nm. The factor η is called the coupling coefficient or the overlapping coefficient of the two Gaussian beams which indicates how much light is coupled back to the fiber core. If the two reflecting surfaces are flat, such a factor can be expressed as [39]:

$$\eta = (\pi n_p w_0^2)^2 / [d^2 \lambda^2 + (\pi n_p w_0^2)^2] \quad (2)$$

In Eq. (2), w_0 is the radius of the Gaussian beam at the output of the SMF, which is approximately a half of the mode field diameter (MFD) of the SMF. Depending on the manufacturer, the value of MFD at 1500 nm is between 9.5 and 10.5 μm .

Note from Eq. (2) that η is independent of n_s (the refractive index of the sample). On the other hand, the type of SMF, the material of the cavity, i.e., n_p , and the light source (or λ) can be chosen to fabricate and interrogate the refractometer. Thus, the critical parameter to control η , hence I_r , and consequently, the performance of the refractometer is the size of the cavity or d . As it was mentioned above, d can be controlled with micrometer, and even with nanometer, precision with a computer-controlled translation stage. Another important factor is the flatness of the interfaces from which the Gaussian beams reflect. In our case, this is not an issue as we cleave or polish the two reflecting surfaces mentioned above. The cleaving or polishing angle that can be achieved with conventional fiber cleavers or polishers is approximately 0.2° , and even less. Thus, a more accurate calculation of the coupling factor η can be carried out with Eqs. (A7) and (A8) of Ref. [40].

3. Results and discussion

In Fig. 2, we show the evolution of η for different values of d . For the calculations, we assumed that $w_0 = 5.0 \mu\text{m}$, which is an average value at $\lambda = 1550 \text{ nm}$ in conventional SMFs. In the figure, we show the values of η

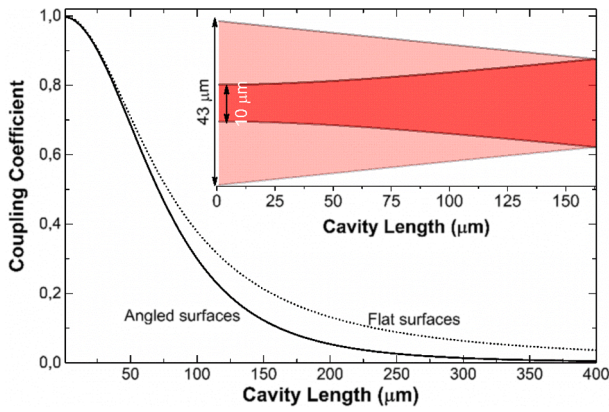


Fig. 2. Value of the coupling coefficient η as a function of the cavity length considering flat surfaces (dotted line) and ones with an angle of 0.2° (solid line). The inset shows the diffraction of a Gaussian beam, at $\lambda = 1550$ nm, when it leaves (dark red) and returns (light red) to the SMF.

when the interfaces are perfectly flat and when they have an angle of 0.2° . The value of the refractive index of the NOA81 polymer was calculated with the following equation provided by the manufacturer: $n_p = A + B/\lambda^2 + C/\lambda^4$, with $A = 1.5375$, $B = 8290.45$, and $C = -2.11046 \times 10^8$. The inset of Fig. 2 shows the propagation (at 1550 nm) of a Gaussian beam when it leaves an SMF, travels a distance $d = 163 \mu\text{m}$ (dark red), and returns (light red) to the SMF after being reflected from a flat surface. The results shown in Fig. 2 suggest that d allows controlling the coupling coefficient η .

In Fig. 3, we show the theoretical reflection spectra of some FPIs with different lengths of the cavity that are indicated in the figure. In all cases, the reflection spectra were calculated with Eqs. (1) and (2) in which it was assumed that $n_s = 1$. It can be noted that the visibility of the interference patterns increases as d is longer. Visibility is defined as the difference over the sum of the maximum and minimum of the interference pattern. With the fabrication technique here described, the cavity size can be controlled with high precision; hence, the visibility of the interference patterns in our devices can be tailored. We will see that high visibility when the external medium is air is important to avoid ambiguity in the refractive index measurements.

3.1. Effect of temperature

The effect of temperature on our FPIs was studied first. To do so, a device fabricated with NOA81 polymer with $d = 125 \mu\text{m}$ was placed in a temperature chamber. The device was exposed to temperatures between

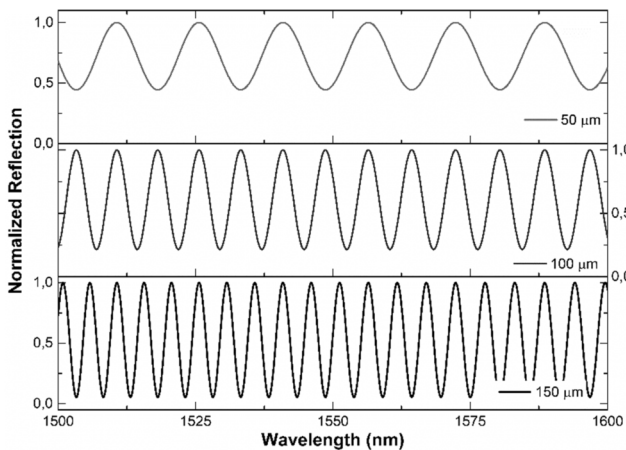


Fig. 3. Calculated reflection spectra of FPIs for three different values of d which are indicated in the graphs.

-10 and 45°C . For this experiment, the external medium was air. Some of the observed spectra are shown in Fig. 4(a). As expected, the interference patterns shifted as the polymer that fills the cavity is temperature sensitive. The fast Fourier transform (FFT) of the spectra observed at different temperatures is shown in Fig. 4(b). From Fig. 4(b), it can be noted that the amplitude of the FFT (denoted as A_F) changed around 2.5% in the temperature range between 5 and 45°C . At temperatures below 0°C the changes are more prominent, however, refractometers are not designed to measure the index of samples at such temperatures as liquids may freeze. In the $20\text{--}25^\circ\text{C}$ range, A_F changes 3.1×10^{-4} .

It is important to discuss in more detail the behavior of our interferometers when they are exposed to different temperatures. To do so the optical properties of the NOA81 polymer must be taken into account. According to the manufacturer, such a polymer has a thermal expansion coefficient (TEC) at room temperature of $220 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. This means that a cavity of $125 \mu\text{m}$ will increase or decrease less than $1 \mu\text{m}$ if the temperature gradient is 30°C . The thermo-optic coefficient (TOC) of the aforementioned polymer is $-1.87 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. This means that a temperature gradient of 35°C will change the refractive index of the polymer by 6.545×10^{-3} . The changes in d or in n_p give rise to shifts in the interference pattern but, according to the results shown in Fig. 4(b), the amplitude of the FFT does not change drastically.

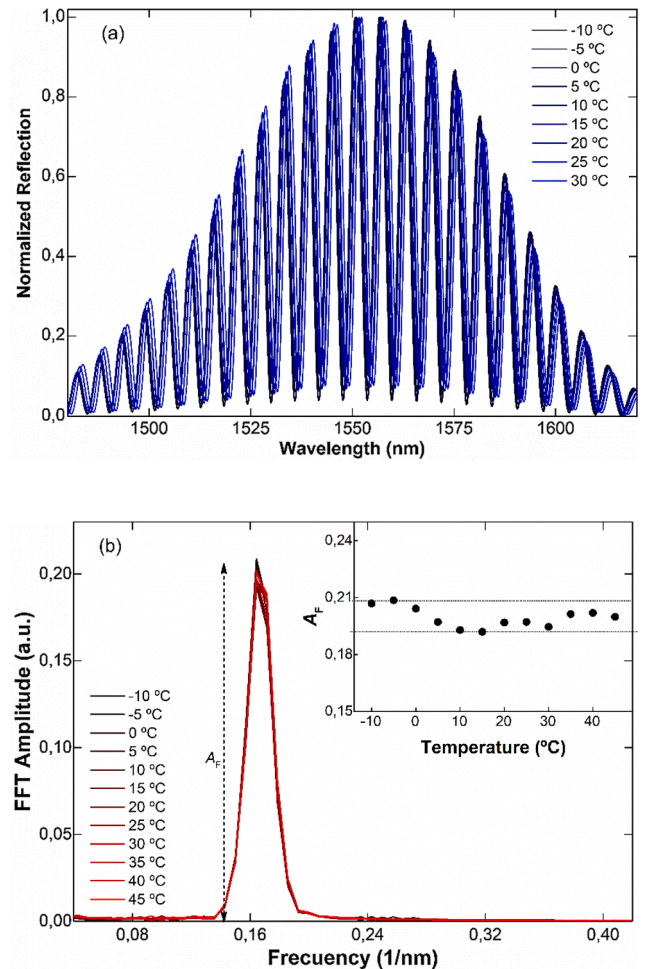


Fig. 4. (a) Experimental reflection spectra at different temperatures observed with a device in which $n_p = 1.5409$ and $d = 125 \mu\text{m}$. In all cases, the external medium was air. (b) FFT of the spectra shown in (a). The inset plot in shows the height of the FFT at different temperatures.

3.2. Refractive index measurements

To measure n_s , i.e. the refractive index of a sample, the following measuring procedure was implemented. First, it is important to fabricate a FPI with high visibility when the external medium is air. Second, the FFT of the normalized spectra are calculated of each value of n_s . From this calculation we obtain the amplitude and phase of the FFT, denoted here as A_F and ϕ_F , respectively. We will see that the value of A_F depends on n_s . In fact, some research groups have reported FPI-based refractive index sensors in which A_F is correlated with n_s , see for example [38,41]. The value of $\cos(\phi_F)$ - or $\sin(\phi_F)$ - has the same sign for all values of n_s that are smaller than n_p and opposite sign for all values of n_s bigger than n_p due to phase changes as demonstrated in [29,41,42]. Thus, by normalizing the value of $\cos(\phi_F)$, to take into account exclusively its sign, it is possible to determine n_s without ambiguity if we calculate the following value:

$$S = \pm A_F \times \cos(\phi_F) / |\cos(\phi_F)|. \quad (3)$$

The sign in Eq. (3) can be chosen. In our case, S was considered to be positive when $n_s = 1$. In Fig. 5, we show the theoretical value of S as a function of n_s for three values of the coupling coefficient η , such values can be obtained with FPI with cavities with d between 50 and 150 μm . To obtain the results shown in Fig. 5, the cavity of the FPIs was considered to be made of a polymer with $n_p = 1.5409$. The wavelength was considered to be in the 1500–1600 nm range. The values of A_F and ϕ_F , and therefore, the value of S , were calculated from the FFT of the normalized reflection spectra for each value of n_s . The spectra were calculated with the expressions given in Eqs. (1) and (2). It can be noted that with a FPI where the coupling factor η is 0.2 it is possible to measure indices over a broad range without ambiguity. According to the results shown in Fig. 2 such coupling factor can be achieved with cavity with d in the 125–160 μm range.

To demonstrate the concepts outlined above, we fabricated a FPI with a commercial polymer (NOA81) whose n_p is 1.5409 at 1550 nm. The size of the cavity was 125 μm for the reasons explained above. The interference patterns were collected when the device was in air or in contact with calibrated refractive index liquids. In our case, we used brand new calibrated oils (from Cargille Labs). All the spectra were collected and normalized when the FPI and the oils were at 25 °C. The value of the indices of the oils at 1550 nm were calculated with the Cauchy equation for each oil provided by the manufacturer.

The measurements were carried out as follows. The reflection spectrum of the refractometer when it was in contact with each calibrated index was taken and normalized. In Fig. 6(a), we show the spectra observed at different indices. The values given in the figure are the

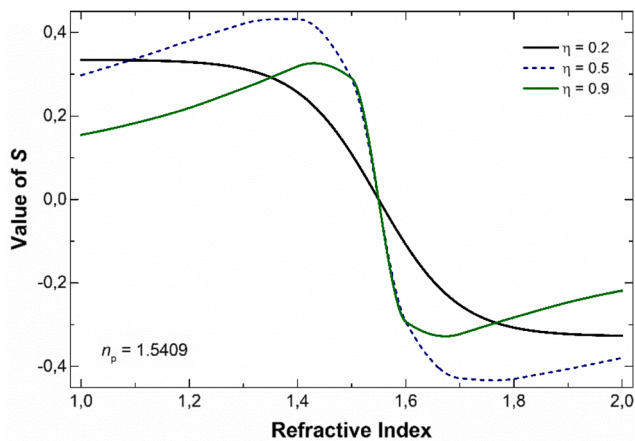


Fig. 5. Calculated value of S as a function of the refractive index (n_s). For the calculations, the values of η shown in the plot were considered. In all cases, n_p was considered to be 1.5409.

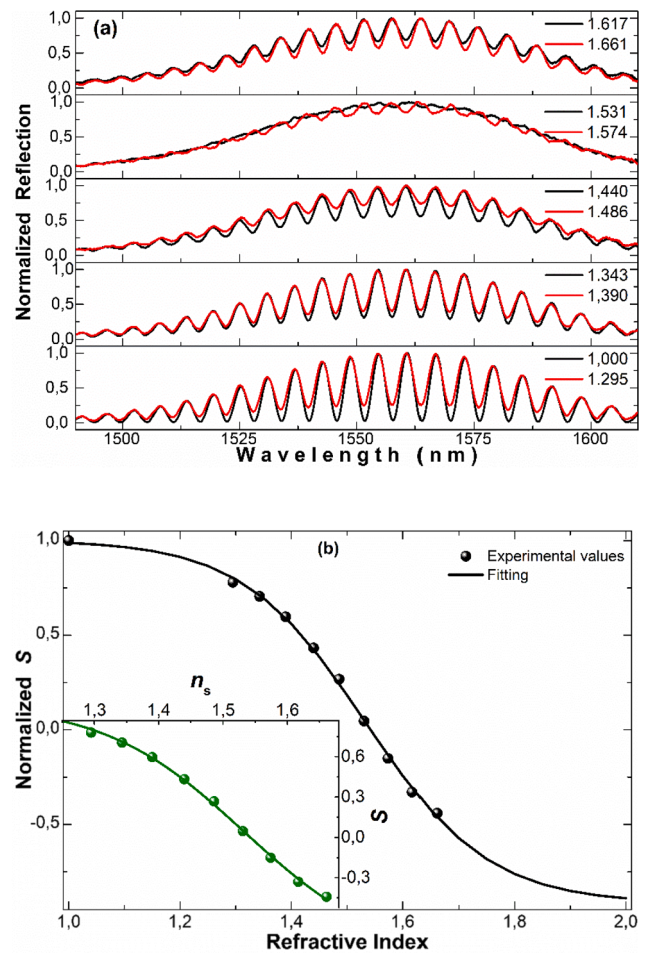


Fig. 6. (a). Reflection spectra observed when the interferometer was in contact with the indices indicated in the figure. (b) Normalized value of S as a function of refractive index. The solid dots are experimental points and the continuous line is the fitting to the data. The parameters of the FPI were: $n_p = 1.5409$ and $d = 125 \mu\text{m}$. The inset graph is a closed up of the region where n_s was calibrated.

indices of Cargille oils at 1550 nm. Between consecutive measurements, the surface of the polymer at the end of the ferrule was cleaned and dried. The normalization is important to eliminate the effect of fluctuations of the optical source or losses caused by mechanical connectors in the calculation of the FFT.

