

# SENSOR DE TEMPERATURA ÓPTICO BASADO EN LOS EFECTOS TERMO ÓPTICOS DEL SILICIO

Rodriguez Rodriguez Anyi Ximena (1), Vargas Rodriguez Everardo (2), Guzman Chavez Ana Dinora (2)

1 [Licenciatura en Física, Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá Colombia] | [axrodriguezr@correo.udistrital.edu.co]

2 [Departamento de Estudios Multidisciplinarios, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato] | [evr@ugto.mx]

## Resumen

Este trabajo presenta un tipo de sensor de temperatura óptico, basado en la variación de temperatura de una oblea de silicio de  $368.143 \mu\text{m}$  de espesor, unida a una fibra monomodo con una mini cavidad de aire, que actúan como interferómetros Fabry-Perot. Con esta estructura se presenta la implementación de un sensor de temperatura el cual tiene una gran sensibilidad de  $1.3167^\circ\text{C/V}$  y una alta resolución del orden de  $0.0003^\circ\text{C}$  para un rango dinámico corto de  $8.6$  a  $13.8^\circ\text{C}$ . Se presenta el modelado del sensor y estos resultados se respaldan con resultados experimentales.

## Abstract

This work presents a type of Optical temperature sensor, based on the temperature variation of a  $368.143 \mu\text{m}$  thick silicon wafer, together with a single-mode fiber with a mini air cavity, which act as Fabry-Perot interferometers. With this structure is presented the implementation of a temperature sensor which has a high sensitivity of  $1.3167^\circ\text{C/V}$  and a high resolution of the order of  $0.0003^\circ\text{C}$  for a short dynamic range of  $8.6^\circ\text{C}$  to  $13.8^\circ\text{C}$ . The modeling of the sensor is presented and these results are supported with experimental results.

## Palabras Clave

Láser; Temperatura, Cavidad de anillo; Sensibilidad; Interferómetro Fabry Perot.

## INTRODUCCIÓN

La fibra óptica ha jugado un papel importante en el desarrollo de la comunicación a lo largo de la historia gracias al uso de ondas luminosas para la transmisión y recepción de información. Desde inicios de la década de 1990 la investigación se ha extendido al campo de la optoelectrónica buscando la construcción de productos industriales como lo son sensores ópticos [1]. Estos presentan una notable ventaja frente a los sensores eléctricos los cuales han sido el mecanismo estándar para medir fenómenos físicos y mecánicos; sin embargo, tienen limitaciones como pérdida de transmisión y susceptibilidad a interferencia electromagnética [2]. De manera tal que una solución a estas dificultades la ofrece un sensor de fibra óptica siendo una excelente herramienta de detección en una variedad de aplicaciones de detección tales como: mediciones de deformación, esfuerzo, temperatura, vibraciones, desplazamiento y deflexión. Los principios de modulación de la luz se utilizan para medir diversos fenómenos físicos. Estas tecnologías de detección óptica se pueden clasificar teniendo en cuenta el fenómeno de interacción que puede ser por: intensidad, atenuación de la luz, interferometría, resonancia, retrodispersión, polarización y finalmente interferencia espectral [3]. Actualmente existe una variedad de tecnologías de sensores ópticos, como lo son los sensores intrínsecos, utilizando la fibra óptica como el elemento de detección. Entre estos se destacan los interferómetros Fabry-Perot (FPI), Fiber Bragg Gratings (FBG), sensores distribuidos sobre la base de Rayleigh, Raman [4]. El diseño de dispositivos ópticos, usando sistemas de bombeo, medios activos con fibras dopadas y cavidades resonantes se hace debido a su uso potencial como sensores [5].

