



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

"El saber de mis hijos hará mi grandeza"

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Investigación en Física de la Universidad de Sonora
(DIFUS)

INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

***"OPTICAL FIBER TEMPERATURE SENSOR BASED ON
A MICROCAVITY WITH POLYMER OVERLAY"***

OBRA PUBLICADA

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

P R E S E N T A:

Omar Emmanuel Paredes Gallardo

Director(a):

Dra. Milka del Carmen Acosta Enríquez

Asesores:

Dr. Iván Hernández Romano

Dr. David Monzón Hernández



Hermosillo, Sonora, México. Diciembre de 2016

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Dedicatorias

Dedicada con un profundo agradecimiento y admiración a mis padres Marisol y Gerardo, que sin sus enseñanzas y su forma de guiarme por la vida no habría llegado a ser quien soy. Mis ejemplos a seguir.

A mis hermanas Andrea, Desiree, Danna, por demostrarme su cariño y enseñarme el valor de la hermandad.

Al equipo de trabajo del Laboratorio Nacional de nanoFabricación (nanoFAB) por creer en mí y brindarme su asesoría, esfuerzo y amistad para cumplir con esta meta.

A todos mis amigos que de manera directa o indirecta han estado ahí siempre para superar cada obstáculo en mi vida, y por todos esos momentos inolvidables.

Agradecimientos

A la *Universidad de Sonora* por ser la institución donde pude desarrollarme como profesional, la cual fue pieza clave para poder concretar este proyecto y por todos los apoyos brindados.

Al equipo de trabajo del Laboratorio de Fibras Ópticas del Centro de Investigaciones en Óptica, A. C., en donde tuve oportunidad de colaborar para desarrollar este proyecto.

Agradezco el trabajo realizado en las aulas de clase a todos mis maestros que conforman la planta académica de la carrera de Ingeniería en Tecnología Electrónica y de otros departamentos por impulsarme en mi camino como profesional.

Agradezco ampliamente al equipo del Laboratorio Nacional de nano-Fabricación (nanoFAB): M.C. Hiram Higuera, Dr. Antonio Ramos, Dr. Dainet Berman, por ayudarme a crecer como persona y como profesional, por sus buenas vibras y momentos de recreación, así como también todas las asesorías y conocimientos impartidos que sé me ayudarán a lo largo de mi camino. A todos los que conforman este equipo, gracias.

A mi familia: Mamá, Papá, abuelas, tíos, hermanos, primos.

A cada uno de los antes mencionados, gracias por todo.

Hermosillo, Sonora, México.

ÍNDICE

Resumen	1
Introducción	2
Dispositivos <i>Lab-on-a-chip</i> (LOC).....	2
Sensores de fibra óptica	3
Sensores de fibra óptica en configuración <i>Fabry-Pérot</i>	4
Referencias bibliográficas.....	5
Objetivos	6
Justificación del Proyecto	7
Materiales y Métodos experimentales	8
Etapa 1: Proceso de depósito de TiO ₂ en fibra óptica monomodo	8
Etapa 2: Proceso de soldadura por fusión de fibra óptica monomodo con TiO ₂ a otro segmento de fibra monomodo.....	10
Etapa 3: Corte de segmento microscópico de fibra óptica monomodo	11
Etapa 4: Depósito de PDMS (polidimetisiloxano) en el cabezal del sensor.....	11
Principio de funcionamiento	13
Interferómetro <i>Fabry-Pérot</i>	13
Modelo matemático.....	14
Resultados y discusión	16
Análisis de la visibilidad del patrón de interferencia.....	16
Variación en la relación de extinción.....	18
Análisis de las franjas del patrón de interferencia por medio de la Transformada de Fourier.....	19
Conclusiones	20
Anexo y Referencias	21

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ejemplo de un dispositivo <i>Lab-on-a-chip</i> para medición de microfluidos por medio de luz a través de fibra óptica	2
Figura 2: Diagrama esquemático de un sistema de sensado por fibra óptica	3
Figura 3: (a) Sensor de fibra óptica extrínseco. (b) Sensor de fibra óptica intrínseco	4
Figura 4: Esquema del proceso de depósito de TiO_2 en la fibra óptica monomodo y medición en tiempo real de la potencia reflejada por el efecto de la película depositada.....	9
Figura 5: Método de depósito de la película de TiO_2 por depósito por vapor físico mediante bombardeo de electrones	9
Figura 6: Empalmadora para fibra óptica <i>Fitel s178</i>	10
Figura 7: Esquema paso a paso del proceso de empalme	10
Figura 8: Diagrama del procedimiento de corte microscópico de fibra óptica para la creación de una cavidad resonante	11
Figura 9: Diagrama de la estructura del proceso de depósito del PDMS en el cabezal sensor	12
Figura 10: Estructura física del sensor de fibra óptica en configuración <i>Fabry Pérot</i>	12
Figura 11: Dimensiones físicas del sensor de fibra óptica en configuración <i>Fabry Pérot</i> ..	13
Figura 12: Principio de funcionamiento del interferómetro Fabry-Pérot	14
Figura 13: Esquema experimental para la caracterización del sensor	16
Figura 14: Patrón de interferencia observado en el sensor Fabry-Pérot con longitud de cavidad de $20\ \mu m$ a diferentes temperaturas del PDMS	17
Figura 15: (a) Variación de la relación de extinción con respecto a los cambios de temperatura. (b) Variación de la relación de extinción a diferentes índices de refracción del PDMS	18
Figura 16: (a) Componentes en frecuencia de la transformada de Fourier del patrón de interferencia. (b) Emplitud normalizada de los picos de la TF en función de la temperatura	19

Resumen

Un sensor de temperatura de fibra óptica ultra compacto, de bajo costo y de alta precisión, ha sido propuesto y demostrado en el presente trabajo. La estructura del dispositivo cuenta con un cabezal sensor, el cual consiste en una microcavidad *Fabry-Pérot* formada por un espejo interno hecho de una película delgada de dióxido de titanio (TiO_2) y un segmento microscópico de fibra óptica monomodo recubierta con polidimetilsiloxano (PDMS). El sensor funciona bajo el principio de interferencia óptica; debido al alto coeficiente termo-óptico del PDMS la reflectancia de la interface fibra-PDMS varía fuertemente con la temperatura, provocando que ésta última modifique la amplitud del patrón de interferencia. Para cuantificar los cambios de éste último, se monitorea la visibilidad del patrón de interferencia y se analiza por medio de la Transformada de Fourier. Las dimensiones microscópicas del dispositivo a lo largo de su desempeño, lo vuelven atractivo para sensado de temperatura en aplicaciones biológicas que cuenten con circuitos microfluídicos a base de PDMS.

Palabras clave: fibra óptica, sensor, interferómetro *Fabry-Pérot*, película delgada, cavidad resonante.

Introducción

En la actualidad, la necesidad de contar con nuevas formas de técnicas de medición y caracterización en laboratorios especializados y no especializados ha abierto caminos para la creación de nuevos dispositivos que cuenten con propiedades que los hagan aptos para funcionar en diferentes ambientes y en aplicaciones específicas [1].

Los dispositivos de análisis a micro escala cuentan con características que los hacen más atractivos en comparación a dispositivos a macro escala por muchas razones. Cuentan con volúmenes bastante reducidos, son ligeros y compactos, se caracterizan por tener tiempos de respuesta efectivos debido a la alta sensibilidad que poseen.

Dispositivos *Lab-on-a-chip*

En los últimos años, los dispositivos *Lab-on-a-chip* (LOC) han surgido como una tecnología con múltiples aplicaciones en campos como análisis químico [1], diagnósticos en tiempo real [2], investigación genómica [3], etc. Un *Lab-on-a-chip* es un dispositivo que integra los componentes convencionales de un laboratorio en un sistema a micro escala; tales componentes pueden ser reactores, sistemas completos de interrogación óptica en microfluidos [4], etc. Uno de los materiales más populares en la fabricación de estos dispositivos es el PDMS (polidimetilsiloxano) [5,6] debido a que es biocompatible, no tóxico, ópticamente transparente, barato y es fácil de fabricar en ambientes no controlados.

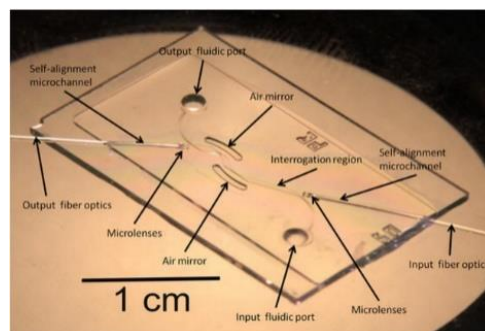


Figura 1. Ejemplo de un dispositivo *Lab-on-a-chip* para medición de microfluidos por medio de luz a través de fibra óptica. Fuente: Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Madrid, España.

El PDMS es un polímero apto en diversas aplicaciones debido a sus propiedades tanto químicas como físicas. Una de sus aplicaciones principales en dispositivos LOC es la fabricación de espejos semitransparentes los cuales pueden servir como sistemas de sensado en dispositivos a micro escala. El PDMS cuenta con propiedades ópticas que pueden ser explotadas para aplicaciones de sensado como por ejemplo su coeficiente termo-óptico que es una propiedad de algunos polímeros de cambiar su índice de refracción conforme la temperatura cambia. El valor del coeficiente termo-óptico del PDMS es de $-4.66 \times 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ [16].

Sensores de fibra óptica

Un sensor es un dispositivo que detecta un cambio en un estímulo físico y lo transforma en una señal que puede ser registrada o medida [28]. En fibra óptica, la composición de un sistema de sensado en fibra óptica se muestra en la Figura 2, donde se puede observar una fuente de luz conectada, por medio de fibra, a un sistema de sensado que perturba esa señal óptica y posteriormente a un detector para poder visualizar la medición [28].