In Fig. 6(b), we show the experimental values of S as a function of n_s . The values of S were calculated with the amplitude and phase of the FFT obtained from the normalized spectra shown in Fig. 6(a). For simplicity, S was considered to be 1 when n_s was 1. The inset graph shows only the values of S obtained with calibrated refractive index oils. In the graphs, the solid dots are experimental points and the solid lines are a fitting to the experimental data that was extrapolated to $n_s = 2$. It can be noted from the figure that the fitting to the experimental data leads to a curve of sigmoidal shape.

From the fitting of the experimental data, the value of n_s can be calculated with the following expression:

$$n_s = n_0 - \left(\frac{1}{p}\right) \log\left(\frac{S_2 - S_1}{S - S_1} - 1\right) \quad (4)$$

In Eq. (4), S_2 , S_1 , n_0 , and p are fitting values that can be calculated easily for each sensor. The slope of the fitting curve is p and n_0 is the point where S is zero. Therefore, according to Eqs. (3) and (4), a measurement of S will lead to a unique value of n_s no matter the value of it in the range between 1 and 2. To the best of the authors' knowledge, the measuring range of the fiber refractometer discussed here is the broadest

one reported until now.

The capability of our device to measure refractive indices of viscous samples was investigated. To do so, the device with $d = 125 \mu\text{m}$ described above was immersed in a commercial index matching gel (G608N3 purchased from Thorlabs) whose index and TOC were, respectively, 1.4382 (at 1550 nm) and $-3.5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. The device and the gel were exposed to temperatures between -10 and $35 \text{ }^\circ\text{C}$ in a temperature chamber. Some of the observed spectra are shown in Fig. 7 (a).

In Fig. 7(b), we show the FFT amplitude as a function of frequency at different temperatures. Such plots were calculated from the spectra shown in Fig. 7(a). The alteration of A_F is attributed to refractive index changes of the gel, which are caused by the effect of temperature. Different values of refractive indices of the gel give rise to different values of A_F . Note from Fig. 7(b) that the value of A_F increases with temperature. According to the calibration curve shown in Fig. 6, this means that the gel refractive index diminishes with temperature, which agrees well with the fact that the TOC of the gel is negative.

From the calibration procedure discussed above and the values of A_F from Fig. 7(b), we calculated n_s of the gel at different temperatures. The results are shown in Fig. 8. In such a graph, the squares represent the index of the gel measured with our refractometer and the continuous solid line is the index of the gel as a function of temperature that was calculated with the data (refractive index and TOC) provided by the gel manufacturer. From the experimental data shown in Fig. 8, the index of the gel as a function of temperature was found to be $n_s = 1.4468 - 3.4011 \times 10^{-4}T$. In this expression, T is temperature in degree Celsius.

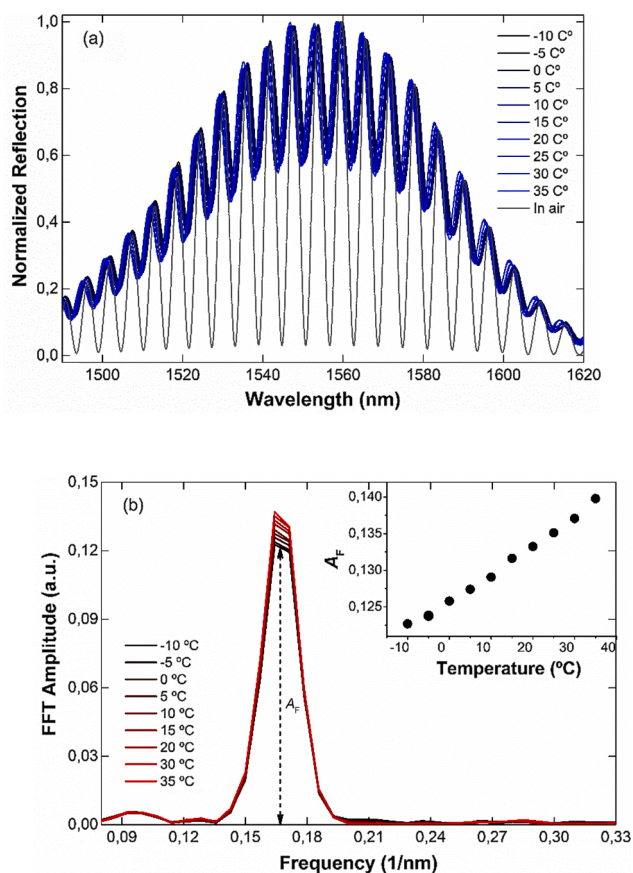


Fig. 7. (a) Reflection spectra of a FPI fabricated with $n_p = 1.5409$ and $d = 125 \mu\text{m}$ at different temperatures when the external medium was a gel ($n_s = 1.4382$) with high thermo-optic coefficient. The spectrum when the external medium was air is included for comparison. (b) FFT amplitude as a function of frequency observed at different temperatures. Such values were calculated from the plots shown in Fig. 7(a).

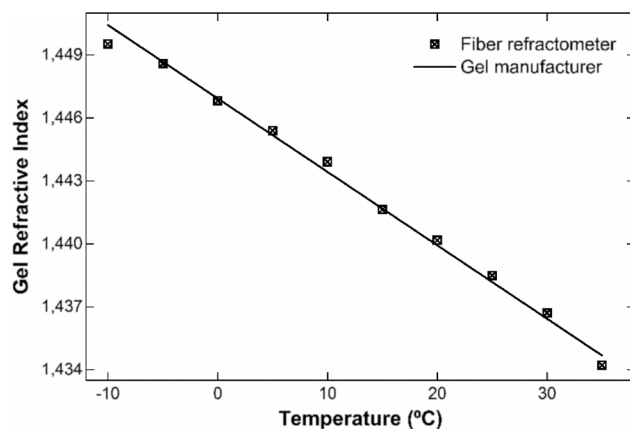


Fig. 8. Refractive index of a commercial gel with high thermo-optic coefficient as a function of temperature. The squares are values measured with the FPI described in Fig. 7 and the solid line represents the values provided by the gel manufacturer.

This means that the TOC of the aforementioned gel measured with our device was -3.4011×10^{-4} . The difference with the value given by the manufacturer is 9.89×10^{-6} . The results shown in Fig. 8 suggest that our device without a reference temperature sensor can be used to calculate, with good approximation, the TOC of different gels or liquids. For this application, our device is simpler than other fiber optic sensors reported so far, see for example [43–45].

4. Conclusions

In this work, we have reported on a compact fiber optic interferometer that comprises a conventional mono mode fiber inside a ferrule. At the end of the latter, a cylindrical polymer cavity is made. The dimensions of the cavity can be controlled with high precision with a motorized translation stage. This fabrication process ensures reproducibility.

The interferometer proposed here can be used as a refractometer for liquid and viscous samples. For this application, it was demonstrated that a cavity with properly selected dimensions in combination with an adequate signal processing allows the measuring of refractive indices over a broad range, at least from 1.3 to 1.7, without ambiguity. Moreover, the signal processing discussed here allows the measuring of refractive index without a reference temperature sensor. Under these conditions, the errors in the refractive measurements can be on the order of 10^{-4} if the temperature gradient is not so high. Therefore, the refractometers proposed here can be used in laboratory environments without temperature compensation. The attributes of our refractometer combined with its small dimensions and its multiplexing capability, which is an attribute of most optical fiber sensors, make it attractive for a number of practical applications, particularly for those in small or remote spaces.

We believe that the interferometers reported here can be used as sensors as well. For such applications, the cavity of the interferometer must be coated with polymers, resins or any other material that is sensitive to a chemical or biological parameter. Therefore, the concepts and approaches reported here can lead to the development of a variety of devices.

CRedit authorship contribution statement

J.A. Flores-Bravo: Conceptualization, Methodology, Formal analysis. M.A. Illarramendi: Investigation, Formal analysis, Writing - review & editing. Joseba Zubia: Resources, Formal analysis, Funding acquisition. Joel Villatoro: Conceptualization, Visualization, Formal analysis, Supervision, Writing - review & editing.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The authors acknowledge funding support from the Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) and the Ministerio de Economía y Competitividad (Spain) under projects PGC2018-101997-B-I00 and RTI2018-094669-B-C31, and also from the Departamento de Educación del Gobierno Vasco, grants No. IT933-16 and Elkartek KK2019-00101.

References

- [1] J. Rheims, J. Köser, T. Wriedt, Refractive-index measurements in the near-IR using an Abbe refractometer, *Measure. Sci. Technol.* 8 (1997) 601–605.
- [2] J.E. Saunders, C. Sanders, H. Chen, H.-P. Looock, Refractive indices of common solvents and solutions at 1550 nm, *Appl. Opt.* 55 (2016) 947–953.
- [3] L. Lei, H. Li, J. Shi, Y. Chen, Microfluidic refractometer with integrated optical fibers and end-facet transmission gratings, *Rev. Sci. Instrum.* 81 (2010) 023103.
- [4] S.Y. Yoon, S. Yang, Microfluidic refractometer with micro-image defocusing, *Lab Chip* 11 (2011) 851–855.
- [5] G. Aronne, P. Malara, Fiber-optic refractometer for in vivo sugar concentration measurements of low-nectar-producing flowers, *New Phytol.* 224 (2019) 987–993.
- [6] Q. Wang, G. Farrell, All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design, *Opt. Lett.* 31 (2006) 317–319.
- [7] R. Jha, J. Villatoro, G. Badenes, V. Pruneri, Refractometry based on a photonic crystal fiber interferometer, *Opt. Lett.* 34 (2009) 617–619.
- [8] H. Gong, C.C. Chan, Y.F. Zhang, W.C. Wong, X. Dong, Miniature refractometer based on modal interference in a hollow-core photonic crystal fiber with collapsed splicing, *J. Biomed. Opt.* 16 (2011) 017004.
- [9] Q. Wu, Y. Semenova, P. Wang, G. Farrell, High sensitivity SMS fiber structure based refractometer—analysis and experiment, *Opt. Express* 19 (2011) 7937–7944.
- [10] J. Wu, Y. Miao, B. Song, K. Zhang, W. Lin, H. Zhang, B. Liu, J. Yao, Temperature-insensitive optical fiber refractometer based on multimode interference in two cascaded no-core square fibers, *Appl. Opt.* 53 (2014) 5037–5041.
- [11] P. Wang, S. Zhang, R. Wang, G. Farrell, M. Zhang, T. Geng, E. Lewis, K. Tian, Temperature-insensitive refractometer based on an RI-modulated singlemode-multimode-singlemode fibre structure, *Opt. Express* 27 (2019) 13754–13764.
- [12] M. Iga, A. Seki, K. Watanabe, Hetero-core structured fiber optic surface plasmon resonance sensor with silver film, *Sens. Actuators, B* 101 (2004) 368–372.
- [13] S.M. Tripathi, A. Kumar, E. Marin, J. Meunier, Side-polished optical fiber grating-based refractive index sensors utilizing the pure surface plasmon polariton, *J. Lightwave Technol.* 26 (2008) 1980–1985.
- [14] J.S. Velázquez-González, D. Monzón-Hernández, D. Moreno-Hernández, F. Martínez-Piñón, I. Hernández-Romano, Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a SPR-based fiber optic sensor, *Sens. Actuators, B* 242 (2017) 912–920.
- [15] A. Ozcariz, D.A. Piña-Azamar, C.R. Zamarreño, R. Domínguez, F.J. Arregui, Aluminum doped zinc oxide (AZO) coated optical fiber LMR refractometers—an experimental demonstration, *Sens. Actuators, B* 281 (2019) 698–704.
- [16] C.F. Chan, C. Chen, A. Jafari, A. Laronche, D.J. Thomson, J. Albert, Optical fiber refractometer using narrowband cladding-mode resonance shifts, *Appl. Opt.* 46 (2007) 1142–1149.
- [17] B. Jiang, K. Zhou, C. Wang, Y. Zhao, J. Zhao, L. Zhang, Temperature-calibrated high-precision refractometer using a tilted fiber Bragg grating, *Opt. Express* 25 (2017) 25910–25918.
- [18] W. Zhou, Y. Zhou, J. Albert, A true fiber optic refractometer, *Laser Photonics Rev.* 11 (2017) 1600157.
- [19] Z. Zhang, T. Guo, B.-O. Guan, Reflective fiber-optic refractometer using broadband cladding mode coupling mediated by a tilted fiber Bragg grating and an in-fiber mirror, *J. Lightwave Technol.* 37 (2019) 2815–2819.
- [20] C.-B. Kim, C.B. Su, Measurement of the refractive index of liquids at 1.3 and 1.5 micron using a fiber optic Fresnel ratio meter, *Meas. Sci. Technol.* 15 (2004) 1683–1686.
- [21] H. Su, X.G. Huang, Fresnel-reflection-based fiber sensor for on-line measurement of solute concentration in solutions, *Sens. Actuators, B* 126 (2007) 579–582.
- [22] J.R. Zhao, X.G. Huang, J.H. Chen, A Fresnel-reflection-based fiber sensor for simultaneous measurement of liquid concentration and temperature, *J. Appl. Phys.* 106 (2009) 083103.
- [23] A. Basgumus, F.E. Durak, A. Altuncu, G. Yilmaz, A universal and stable all-fiber refractive index sensor system, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 28 (2016) 171–174.
- [24] R. Martínez-Manuel, M.D.R. Bautista-Morales, D. López-Cortés, C.A. Pineda-Arellano, M.G. Shlyagin, O. Esteban, Multi-point fiber refractometer using Fresnel reflection and a coherent optical frequency-domain multiplexing technique, *Appl. Opt.* 58 (2019) 684–689.
- [25] É. Pinet, Fabry-Pérot fiber-optic sensors for physical parameters measurement in challenging conditions, *Journal of Sensors* 2009 (2009).
- [26] C.J. Alberts, S.d. Man, J.W. Berenschot, V.J. Gadgil, M.C. Elwenspoek, D. Iannuzzi, Fiber-top refractometer, *Measure. Sci. Technol.*, 20 (2009) 034005.
- [27] E. Cibula, D. Donlagic, In-line Fabry-Perot refractive index sensor, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 23 (2011) 1609–1611.
- [28] C.-L. Lee, Y. Lu, C.-H. Chen, C.-T. Ma, Microhole-pair hollow core fiber Fabry-Perot interferometer micromachining by a femtosecond laser, *Sens. Actuators, A* 302 (2020) 111798.
- [29] Z.L. Ran, Y.J. Rao, W.J. Liu, X. Liao, K.S. Chiang, Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature-independent measurement of refractive index, *Opt. Express* 16 (2008) 2252–2263.
- [30] L. Mosquera, D. Saez-Rodríguez, J.L. Cruz, M.V. Andres, In-fiber Fabry-Perot refractometer assisted by a long-period grating, *Opt. Lett.* 35 (2010) 613–615.
- [31] P. Chen, X. Shu, H. Cao, K. Sugden, High-sensitivity and large-dynamic-range refractive index sensors employing weak composite Fabry-Perot cavities, *Opt. Lett.* 42 (2017) 3145–3148.
- [32] Y. Ouyang, X. Xu, Y. Zhao, A. Zhou, L. Yuan, Temperature compensated refractometer based on parallel fiber Fabry-Pérot interferometers, *IEEE Photonics Technol. Lett.* 30 (2018) 1262–1265.
- [33] O. Rodríguez-Quiroz, C.E. Domínguez-Flores, D. Monzón-Hernández, E. Morales-Narváez, V.P. Minkovich, D. López-Cortés, Unambiguous refractive-index measurement in a wide dynamic-range using a hybrid fiber Fabry-Perot interferometer assisted by a fiber Bragg grating, *Optics Laser Technol.* 128 (2020) 106236.
- [34] O. Frazao, P. Caldas, J.L. Santos, P.V. Marques, C. Turck, D.J. Loughn, O. Soppera, Fabry-Perot refractometer based on an end-of-fiber polymer tip, *Opt. Lett.* 34 (2009) 2474–2476.
- [35] V. Melissinaki, M. Farsari, S. Pissadakis, A fiber-endface, Fabry-Perot vapor microsensor fabricated by multiphoton polymerization, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 21 (2014) 344–353.
- [36] X. Tan, Y. Geng, X. Li, Y. Deng, Z. Yin, R. Gao, UV-curable polymer microhemisphere-based fiber-optic Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature, *IEEE Photonics J.* 6 (2014) 1–8.
- [37] O. Arrizabalaga, G. Durana, J. Zubia, J. Villatoro, Accurate microthermometer based on off-center polymer caps onto optical fiber tips, *Sens. Actuators, B* 272 (2018) 612–617.
- [38] O. Arrizabalaga, J. Zubia, J. Villatoro, Microrefractometer based on off-center polymer caps bonded onto optical fiber tips, *J. Lightwave Technol.* 36 (2018) 3573–3579.
- [39] N. Ushakov, L. Liokumovich, Resolution limits of extrinsic Fabry-Perot interferometric displacement sensors utilizing wavelength scanning interrogation, *Appl. Opt.* 53 (2014) 5092–5099.
- [40] Y. St-Amant, D. Gariépy, D. Rancourt, Intrinsic properties of the optical coupling between axisymmetric Gaussian beams, *Appl. Opt.* 43 (2004) 5691–5704.
- [41] O. Rodríguez-Quiroz, C.E. Domínguez-Flores, D. Monzón-Hernández, C. Moreno-Hernández, Hybrid fiber Fabry-Perot interferometer with improved refractometric response, *J. Lightwave Technol.* 37 (2019) 4268–4274.
- [42] M.G. Shlyagin, R. Martínez Manuel, Ó. Esteban, Optical-fiber self-referred refractometer based on Fresnel reflection at the fiber tip, *Sens. Actuators, B* 178 (2013) 263–269.
- [43] Y.H. Kim, S.J. Park, S.-W. Jeon, S. Ju, C.-S. Park, W.-T. Han, B.H. Lee, Thermo-optic coefficient measurement of liquids based on simultaneous temperature and refractive index sensing capability of a two-mode fiber interferometric probe, *Opt. Express* 20 (2012) 23744–23754.
- [44] Y. Chen, L. Fang, D. Yi, X. Li, X. Hong, Thermo-optic property measurement using surface plasmon resonance-based fiber optic sensor, *IEEE Sens. J.* 20 (2020) 11357–11363.
- [45] V. Ruiz-Perez, P. Velasco-Bolom, D. May-Arrijo, J. Guzman-Sepulveda, Measuring the thermo-optic coefficient of liquids with athermal multimode interference devices, *IEEE Sens. J.* (2020).