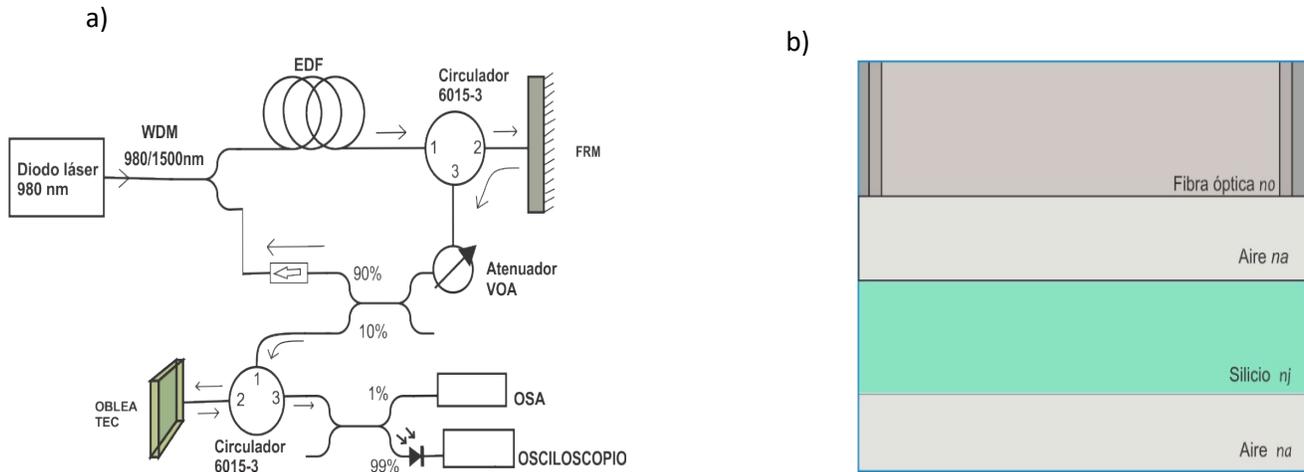
En este trabajo se presenta un sensor de temperatura basado en una cavidad tipo Fabry-Perot compuesta por un sistema multicapa conformado por una fibra monomodo dirigida hacia una oblea de silicio (Si) de 368.143  $\mu\text{m}$  de espesor, entre estas dos interfaces existe una cavidad de aire de aproximadamente 29  $\mu\text{m}$ ; en la otra cara de la capa de silicio hay un medio semi infinito de aire. Con este sistema se logró implementar un sensor de temperatura con una alta sensibilidad y resolución del orden de 1.3167°C/V con rango dinámicos relativamente cortos de temperatura, haciendo barridos entre 8.6°C y 23.2°C. Además, en el presente trabajo se muestra el modelado teórico de la caracterización espectral de la estructura de capas delgadas para poder simular la respuesta final del sensor de temperatura. La respuesta aproximada que se obtiene por las simulaciones es soportada por mediciones experimentales.

## METODOLOGÍA

### Implementación del arreglo experimental

Para implementar el sensor de temperatura se implementó el arreglo experimental presentado en la Imagen 1. El principio de operación de nuestro sensor está basado en la interacción de una emisión láser y la reflectividad de que tiene el elemento sensor compuesto por la capa de aire y la oblea de silicio. En nuestro caso implementamos un láser de fibra óptica emitiendo en la región de 1560 nm. Para el funcionamiento de este sistema se bombea con un láser semiconductor (BL976-SAG300 Thorlabs) a  $\lambda=980$  nm, este excita una fibra de erbio dopada EDF (por su sigla en inglés Erbium Doped Fiber, modelo T6 –EFD-T6 Newport) que actúa como medio activo, de allí se transmite la señal amplificada, en un ancho de banda sobre 1550nm, que a su vez está dirigido hacia una cavidad tipo anillo, de esta manera la luz viaja a través de un circulador (6015-3 Thorlabs) del puerto 1 al puerto 2, hasta llegar al espejo de Faraday (FRM Faraday Ro), frente a las diferentes configuraciones se decide usar esta, llamada configuración de anillo, por su eficiencia. Entre el sistema de bombeo y la fibra dopada se encuentra un multiplexor por división de longitud de onda (WDM, por sus siglas en inglés – modelo WD202A-FC THORLABS), este se encarga de hacer circular varias señales por una sola fibra común, una señal entrante propia del bombeo y una de regreso de 1550 nm. Posteriormente la señal pasa por un atenuador variable óptico (VOA) el cual estabiliza la región de emisión del láser. La salida del láser se obtiene dividiendo la señal con un acoplador (TW1550R2F2 Thorlabs) de la cual el 90% se dirige para retroalimentar el sistema láser y el 10% restante se dirige hacia el elemento sensor (cavidad tipo Fabry Perot) pasando a través