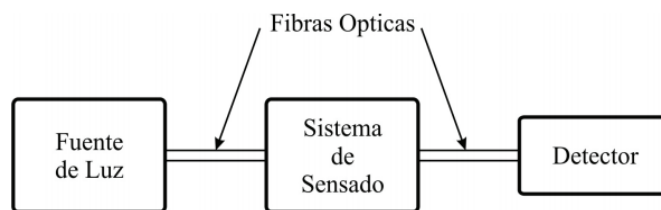


Figura 2. Diagrama esquemático de un sistema de sensado por fibra óptica [27].

Para un sensor que se basa en estos dispositivos puede funcionar como intrínseco o extrínseco, como se puede observar en la Figura 3. Un sensor extrínseco utiliza la fibra óptica sólo como guía de onda, enviando la señal perturbada por un módulo sensor hacia otra fibra óptica. Por otro lado, un sensor intrínseco usa la fibra óptica como parte del sistema de sensado y actuando como dispositivo influyente en el desempeño del sensor [28], tal como se observa en la Figura 3.

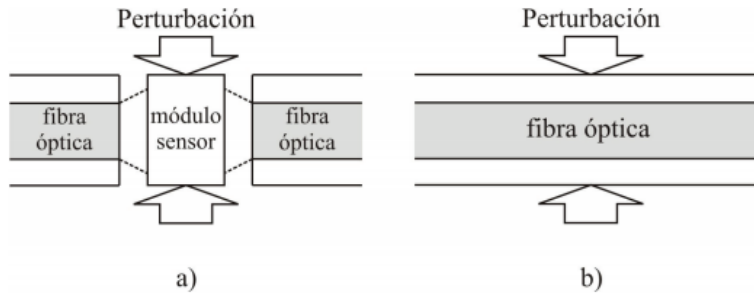


Figura 3. (a) Sensor de fibra óptica extrínseco. (b) Sensor de fibra óptica intrínseco [27].

Sensores de fibra óptica en configuración *Fabry-Pérot*.

Los sensores de fibra óptica en configuración *Fabry-Pérot* son los más simples y fáciles de fabricar [7]. Son sensores que cuentan con la capacidad de poder propiedades físicas como índice de refracción [8], presión y temperatura [9].

Éstos sensores se caracterizan por contar con cavidades resonantes sumamente pequeñas ($\sim 100 \mu\text{m}$) que los vuelven dispositivos altamente sensibles a estímulos [9]. En óptica, una cavidad resonante se puede definir como un medio separado por superficies por lo general dieléctricas donde dos o más ondas pueden oscilar a diferentes frecuencias con amplitudes más grandes que las otras. Éste fenómeno tiene aplicaciones en amplificadores, láseres y en sensado.

Para la fabricación de sensores basados en fibra óptica en configuración *Fabry-Pérot*, es muy usual utilizar técnicas que permitan modificar la estructura de la fibra para poder crear una cavidad resonante. Una técnica muy utilizada es el depósito de películas delgadas de ciertos materiales en la punta de la fibra para generar espejos semitransparentes y formar cavidades resonantes. Uno de los materiales más utilizados para tal fin es el dióxido de titanio (TiO_2) debido a su alta estabilidad y fuerza mecánica, además de soportar altas temperaturas a las que se somete para su depósito [23].

Referencias bibliográficas:

27. F. Arenas, Gustavo (2009), Esquema básico de un sensor de fibra óptica. [Figura]. Recuperado de:
http://www3.fi.mdp.edu.ar/electronica/tesisgradoypostrgrado/tesis/Tesis_Arenas_Gustavo.pdf
28. Martínez Agoues, A. (2013), “*Sensores de Fibra Óptica para la detección de compuestos orgánicos volátiles basados en xerogeles silíceos híbridos*” (Tesis de Maestría), Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España.

Objetivos

Objetivo General

Proponer, desarrollar y demostrar un sensor de fibra óptica en configuración *Fabry-Pérot* para medición de temperatura.

Objetivos Específicos

- Adecuar fibras ópticas monomodo para la fabricación del sensor.
- Realizar el depósito de dióxido de titanio (TiO_2) en la punta de una fibra óptica monomodo a un determinado espesor.
- Ensamblar la estructura *Fabry-Pérot* en fibra monomodo compuesta por una película de dióxido de titanio (TiO_2), un segmento microscópico de fibra óptica y un recubrimiento de polímero *polidimetilsiloxano* (PDMS).
- Estudiar las propiedades ópticas del dispositivo sensor a diferentes temperaturas.

Justificación del Proyecto

En los dispositivos *Lab-on-a-chip* la presencia del agente a medir involucra un cambio en el índice de refracción (IR) del fluido.

Diferentes enfoques para medir diminutos cambios de IR asociados a reacciones biológicas han sido demostrados exitosamente, se presenta especial atención a la estabilidad térmica debido a que se sabe que el IR de algunos polímeros varía con la temperatura.

Sin embargo, en aplicaciones donde la temperatura es difícil de controlar, una opción es ***medir el IR y la temperatura simultáneamente.***

En este sentido una alternativa es la integración de sensores de temperatura en circuitos microfluídicos en base a PDMS.

Para tal fin, los sensores de fibra óptica son fuertes candidatos debido a que son ligeros y compactos, biocompatibles, fáciles de integrar en comunicaciones a distancia y de sensado en tiempo real.

Materiales y Método Experimental

Etapa 1

Proceso de depósito de TiO_2 en fibra óptica monomodo

Como primera etapa en el desarrollo de nuestro sensor, se realiza el depósito de una película delgada de dióxido de titanio (TiO_2) en la punta de una fibra monomodo utilizando una cámara de alto vacío modelo *Balzers 510*, con la cual se cuenta en el laboratorio de películas delgadas del Centro de Investigaciones en Óptica A.C. Las fibras ópticas se tienen que adecuar para poder realizar éste proceso. La adecuación de las fibras ópticas monomodo se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. Se toma un carrete de fibra óptica monomodo y éste es cortado para tomar tramos y realizar el depósito de la película delgada de TiO_2 .
2. Se toman 20 tramos como muestras. Después se utiliza una cortadora especial de fibra óptica modelo *KL-21B*, la cual tiene la capacidad de cortar fibra óptica con una alta precisión y dejar uniforme la superficie en la punta de una fibra.
3. Los tramos de fibra se limpian cuidadosamente con acetona utilizando dos pinzas con punta de algodón (improvisadas en el laboratorio), esto con la finalidad de que las fibras se encuentren libres de cualquier suciedad. Dicho proceso se realiza en un cuarto limpio con su debida ventilación.
4. Una vez limpias, se procede a colocar las fibras dentro de la cámara de vacío en una posición que favoreciera el depósito de la película delgada en las puntas de la fibra, como se muestra en la Figura 5.

En la Figura 5 se aprecia el esquema que se utilizó para la primera etapa del proceso de fabricación del sensor. Consta de una fuente de luz LED supe luminiscente (SLED) centrado a 1550 nm en longitud de onda con una potencia de 2 mW y una corriente de 40.4 mA. El LED envía una esa señal luminosa por medio de fibra hacia un circulador el cual tiene la función de transmitir la señal hacia la fibra óptica contenida dentro de la cámara y conforme la película se deposita, la señal que se refleja por el efecto de la película vuelve al circulador y es enviada a un computador para medir la potencia y verificar que la película, en efecto, se deposita.

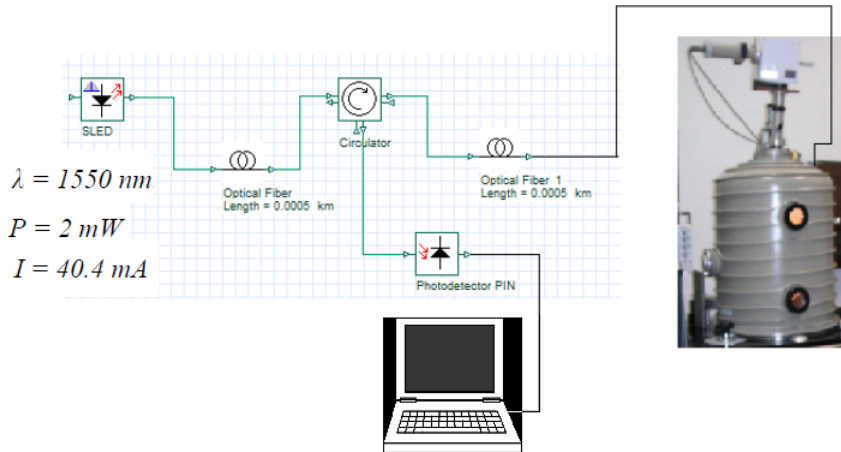


Figura 4. Esquema del proceso de depósito de TiO_2 en la fibra óptica monomodo y medición en tiempo real de la potencia reflejada por el efecto de la película depositada.

El método que se utilizó para realizar el depósito del TiO_2 fue el de deposición por vapor físico mediante bombardeo de electrones (EBPVD, por sus siglas en inglés). Para que éste proceso se lleve a cabo, la cámara se encuentra conectada a una bomba que se encarga de hacer el vacío (del orden de mili-torr); dentro de la cámara se encuentra un filamento de tungsteno que es excitado eléctricamente con un voltaje sumamente alto, haciendo que se libere un haz de electrones altamente energético hacia la muestra (en éste caso el TiO_2) provocando que el TiO_2 se evapore y el material se aglomere en la superficie de la punta de las fibras.