Artículo 2

Título:

Simultaneous Sensing of Refractive Index and Temperature With Supermode Interference

Autores:

Jose A. Flores-Bravo, Ruben Fernández, Enrique Antonio Lopez, Joseba Zubia, Axel Schülzgen, Rodrigo Amezcua Correa, and Joel Villatoro.

D.O.I.:

10.1109/JLT.2021.3113863

Información sobre la revista y número de citas:

Journal of Lightwave Technology Vol. 39, Issue 22, pp. 7351-7357, (2021)

Citas: 10

Indicadores de la Revista en 2023:

Factor de impacto: 4.439

Q1 en Física y Astronomía - Física Atómica, Molecular y Óptica (24/205)

Simultaneous Sensing of Refractive Index and Temperature With Supermode Interference

Jose A. Flores-Bravo , Ruben Fernández, Enrique Antonio Lopez, Joseba Zubia, Axel Schülzgen ,
Rodrigo Amezcua Correa, and Joel Villatoro 

Abstract—In general, a sensor is used to monitor a single parameter only, and in many cases, a reference sensor is necessary to compensate the effect of temperature. Here, we demonstrate that a single supermode interferometer is capable of monitoring two parameters simultaneously. Said interferometer was fabricated with a segment of strongly coupled multicore fiber fusion spliced at the end of a standard single mode fiber. The free end of the multicore fiber was flat, thus, it behaved as a low reflectivity mirror whose reflection depended on the external refractive index. The reflection spectrum of our supermode interferometer consisted of well-defined periodic maxima and minima whose values and position varied when the interferometer was exposed to refractive index and temperature changes. In the Fourier domain, the changes of the interference pattern can be decoded easily. We demonstrate that the supermode interferometer here proposed can be useful to measure the thermo-optic coefficient of a sample. An important advantage of the device reported here is that the length of the multicore fiber is not determinant on the performance of the sensor. In addition, the device can be reused multiple times.

Index Terms—Dual parameter sensors, interferometers, Multicore fiber sensors, optical fiber sensors, refractometers, supermode interferometers, thermo-optic coefficient.

I. INTRODUCTION

OPTICAL fibers have an intrinsic temperature sensitivity which makes them good thermometers, but such sensitivity is an issue when one wants to measure or monitor the refractive index of a sample. In a laboratory environment, refractive index measurements can be carried out at constant temperature. However, for *in situ* refractive index measurements and in many

other applications, temperature cannot be controlled. In such circumstances, it is necessary to measure simultaneously index and temperature.

To be a real alternative for practical applications, a fiber optic sensor that is capable of measuring refractive index and temperature simultaneously must fulfill some important requirements. Its fabrication must be easy and reproducible; it must be robust, easy to use and clean; the refractive index measuring range of the sensor must be as broad as possible, etc.

So far, the optical fiber sensing community has made substantial efforts to devise sensors that fulfill such requirements. In Ref. [1], for example, different sensor architectures that can be used to measure temperature and refractive index are reviewed. Several of such architectures include a reference sensor for which their fabrication may entail complex assembly procedures. The addition of a reference sensor may compromise the reproducibility, interrogation, and cost of a device.

To overcome the above issues, single fiber optic sensors capable of monitoring index and temperature have been proposed in the literature. These include long-period gratings [2], [3], Bragg gratings [4]–[10], single-cavity Fabry-Perot interferometers fabricated with polymer [11] or by fusion splicing [12], and metal-coated fibers [13], [14] among others. The main disadvantage of grating-based sensors is their poor sensitivity for refractive indices below 1.4 or their expensive interrogation. The drawbacks of sensors based on polymer- or metal-coated fiber include poor reproducibility or issues related with their reusability.

Single interferometers built with conventional [15]–[18], polarization-maintaining fibers [19], [20] or etched multicore fibers [21], [22] have also been proposed for simultaneous sensing of index and temperature. The inconvenience of such interferometers is the need of a multi-step fabrication process or complex interrogation and signal processing. Single-mode-multimode structures that operate in reflection [23]–[26] have been demonstrated for index and temperature measurements as well. The disadvantage in these cases is the lack of control on the number of modes that are excited in the segment of multimode fiber. Moreover, in Refs. [24]–[26] temperature and index were measured in separate experiments.

To make a mode interferometer functional and practical for dual parameter sensing it is important to control the modes that participate in the interference. In addition, the fabrication of the interferometer must include minimal steps to ensure reproducibility and low cost.

Manuscript received April 9, 2021; revised July 21, 2021 and August 27, 2021; accepted September 16, 2021. Date of publication September 20, 2021; date of current version November 16, 2021. This work was supported in part by the Ministerio de Economía y Competitividad (Spain) and the European Regional Development Fund under Grants PGC2018-101997-B-I00 and RTI2018-094669-B-C31, and in part by the Departamento de Educacion del Gobierno Vasco, under Grant IT933-16. (*Corresponding author: Joel Villatoro.*)

Jose A. Flores-Bravo, Ruben Fernández, and Joseba Zubia are with the Department of Communications Engineering, University of the Basque Country UPV/EHU, E-48013 Bilbao, Spain (e-mail: joseangel.flores@ehu.eus; ruben.fernandez@ehu.eus; joseba.zubia@ehu.eus).

Enrique Antonio Lopez, Axel Schülzgen, and Rodrigo Amezcua Correa are with the CREOL The College of Optics and Photonics, University of Central Florida, Orlando, FL 162700 USA (e-mail: jealopez@creol.ucf.edu; axel@creol.ucf.edu; r.amezcua@creol.ucf.edu).

Joel Villatoro is with the Department of Communications Engineering, University of the Basque Country UPV/EHU, E-48013 Bilbao, Spain; he is also with IKERBASQUE, Basque Foundation for Science, E-48011 Bilbao, Spain (e-mail: agustinjoel.villatoro@ehu.es).

Color versions of one or more figures in this article are available at <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3113863>.

Digital Object Identifier 10.1109/JLT.2021.3113863

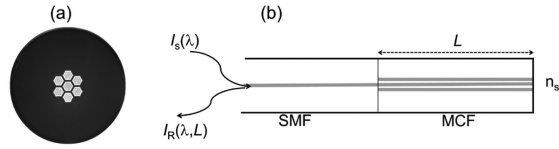


Fig. 1. (a) Cross section of the MCF used in the experiments. (b) Schematic representation of the supermode interferometer of length L . The profile of the excitation light source and the reflection spectrum of the interferometer are denoted as $I_s(\lambda)$ and $I_R(\lambda, L)$, respectively. The refractive index of the sample is denoted as n_s .

Here, we propose a device that may fulfill the aforementioned requirements. We used an optical fiber designed to support specific interfering modes, which is called strongly-coupled multicore fiber (MCF). These fibers have opened up new alternatives to devise mode interferometers for sensing applications, see for example Refs. [27]–[29]. In the referred MCFs, the cores are close to each other to allow optical interaction among them. Strongly-coupled MCFs support several supermodes and can be treated as a special form of multimode fiber [30]. However, under specific excitation conditions it is possible to excite and recombine only two supermodes in the MCF [31].

Supermode interferometers are promising for optical fiber sensing due their distinct advantages. First, it is possible to have control on the supermodes that participate in the interference. Hence, the performance of a sensor can be predicted and even tailored. Second, they are compact and robust and can be fabricated by splicing a centimeter-long segment of such an MCF to SMF. Third, here is no need to use expensive fan-in and fan-out devices to interrogate a supermode interferometer. Moreover, the insertion losses of a SMF-MCF junction may be minimal if the SMF and the MCF have the same numerical aperture [27]–[29].

In this work, we demonstrate that a single supermode interferometer can be capable of monitoring temperature and refractive index simultaneously. Temperature is encoded in a shift of the interference pattern and refractive index in the visibility of the same pattern. To interrogate our devices, a narrow band light source and a low resolution spectrometer may be sufficient.

As an application, we demonstrate the use of our supermode interferometer to measure the thermo-optic coefficient of a liquid. However, many other applications are foreseen as in many sensing applications temperature cannot be constant and must be monitored along with the target parameter.

II. THEORY OF A SUPERMODE INTERFEROMETER

The supermode interferometer used in our experiments was built with the MCF whose cross section is shown in Fig. 1(a). The MCF has seven coupled cores; all the cores are identical, one of them is in the geometrical center of the fiber and the other six cores are located around the central core. The numerical aperture of all the cores of the MCF is approximately equal to that of the SMF, which is 0.14 at 1550 nm.

The structure of the interferometer is shown schematically in Fig. 1(b). It consists of a piece of MCF of length L fusion spliced at the distal end of a conventional SMF. The MCF end was cleaved, in this manner; the MCF facet behaves as a reflector. Said reflector is sensitive to the refractive index of a sample that may be in direct contact with the MCF facet.

In the SMF-MCF structure shown in Fig. 1(b), the unique core of the SMF and the central core of the MCF are axially aligned and in physical contact. Thus, only the fundamental SMF mode excites the MCF. This assumption is valid in a range of wavelengths in which the SMF and the cores of the MCF are single mode, between 1260 and 1650 nm, approximately. Under these excitation conditions, only two supermodes that have nonzero intensity in the central core are excited in the MCF. This has been demonstrated experimentally and analytically, by other authors, see for example [27], [31].

The propagation constants of the two excited supermodes in the MCF can be denoted as β_1 and β_2 . Both β_1 and β_2 depend mainly on the wavelength (λ) of the excitation light source, the size of the cores, their separation and the material the cores are made of. The light source, the geometry, and the refractive index (material) of the cores of the MCF can be chosen. Thus, with coupled-core MCF, it is possible to tailor the properties of a supermode interferometer. This is a distinctive advantage over their counterparts built with other optical fibers in which there is no control on the modes that interfere.

The difference in the propagation constants of the interfering supermodes can be expressed as $\Delta\beta = 2\pi\Delta n/\lambda$, where $\Delta n = n_{e1} - n_{e2}$, with n_{e1} and n_{e2} the effective refractive indices of the supermodes excited in the MCF. As the supermodes travel twice the segment of MCF, thus, the reflection of the SMF-MCF structure shown in Fig. 1(b) can be expressed as

$$I_R(\lambda, L) = I_s(\lambda) R_F \left[I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(4\pi\Delta n L/\lambda) \right] \quad (1)$$

In Eq. (1), $I_s(\lambda)$ denotes the profile of the light source, R_F is the Fresnel reflection coefficient that depends on the index of the sample (n_s). I_1 and I_2 denote the intensities of the two supermodes that are excited in the MCF. Note that Eq. (1) describes an interference pattern that can be detected by means of the SMF connected to a spectrometer by means of a fiber coupler or circulator.

An interference pattern can be characterized by its visibility (V). In our case, V is the difference between the maximum and minimum of Eq. (1) divided by the sum of such maximum and minimum. This means, $V = 2\sqrt{I_1 I_2}/(I_1 + I_2)$. Therefore, the normalized reflection spectrum of the structure shown in Fig. 1(b) can be expressed as:

$$R(\lambda, L) = I_{ns}(\lambda) R_F [1 + V \cos(4\pi\Delta n L/\lambda)] / (1 + V) \quad (2)$$

In Eq. (2), $I_{ns}(\lambda)$ is the normalized spectral distribution of the light source that excites the MCF. In a practical application, the excitation light source may be a narrow-band superluminescent diode (SLED), which has a quasi-Gaussian spectral distribution.