de un circulador (6015-3) del puerto 1 al puerto 2, donde se encuentra la oblea de silicio (Si) el cual refleja una proporción de la señal y esta señal pasa del puerto 2 al puerto 3 del circulador. Posteriormente la señal reflejada es dividida por un acoplador (TW1550R1F1 Thorlabs), de la cual el 99% que se dirige un fotodiodo, el cual producirá una cierta corriente cuando sea excitado por la luz, está corriente llega al sistema de adquisición de datos donde se da la representación gráfica de señales eléctricas. El 1% restante se dirige a un analizador óptico de espectros OSA (por sus siglas en inglés Optical Spectrum Analyzer, modelo OSA, AQ6370C, Yokogawa, Musashino-shi, Tokyo, Japan) con una resolución de 0.02 nm, allí se guardarán los cambios en la densidad espectral es decir el espectro de interferencia reflejada del FPI.



**IMAGEN 1: a) Esquema Montaje Experimental; b) Cavidad Fabry Perot del sensor.**

El sensor fabricado se basa en la interacción de la luz emitida por un láser y la proporción de esta luz que es reflejada por el sistema multicapa, este está conformado por una fibra óptica monomodo con un índice de refracción  $n_0 = 1.5$ , una capa de aire con  $n_a = 1$ , silicio  $n_j = 3.4$ , para ajustar la fibra se utilizó un microtubo de vidrio, el cual es pegado a esta con un pegamento instantáneo. La proporción de luz que es reflejada por la estructura de películas delgadas variará con la temperatura (Imagen 2). Teniendo en cuenta que el FPI de manera general se ve como un sistema multicapa, el patrón de franjas de reflectividad FPI final se puede calcular utilizando el método de la matriz característica, la cual toma en cuenta todas las reflexiones que ocurren en cada interfaz del FPI, lo que nos permite simular con mayor precisión el espectro de reflectividad. La matriz característica de todo el medio se puede expresar como [6]:

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} a & ib \\ ic & d \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $M_j$  es la matriz característica de la  $j$ -ésima placa, que para un haz no polarizado está dada por [7]:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{2\pi n_j d_j \cos \theta_j}{\lambda}\right) & -\frac{i}{n_j} \sin\left(\frac{2\pi n_j d_j \cos \theta_j}{\lambda}\right) \\ -in_j \sin\left(\frac{2\pi n_j d_j \cos \theta_j}{\lambda}\right) & \cos\left(\frac{2\pi n_j d_j \cos \theta_j}{\lambda}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Donde  $d_j$ ,  $n_j$  y  $\theta_j$  son el índice de refracción, el espesor y el ángulo incidente de la  $j$ -ésima placa, respectivamente, y  $\lambda$  es la longitud de onda. La reflectividad de esta estructura se puede obtener utilizando la siguiente definición [7]:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & ib \\ ic & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

De modo tal que el coeficiente de reflexión viene dado por:  $r = \left( \frac{n_o B - C}{n_o B + C} \right)$

$$R_{FP}(\lambda, n_e) = r r^* \left( \frac{n_o B - C}{n_o B + C} \right) \left( \frac{n_o B - C}{n_o B + C} \right)^* \quad (4)$$

Siendo  $n_o$  el índice de refracción de la fibra. Finalmente, el medio de salida  $n_e$  dependerá del material que rodea la estructura, en nuestro caso fue aire  $n_e = 1$ . Los espectros de reflectividad simulados del FPI para diferentes temperaturas se muestran en la Imagen 3.