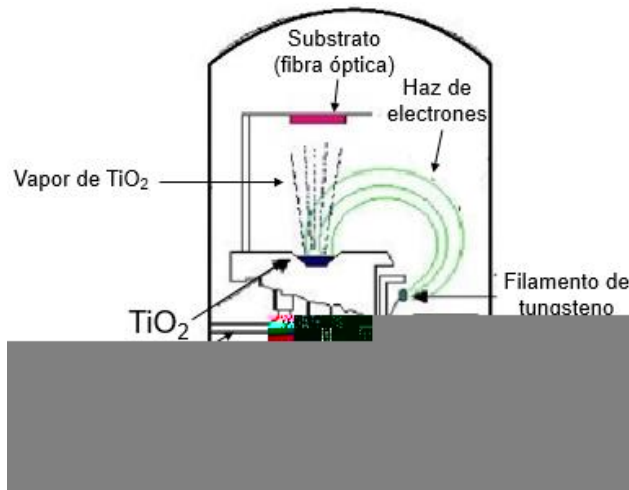


Figura 5. Método de depósito de la película de TiO_2 por depósito por vapor físico mediante bombardeo de electrones.

Etapa 2

Proceso de empalme por fusión de fibra óptica monomodo con TiO_2 a otro segmento de fibra monomodo.

Como segundo paso, se utiliza una empalmadora de fibra óptica modelo *Fitel s178*. Éstas empalmadoras tienen la característica de ser muy precisas, crear soldaduras de fibra óptica con pérdidas prácticamente nulas (del orden de 0.1 dB) y son fáciles de utilizar.



Figura 6. Empalmadora para fibra óptica *Fitel s178*.

El proceso para empalmar las fibras ópticas se realiza siguiendo los pasos que se presentan en el siguiente esquema:

1. La fibra óptica con TiO_2 se coloca en medio de dos electrodos que contiene la empalmadora. Del otro extremo se posiciona la fibra óptica a empalmar.

2. Una vez que las fibras se colocan en una posición ideal por medio de motores de alta precisión, los electrodos preparan los extremos de las fibras mediante un arco voltaico.

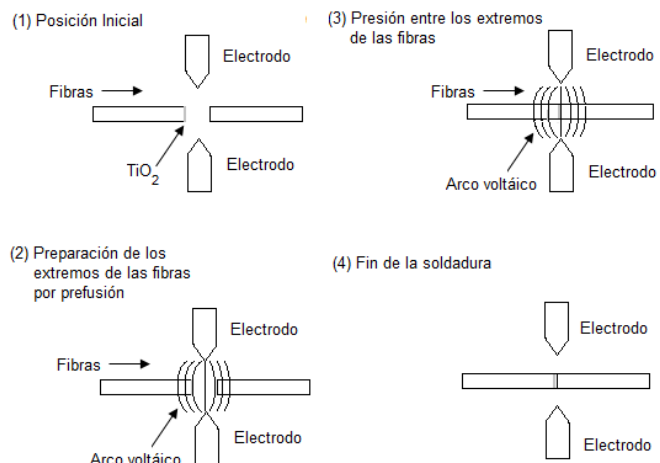


Figura 7. Esquema paso a paso del proceso de empalme.

3. Al mismo tiempo que el arco voltaico funde las fibras para su posterior unión, los motores de la empalmadora generan presión entre los extremos de las fibras.

4. Las fibras ópticas quedan soldadas adecuadamente.

Etapa 3

Corte de segmento microscópico de fibra óptica monomodo.

Como penúltima etapa se recurre a cortar un segmento microscópico de fibra óptica, como se muestra en la Figura 9.

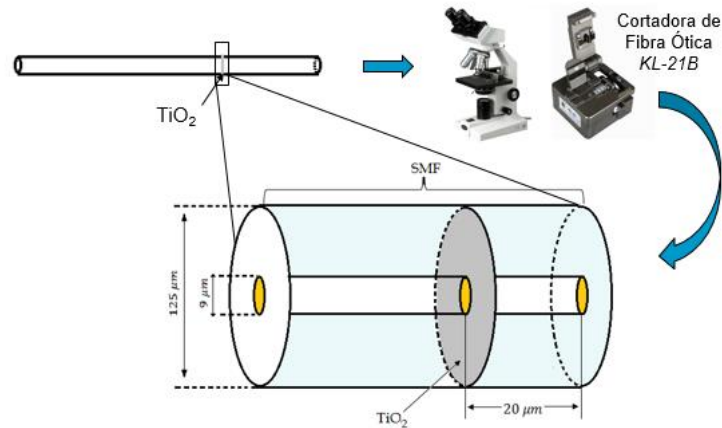


Figura 8. Diagrama del procedimiento de corte microscópico de fibra óptica para la creación de una cavidad resonante.

Al segmento sin TiO_2 previamente unido por fusión se le realiza un corte con ayuda de un microscopio convencional y la cortadora utilizada en la Etapa 1. El segmento resultante tiene una longitud de $20 \mu m$ a partir de la punta de la primera fibra que contiene al TiO_2 .

Etapa 4

Depósito de PDMS (polidimetisiloxano) en el cabezal del sensor

Como última etapa del proceso de fabricación, se adecuó el cabezal sensor que consta de la película delgada de TiO_2 el segmento microscópico de fibra y el recubrimiento de PDMS, como se muestra en la Figura 10, cuyo proceso se realizó de la siguiente manera:

1. Se prepara solución líquida de PDMS siguiendo las indicaciones del proveedor.
2. La fibra óptica se coloca dentro de un capilar con diámetro superior al de la cubierta de la fibra ($>125 \mu m$).

3. Se agrega el PDMS en el capilar para que éste cubra el cabezal de la fibra óptica y quede totalmente cubierto del polímero.

4. El proceso de curado del PDMS se realiza a temperatura ambiente (aprox. 24 hrs).

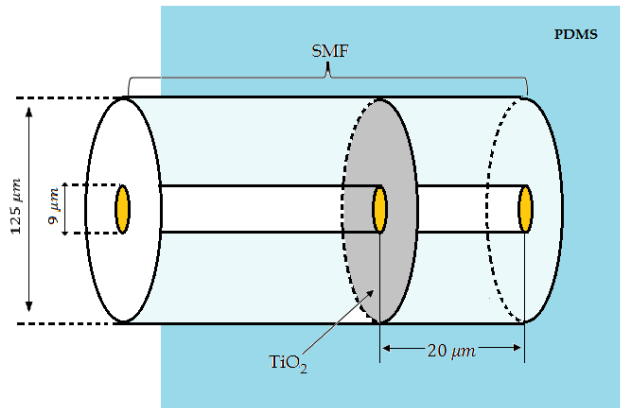


Figura 9. Diagrama de la estructura del proceso de depósito del PDMS en el cabezal sensor.

En la Figura 11 se muestra la estructura física del sensor a lado izquierdo y una fotografía del sensor real. En la Figura 11(a) se pueden observar los haces de luz que inciden sobre la superficie del primer espejo que se forma con la película delgada de TiO_2 y se observa como el haz I_0 incidente (haz negro) se transmite y otra parte se refleja (haz amarillo), de manera que el segundo haz rebota sobre el segundo espejo formado por la interfaz entre la punta de la fibra con el PDMS provocando que una parte de ese haz se transmita (el haz transmitido en esta etapa se descarta) y otra componente se refleja (haz rojo) dando como resultado una superposición entre los haces rojo y amarillo que salen de la película de TiO_2 .

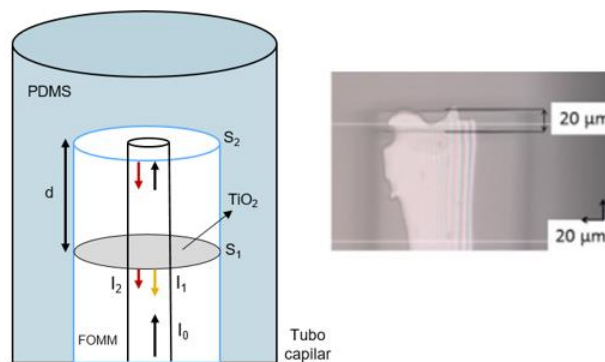


Figura 10. Estructura física del sensor de fibra óptica en configuración *Fabry Pérot*.

A continuación, se presentan fotografías del sensor óptico:

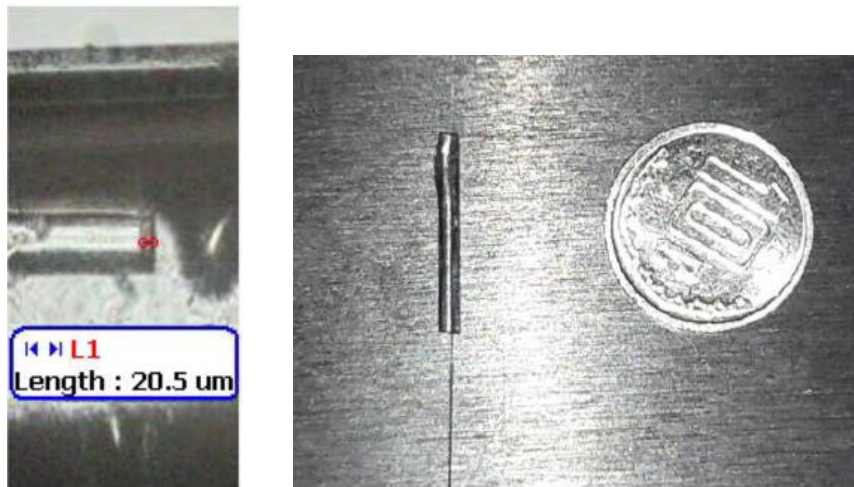


Figura 11. Dimensiones físicas del sensor de fibra óptica en configuración *Fabry Pérot*.