To calculate the reflection spectrum of the structure depicted in Fig. 1(b) it is necessary to know the wavelength dependence of Δn . To do so, a commercial simulation software (MODE from Lumerical) was used. In the simulations, a conventional SMF with a core of 8.2 μm in diameter and a numerical aperture of 0.14 was considered. The diameter of each core in the MCF was considered to be 11 μm and the separation between neighbor cores of 13 μm . The refractive index of each core in the MCF

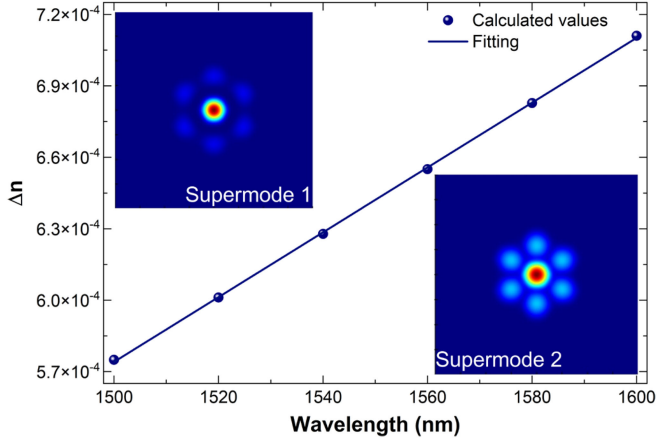


Fig. 2. Δn as a function of wavelength calculated of the MCF shown in Fig. 1(a). The inset images show the profiles at 1550 nm of the two excited supermodes in the MCF.

was considered to be 1.451 and the index of MCF cladding of 1.444.

Fig. 2 shows the calculated values of Δn of the seven-coupled core fiber shown in Fig. 1(a) at discrete wavelengths. The profiles of the two supermodes that have nonzero intensity in the central core of the MCF are shown in the insets of Fig. 2. The simulations show that Δn depends linearly on the wavelength. Thus, the wavelength dependence of Δn can be expressed as:

$$\Delta n(\lambda) = a_7\lambda + b_7 \quad (3)$$

When λ is in nanometers, the following values were found for the MCF shown in Fig. 1(a): $a_7 = 1.3531 \times 10^{-6}$ and $b_7 = -1.4611 \times 10^{-3}$. Thus, to predict the reflection spectrum of a supermode interferometer built with different lengths of the MCF segment, we only need to substitute Eq. (3), with the values of a_7 and b_7 given above, in Eq. (2).

To verify the validity of our theoretical predictions and to confirm that the interference was between two supermodes only, we fabricated several samples and measured their reflection spectra. In Fig. 3 we show the theoretical and measured spectra of some samples where L was between 1.575 and 8 cm. In the theoretical spectrum, it was assumed that V was between 0.92 and 0.98. The light source used in the experiments was an SLED whose spectral profile was Gaussian, so it was expressed as $I_{\text{ns}}(\lambda) = \exp[-(\lambda - \lambda_0)^2 / (2\Delta\lambda^2)]$, where λ_0 is the peak or central wavelength of the SLED and $\Delta\lambda$ the spectral width of the same. The SLED used in our experiments had the following values: $\lambda_0 \approx 1550$ nm and $\Delta\lambda \approx 30$ nm.

It can be noted from Fig. 3 the good agreement between our theoretical predictions with the experimental results. The results shown in such a figure suggest that our supermode interferometer is almost ideal as the visibility of the interference pattern reaches values close to 1.

III. REFRACTIVE INDEX SENSING

Our supermode interferometers were characterized as refractive index sensors at a constant temperature. To do so, we

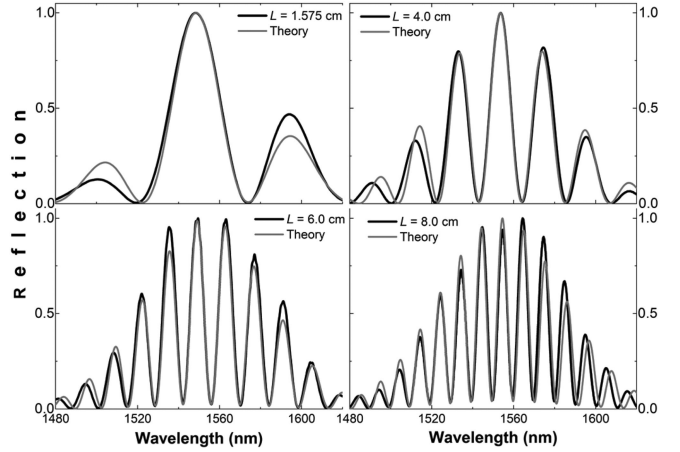


Fig. 3. Calculated (dotted lines) and measured (solid lines) reflection spectra of some supermode interferometers built with the MCF shown in Fig. 1(a). The values of L are indicated in the graphs.

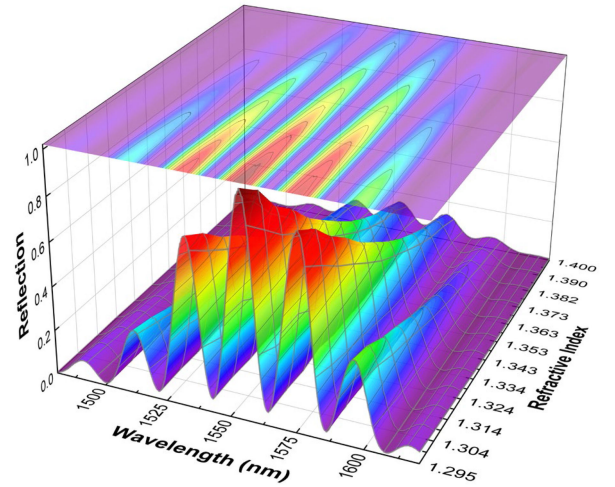


Fig. 4. Reflection spectra observed when the MCF tip of a supermode interferometer was immersed in different calibrated refractive indices. In all cases, $L = 4$ cm. The top graph is a projection of the 3D spectra.

used calibrated refractive index liquids from Cargille laboratories, which had nominal indices between 1.300 and 1.400 (at 589.3 nm and 25 °C). Two supermode interferometers were tested, one with $L = 4$ cm and the other with $L = 8$ cm. In each measurement, the flat MCF tips of both samples were cleaned in an ultrasonic cleaner that was filled with ethyl alcohol, dried with air, and then they were immersed in Cargille liquids with different refractive indices. It is important to point out that the MCF segments were straight during the measurements.

The MCF interferometer and the calibrated refractive index liquids were inside an oven whose temperature was 25 ± 0.5 °C. To ensure that the liquids and the supermode interferometers reached thermal stability, we waited 5 minutes before collecting the reflection spectra.

In Fig. 4, we show the reflection spectra observed when the 4 cm-long interferometer was immersed in the aforementioned liquids. It was observed that the reflection spectrum decreased as the index of the liquid increased. This behavior is due to changes

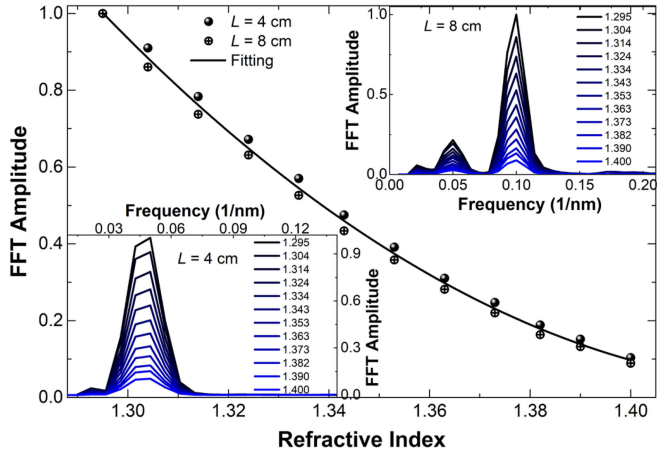


Fig. 5. Calibration curve showing the FFT amplitude as a function of the refractive index. The lengths of the interferometers are indicated. The continuous line is a fitting to the average data obtained with devices with $L = 4$ and $L = 8$ cm. The inset graphs show the FFT amplitudes at different indices.

in the reflectivity of the MCF-sample interface that affect the intensity of the two interfering supermodes, and consequently, the interference pattern.

As the temperature is constant the interference patterns should not shift. The calculated shift was found to be ca. 50 pm, but we attribute that it is due to the errors in finding the wavelength position of the peaks of the interference pattern, particularly when the index gets closer to that of glass. For example, when $n_s = 1.40$, the reflection from the MCF-liquid interface is 0.032%, which is ten times lower than the reflectivity when $n_s = 1.30$.

The experiments were also carried out with the 8 cm-long supermode interferometer. Similar behavior than that of the 4-long interferometer was observed (graphs not shown).

There are different manners to correlate the changes of the reflection spectra shown in Fig. 4 with the refractive index in which the MCF facet was immersed to. In our case, the fast Fourier transform (FFT) of each spectrum was calculated. The calculation of the FFT of an interference pattern is straightforward. The FFT has been used for several authors to decode the parameters that perturb an interferometric sensor, see for example Refs. [29], [32]–[34]. In our case, the height of the FFT amplitude was correlated with the index of the sample.

Fig. 5 displays the FFT amplitude as a function of the index of the liquids observed with the 4- and 8-cm long supermode interferometers. The inset graphs show the normalized FFT amplitudes for different indices of the liquids. For convenience, the FFT amplitude was considered as 1 when $n_s = 1.3000$.

It can be concluded from the results shown in Fig. 5 that a short or a long interferometer can provide similar calibration curves. This suggests that the length of the MCF may not be crucial on the performance of a supermode interferometer if it is used as refractive index sensor. Hence, if compactness is important, a short segment of MCF can be used to fabricate the sensor.

The calibration curves that were obtained for the short and long interferometers were fitted with the following expression:

$$n_s = a + b_1 A_F + b_2 A_F^2 \quad (4)$$

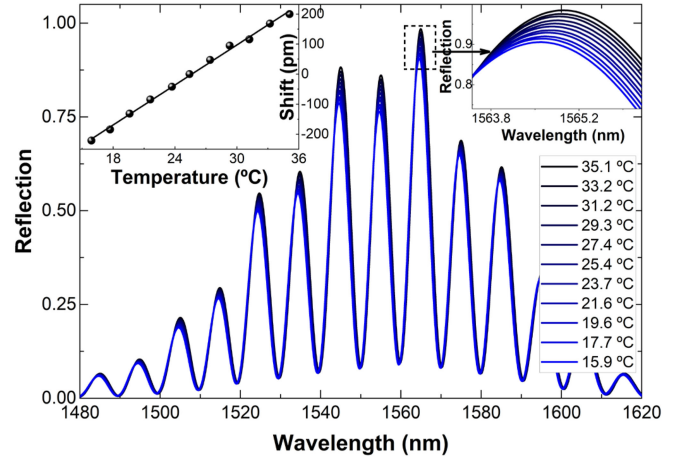


Fig. 6. Reflection spectra observed when a supermode interferometer fabricated with 8 cm of MCF was immersed in a liquid with index of 1.2945 (at 1550 nm) and the temperature was changed between 15.9 and 35.1 °C. The inset graphs show the shift caused by temperature. At 25 °C the shift was considered to be 0. A zoom in of a maximum of the spectra is also shown.

In Eq. (4), n_s is the refractive index of the sample; a , b_1 , and b_2 are fitting values, and A_F is the amplitude of the FFT which is measured experimentally. The fitting values a , b_1 , and b_2 can be obtained for each sensor when it is calibrated.

In different situations, the temperature cannot be controlled during the index measurements. Thus, we carried out experiments in which the temperature changed in a controlled manner. To do so, we immersed the MCF end of the 8 cm-long interferometer in a liquid with nominal index of 1.300. The whole MCF segment and the liquid were exposed to temperatures between 15 and 35 °C. The reason of this temperature range was because Cargille laboratories provide (in the datasheet) the refractive index of the referred liquid in a such a range of temperatures.

The results of the experiments mentioned in the above paragraph are summarized in Fig. 6. The figure shows that the interference pattern shifts (22 pm per degree Celsius) and that the amplitude of the same pattern changes. The shift of the interference pattern is due to changes of Δn of the supermodes as they are sensitive to temperature as demonstrated in Ref. [27]. The changes in the amplitude are due to alterations of the refractive index of the sample that affect the reflectivity of the MCF-liquid interface.

The measured refractive indices at different temperatures are shown in Fig. 7. It should be pointed out that the indices were calculated with Eq. (4) with the following coefficients $a = 1.4131$, $b_1 = -0.17962$, and $b_2 = 0.06199$ that were obtained from the calibration curve of the 8 cm long MCF interferometer. It was assumed that $n_s = 1.295$ at 1550 nm and 25 °C. From the fitting of the experimental points of Fig. 7, we obtained the thermo-optic coefficient (TOC) of the referred liquid. The TOC we found experimentally was $-2.75 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, which differs ca. 18% with the value ($-3.33 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) provided by Cargille laboratories. It is important to mention that the referred laboratories provide TOCs of their liquids at 589 nm. In our case, we considered that the peak or central wavelength of the SLED use in our experiments was 1550 nm.

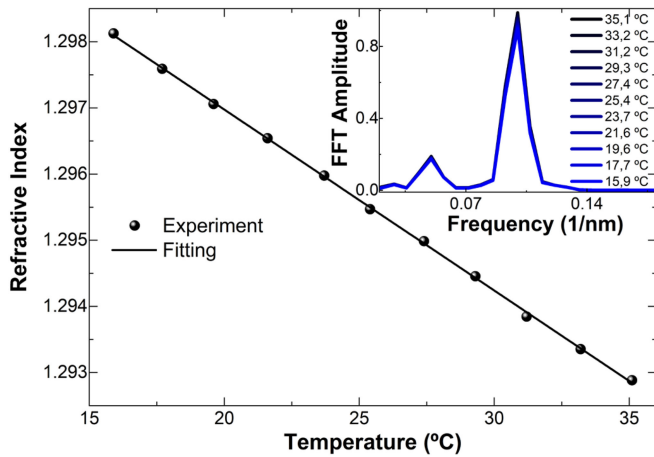


Fig. 7. Refractive index as a function of temperature calculated from the spectra shown in Fig. 6. The inset graph show the FFT amplitude at different temperatures.