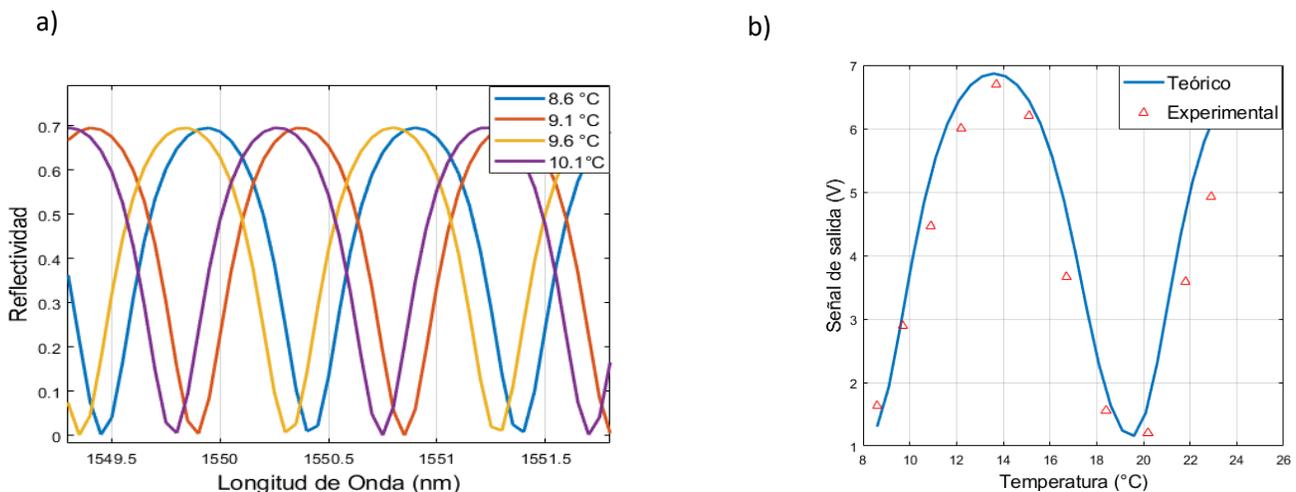
A partir del perfil espectral es posible determinar el espesor exacto de la capa delgada de silicio, donde se producen múltiples reflexiones internas. Aquí es importante recordar que el Rango Espectral Libre (FSR), que es la separación entre dos franjas consecutivas, se define como:

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2n_2 d_2} \quad (5)$$

Encontrando que para nuestro sistema  $FSR = 0.96$  nm entonces el espesor del silicio  $d_j = 368.143$   $\mu\text{m}$ .

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En base a la metodología implementada en este trabajo se reportan inicialmente los resultados obtenidos para el espectro de reflectividad del sistema, considerando variaciones de temperatura desde 8.6 °C hasta 23.2 °C con intervalos de 0.5 °C para los valores simulados, se evidencia un corrimiento en función de la longitud de onda de casi un rango espectral libre, lo cual demuestra que a medida que calentamos la estructura y particularmente la oblea de silicio, las propiedades ópticas cambian y por tanto su respuesta, hecho que nos sirve para dar pie a la búsqueda de un sistema que sea capaz de detectar dichos cambios y transformarlos en una variable que podamos medir (Imagen 3a). Por otra parte, la potencia de la señal no tiene variaciones considerables en decibeles (dB).



**IMAGEN 3: a) Espectros de reflectividad del FPI simulados de una oblea de silicio de 368,143  $\mu\text{m}$  a diferentes temperaturas; b) Comportamiento de la señal de salida del fotodetector en función de la temperatura.**

Con el arreglo experimental se toma el haz de luz, producto de la reflectividad de la cavidad para convertirla en una señal eléctrica usando el fotodiodo. En esta disposición, la energía que llega al detector de medición se describe directamente mediante la reflectancia FPI óptica integrada [8]. De esta manera los cambios de

temperatura se pueden ver ahora en función del voltaje (Imagen 3b), en esta se puede apreciar un comportamiento que describe una función polinomial periódica. Contrastando los valores teóricos y los experimentales se observan pequeñas variaciones, los valores experimentales están por debajo de los valores teóricos, lo cual se puede deber a pérdidas en el sistema.