Principio de funcionamiento

Interferómetro Fabry Pérot

El interferómetro Fabry Pérot consta de una cavidad resonante formada de dos espejos semitransparentes. Se le conoce como resonante porque se pueden hacer interferir dos o más haces de luz por medio de múltiples reflexiones dentro de ella. Como se observa en la Figura 13, se tiene el primer espejo formado por la película delgada de TiO_2 (S_1) en la cual incide la señal proveniente del láser con amplitud de campo eléctrico E_0 . Cuando llega a la superficie del espejo una componente del haz incidente se refleja con magnitud $E_0\sqrt{R_1}$ y otra se transmite, teniendo una amplitud $\sqrt{1 - A_1}\sqrt{1 - R_1}E_0$. El factor $\sqrt{1 - A_1}$ representa el factor de pérdida de S_1 y $\sqrt{1 - R_1}$ es el factor de transmitancia del mismo espejo. Cuando el haz transmitido se propaga en la cavidad, sufre un cambio de fase o camino óptico representado por el factor $e^{-j\varphi}$. Posteriormente, se refleja desde el espejo S_2 formado por la interfaz fibra óptica-PDMS provocando un cambio en la amplitud de $\sqrt{1 - A_1}\sqrt{1 - R_1}\sqrt{R_2}e^{-j\varphi}E_0$. Por último, el haz que se reflejó de S_2 llega a S_1 y se transmite con una amplitud $(1 - A_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{-j\varphi}E_0$.

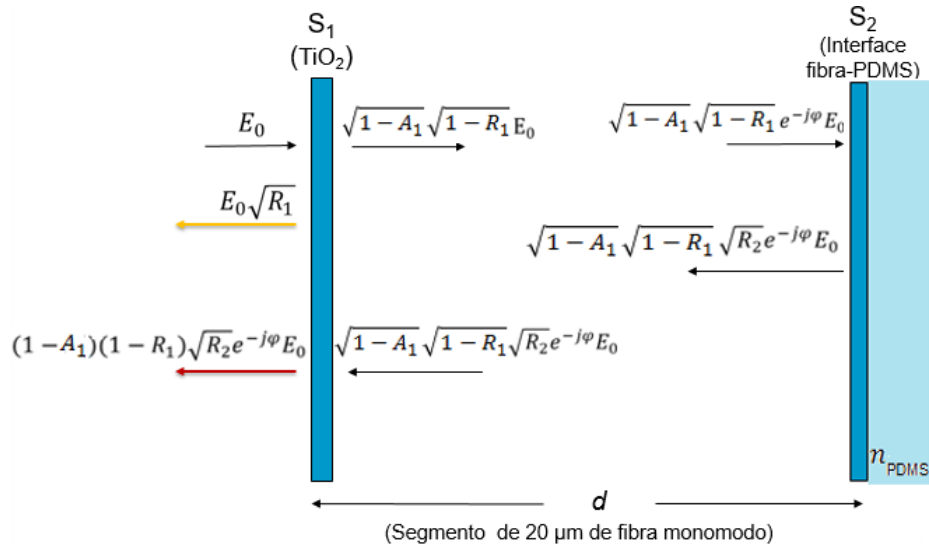


Figura 12. Principio de funcionamiento del interferómetro Fabry-Pérot

Modelo matemático

Como la reflectancia de los espejos S_1 y S_2 es baja, las múltiples reflexiones pueden ser descartadas, considerando así al sensor como un interferómetro de doble haz. Ahora, la manera de representar un haz de luz para el análisis de la visibilidad del patrón de interferencia es por medio de intensidades ópticas (I_0). Para poder representar un haz de luz a partir de las magnitudes de campo eléctrico (E_0) se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

Tenemos el campo eléctrico total:

$$E_T = \sqrt{R_1}E_0 + (1 - A_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{-j\varphi}E_0$$

Se considera a la intensidad total I_T como:

$$I_T = E_T E_T^*$$

$$I_T = [\sqrt{R_1}E_0 + (1 - A_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{-j\varphi}E_0][\sqrt{R_1}E_0 + (1 - A_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{j\varphi}E_0]$$

$$I_T = R_1E_0^2 + \sqrt{R_1}E_0^2(1 - A_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{j\varphi} + \sqrt{R_1}E_0^2(1 - A_1)(1 - R_1)\sqrt{R_2}e^{-j\varphi} + (1 - A_1)^2(1 - R_1)^2R_2E_0^2$$

$$I_T = R_1 E_0^2 + \sqrt{R_1} E_0^2 (1 - A_1)(1 - R_1) \sqrt{R_2} (e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}) + (1 - A_1)^2 (1 - R_1)^2 R_2 E_0^2$$

Considerando la identidad de *Euler*, $\text{Cos}(\varphi) = \frac{1}{2}(e^{i\varphi} + e^{-i\varphi})$, tenemos:

$$I_T = R_1 E_0^2 + 2\sqrt{R_1} E_0^2 (1 - A_1)(1 - R_1) \sqrt{R_2} \text{Cos}(\varphi) + (1 - A_1)^2 (1 - R_1)^2 R_2 E_0^2$$

Por definición, tenemos $E_0^2 = I_0$, de tal modo que I_T resulta:

$$I_T = R_1 I_0 + (1 - A_1)^2 (1 - R_1)^2 R_2 I_0 + 2(1 - A_1)(1 - R_1) \sqrt{R_1 R_2} I_0 \text{Cos}(\varphi)$$

Ésta intensidad total es la que es leída por el analizador de espectros ópticos. Las intensidades I_1 e I_2 vistas en la Figura 11 en la estructura del sensor, corresponden a $I_1 = R_1 I_0$ (haz de referencia) y $R_2 = (1 - A_1)^2 (1 - R_1)^2 R_2 I_0$, las cuales son combinadas en el núcleo de la fibra óptica y crean el patrón de interferencia.

El término $2(1 - A_1)(1 - R_1) \sqrt{R_1 R_2} I_0 \text{Cos}(\varphi)$ describe la diferencia de camino óptico de la combinación de las intensidades I_1 e I_2 o también llamado término de interferencia. Éste término depende de φ el cual equivale a:

$$\varphi = \frac{4\pi n_{eff}}{\lambda} d$$

donde $n_{eff} = 1.4463$ y es el índice de refracción efectivo de la fibra óptica, d el tamaño de la cavidad y λ la longitud de onda de la fuente de luz.

Resultados y discusión

Para caracterizar el sensor, se llevó a cabo un arreglo experimental el cual se muestra en la Figura 13. El esquema consta del LED súper luminiscente centrado a 1550 nm conectado por fibra óptica al circulador para transmitir la señal al sensor que se encuentra colocado sobre una placa térmica para poder variar la temperatura de interés que es de los 22 a los 60°C y debidamente cubierto y que la señal de respuesta sea enviada a un analizador de espectros ópticos (OSA) para observar el patrón de interferencia obtenido, poder analizar la visibilidad del mismo y cuantificar sus resultados.

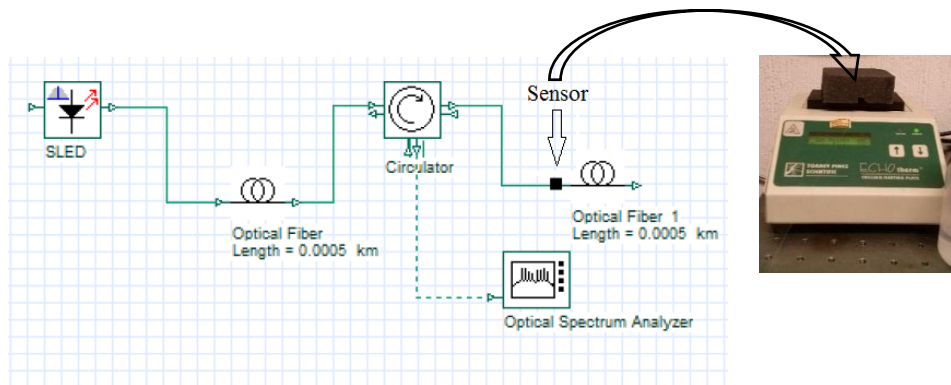


Figura 13. Esquema experimental para la caracterización del sensor.

Para los resultados se utilizan dos técnicas de análisis: la relación de extinción (ER), la diferencia entre el máximo y el mínimo de las franjas del patrón de interferencia y la amplitud del pico de la Transformada rápida de Fourier.

Análisis de la visibilidad del patrón de interferencia

La visibilidad es un coeficiente para medir la calidad del padrón de interferencia, el cual puede variar entre 0 y 1 donde 0 indica que no hay interferencia y 1 que existe una buena interferencia en cualquier interferograma. En el patrón de interferencia que se observa en la Figura 15 se ve la relación en dB's. Se utilizan dB por que se toma el láser que se utiliza para producir el patrón de interferencia como una unidad de referencia y por otro lado se toma la relación de la respuesta del sensor. La visibilidad se define como:

$$Vis = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Por lo tanto, se realiza una comparación entre las amplitudes del máximo y el mínimo de las franjas del patrón de interferencia. Se observa que el patrón no tiene corrimientos en longitudes de onda, sino que solo cambia su amplitud, lo que indica que este interferómetro es un interferómetro de amplitud y es únicamente dependiente de la temperatura. Esto demuestra que el sensor tiene una alta dependencia al índice de refracción del polímero que se está utilizando (PDMS), el cual es termo óptico. Esto se puede ilustrar mejor con la siguiente definición del término R_2 que es el factor de reflexión del espejo dos:

$$R_2 = \left[\frac{n_{eff} - n_{PDMS}}{n_{eff} + n_{PDMS}} \right]^2$$

Con la variación de la temperatura entre los 22 a 60°C, el índice de refracción del PDMS varía de 1.42039 a 1.40268.