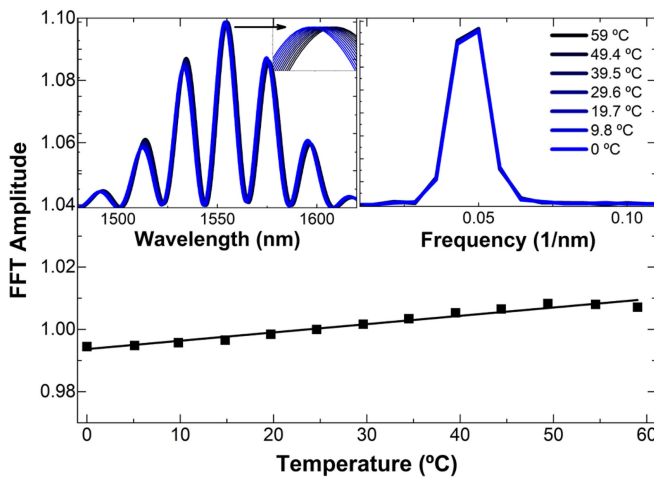


Fig. 8. Amplitude of the FFT as a function of temperature observed when n_s was 1 (air). The normalized reflection spectra and FFT amplitudes at different temperatures are shown in the insets. In all cases L was 4 cm.

To investigate the temperature-index crosstalk of our interferometers we analyzed their response to temperature when the external medium was air. To do this investigation, the facet of the MCF was protected and the interferometer was exposed to temperatures from 0 to 60 °C. The normalized spectra and FFT amplitude at different temperatures are shown in the insets of Fig. 8. In said graph, we also show the FFT amplitude as a function of temperature. At 25 °C, the FFT amplitude was considered to be 1.

From Fig. 8, the calculated temperature sensitivity of the interferometer was found to be 22.86 pm/°C, which is similar to the sensitivity when the MCF was in contact with a fluid. This suggests that a liquid in contact with the MCF facet does not affect the temperature sensitivity of the interferometer. From the results shown in Fig. 8, we also calculated the fluctuations of the FFT amplitude in the 15–35 °C temperature range. They were found to be $\pm 0.198\%$ with respect to the value of the FFT amplitude at 25 °C. These fluctuations induce errors in

the measurements of the TOC. Thus, by considering such fluctuations, the TOC of the fluid referred above was found to be $-3.29 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ which agrees better with the value given by Cargille laboratories.

IV. DISCUSSION

So far, several research groups have reported different optical fiber sensors with the aim of measuring refractive index and temperature simultaneously. However, in most cases, this is achieved with two sensors, one of them is used as a reference. Fabry-Perot interferometers (FPIs) with two cavities [35]–[38] or modal interferometers combined with other sensing elements [39]–[41] represent some examples. The main inconvenience of double-cavity FPIs include complex fabrication, as it is important to ensure multiple flat and parallel reflecting surfaces that are separated a microscopic distance.

Another approach to measure temperature and refractive index is by means of monitoring Fresnel reflections but in these cases, complex systems to compensate optical power fluctuations are necessary [34], [42]–[44].

The device reported here can provide data of temperature and refractive index of a sample without the need of a second sensor or a reference. This was achieved thanks to the well-defined sinusoidal interference patterns, which are due the beating of two supermodes in the MCF.

A comparison of the performance of the device here proposed with others reported in the literature is provided in Table I. It is important to clarify that the comparison was made only with sensors based on a single platform, grating, or interferometer. Index-temperature sensors that need a reference, two platforms, multiple gratings, dual cavities, or two interferometers belong to a different category and are reviewed in Ref. [1].

It is important to mention that a common drawback of the majority of refractive index sensors reported so far may be related to their cleaning. A refractive index sensor must be properly cleaned before and after its use to ensure reproducible results. Cleaning agents commonly used to clean the prism of commercial refractometers or optical fibers may be too aggressive to clean some sensors. For example, a nanometer thick metal layer cannot be cleaned easily. That is the reason sensors based on surface plasmon resonance are disposable. The cavity of some FPIs is made of polymer that cannot be polished or immersed in solvents. Changes in the dimensions or shape of the cavity of a FPI can severely affect its performance as index sensors.

The sensitive section of the sensors demonstrated here is the facet of an MCF. In our experiments, the MCF facet was cleaned with ethyl alcohol in an ultrasonic cleaner during 20 seconds before each measurement. The MCF facet can also be polished with a conventional optical fiber polisher. The effect of polishing on our devices may be a minute change in the length of the MCF segment. As demonstrated in Fig. 5, the length of the MCF has no effect on the measurement of the refractive index of a sample. The only important thing is to ensure a flat MCF end. Therefore, the sensors reported in this work can be reused multiple times.

It was found that refractive index induced errors of around 50 pm in finding the interference pattern shift; while temperature

TABLE I
COMPARISON OF REFRACTIVE INDEX (RI) AND TEMPERATURE (T) SENSORS BASED ON A SINGLE PLATFORM

Method or Technique	Measuring RI Range	Simultaneous RI and T	Reproducibility	References
Long period gratings	1.32 to 1.44	NO	LOW	2, 3
Fiber Bragg gratings	1.30 to 1.45	YES in Ref. 9	HIGH	4-10
Surface plasmon resonance	1.33 to 1.38	YES	LOW	13-14
Fabry-Perot Interferometry	1 to 1.44	YES	LOW	11, 12
In-transmission multimode interference	1.33 to 1.40	NO	MODERATE	15-22
In-reflection multimode interference	1.33 to 1.38	YES in Ref. 23, NO in others	MODERATE	23-26
Supermode interference	1.29 to 1.40	YES	HIGH	This work

induced errors of around 0.2% in finding the amplitude of the FFT. We believe that the cross refractive-index-temperature sensitivity can be further reduced, for example, by means of a better processing of the interference patterns. The use of filters to calculate the FFT may help to improve the accuracy in finding its height.

V. CONCLUSION

In this work, we have demonstrated, for the first time to the best of our knowledge, the use of a single supermode interferometer for sensing two parameters (refractive index and temperature) simultaneously. One parameter is encoded in a shift of the interference pattern and the other in the amplitude of the same. The fabrication of the supermode interferometer is simple and reproducible. It consists of fusion splicing a segment of coupled core optical fiber to a conventional single mode fiber. The multicore fiber was cleaved to have a flat end that functioned as a low reflectivity mirror. Higher reflectivity can be achieved with metal or dielectric films deposited on the MCF facet.

Batch fabrication of the devices here proposed seems possible with commercially available fiber polishing or cleaving machines as the MCF is made of glass.

The MCF facet can be coated with a film that be sensitive to a gas or chemical parameter, thus, the supermode interferometer reported here can be used for gas or chemical sensing applications. The main advantage for such applications is that temperature and the target parameter can be monitored simultaneously.

REFERENCES

- [1] S. Pevec and D. Donlagić, "Multiparameter fiber-optic sensors: A review," *Opt. Eng.*, vol. 58, no. 7, 2019, Art. no. 072009.
- [2] T. Zhu, Y. J. Rao, and Q. J. Mo, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a single ultralong-period fiber grating," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. 12, pp. 2700–2702, Dec. 2005.
- [3] S. Zhang *et al.*, "Few-mode fiber-embedded long-period fiber grating for simultaneous measurement of refractive index and temperature," *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 29, pp. 9248–9253, 2020.
- [4] X. Shu *et al.*, "Sampled fiber bragg grating for simultaneous refractive-index and temperature measurement," *Opt. Lett.*, vol. 26, no. 11, pp. 774–776, 2001.
- [5] X. Chen *et al.*, "Simultaneous measurement of temperature and external refractive index by use of a hybrid grating in D fiber with enhanced sensitivity by HF etching," *Appl. Opt.*, vol. 44, no. 2, pp. 178–182, 2005.
- [6] C. L. Zhao, X. Yang, M. S. Demokan, and W. Jin, "Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3° slanted multimode fiber Bragg grating," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 2, pp. 879–883, Feb. 2006.
- [7] H. Meng *et al.*, "Fiber Bragg grating-based fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature," *Sensors Actuators, B: Chem.*, vol. 150, no. 1, pp. 226–229, 2010.
- [8] Z. Chen *et al.*, "Side polished fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature," in *Proc. SPIE*, vol. 7753, 2011, Art. no. 77538K.
- [9] M. Yang, D. N. Wang, and C. R. Liao, "Fiber Bragg grating with micro-holes for simultaneous and independent refractive index and temperature sensing," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, no. 20, pp. 1511–1513, Oct. 2011.
- [10] H. Z. Yang *et al.*, "Cladless few mode fiber grating sensor for simultaneous refractive index and temperature measurement," *Sensors Actuators, A: Phys.*, vol. 228, pp. 62–68, 2015.
- [11] X. L. Tan, Y. F. Geng, X. J. Li, Y. L. Deng, Z. Yin, and R. Gao, "UV-Curable polymer microhemisphere-based fiber-optic Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of refractive index and temperature," *IEEE Photon. J.*, vol. 6, no. 4, Aug. 2014, Art. no. 7800208.
- [12] T. Wang and M. Wang, "Fabry-Pérot fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on an in-fiber ellipsoidal cavity," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 19, pp. 1733–1736, Oct. 2012.
- [13] S. Weng, L. Pei, C. Liu, J. Wang, J. Li, and T. Ning, "Double-Side polished fiber SPR sensor for simultaneous temperature and refractive index measurement," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 28, no. 18, pp. 1916–1919, Sep. 2016.
- [14] J. S. Velázquez-González *et al.*, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a SPR-based fiber optic sensor," *Sensors Actuators, B: Chem.*, vol. 242, pp. 912–920, 2017.
- [15] J. Zhang *et al.*, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a Michelson fiber interferometer with a hi-bi fiber probe," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 6, pp. 2061–2065, Jun. 2013.
- [16] R. Xiong *et al.*, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on modal interference," *IEEE Sensors J.*, vol. 14, no. 8, pp. 2524–2528, Aug. 2014.
- [17] L. Zhang, D. Wang, J. Liu, and H. F. Chen, "Simultaneous refractive index and temperature sensing with precise sensing location," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 28, no. 8, pp. 891–894, Apr. 2016.
- [18] F. Yu, P. Xue, X. Zhao, and J. Zheng, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a peanut-shape structure in-line Fiber Mach-Zehnder interferometer," *IEEE Sensors J.*, vol. 19, no. 3, pp. 950–955, Feb. 2019.
- [19] H.-J. Kim and Y.-G. Han, "Polarization-dependent in-line Mach-Zehnder interferometer for discrimination of temperature and ambient index sensitivities," *J. Lightw. Technol.*, vol. 30, no. 8, pp. 1037–1041, Apr. 2011.
- [20] R.-A. Zhao *et al.*, "Polarization-maintaining fiber sensor for simultaneous measurement of the temperature and refractive index," *Opt. Eng.*, vol. 56, no. 5, 2017, Art. no. 057113.
- [21] Y. Jiang *et al.*, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature with high sensitivity based on a multipath fiber Mach-Zehnder interferometer," *Appl. Opt.*, vol. 58, no. 15, pp. 4085–4090, 2019.
- [22] F. Mumtaz, Y. Dai, and M. A. Ashraf, "Inter-cross de-modulated refractive index and temperature sensor by an etched multi-core fiber of a MZI structure," *J. Lightw. Technol.*, vol. 38, no. 24, pp. 6948–6953, Dec. 2020.

- [23] Y. H. Kim *et al.*, "Thermo-optic coefficient measurement of liquids based on simultaneous temperature and refractive index sensing capability of a two-mode fiber interferometric probe," *Opt. Exp.*, vol. 20, no. 21, pp. 23744–23754, 2012.
- [24] S. Musa *et al.*, "Double-clad fiber Michelson interferometer for measurement of temperature and refractive index," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 60, no. 4, pp. 822–827, 2018.
- [25] H. Xue, H. Meng, W. Wang, R. Xiong, Q. Yao, and B. Huang, "Single-mode-multimode fiber structure based sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 11, pp. 4220–4223, Nov. 2013.
- [26] Y. Zhao, L. Cai, and X.-G. Li, "High sensitive modal interferometer for temperature and refractive index measurement," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 12, pp. 1341–1344, Jun. 2015.
- [27] J. E. Antonio-Lopez *et al.*, "Multicore fiber sensor for high-temperature applications up to 1000 °C," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 15, pp. 4309–4312, 2014/08/01, 2014.
- [28] J. Villatoro *et al.*, "Miniature multicore optical fiber vibration sensor," *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 10, pp. 2022–2025, 2017.
- [29] M. C. Alonso-Murias *et al.*, "Long-range multicore optical fiber displacement sensor," *Opt. Lett.*, vol. 46, no. 9, pp. 2224–2227, May 2021.
- [30] K. Saitoh and S. Matsuo, "Multicore fiber technology," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 55–66, Jan. 2016.
- [31] N. Kishi, E. Yamashita, and K. Atsuki, "Modal and coupling field analysis of optical fibers with circularly distributed multiple cores and a central core," *J. Lightw. Technol.*, vol. 4, no. 8, pp. 991–996, Aug. 1986.
- [32] H. Y. Choi *et al.*, "Cross-talk free and ultra-compact fiber optic sensor for simultaneous measurement of temperature and refractive index," *Opt. Exp.*, vol. 18, no. 1, pp. 141–149, Jan. 2010.
- [33] S. Rota-Rodrigo, A. López-Aldaba, R. A. Pérez-Herrera, M. del Carmen López Bautista, Ó. Esteban, and M. López-Amo, "Simultaneous measurement of humidity and vibration based on a microwire sensor system using fast Fourier transform technique," *J. Lightw. Technol.*, vol. 34, no. 19, pp. 4525–4530, Oct. 2016.
- [34] N. Cuando-Espitia, M. A. Fuentes-fuentes, D. A. May-Arrijoja, I. Hernandez-Romano, R. M. Manuel, and M. Torres-Cisneros, "Dual-point refractive index measurements using coupled seven-core fibers," *J. Lightw. Technol.*, vol. 39, no. 1, pp. 310–319, Jan. 2021.
- [35] T. Wang and M. Wang, "Fabry-Pérot fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on an in-fiber ellipsoidal cavity," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 19, pp. 1733–1736, Oct. 2012.
- [36] H. Sun *et al.*, "A hybrid fiber interferometer for simultaneous refractive index and temperature measurements based on Fabry-Perot/Michelson interference," *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 5, pp. 2039–2044, May 2013.
- [37] R. M. André *et al.*, "Simultaneous measurement of temperature and refractive index using focused ion beam milled Fabry-Perot cavities in optical fiber micro-tips," *Opt. Exp.*, vol. 24, no. 13, pp. 14053–14065, 2016.
- [38] C. Zhou, Q. Zhou, C. He, J. Tian, Y. Sun, and Y. Yao, "Fiber optic sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature based on internal-and- external-cavity Fabry-Pérot interferometer configuration," *IEEE Sensors J.*, vol. 21, no. 8, pp. 9877–9884, Apr. 2021.
- [39] C. Gouveia *et al.*, "Simultaneous measurement of refractive index and temperature using multimode interference inside a high birefringence fiber loop mirror," *Sensors Actuators, B: Chem.*, vol. 177, pp. 717–723, 2013.
- [40] R. Oliveira *et al.*, "Simultaneous measurement of strain, temperature and refractive index based on multimode interference, fiber tapering and fiber Bragg gratings," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 7, 2016, Art. no. 075107.
- [41] Y. Zhang *et al.*, "Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on a hybrid surface plasmon resonance multimode interference fiber sensor," *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 4, pp. 1225–1229, 2020.
- [42] J. R. Zhao, X. G. Huang, and J. H. Chen, "A Fresnel-reflection-based fiber sensor for simultaneous measurement of liquid concentration and temperature," *J. Appl. Phys.*, vol. 106, no. 8, 2009, Art. no. 083103.
- [43] H. Y. Choi *et al.*, "Cross-talk free and ultra-compact fiber optic sensor for simultaneous measurement of temperature and refractive index," *Opt. Exp.*, vol. 18, no. 1, pp. 141–149, 2010.
- [44] R. Martínez-Manuel *et al.*, "Multi-point fiber refractometer using Fresnel reflection and a coherent optical frequency-domain multiplexing technique," *Appl. Opt.*, vol. 58, no. 3, pp. 684–689, Jan. 2019.