En la imagen 4, se presentan los resultados de la sensibilidad de nuestro sensor para distintos rangos de observación, el primero comprendido entre 8.6°C y 13.8°C, el segundo entre 15.1°C y 20.2°C, finalmente el último rango entre 18.3°C y 23.2°C encontrando para cada valor de temperatura una respuesta de sensibilidad del sensor. La sensibilidad viene dada por la variación de la salida producida por una variación de entrada. Cuanto mayor sea mejor. De modo tal que tenemos:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\Delta \text{Temperatura}}{\Delta \text{Voltaje}} \quad (6)$$

En términos generales, la respuesta esperada del sensor se describirá como se muestra en la Imagen 4. Sin embargo, este tipo de sensor puede ser sensible a errores ocasionados por diferentes factores como son la inestabilidad en la posición de la línea láser, inestabilidad de la fuente de energía y envejecimiento de la fuente y detector [8]. El sensor es óptimo para valores entre 9.5°C y 12°C, en esos valores de temperatura es donde es más sensible a cambios en el entorno. También es sensible, aunque en un margen inferior para temperaturas entre 22°C y 24°C. Para temperaturas donde no se recomienda ser usado es entre 14°C y 21°C pues no es susceptible a los cambios.

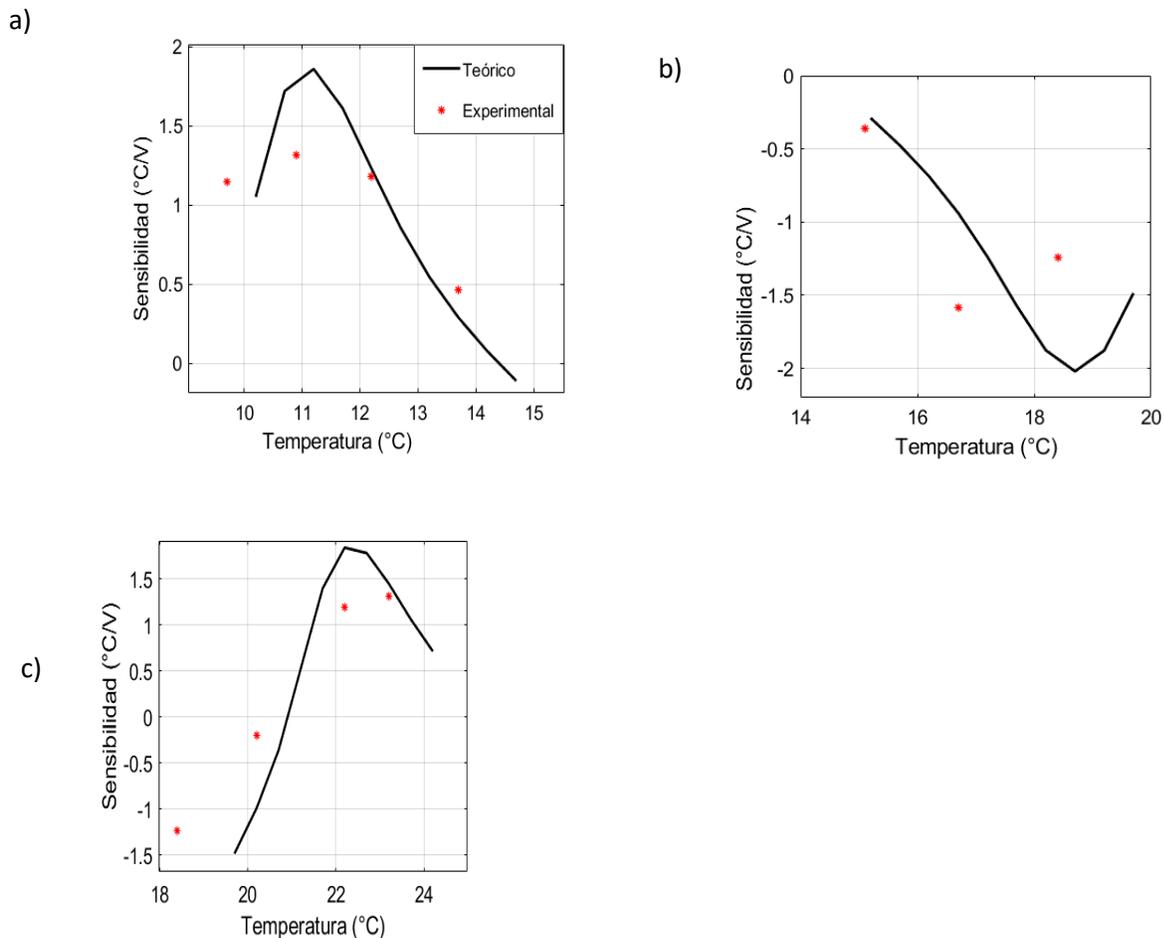


IMAGEN 4: a) Sensibilidad del sensor a temperaturas superiores a 8,6°C, e inferiores a 15°C; b) inferiores a 20°C. c) Inferiores a 24°C.

La Sensibilidad teórica máxima obtenida para nuestro sistema es de  $2.0577^{\circ}\text{C}/\text{V}$  mientras que la sensibilidad experimental fue de  $1.3167^{\circ}\text{C}/\text{V}$ , lo cual evidencia pérdidas en nuestro arreglo experimental, sobre el cual se pueden hacer arreglos para trabajos posteriores. Tomando el rango de  $8.6^{\circ}\text{C}$  a  $13.8^{\circ}\text{C}$  se ajusta a una ecuación de Polinomial y con esto se puede calcular que el sensor tiene una resolución de  $0.0003^{\circ}\text{C}$ .

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó análisis y caracterización de un sensor de temperatura óptico, basado en una cavidad FPI, considerándola como un sistema multicapa y, por lo tanto, su respuesta espectral se modeló mediante el método de matriz de transferencia. Además, se demostró que, en este FPI, se producen múltiples reflexiones internas generando un patrón