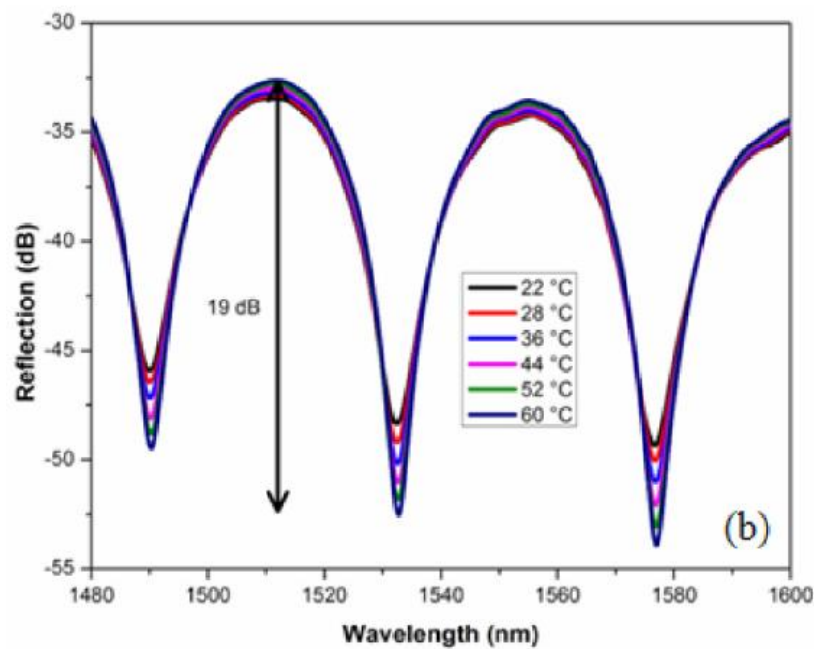


Figura 14. Patrón de interferencia observado en el sensor Fabry-Pérot con longitud de cavidad de 20 μm a diferentes temperaturas del PDMS.

Variación de la relación de extinción

Para analizar el patrón de interferencia, se utiliza la relación de extinción (ER). La ER es una relación logarítmica que hace un análisis de los máximos y mínimos del espectro obtenido. En la Figura 16(a) se observa una relación entre la temperatura y la ER en dB. A mayor temperatura se detecta una mayor cantidad de dB, por lo que la cantidad de luz que se refleja es mayor. Esto se relaciona con la amplitud que tiene el interferograma o patrón de interferencia. Consecuentemente, a menor temperatura se tiene una menor cantidad de dB. La ER también se relaciona con los cambios de índice de refracción del PDMS. En la Figura 16(b) se observa que a mayor índice de refracción se tiene una menor cantidad de dB.

Lo que se puede observar con éste análisis es que cuando el PDMS se encuentra a temperatura ambiente cuenta con un índice de refracción establecido y conforme la temperatura aumenta el índice de refracción disminuye provocando que la intensidad de luz que abandona la cavidad del sensor aumenta. El sensor demuestra una sensibilidad a la temperatura de 0.13 dB/°C.

$$ER = 10 \log_{10} \left[\frac{R_1 + (1-A)^2 (1-R_1)^2 R_2 + 2(1-A)(1-R_1)\sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + (1-A)^2 (1-R_1)^2 R_2 - 2(1-A)(1-R_1)\sqrt{R_1 R_2}} \right]$$

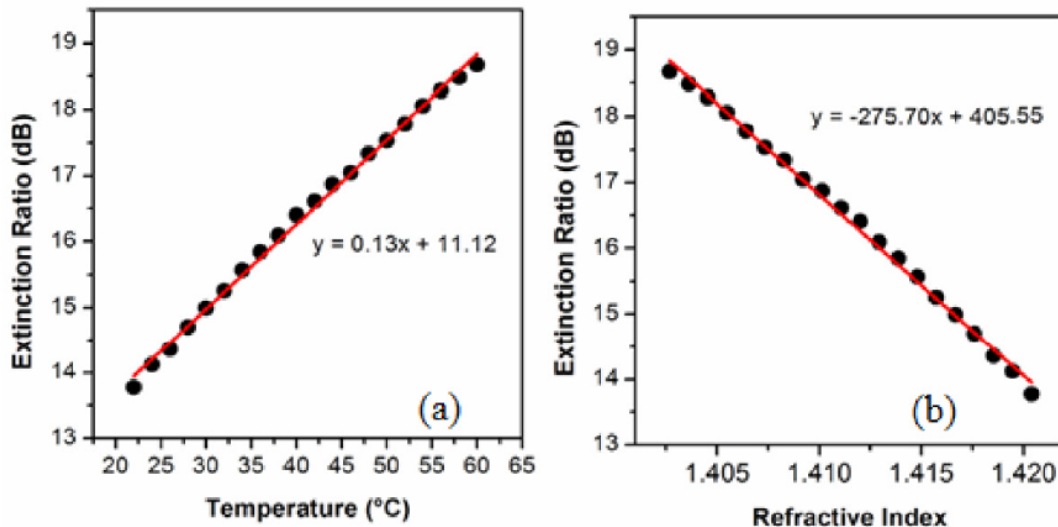


Figura 15. (a) Variación de la relación de extinción con respecto a los cambios de temperatura. (b) Variación de la relación de extinción a diferentes índices de refracción del PDMS.

Análisis de las franjas del patrón de interferencia por medio de la Transformada de Fourier

Finalmente, para hacer un análisis de las franjas del patrón de interferencia se utiliza la Transformada rápida de Fourier. La transformada de Fourier lo que hace es obtener las componentes en frecuencia del patrón de interferencia. Lo que se realizó aquí es que se aisló la componente de la fuente de luz y solamente se tiene la frecuencia a la que se lleva a cabo el patrón de interferencia, como puede observarse en la Figura 17.

Se puede observar en la Figura 17(a) que todas las componentes están centradas a una longitud de onda de 0.25 nm^{-1} (se expresa en nm^{-1} porque se considera como números de ciclos en una onda electromagnética), de modo que se vuelve a demostrar que el patrón de interferencia se repite uniformemente conforme la temperatura cambia, existiendo solamente cambios en la amplitud. Esto se demuestra mediante la Figura 17(b) donde se presenta una correlación entre temperatura y la amplitud normalizada de las componentes en frecuencia, presentando un comportamiento lineal, lo que vuelve atractivo al sensor.

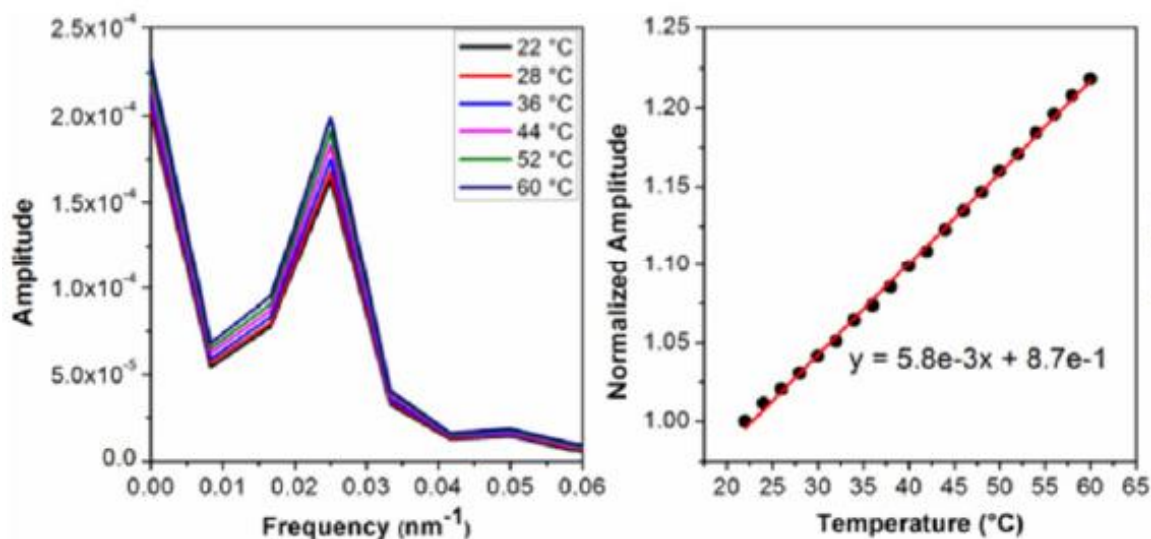



Figura 16. (a) Componentes en frecuencia de la transformada de Fourier del patrón de interferencia. (b) Emplitud normalizada de los picos de la TF en función de la temperatura.

Conclusiones

- Se propuso y demostró un sensor de temperatura altamente preciso, ultra compacto y sencillo de fabricar, basado en una cavidad *Fabry-Pérot* recubierta con PDMS.
- El espectro de interferencia reflejado desde la cavidad depende del índice de refracción del PDMS debido a su alto coeficiente termo-óptico.
- Monitorizando la relación de extinción en el sensor propuesto se observó una sensibilidad de 0.13 dB/°C.
- Pequeñas variaciones de temperatura (en el rango de 22 a 60°C) causan un cambio detectable en el patrón de interferencia.
- El estudio del comportamiento del dispositivo es tan simple como un LED, por lo que un analizador de espectros ópticos de baja resolución puede ser utilizado.
- Debido a la existencia del polímero PDMS en aplicaciones biológicas y de micro-fluidos, creemos que el sensor microscópico puede ser utilizado en tales estructuras.

Anexo y Referencias



OSA Publishing

Artículo publicado
Optics Express
Factor de Impacto: 3.148

Optics Express
Andrew M. Weiner, Editor-in-Chief
Editorial Board

Recibido: 02 Dic 2015; Revisado: 15 Feb 2016; Aceptado: 21 Feb 2016; Publicado: 4 Mar 2016

Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay

Iván Hernández-Romano,^{1,*} Miguel A. Cruz-García,² Carlos Moreno-Hernández,³ David Monzón-Hernández,³ Efraín O. López-Figueroa,⁴ Omar E. Paredes-Gallardo,⁴ Miguel Torres-Cisneros,⁵ and Joel Villatoro^{6,7}

Éste trabajo se realizó en el Centro de Investigaciones en Óptica A.C. en León, Guanajuato, México en una estancia de investigación científica por medio del programa de *Cooperación, Movilidad e Internacionalización Estudiantil* con la modalidad de *Verano Científico* de la Universidad de Sonora en el año 2015. El trabajo estuvo a cargo del Dr. Iván Hernández Romano en colaboración con el Dr. David Monzón Hernández del centro antes mencionado. Cabe destacar que el trabajo de investigación aquí presentado forma parte de una publicación en la revista *Optics Express* con factor de Impacto 3.148.