Artículo 3

Titulo:

Coupled-core fiber Bragg gratings for low-cost sensing

Autores:

Jose A. Flores-Bravo, Javier Madrigal, Joseba Zubia, Salvador Sales & Joel Villatoro.

D.O.I.:

10.1038/s41598-022-05313-9

Información sobre la revista y número de citas:

Scientific reports

Citas: 8

Indicadores de la Revista en 2023:

Factor de impacto: 4.997



OPEN

Coupled-core fiber Bragg gratings for low-cost sensing

Jose A. Flores-Bravo¹, Javier Madrigal², Joseba Zubia¹, Salvador Sales² & Joel Villatoro^{1,3}✉

Sensors based on Bragg gratings inscribed in conventional single mode fibers are expensive due to the need of a sophisticated, but low-speed, interrogation system. As an alternative to overcome this issue, in this work, it is proposed and demonstrated the use of coupled-core optical fiber Bragg gratings. It was found that the relative reflectivity from such gratings changed when the coupled-core fiber was subjected to point or periodic bending. This feature makes the interrogation of such gratings simple, fast, and cost-effective. The reflectivity changes of the gratings are attributed to the properties of the supermodes supported by the coupled-core fiber. As potential applications of the referred gratings, intensity-modulated vector bending and vibration sensing are demonstrated. We believe that the results reported here can pave the way to the development of many inexpensive sensors. Besides, coupled-core fiber Bragg gratings may expand the use of grating technology in other areas.

Fiber Bragg grating (FBG) sensors are increasingly accepted in more fields and sectors^{1–4} due to their multiple advantages which include, among others, compact size, high sensitivity, reliability, and immunity to electromagnetic interference. Another key advantage of such sensors is the possibility of monitoring several parameters, or the same parameter in several points, along a conventional single mode optical fiber^{3,5}. The FBG technology is mature and commercially available⁶.

FBG sensors require a sophisticated readout unit to monitor the position of the Bragg wavelength (λ_B) with high accuracy. The two most common methods to do so entail either a broadband light source and a picometer-resolution spectrometer or a tunable laser and a suitable photodetector. Both interrogation systems are bulky and costly, which makes FBG sensors expensive. As a low-cost alternative to interrogate FBG sensors, compact, integrated read-units have been proposed in the past years, see for example Refs.^{7–11}. However, such miniature FBG interrogators do not compete yet in performance with the bulky ones. It is important to point out that the speed with which λ_B is monitored with bulk or integrated FBG interrogators is limited to a few kHz¹².

To reduce the cost of the interrogation of FBG sensors, changes in the position of λ_B can be converted to intensity changes by means of edge filters^{7,13–15}, interferometers^{16,17}, or similar wavelength-selective devices¹⁸ in combination with inexpensive photodetectors. The so-called π -phase-shifted FBGs interrogated with narrow linewidth lasers have been proposed to develop intensity-modulated sensors^{19–24}. The advantages in these cases include lower cost than the wavelength tracking method and much higher speeds as intensity changes can be detected from DC to several MHz^{14,17,20,21,23}. However, the use of wavelength filters or π -phase-shifted FBGs has some drawbacks. One is the cost of the filter, and the other is its linear section and useful wavelength range that may be limited. Therefore, the Bragg wavelength of the grating must be properly selected. In addition, with filters or π -phase-shifted FBGs, temperature compensation may be complex.

Intensity-modulated FBG sensors are good candidates for monitoring dynamic events like impacts or vibrations^{2,17}, as well as other parameters, as for example, bending or curvature^{25–28}. Although in the latter case, it is important to discriminate the direction of the bending or curvature.

Based on the aforementioned, it clear that is important to investigate new methods to fabricate fiber Bragg gratings to develop functional sensors whose interrogation be less complex or expensive than the existing ones. Thus, herein, we propose the use of an optical fiber consisting of two coupled cores with FBG gratings for cost-effective optical sensing. The reflection spectrum of our gratings is a narrow peak similar to that of FBGs inscribed in conventional optical fibers. However, unlike conventional FBGs, the reflectivity of the coupled-core fiber gratings changed when such fiber was subjected to point or periodic bending (vibrations). It was also observed that the sensor provided both amplitude and direction of the bending.

The advantages of the sensors here proposed include inscription of Bragg gratings with standard procedures and an interrogation system that can be compact, simple, fast, and cost effective. No additional wavelength filters,

¹Department of Communications Engineering, University of the Basque Country UPV/EHU, 48013 Bilbao, Spain. ²Photonics Research Labs, ITEAM Research Institute, Universitat Politècnica de València, 46022 Valencia, Spain. ³IKERBASQUE—Basque Foundation for Science, 48011 Bilbao, Spain. ✉email: agustinjoel.villatoro@ehu.eus

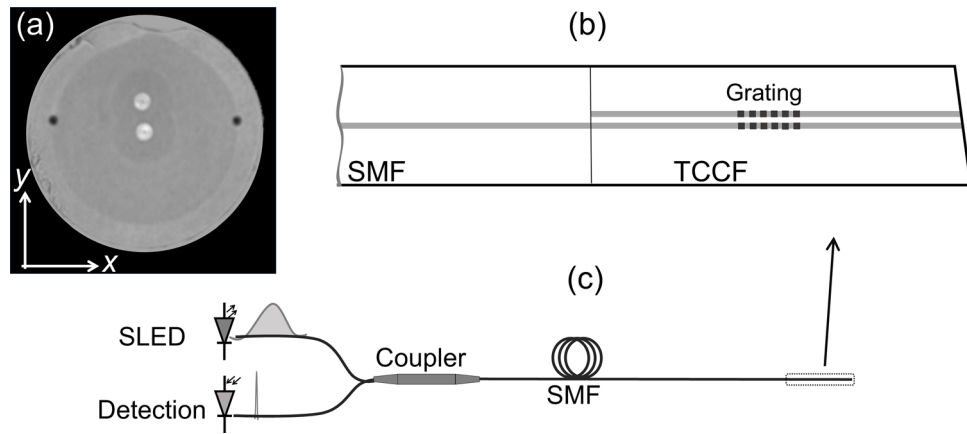


Figure 1. (a) Cross section of the twin coupled-core optical fiber (TCCF) used in the experiments. The coordinate system to orient the cores is indicated. (b) Schematic representation of a single mode fiber (SMF) spliced to the TCCF. (c) Sketch of the device interrogation; SLED is superluminescent light emitting diode. The input and reflected light are illustrated with a broad and narrow ‘spectrum’, respectively.

tunable lasers or fiber devices like fan in/out are necessary. Thus, we believe that the concepts and approaches reported here may expand the use of Bragg grating technology for sensing or may represent a cost-effective alternative for sensing bending and vibrations and other parameters that can induce bending to the coupled-core optical fiber.

Sensor fabrication and working mechanism

The cross section of the twin-core fiber that was used in our experiments is shown in Fig. 1a. The fiber was fabricated at RISE Acreo (Sweden) by drilling a void in the preform of a standard telecom fiber and inserting a second core into the void. The fiber was then drawn using conventional methods. In this manner, the fiber had two identical single-mode cores, each with a diameter of 8 μm and a numerical aperture of 0.12. One core was located in the geometrical center of the fiber and the other core was approximately at 15 μm from the central one. This short separation allows optical coupling between the cores.

A short segment of the twin-coupled-core fiber (TCCF) was first hydrogenated at ambient temperature during 2 weeks at a constant pressure of 50 bar. A 5 mm-long grating with $\lambda_B = 1552.5$ nm was inscribed in the two-core fiber with the well-established phase mask technique. A frequency-doubled Argon-ion laser operating at 244 nm was used. The inscription setup is described in more detail elsewhere²⁹. The two cores of the fiber had gratings with the same period, length and reflectivity (~ 35%). The position of the gratings from the SMF-TCCF junction was arbitrary as it was not critical. During the inscription of the gratings, the reflection spectrum was monitored with the setup shown schematically in Fig. 1c. Light from a superluminescent light emitting diode (SLED) with peak emission at 1550 nm was launched to the grating through a broadband optical fiber coupler. The reflected light was analyzed with a small spectrometer (IMON-512, Ibsen Photonics).

Due to the axial symmetry of the SMF-TCCF structure, see Fig. 1b, the excitation of the TCCF is carried out with the fundamental SMF mode. Such a mode excites two supermodes in the TCCF, which propagate at different velocities. As the two cores of the fiber are identical and the light is launched into the central core, thus, the normalized optical power in the central core (P_c) of the TCCF at a length L from the SMF-TCCF junction is^{30,31}:

$$P_c(L, \lambda) = \cos^2(\pi \Delta n_{ef} L / \lambda), \quad (1)$$

In the above equation, Δn_{ef} is the difference between the effective refractive indices of the supermodes excited in the TCCF and λ is the wavelength of the optical source. Thus, if the transmission of an SMF-TCCF-SMF structure is measured, it will be periodic in wavelength^{31,32}.

The situation when the SMF-TCCF structure where the twin-core fiber has Bragg gratings in the cores, see Fig. 1b, can be analyzed as follows. The Bragg reflection condition indicates that a specific wavelength will be reflected and that the intensity of the Bragg wavelength depends on the coupling coefficient of the forward and backward propagating supermodes. Therefore, if the TCCF is bent in the y direction, according to the coordinate system shown in Fig. 1a, the off-center core will experience more or less stress depending on the direction of the bending. The central core is in the neutral axis of the stress. The refractive index the off-center core is modified due to the stress caused by the bending. As a consequence, the field intensities of the supermodes, hence, the amount of light that in the cores of the fiber, will change. Therefore, changes in the reflectivity of the Bragg gratings can be expected when the TCCF is subjected to bending or vibrations.

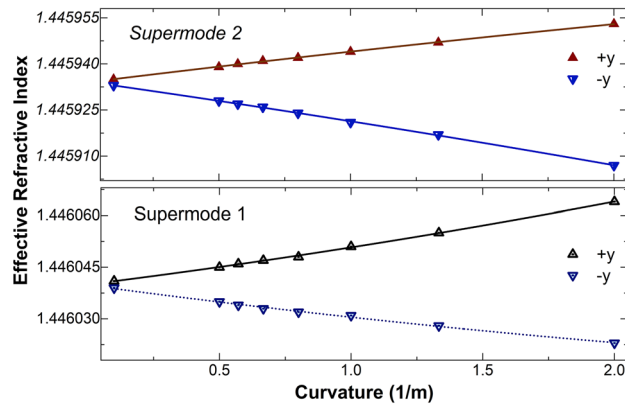


Figure 2. Calculated effective refractive indices (triangles) at 1552.5 nm of the two supermodes excited in the TCCF as a function of curvature. The $+y$ and $-y$ directions are according to the coordinate system shown in Fig. 1a. The solid and dashed lines are fitting to the calculated data.

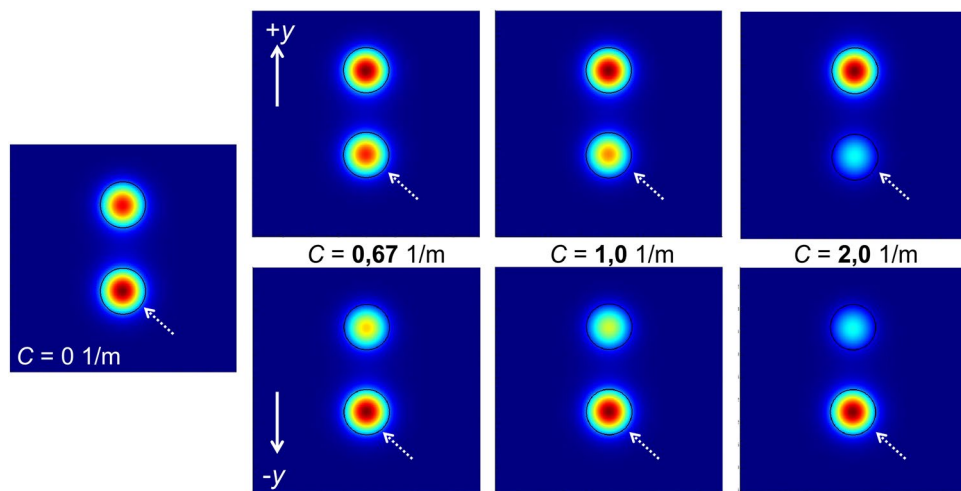


Figure 3. Calculated field intensities of a supermode at different values of curvature (C) applied to the TCCF. All the calculations were carried out at 1552.5 nm. The solid arrows indicate the direction of the bending and the dashed arrows show the central core of the TCCF. Each blue area has dimensions of $40 \times 40 \mu\text{m}^2$.

Results and discussion

To corroborate the aforementioned concepts, the effective refractive indices (n_{ef}) of the supermodes excited in the TCCF were calculated at 1552.5 nm with a commercial photonic simulation software (MODE from Lumerical). The TCCF was assumed to be straight or bent with different radius of curvature in $-y$ and $+y$ directions, see Fig. 1a. The results of our simulations are summarized in Fig. 2. From the figure, it can be concluded that the value of n_{ef} of both supermodes increases when the TCCF is bent in the $+y$ direction but it decreases if the fiber is bent in the $-y$ direction. As it was pointed out above, the reason of this behavior is due to the asymmetry of the TCCF. The index of the off-center core of the TCCF increases or decreases depend on the direction of the bending due the stress experienced by the material the core is made of³⁰.

The 2D profiles of one supermode at different values of curvature are shown in Fig. 3. The figure shows that the intensity of the supermode tends to concentrate in the off-center core of the TCCF as the value of curvature increases in the $+y$ direction. This is due to the compression that such a core experiences when the fiber is bent in the $+y$ direction. The opposite happens when the curvature is in the $-y$ direction. In this case, the central core has more intensity than the off-center core. The distribution of intensity of the supermodes in the bent two-core fiber gives rise to changes in the reflectivity of the Bragg grating since it depends on the amount of light in the cores.