de franjas FPI, que es sensible a los cambios de temperatura. El sensor de temperatura óptico presenta distintos valores de sensibilidad para cada temperatura, evidenciando una alta sensibilidad para temperaturas cercanas a  $10.9^{\circ}\text{C}$  con una sensibilidad de  $1.3167^{\circ}\text{C}/\text{V}$ . Nuestro sensor además tiene un rango dinámico corto, pero una buena resolución siendo capaz de detectar variaciones de hasta  $0.0003^{\circ}\text{C}$ . Los resultados de simulación proporcionados concuerdan muy bien con los resultados obtenidos experimentalmente.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el producto de la dedicación, esfuerzo y compromiso de varias partes que a su modo contribuyeron para llevarla a feliz término, de modo tal que debo mi mayor gratitud a mi familia por su apoyo incondicional.

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por haberme concedido la confianza y haberme formado académicamente en la Licenciatura en Física.

Allí mismo en la Universidad Distrital agradezco al Profesor Cesar Aurelio Herreño quien fue el precursor de la iniciativa de realizar una estancia y trabajar en investigación científica.

Finalmente, a la Universidad de Guanajuato, muchas gracias por hacer amena mi estancia en México.

## REFERENCIAS

- [1] Kumar, K, Madhav, V. (2010). Review on developments in fiber optical sensors and applications. Scientific & Academic Publishing Volumen (1). doi: 10.5923/j.ijme.20110101.01.
- [2] Hecht F. (2015) Understanding Lasers: An Entry-Level Guide. Piscataway. IEEE Press Editorial Board.
- [3] Fernández B. R. (2016). Estudio experimental de estructuras láser de fibra óptica con anillo óptico. Universidad Pública de Navarra.
- [4] Grattan K. T.V, Meggitt B.T. (1995). Optical fiber sensor technology fundamentals. Springer; 2000 edition (March 9, 2013).
- [5] Navarro F. (2014) Structural Health Monitoring of Bridges with Fiber Bragg Grating Sensor. Tecnología en Marcha, 4 Vol. 27, N.º 4.
- [6] Born, M.; Wolf, E. (1970) Principles of Optics; Pergamon Press: Oxford, UK.
- [7] Macleod, H.A. (2001). Thin-Films Optical Filters; Institute of Physics Publishing: Bristol, UK.
- [8] Vargas E, Guzman A.D. Analytical Modelling of a Refractive Index Sensor Based on an Intrinsic Micro Fabry-Perot Interferometer, Sensors 2015, 15, 26128-26142; doi:10.3390/s151026128.