Se anexa el artículo publicado en las siguientes cuartillas para una mejor comprensión del lector. En él se pueden observar las referencias utilizadas en este trabajo.

Optical fiber temperature sensor based on a microcavity with polymer overlay

Iván Hernández-Romano,^{1,*} Miguel A. Cruz-García,² Carlos Moreno-Hernández,³
David Monzón-Hernández,³ Efraín O. López-Figueroa,⁴ Omar E. Paredes-Gallardo,⁴
Miguel Torres-Cisneros,⁵ and Joel Villatoro^{6,7}

¹CONACYT Research Fellow-Electronics Department, Sede Palo Blanco, University of Guanajuato, Km 3.5 + 1.8, Carr. Salamanca-Valle de Santiago, Salamanca, Guanajuato 36885, Mexico

²Fiber and Integrated Optics Laboratory, UAM Reynosa-Rodhe, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Carr. Reynosa-San Fernando S/N, Reynosa, Tamaulipas 88779, Mexico

³Centro de Investigaciones en Óptica, Loma del Bosque 115, Colonia Lomas del Campestre, León, Guanajuato 37150, Mexico

⁴Departamento de Investigación en Física, División de Ciencias Exactas y Naturales, University of Sonora, Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N, Colonia Centro, Hermosillo, Sonora 83000, Mexico

⁵Electronics Department, Sede Palo Blanco, University of Guanajuato, Km 3.5 + 1.8, Carr. Salamanca-Valle de Santiago, Salamanca, Guanajuato 36885, Mexico

⁶Dept. of Communications Engineering, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ETSI) de Bilbao. University of the Basque Country (UPV/EHU), Alda. Urquijo s/n, E-48013 Bilbao, Spain

⁷IKERBASQUE -Basque Foundation for Science, E-48011 Bilbao, Spain

*heriromano@gmail.com

Abstract: An ultracompact, cost-effective, and highly accurate fiber optic temperature sensor is proposed and demonstrated. The sensing head consists of Fabry-Perot microcavity formed by an internal mirror made of a thin titanium dioxide (TiO₂) film and a microscopic segment of single-mode fiber covered with Poly(dimethylsiloxane) (PDMS). Due to the high thermo-optic coefficient of PDMS the reflectance of the fiber-PDMS interface varies strongly with temperature which in turn modifies the amplitude of the interference pattern. To quantify the changes of the latter we monitored the visibility of the interference pattern and analyzed it by means of the fast Fourier transform. Our sensor exhibits linear response, high sensitivity, and response time of 14 seconds. We believe that the microscopic dimensions along with the performance of the sensor here presented makes it appealing for sensing temperature in PDMS microfluidic circuits or in biological applications.

©2016 Optical Society of America

OCIS codes: (060.2370) Fiber optics sensors; (120.2230) Fabry-Perot; (130.3990) Micro-optical devices.

References and links

1. D. Janasek, J. Franzke, and A. Manz, "Scaling and the design of miniaturized chemical-analysis systems," *Nature* **442**(7101), 374–380 (2006).
2. P. Yager, T. Edwards, E. Fu, K. Helton, K. Nelson, M. R. Tam, and B. H. Weigl, "Microfluidic diagnostic technologies for global public health," *Nature* **442**(7101), 412–418 (2006).
3. H. Craighead, "Future lab-on-a-chip technologies for interrogating individual molecules," *Nature* **442**(7101), 387–393 (2006).
4. G. M. Whitesides, "The origins and the future of microfluidics," *Nature* **442**(7101), 368–373 (2006).
5. D. Psaltis, S. R. Quake, and C. Yang, "Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics," *Nature* **442**(7101), 381–386 (2006).
6. F. Schneider, J. Draheim, R. Kamberger, and U. Wallrabe, "Process and material properties of polydimethylsiloxane (PDMS) for Optical MEMS," *Sens. Actuators A Phys.* **151**(2), 95–99 (2009).
7. E. Udd, "The Emergence of Fiber Optic Sensor Technology," in *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, 2nd ed., E. Udd, W. B. Spillman, eds. (John Wiley & Sons, 2011).
8. C. L. Lee, J. M. Hsu, J. S. Horng, W. Y. Sung, and C. M. Li, "Microcavity fiber Fabry-Pérot interferometer with an embedded golden thin film," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25**(9), 833–836 (2013).

9. B. Sun, Y. Wang, J. Qu, C. Liao, G. Yin, J. He, J. Zhou, J. Tang, S. Liu, Z. Li, and Y. Liu, "Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet," *Opt. Express* **23**(3), 1906–1911 (2015).
10. A. Zhou, B. Qin, Z. Zhu, Y. Zhang, Z. Liu, J. Yang, and L. Yuan, "Hybrid structured fiber-optic Fabry-Perot interferometer for simultaneous measurement of strain and temperature," *Opt. Lett.* **39**(18), 5267–5270 (2014).
11. H. Y. Choi, K. S. Park, S. J. Park, U. C. Paek, B. H. Lee, and E. S. Choi, "Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Perot interferometer," *Opt. Lett.* **33**(21), 2455–2457 (2008).
12. Z. L. Ran, Y. J. Rao, W. J. Liu, X. Liao, and K. S. Chiang, "Laser-micromachined Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high-resolution temperature-independent measurement of refractive index," *Opt. Express* **16**(3), 2252–2263 (2008).
13. C. L. Lee, L. H. Lee, H. E. Hwang, and J. M. Hsu, "Highly sensitive air-gap fiber Fabry-Pérot interferometers based on polymer-filled hollow core fibers," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **24**(2), 149–151 (2012).
14. 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 Photonics J.* **6**(4), 1–8 (2014).
15. X. Y. Zhang, Y. S. Yu, C. C. Zhu, C. Chen, R. Yang, Y. Xue, Q. D. Chen, and H. B. Sun, "Miniature end-capped fiber sensor for refractive index and temperature measurement," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26**(1), 7–10 (2014).
16. C. Moreno-Hernández, D. Monzón-Hernández, I. Hernández-Romano, and J. Villatoro, "Single tapered fiber tip for simultaneous measurements of thickness, refractive index and distance to a sample," *Opt. Express* **23**(17), 22141–22148 (2015).
17. R. Mukhopadhyay, "When PDMS isn't the best. What are its weaknesses, and which other polymers can researchers add to their toolboxes?" *Anal. Chem.* **79**(9), 3248–3253 (2007).
18. I. Martincek, D. Pudis, and P. Gaso, "Fabrication and optical characterization of strain variable PDMS biconical optical fiber taper," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **25**(21), 2066–2069 (2013).
19. A. L. Thangawng, R. S. Ruoff, M. A. Swartz, and M. R. Glucksberg, "An ultra-thin PDMS membrane as a bio/micro-nano interface: fabrication and characterization," *Biomed. Microdevices* **9**(4), 587–595 (2007).
20. D. Fuard, T. Tzvetkova-Chevolleau, S. Decossas, P. Tracqui, and P. Schiavone, "Optimization of poly-dimethyl-siloxane (PDMS) substrates for studying cellular adhesion and motility," *Microelectron. Eng.* **85**(5-6), 1289–1293 (2008).
21. S. L. Peterson, A. McDonald, P. L. Gourley, and D. Y. Sasaki, "Poly(dimethylsiloxane) thin films as biocompatible coatings for microfluidic devices: cell culture and flow studies with glial cells," *J. Biomed. Mater. Res. A* **72**(1), 10–18 (2005).
22. R. Seemann, M. Brinkmann, T. Pfohl, and S. Herminghaus, "Droplet based microfluidics," *Rep. Prog. Phys.* **75**(1), 016601 (2012).
23. C. E. Lee, H. F. Taylor, A. M. Markus, and E. Udd, "Optical-fiber Fabry-Perot embedded sensor," *Opt. Lett.* **14**(21), 1225–1227 (1989).
24. Y. H. Kim, K. S. Park, B. H. Lee, S. Lee, D. H. Woo, and Y. T. Chough, "Highly accurate refractive index sensor based on Fourier-transformed phase acquisition in fiber-optic interferometer," in *Proceeding of International Conference In Sensing Technology*, (IEEE, 2013) pp. 555–558.
25. J. Villatoro, V. P. Minkovich, and J. Zubia, "Photonic crystal fiber interferometric force sensor," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27**(11), 1181–1184 (2015).
26. 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 Sens. J.* **12**(1), 107–112 (2012).

1. Introduction

In the last twenty years lab on a chip (LOC) devices have emerged as a feasible technology for a number of applications such as analytical chemistry [1], point-of-care diagnostics [2], genomic research [3], etc. One of the most promising LOC devices addresses the integration of microfluidics [4] technology and optical interrogation techniques. The popular material to fabricate such optofluidic devices is PDMS (Polydimethylsiloxane) [5,6] since it is biocompatible, nontoxic, optically transparent, inexpensive, and easy to fabricate in not controlled nor specialized facilities. In these devices the presence of the targeted agent involves a change in the refractive index (RI) of the fluid. Different approaches to measure the tiny RI changes associated to biological reactions have been successfully demonstrated in controlled lab conditions [5]. Especial attention has been paid to temperature stability since it is well known that RI of most polymers varies with temperature. However, in real world applications where temperature is difficult to control, one option is to measure RI and temperature simultaneously. In this sense an alternative is the integration of a temperature sensor in the PDMS microfluidic circuit. To this end, optical fiber sensors are good candidates

since they are lightweight and compact, biocompatible, chemically inert, can be easily integrated in a telecommunication network for remote and real-time sensing [7].