After the inscription of the gratings in the cores of the TCCF, we investigated the potential of our device for sensing bending and its direction as well as vibrations. To investigate the performance of our devices as bend sensors, the cores of the TCCF were oriented in the direction of the bending, after that, the fiber was bent in the $+y$ and $-y$ directions, see Fig. 1a. During the experiments, the SMF-TCCF junction was fixed and the TCCF was bent at a point located at 31 mm from the fixing point. The TCCF was angle cleaved to avoid Fresnel reflections that could affect the reflectivity measurements. A motorized translation stage was used to bend the dual-core

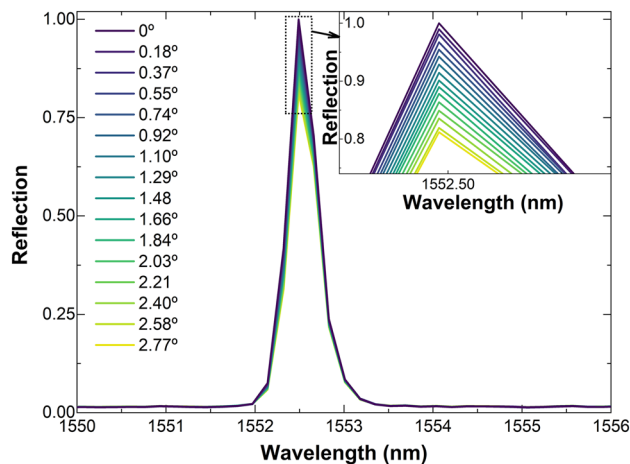


Figure 4. Reflection spectra for a 5-mm long Bragg grating inscribed in the TCCF at different bending angles in the $-y$ direction, according to the coordinate system shown in Fig. 1a. The inset graph is a zoom in of the reflection indicated with a dotted square.

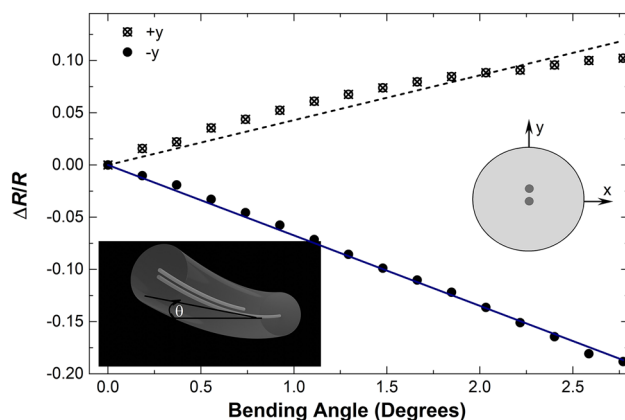


Figure 5. Calibration curves observed when the TCCF was bent in the $+y$ and $-y$ directions indicated in the drawing. R was the reflectivity of the grating when the TCCF was straight and ΔR refers to relative reflectivity changes observed at different bending angles. The latter are indicated with the letter θ in the bottom inset figure.

fiber in a controlled manner. At each bending angle, the spectrum of the grating was collected with the measuring setup shown schematically in Fig. 1c.

Some observed reflection spectra when the TCCF was bent in the $-y$ direction are shown in Fig. 4. The wavelength position of the Bragg grating did not change, however, the reflectivity of the grating decreased in proportion to the bending angle. When the TCCF was bent in the $+y$ the opposite was observed, i.e., the reflectivity increased. The calibration curves of the bending in the $+y$ and $-y$ directions are shown in Fig. 5. In such a figure, $\Delta R = (R_a - R_0)$, where R_a was the absolute maximum of the reflection when the bending angle was a . R_0 was the maximum of the reflection when the TCCF was straight.

The bending sensitivities in the $+y$ and $-y$ directions were found to be, respectively, 0.043 and -0.067 a.u. per degree. The difference in the sensitivities may be due to the asymmetry of the TCCF. It is worth noting that in both bending directions, $\Delta R/R$ changed linearly with the bending angle and its sign can indicate the direction of the bending.

To investigate the bending response of our device at different orientations of the fiber cores with respect to the direction of the bending, the TCCF was rotated in the clockwise direction in steps of 30° , at each rotation angle, the fiber was bent in the $+y$ and $-y$ directions with the same procedure described in the above paragraphs. The bending sensitivities that were found are shown in Fig. 6. The results of such a figure indicate that the bending sensitivity decreases gradually with the orientation of the off-center core of the fiber with respect to the direction of the bending. Thus, if maximum sensitivity is important, the off-center core must be parallel to the direction of the bending.

In an ideal case, the TCCF should be insensitivity to bending when the off-center core is perpendicular to the direction of bending, see the drawing labeled with 90° in Fig. 6. However, due to unavoidable experimental errors and possible imperfections of the TCCF, a low bending sensitivity was observed at such conditions.

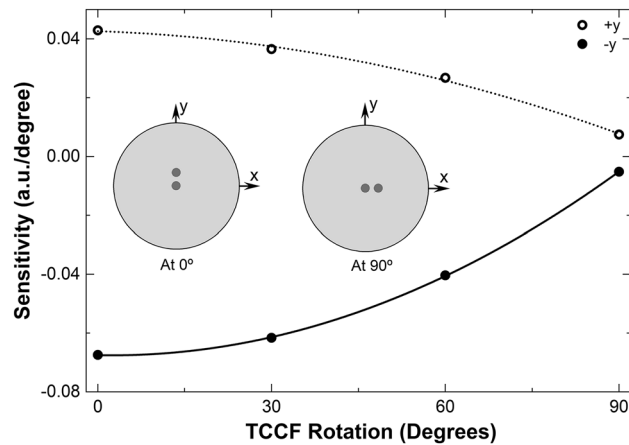


Figure 6. Bending sensitivities measured at different orientations of the TCCF cores with respect to the direction of the bending which was in the $+y$ and $-y$ directions in all cases. Two orientations of the TCCF are shown in the graph. The rotation angle of the TCCF is measured from y to x according to the inset illustrations.

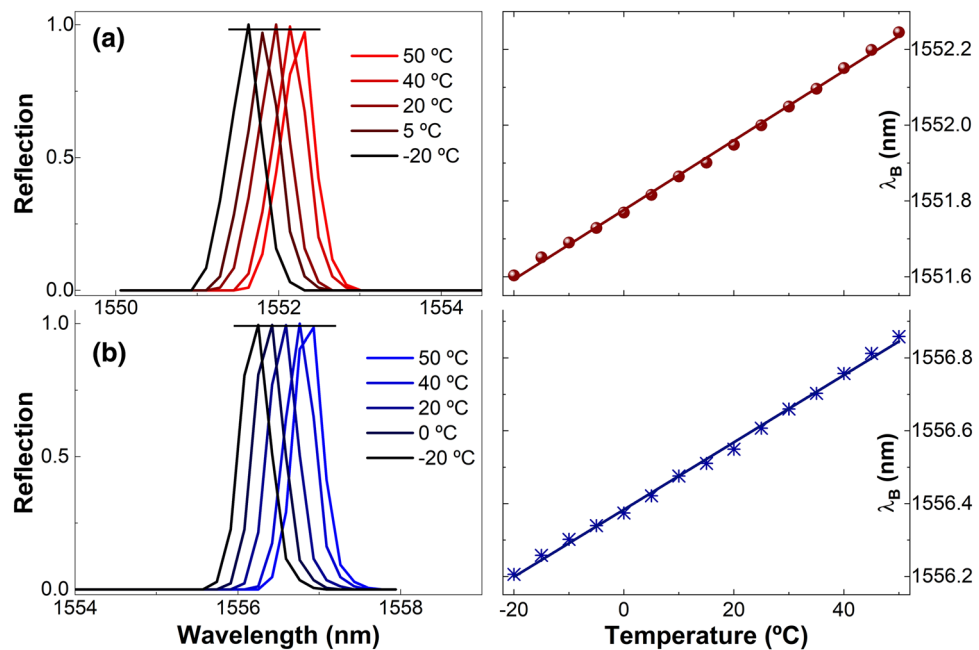


Figure 7. Normalized reflection spectra of coupled-core fiber gratings with Bragg wavelengths around 1552.5 nm (a) and 1556.5 nm (b) at temperatures indicated in the graphs. The horizontal lines show the fluctuations of the reflectivity of the gratings. The right-hand side graphs show the position of the Bragg wavelengths (dots or asterisks) at different temperatures. The solid lines are a fitting to the experimental data.

The behavior of the TCCF with Bragg gratings can be explained with the results shown in Figs. 2, 3 and 4. The intensity of the light that reaches the two Bragg gratings changes with bending, thus, the light reflected and measured at the central core of the TCCF with a conventional SMF depends on the bending angle. It is important to note from Fig. 5 that a bending angle of 0.2° can be detected. This may be due to the high bending sensitivity of the supermodes excited in the TCCF.

The temperature effect on two gratings, one with Bragg wavelength close to 1552 nm and the other close to 1556 nm, was studied from -20 to $+50$ °C. The results of our experiments are shown in Fig. 7. We observed that the relative reflection of the gratings changed little with temperature. From Fig. 7b, the fluctuations of the reflectivity of the grating caused by temperature were found to be around 1.3%. We believe that the low number of data points (512 in 85 nm) of the spectrometer (IMON-512, Ibsen Photonics) that was used to monitor the reflection spectra from the gratings contributed to such fluctuations. The referred spectrometer provided the position of the Bragg wavelength with good accuracy, see the right-hand side graphs of Fig. 7. The temperature

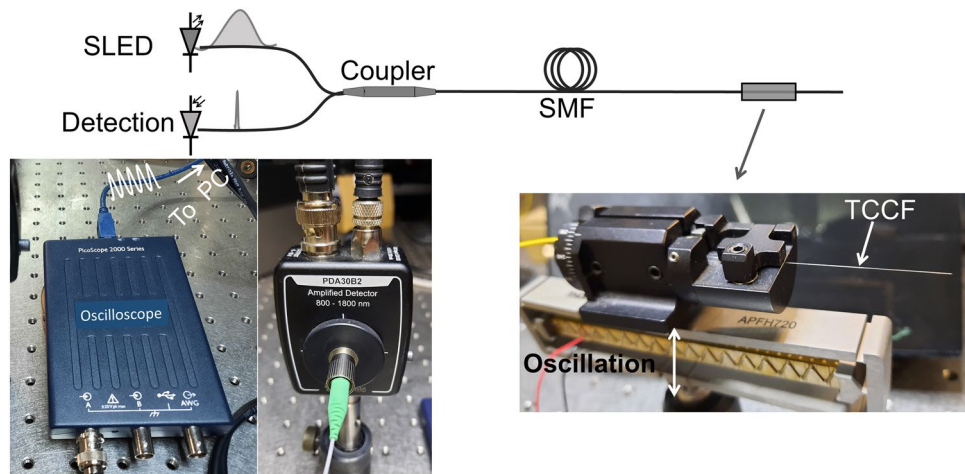


Figure 8. (Top) Schematic of the measuring setup implemented to monitor vibrations. The injected and reflected light from the grating are illustrated with a broad and narrow ‘spectrum’, respectively. (Bottom) Photographs of the mini oscilloscope, photodetector, and piezoelectric actuator with the fiber rotator attached on it. PC is personal computer. The photos were taken by one of the authors (J. Villatoro).

sensitivity of the two gratings was found to be ~ 9.30 pm/°C, which is similar to that of a Bragg grating written in conventional single-core optical fibers.

The experimental results presented and discussed above suggest that with our method to fabricate and interrogate coupled-core fibers Bragg gratings, inexpensive intensity-modulated bending sensors that have the capability of distinguishing the direction of the bending can be developed. In this application, the only requirement is to orient the off-center core of the fiber parallel to the direction of the bending. Although in a practical application, temperature compensation may be necessary, but this is a common practice in FBG sensors.

As the gratings here reported were inscribed with UV laser light, they cannot operate at temperatures higher than 300 °C. For such temperatures, gratings inscribed with femtosecond lasers may be an option.

Our bending sensor can be substantially simpler than other FBG bending sensors that need two or more Bragg gratings and expensive interrogation to discriminate the direction of the bending and to compensate the effect of temperature, see for example^{25–27,33–35}. Vector bending sensors with Bragg gratings in single-core optical fibers^{26,36,37} or in multicore fibers^{27,33,34,38} have been demonstrated but they are more complex due to their fabrication or interrogation. Other alternatives for sensing bending include the use of coupled core optical fibers in interferometric configurations^{32,39–42}, but they also need an expensive wavelength-tracking interrogation method and temperature compensation. Intensity-modulated curvature (bend) sensors based on Bragg gratings written in multicore fibers have been demonstrated recently⁴³, but such sensors cannot distinguish the bending direction.

A straightforward application of the devices here proposed is for monitoring vibrations (cyclic bending). To explore this application, the measuring setup shown in Fig. 8 was implemented. TCCF was secured on a fiber rotator and placed in cantilever position with the off-center core oriented in the direction of vibration. In this manner, the segment of TCCF was free to oscillate. An amplified piezoelectric actuator with flexure mount (APFH720, Thorlabs), with maximum displacement of 2500 μm connected to a function generator was used to induce vibrations to the TCCF at different frequencies. To measure reflectivity changes of the coupled-core Bragg grating, a single germanium amplified photodetector (Thorlabs, model PDA30B2) connected to a miniature USB-powered PC oscilloscope (Picoscope, series 2000) was used. The refereed photodetector and oscilloscope are inexpensive. Thus, the detection system of the gratings reported here may cost less than 500 Euros; this means, 10 times lower than the cost of a high-resolution spectrometer that operates around 1550 nm.

Vibrations induced to the TCCF segment were detected as periodic voltage changes with the cited oscilloscope. From such voltage oscillations, we calculated the fast Fourier transform (FFT) with the software provided by the manufacturer of the oscilloscope. We investigated the behavior of the TCCF with gratings at different vibration frequencies.

Figure 9 displays the measured voltage as a function of time when the TCCF with a grating with Bragg wavelength at 1552.5 nm was oscillating at 1 kHz. In the figure, we show the raw and the smoothed data. From the raw data the FFT was calculated. Figure 10 displays the observed FFTs when the TCCF was oscillating at 0.3, 1, and 5 kHz. A dominant peak (indicated with an arrow) located at the input vibration can be observed.

We also investigated the capability of our device to measure lower frequencies. Figure 11 displays the measured FFTs when the TCCF was vibrating at frequencies between 1 and 30 Hz. Again, a dominant peak can be seen at each input frequency.

It is worth noting that the device responded well for low and high frequencies. Thus, it can be useful to monitor events like seism, ground motions, or small movements of critical infrastructures or machines. For such applications, our vibration sensor is substantially simpler than several FBG-accelerometers reported in the literature, see for example², which monitor shifts of the Bragg wavelength. However, for practical applications, our coupled-core fiber Bragg gratings must be properly packaged as bare optical fibers can be easily broken when they are bent.