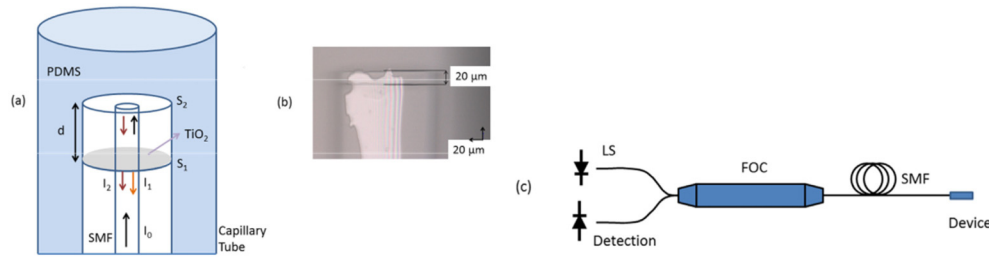


Fig. 1. (a) Schematic diagram of the sensing head, S_1 provides the reference beam and S_2 the probe beam. (b) Image of the cavity composed by an internal mirror and the cleaved end of a SMF. (c) The interrogation of the device involves a light source (LS), a fiber optic circulator (FOC) or coupler and a power meter (PM).

Fiber sensors in a Fabry-Perot configuration are the simplest and easiest to fabricate [7]. A number of fiber Fabry-Perot interferometers have been studied and fabricated due to their capability of measuring physical quantities such as refractive index (RI) [8], pressure [9], strain [10], and temperature [9]. The implementation of Fabry-Perot cavities (FPCs) on the tip of an optical fiber, for sensing temperature for example, is appealing since they combine low-cost fabrication, microscopic size and high sensitivity. Among the techniques used to build compact cavities ($\sim 100 \mu\text{m}$) we can mention thin films embedded in single mode fiber (SMF) [9], hollow core fiber spliced to SMF [11], femtosecond laser micromachining [12], polymer cavities formed by dip coating [9, 13–15]. In the majority of such interferometers the thermo-optic properties of the cavity is exploited. Therefore, in such sensors, temperature induces a shift of the interference pattern. Since the thermo-optic coefficient (TOC) of is small ($6.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) [12], thus, in most FPCs a large temperature change is needed to produce a measurable interference pattern shift. The low thermal sensitivity is a disadvantage for measuring temperature changes in the range between 20 to 60 $^\circ\text{C}$ which is the range of interest for biological applications or in LOC devices. To overcome this limitation, FPCs made of polymer with a high TOC that exhibit high sensitivities in the aforementioned temperature range have been fabricated [9, 13–15]. Three commercial polymers have been used for this purpose, PDMS, NOA61, and NOA65 whose TOCs are $-4.66 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ [16], $-1.17 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ [14], and $-1.83 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ [9], respectively. One drawback of temperature sensors reported in [9, 13–15] is that they need to be calibrated when a physical variable, for example RI or pressure.

In this work, we propose and demonstrate a simple, cost-effective, and highly accurate temperature sensor based on a single mode fiber FPC covered with PDMS, see Fig. 1(a). The interferometer was built by depositing a 169 nm-thick film of TiO_2 over the cleaved face of a standard SMF. The TiO_2 coated fiber was then fusion spliced to another SMF which was cleaved at a distance of 20 or 230 μm from the TiO_2 film. The cleaved face of the SMF was in direct contact with PDMS. To do so, the device was placed inside a capillary tube filled with PDMS. In our configuration, the mirrors of the cavity are the TiO_2 film and the cleaved SMF-PDMS interface, see Fig. 1(a).

In our device, temperature alters the RI of PDMS, and thereby, the reflectance of the interface between fiber core and the PDMS. As a consequence, the amplitude of the interference pattern is changed. To quantify the changes in amplitude of the interference pattern two signal processing techniques were used. In one of them the extinction ratio (ER), i.e., the difference between maxima and minima of the interference fringes, was monitored. In the other case the peak amplitude of the Fast-Fourier-Transform (FFT) of the interference pattern was monitored. The latter technique was used to demonstrate the real-time

temperature measurement capabilities of our device. We chose PDMS polymer for building our sensor because it is nontoxic [17], it has low absorption at 1550 nm [18], and it is biocompatible [19]. Due to its biocompatibility, it has been employed for cell-based studies [20] and tissue engineering [21]. Additionally, PDMS is the most commonly used material in the standard microfluidics devices [22].

2. Design and principle

The proposed device is shown in Fig. 1(a). To fabricate a Fabry-Perot microcavity in SMF we first coated the cleaved end of the SMF with a dielectric material (TiO_2 in our case). The evaporation of TiO_2 was carried out in a high vacuum chamber. The thickness of the film was 169 nm, it was measured with a crystal quartz monitor. We chose TiO_2 as it has good stability and high mechanical strength; moreover, it can withstand the elevated temperature during the fusion splicing of the optical fibers [23]. The dielectric film on the SMF works as a partially reflecting internal mirror and provides the reference beam for the Fabry-Perot interferometer. Then, the TiO_2 -coated fiber was fusion spliced to a segment of SMF which was cleaved from distance of 20 or 238 μm from the dielectric mirror, see Fig. 1(b). The interface between the cleaved SMF end and air (or a polymer) provides the probe or sensing beam. The recombination between the reference and probe beams is what produces an interference pattern. It is interesting to note that the excitation and recombination of the beams is carried out inside a conventional optical fiber.

The reflectance of the TiO_2 film was measured by launching light (wavelength 1550 nm) from a highly stable tunable laser to the coated fiber end through an optical circulator, see Fig. 1(c). The reflected light was detected by a power meter. Without any deposited film the reflectance at the interface between the fiber core and air was -14.81 dB. However, when the cleaved SMF end was coated with a 169 nm-thick TiO_2 film the reflectance reached -7.87 dB. As it is known that the reflectance of a TiO_2 film decreases drastically after a fusion splicing process, several tests were carried out until we achieved an internal mirror (TiO_2 -coated SMF fusion splicing to and non-coated SMF) with reflectance of -36.58 dB which is higher than the reflectance of the interface formed by the fiber core and PDMS polymer (-40.46 dB, at 24°C). The next step in the fabrication of the microcavity involves a cleaving process under an optical microscope. The cavity had a length of 20 or 238 μm , although other lengths are possible as the cavity length does not affect the performance of our temperature sensor as we will see later on.

It is convenient to point out that in a thin film evaporation chamber hundred of cleaved SMFs can be coated in the same evaporation process. In addition, state-of-the-art fusion splicing machines allow developing ad hoc or optimized splicing and cleaving programs which ensures reproducibility and low fabrication cost. The final step in the fabrication of the sensor involves coating a surface of the FP cavity with a thermo-optic material. To do so, the fiber tip was placed inside a capillary tube whose inner diameter, wall thickness, and length were 1.1 mm, 0.2 mm, and 13 mm, respectively. The tube was filled with PDMS by capillary action. PDMS polymer was cured following the curing process provided by the manufacturer. The interface between the PDMS polymer and the cleaved SMF face provides the temperature-sensitive beam.

The behavior of the device shown in Fig. 1(a) can be explained as follows. Light reflects from two interfaces, denoted as S_1 (TiO_2 film) and S_2 (interface between fiber core and PDMS). If light with intensity I_0 is launched into the fiber, then the surface S_1 will reflect part of the light and the rest will be transmitted. The intensity of the reflected light from S_1 is denoted as I_1 . Similar effect occurs at the surface S_2 . The reflected intensity from the surface S_2 is denoted by I_2 . The intensities I_1 and I_2 are collected and combined by the SMF core. As the reflectance of the surfaces S_1 and S_2 is low, multiple reflections can be neglected. Therefore, our device can be treated as a two beam interferometer. The intensities I_1 and I_2

can be written as $I_1 = I_0 R_1$ and $I_2 = (1 - A)^2 (1 - R_1)^2 R_2 I_0$, respectively, where A is the transmission loss factor of the surface S_1 . R_1 and R_2 are the reflectivities of the surfaces S_1 and S_2 , respectively. The intensity I_R of the light reflected from the cavity that will reach the power meter can be expressed by [5]

$$I_R = R_1 I_0 + (1 - A)^2 (1 - R_1)^2 R_2 I_0 + 2(1 - A)(1 - R_1) \sqrt{R_1 R_2} I_0 \cos(\varphi) \quad (1)$$

where $\varphi = 4\pi n_{\text{eff}} d / \lambda$ is the phase difference between the reference and the sensing beams. n_{eff} is the effective refractive index of the fundamental mode propagating in the SMF core, d is the cavity length, and λ is the wavelength of the optical source. Therefore, if one launches light from a broadband source to the device and analyzes the reflected spectrum a sinusoidal (interference) pattern can be expected.

Our device is highly sensitive to temperature because the PDMS polymer has a high TOC. A minute variation in temperature will modify the polymer refractive index, and consequently, the reflectance of the surface S_2 , this means R_2 . As a result, the maxima and minima of the interference pattern will change. Temperature will also alter n_{eff} and d , hence φ , giving rise to a shift of the interference pattern. The optical fiber has a low TOC ($6.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) [12], and a low thermal expansion coefficient ($0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) [12]. Therefore, the shift of the interference pattern will be minimal for a small temperature change. In our case, we do not monitor the shift of the interference pattern but the changes of the visibility or fringe contrast (difference between maxima and minima of the interference pattern). To predict such changes we used the Sellmeier equation [6], the TOC [16] for the PDMS, and the equation $R_2 = \left[\frac{(n_{\text{eff}} - n_{\text{PDMS}})}{(n_{\text{eff}} + n_{\text{PDMS}})} \right]^2$, where n_{PDMS} is the RI of the PDMS and $n_{\text{eff}} = 1.44630$. Figure 2(a) shows the interference patterns at temperature between 22 to 60 °C. In such temperature range the the RI of PDMS goes from 1.42039 to 1.40268.