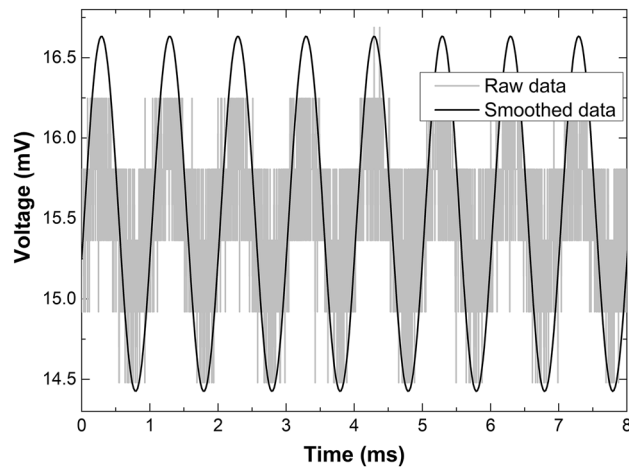


Figure 9. Measured voltage as a function of time when the TCCF was oscillating at 1 kHz.

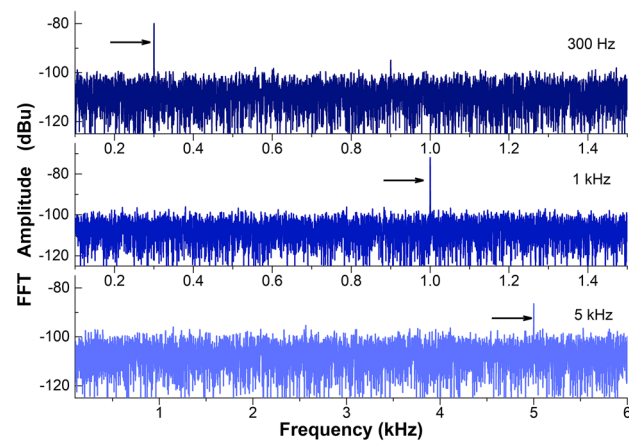


Figure 10. Measured FFT amplitudes as a function of frequency when the TCCF was oscillating at 0.3, 1.0 and 5.0 kHz. A dominant peak is observed at such frequencies.

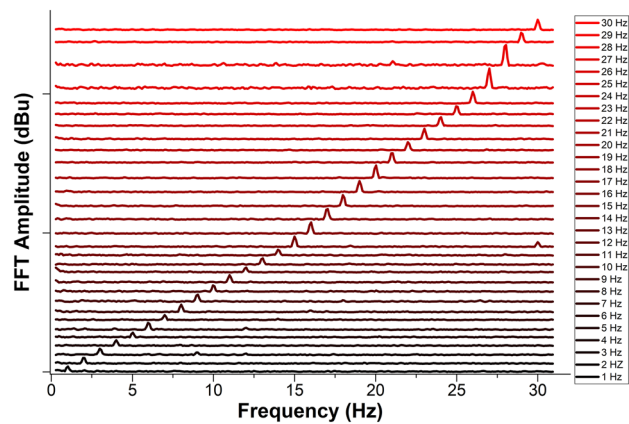


Figure 11. Measured FFT amplitude as a function of frequency. The vertical table shows the input frequencies. A grating with Bragg wavelength of 1552.5 nm was used.

Conclusions

In this work, we have demonstrated that Bragg gratings inscribed in an optical fiber with two identical coupled cores can be used to develop intensity-modulated sensors. We have demonstrated that the reflectivity of the Bragg gratings changed in proportion to the bending applied to the coupled-core fiber. Thus, the reflection changes from the Bragg grating can be monitored easily with a low-cost photodetector. An important advantage is that temperature alters little the reflectivity of the Bragg grating but it causes changes in its wavelength position.

The results reported here could be useful in the design of a variety of inexpensive sensors based on coupled-core fiber with Bragg gratings for practical applications. Intensity-modulated bending and vibrations sensing were demonstrated. The advantage of our sensors include capability of distinguishing the bending direction or detecting vibrations in a broad range. We demonstrated the detection of frequencies from 1 Hz to 5 kHz. Any other parameter that can be converted in local or periodic bending to the coupled-core fiber, hence, in point or periodic intensity changes can also be detected. Thus, it seems feasible to develop sensors to monitor pressure, impact, force, touch, etc.

Sensors for monitoring fast phenomena, as for example impacts, ultrasound, etc., may be developed with coupled-core fiber with Bragg gratings because intensity changes can be monitored at high speed, up to MHz. Multiplexing of coupled-core fiber Bragg grating sensors seems also feasible. For example, with a $1 \times N$ coupler, it would be possible to interrogate N sensors. Although, wavelength division multiplexers and demultiplexers, which are commercially available, may be necessary to discriminate reflection changes of several sensors with different Bragg wavelengths.

We believe that the concepts and results shown in this work may expand the applications of Bragg gratings in the sensing field and perhaps in other applications. They also may open up new lines of research that lead to novel and functional sensors that are less expensive than their counterparts based on Bragg gratings written in conventional single-core optical fibers.

Data availability

Data underlying the results presented in this paper are not publicly available at this time but may be obtained from the authors upon reasonable request.

Received: 20 November 2021; Accepted: 11 January 2022

Published online: 24 January 2022

References

- Riza, M. A., Go, Y. I., Harun, S. W. & Maier, R. R. FBG sensors for environmental and biochemical applications—A review. *IEEE Sens. J.* **20**, 7614–7627 (2020).
- Li, T., Guo, J., Tan, Y. & Zhou, Z. Recent advances and tendency in fiber Bragg grating-based vibration sensor: A review. *IEEE Sens. J.* **20**, 12074–12087 (2020).
- Sahota, J., Gupta, N. & Dhawan, D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: A comprehensive review. *Opt. Eng.* **59**, 060901 (2020).
- Massaroni, C. *et al.* Fiber Bragg grating sensors for cardiorespiratory monitoring: A review. *IEEE Sens. J.* **21**, 14069–14080. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2988692> (2021).
- Götten, M. *et al.* A CDM-WDM interrogation scheme for massive serial FBG sensor networks. *IEEE Sens. J.* <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3070446> (2021).
- Cusano, A., Cutolo, A. & Albert, J. *Fiber Bragg Grating Sensors: Recent Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation* (Bentham Science Publishers, 2011).
- Mendoza, E. A. (Patent US 7512291B2, 2009).
- Yang, F. *et al.* Miniature interrogator for multiplexed FBG strain sensors based on a thermally tunable microring resonator array. *Opt. Express* **27**, 6037–6046 (2019).
- Darwich, D., Youssef, A. & Zaraket, H. Low-cost multiple FBG interrogation technique for static applications. *Opt. Lett.* **45**, 1116–1119 (2020).
- Silveira, P. C. *et al.* 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 1–6 (IEEE).
- Darwich, D., Youssef, A., Pisco, M. & Zaraket, H. Investigation of low-cost interrogation technique based on modulated distributed feedback laser. *IEEE Sens. J.* **20**, 2460–2466 (2019).
- Tosi, D. Review and analysis of peak tracking techniques for fiber Bragg grating sensors. *Sensors* **17**, 2368 (2017).
- Kouroussis, G. *et al.* Edge-filter technique and dominant frequency analysis for high-speed railway monitoring with fiber Bragg gratings. *Smart Mater. Struct.* **25**, 075029 (2016).
- Fernández, M. P., Rossini, L. A. B., Cruz, J. L., Andrés, M. V. & Caso, P. A. C. High-speed and high-resolution interrogation of FBG sensors using wavelength-to-time mapping and Gaussian filters. *Opt. Express* **27**, 36815–36823 (2019).
- Ogawa, K. *et al.* Wireless, portable fiber Bragg grating interrogation system employing optical edge filter. *Sensors* **19**, 3222 (2019).
- Kim, C.-S. *et al.* Multi-point interrogation of FBG sensors using cascaded flexible wavelength-division Sagnac loop filters. *Opt. Express* **14**, 8546–8551 (2006).
- Cheng, L.-K., Hagen, R., van Megen, D., Molkenboer, F. & Jansen, R. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems* (International Society for Optics and Photonics, 2019).
- Dong, X., Shao, L.-Y., Fu, H., Tam, H. Y. & Lu, C. Intensity-modulated fiber Bragg grating sensor system based on radio-frequency signal measurement. *Opt. Lett.* **33**, 482–484 (2008).
- Gatti, D., Galzerano, G., Janner, D., Longhi, S. & Laporta, P. Fiber strain sensor based on a π -phase-shifted Bragg grating and the Pound-Drever-Hall technique. *Opt. Express* **16**, 1945–1950. <https://doi.org/10.1364/OE.16.001945> (2008).
- Rosenthal, A., Razansky, D. & Ntziachristos, V. High-sensitivity compact ultrasonic detector based on a pi-phase-shifted fiber Bragg grating. *Opt. Lett.* **36**, 1833–1835 (2011).
- Wu, Q. & Okabe, Y. High-sensitivity ultrasonic phase-shifted fiber Bragg grating balanced sensing system. *Opt. Express* **20**, 28353–28362. <https://doi.org/10.1364/OE.20.028353> (2012).
- Huang, J. *et al.* Optical sensors reflection-based phase-shifted long period fiber grating for simultaneous measurement of temperature and refractive index. *Opt. Eng.* <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.1.014404> (2013).
- Guo, J., Xue, S., Zhao, Q. & Yang, C. Ultrasonic imaging of seismic physical models using a phase-shifted fiber Bragg grating. *Opt. Express* **22**, 19573–19580. <https://doi.org/10.1364/OE.22.019573> (2014).

24. Deepa, S. & Das, B. Interrogation techniques for π -phase-shifted fiber Bragg grating sensor: A review. *Sens. Actuators A* **315**, 112215. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112215> (2020).
25. Wang, Q. & Liu, Y. Review of optical fiber bending/curvature sensor. *Measurement* **130**, 161–176 (2018).
26. Bao, W., Rong, Q., Chen, F. & Qiao, X. All-fiber 3D vector displacement (bending) sensor based on an eccentric FBG. *Opt. Express* **26**, 8619–8627 (2018).
27. Yakushin, S. S. *et al.* A study of bending effect on the femtosecond-pulse inscribed fiber Bragg gratings in a dual-core fiber. *Opt. Fiber Technol.* **43**, 101–105 (2018).
28. Jang, M., Kim, J. S., Um, S. H., Yang, S. & Kim, J. Ultra-high curvature sensors for multi-bend structures using fiber Bragg gratings. *Opt. Express* **27**, 2074–2084. <https://doi.org/10.1364/OE.27.002074> (2019).
29. Liu, Z. *et al.* Strongly coupled multicore fiber with FBGs for multipoint and multiparameter sensing. *Opt. Fiber Technol.* **58**, 102315. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2020.102315> (2020).
30. Murakami, Y. & Sudo, S. Coupling characteristics measurements between curved waveguides using a two-core fiber coupler. *Appl. Opt.* **20**, 417–422 (1981).
31. Rugeland, P. & Margulis, W. Revisiting twin-core fiber sensors for high-temperature measurements. *Appl. Opt.* **51**, 6227–6232 (2012).
32. Yin, G., Zhang, F., Xu, B., He, J. & Wang, Y. Intensity-modulated bend sensor by using a twin core fiber: Theoretical and experimental studies. *Opt. Express* **28**, 14850–14858 (2020).
33. Flockhart, G. *et al.* Two-axis bend measurement with Bragg gratings in multicore optical fiber. *Opt. Lett.* **28**, 387–389 (2003).
34. Zhang, H. *et al.* Fiber Bragg gratings in heterogeneous multicore fiber for directional bending sensing. *J. Opt.* **18**, 085705 (2016).
35. Bao, W., Wang, C., Wang, Y., Sahoo, N. & Zhang, L. 2D bending (curvature) recognition based on a combination of a TFBG and an orthogonal TFBG pair. *Appl. Phys. Express* **12**, 072009 (2019).
36. Rong, Q., Qiao, X., Yang, H., Lim, K. S. & Ahmad, H. Fiber Bragg grating inscription in a thin-core fiber for displacement measurement. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27**, 1108–1111 (2015).
37. Chen, F., Qiao, X., Wang, R., Su, D. & Rong, Q. Orientation-dependent fiber-optic displacement sensor using a fiber Bragg grating inscribed in a side-hole fiber. *Appl. Opt.* **57**, 3581–3585 (2018).
38. Blanchard, P. M. *et al.* Two-dimensional bend sensing with a single, multi-core optical fibre. *Smart Mater. Struct.* **9**, 132 (2000).
39. Guzman-Sepulveda, J. & May-Arrijoa, D. In-fiber directional coupler for high-sensitivity curvature measurement. *Opt. Express* **21**, 11853–11861 (2013).
40. Van Newkirk, A. *et al.* Bending sensor combining multicore fiber with a mode-selective photonic lantern. *Opt. Lett.* **40**, 5188–5191 (2015).
41. Villatoro, J. *et al.* Ultrasensitive vector bending sensor based on multicore optical fiber. *Opt. Lett.* **41**, 832–835 (2016).
42. Wang, S. *et al.* Bending vector sensor based on the multimode-2-core-multimode fiber structure. *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28**, 2066–2069. <https://doi.org/10.1109/LPT.2016.2582758> (2016).
43. Liu, Z. *et al.* Temperature-insensitive curvature sensor based on Bragg gratings written in strongly coupled multicore fiber. *Opt. Lett.* **46**, 3933–3936. <https://doi.org/10.1364/OL.432889> (2021).

Acknowledgements

The authors are grateful to Walter Margulis for providing the twin core fiber used in this work and for fruitful discussions.

Author contributions

J.A., F.B. conducted experiments and analyzed data, J.M. and S.S. fabricated the Bragg gratings; J.Z. supervised the project and provided resources; J.V. conceived the idea, analyzed data and wrote the manuscript. All authors reviewed and approved the manuscript.

Funding

This work is part of the Projects No. PGC2018-101997-B-I00 and RTI2018-094669-B-C31 funded by the MCIN/AEI/10.13039/501100011033/ and FEDER, *Una manera de hacer Europa*; and the scholarship PAID-01-18 Granted by the Universitat Politècnica de València.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Correspondence and requests for materials should be addressed to J.V.

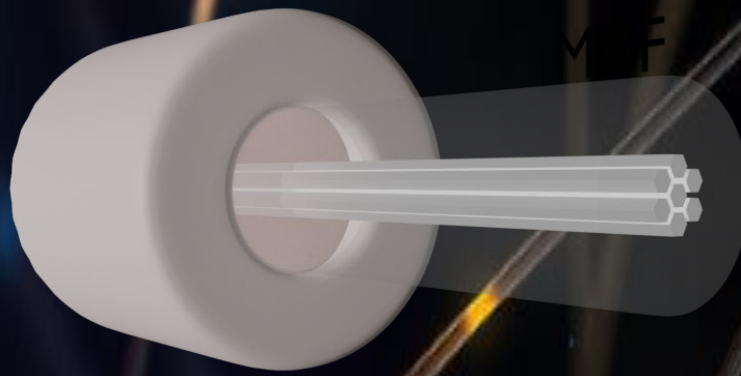
Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2022



eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