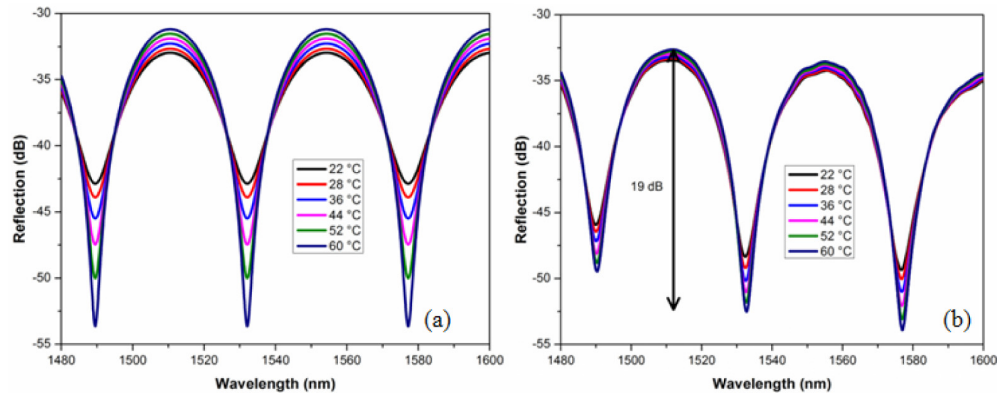


Fig. 2. (a) Simulation of the reflection spectra of the device shown in Fig. 1(a) at difference temperatures. (b) Interference patterns observed in a 20 μm -long Fabry-Perot cavity in PDMS at different temperatures

3. Results and discussion

The experimental setup that was used for testing the proposed devices is shown in Fig. 1(c). Light from a Super-Luminescent Light Emitting Diode (SLED), center at 1550 nm, was launched to the cavity by means of a fiber optic circulator. The reflected light was detected by an optical spectrum analyzer (OSA). The sensor was placed on a thermoelectric cooler, inside a closed box, and the temperature was increased from 22 °C to 60 °C. Figure 2(b) shows the spectra observed at different temperatures. The extinction ratio (ER) of the interference patterns was correlated with temperature [15]. The ER can be calculated by using Eq. (1) as follows,

$$ER = 10 \log_{10} \left[\frac{R_1 + (1-A)^2 (1-R_1)^2 R_2 + 2(1-A)(1-R_1) \sqrt{R_1 R_2}}{R_1 + (1-A)^2 (1-R_1)^2 R_2 - 2(1-A)(1-R_1) \sqrt{R_1 R_2}} \right] \quad (2)$$

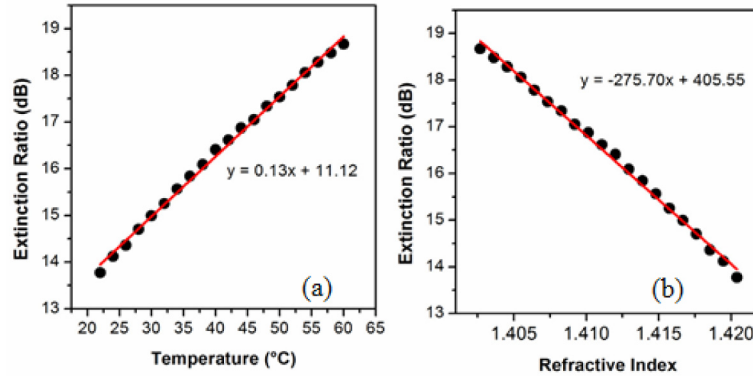


Fig. 3. (a) Variation of the ER at different temperatures. (b) Variation of the ER at different RIs of the PDMS. The dots are experimental values and the solids lines fitting lines to the experimental data. The length of the cavity was 20 μm .

The observed variation of the ER as a function of temperature is shown in Fig. 3(a). The corresponding variation of the ER as a function of the RI of the PDMS is shown in Fig. 3(b). The temperature sensitivity was found to be 0.13 dB/°C.

The method described above suggests a high temperature sensitivity of our device, however, the monitoring of ER is not very accurate because it depends on which peaks and dips are selected. A more accurate method is by analysing the interference patterns by means of the Fast Fourier Transform (FFT) as this provides information of the phase [24], frequency [11] and amplitude [25] of such patterns. It has been shown that the FFT method provides higher resolution [24]. Figure 4(a) was obtained by applying the FFT to the fringe interference patterns shown in Fig. 2(b). The normalized FFT peak as a function of temperature is shown in Fig. 4(b). In order to show that the cavity length is not an issue a large cavity was constructed (238 μm , reflectance of the internal mirror -37.16 dB), following the fabrication steps mention above, and it was also analyzed by the FFT method. The calculated FFT of the spectra and the normalized amplitudes of the FFT peaks as function of temperature are shown in Figs. 4(c) and in (d), respectively. By comparing the Figs. 4(a) and (c), one can observed that the FFT peak of Fig. 4(c), i.e., of the longer device, is sharper than the peak shown in Fig. 4(a), or shorter device. Since the spectra of the larger cavity have more periods, the shape of the FFT is smoother which is easier to track. It can be noted from Figs. 4(b) and 4(d) that the behavior of our devices is linear.

An important parameter of any temperature sensor is its response time. In our case we define it as the time required for our sensor output to go from 10% to 90% of the maximum amplitude change. To measure such a time a simple experimental setup was implemented; it

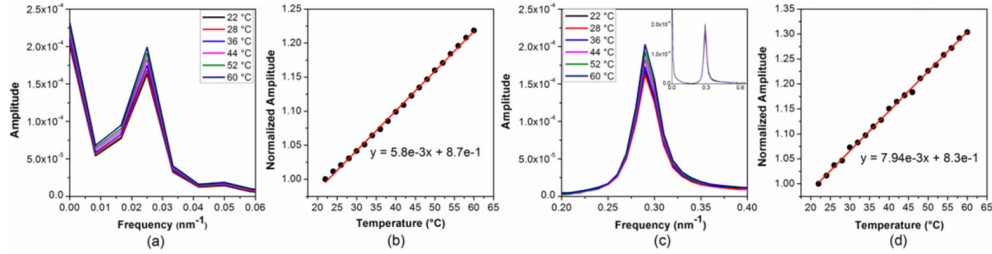


Fig. 4. Cavity length 20 μm : (a) Calculated FFT of the spectra shown in Fig. 3, (b) Normalized amplitude of the FFT peak as a function of temperature; Cavity length 238 μm : (c) Calculated FFT of the spectra, the inset shows higher span, (d) Normalized amplitude of the FFT peak as a function of temperature.

consisted of a personal computer, a spectral interrogator, and the sensor device mounted in a translation stage. The spectral interrogator (sm125, Micron Optics), which had a tunable laser emitting from 1510 to 1590 nm with a 20 Hz repetition rate, was connected to the sensor with a sampling rate of 1 sample/s. A program in LabView was developed to acquire the peak amplitude of the FFT and to store it in personal computer. A more detailed description of this scheme can be found elsewhere [16]. In order to determine the heating up and the cooling down response time of our sensor an automatic system with translations stages was developed. Such system held the sensor in the air, for 5 min, at room temperature (26 $^{\circ}\text{C}$) and then it was dipped into a container with water at 60 $^{\circ}\text{C}$ for another 5 min. Such process was repeated several times. Figure 5 shows the peak amplitude of the FFT for the two temperatures mentioned above as a function of time. The oscillations observed in the FFT peak are due oscillations in temperature of the hot water because it was heated with a hotplate. It is worth noting that the sensor is capable of following the small temperature variations of the hotplate we used. The heating up and the cooling down response time were found to be 14 s and 31 s, respectively. These times are comparable to those of a sensor based on a fiber Bragg grating reported by D. Barrera et al. [26].

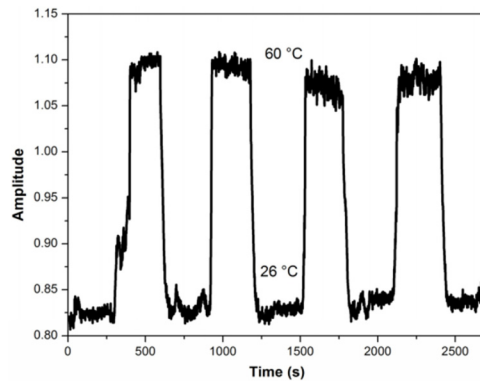


Fig. 5. Temperature cycling test to determine the response time of the proposed devices. The length of the cavity was 20 μm .

4. Conclusions

In conclusion, we have proposed and demonstrated an ultracompact, simple-to-fabricate, and highly accurate temperature sensor based on a single mode fiber Fabry-Perot cavity embedded in PDMS polymer. In our device, the maxima and minima of the reflected interference spectrum depend on the RI of the PDMS which has a high thermo-optic coefficient. Small variations in temperature (in the 22 to 60 $^{\circ}\text{C}$ range) can cause a detectable change in the

interference pattern. By monitoring the extinction ratio of the interference pattern a temperature sensitivity of 0.13 dB/°C was observed. Two FPCs with different lengths were constructed and tested by the fast Fourier transform technique and similar results were obtained. In this case, temperature is codified in the FFT peak which can be monitored easily. The interrogation of our device is simple as an LED and a low-resolution spectrum analyzer can be used. In addition, the materials, components, and tools needed to fabricate the device are widely available. Due to the extensive use of PDMS in biological and microchannel applications we believe that our microscopic device can be employed for monitoring the temperature in those structures. In fact, the fiber tip can be inserted in the PDMS substrate or mold during the fabrication process to sense temperature or refractive index.

Acknowledgments

I. Hernández-Romano and M. Torres-Cisneros acknowledge the funding through the project: “Cátedras CONACYT 2015”, “Cátedras de excelencia Universidad de Guanajuato 2014” and “Convocatoría CIO-UG 2015”. J. Villatoro is grateful to the Ministerio de Economía y Competitividad (Spain) for financial support under project TEC2015-63826-C3-1.