VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Development of fiber optic sensors characterized in the time domain

Desarrollo de sensores de fibra óptica caracterizados en el dominio temporal

Andrés Vasquez Mendoza[1], Everardo Herrera-Ramirez[1], Stephanie G. Hernández-García [1] Julián M. Estudillo-Ayala[1]

[1] División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3.5+1.8 Km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., 36885, México a.vasquezmendoza@ugto.mx, eherreraramirez@ugto.mx, sg.hernandezgarcia@ugto.mx, julian@ugto.mx,

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo y la evaluación de un sensor acústico de fibra óptica de bajo costo basado en una estructura interferométrica integrada por fibra monomodo, fibra de núcleo hueco y fibra monomodo (SMF–COF–SMF), la cual fue encapsulada en una solución de alcohol 50/50 para optimizar el acoplamiento mecánico y la sensibilidad ante perturbaciones externas. Empleando un micro-chip láser pulsado a una longitud de onda de 1064 nm como fuente de alimentación.

Se demostró la capacidad del dispositivo para detectar de manera eficiente las variaciones de presión inducidas por ondas sonoras a través de la modulación de la señal óptica de salida. Los resultados experimentales confirman que la combinación de la cavidad COF con el medio líquido encapsulante potencia la respuesta elasto-óptica del sistema, posicionando a esta arquitectura como una alternativa viable, altamente sensible y económicamente competitiva para aplicaciones de monitoreo acústico estructural, ambiental e industrial en entornos de alta exigencia.

Palabras clave: Dominio temporal, detección acústica, fibra óptica

Introducción

Históricamente, la detección de ondas acústicas ha dependido de transductores piezoeléctricos. Sin embargo, estos dispositivos presentan limitaciones en escenarios de alta exigencia, tales como un ancho de banda restringido debido a sus frecuencias de resonancia fijas, susceptibilidad a interferencias electromagnéticas (EMI) y una pérdida significativa de sensibilidad al intentar miniaturizarlos. Como respuesta a estas limitantes, las técnicas de detección totalmente ópticas han emergido como una alternativa superior. Al emplear la luz como medio de interrogación, los sensores ópticos ofrecen una respuesta en frecuencia de banda ancha, un límite de detección de presión excepcionalmente bajo y una inmunidad total al ruido electromagnético, lo que los hace idóneos para caracterizar señales acústicas de alta fidelidad (Wissmeyer et al., 2018).

En el estado del arte de la detección acústica mediante fibra óptica, se han desarrollado diversas topologías para capturar ondas sonoras, dentro de las cuales destacan las redes de difracción de Bragg (FBG), los interferómetros de Fabry-Perot extrínsecos (EFPI) y los esquemas interferométricos tipo Mach-Zehnder o multimodo (Chow et al., 2008). Físicamente, el mecanismo de transducción de estos dispositivos se basa en cómo las ondas sonoras —que se propagan como variaciones longitudinales de presión mecánica— interactúan con el material óptico y su medio circundante. Cuando una onda acústica incide sobre la fibra, induce microdeformaciones geométricas (cambios longitudinales y compresión diametral) y altera de manera dinámica el índice de refracción del material y del entorno inmediato a través del efecto elasto-óptico o fotoelástico (Yariv & Yeh, 2007). Estas variaciones periódicas de presión transforman la perturbación acústica en una modulación proporcional medible de la fase, longitud de onda o intensidad del haz de luz que viaja por el sistema.

A pesar de que arquitecturas recientes, como los interferómetros Fabry-Perot basados en diafragmas ultradelgados, exhiben altas sensibilidades ante ondas sonoras, suelen requerir procesos de fabricación sumamente complejos, frágiles y de alto costo, tales como la deposición de películas metálicas de oro a

nanoescala y grabados químicos invasivos (Hong et al., 2024). Por esta razón, en el presente trabajo se seleccionó e implementó una estructura interferométrica basada en una fibra sin núcleo (SMF–COF–SMF) encapsulada e infiltrada con fluido, la cual destaca por su alta repetibilidad, robustez y bajo costo de manufactura. En una fibra monomodo convencional, la luz viaja confinada fuertemente en el núcleo, lo que limita su interacción directa con vibraciones externas leves; sin embargo, al propagarse hacia la región sin núcleo (COF), el campo óptico se expande y excita múltiples modos de propagación de orden superior que viajan expuestos directamente al entorno como un campo evanescente.

La decisión de encapsular esta zona activa en un tubo capilar e infiltrarla con un fluido (como alcohol al 50%) constituye la ventaja primordial de nuestro diseño: el medio líquido actúa como un elemento transductor acústico altamente compresible que recibe las ondas sonoras del exterior, las amplifica y transmite esa presión directamente hacia la superficie de la fibra desnuda. Esto modifica drásticamente las condiciones del índice de refracción y el camino óptico de los modos acoplados. Al reinyectarse en la fibra monomodo de salida, se genera un patrón de interferencia sumamente sensible a perturbaciones acústicas, logrando un dispositivo capaz de caracterizar el espectro audible con alta fidelidad sin necesidad de recurrir a membranas metálicas ni cuartos limpios.

Desarrollo

A diferencia de los procesos de recubrimiento metálico de alto costo (Hong et al., 2024), el sensor se fabricó aprovechando las herramientas convencionales de un laboratorio de fotónica mediante el empalme en serie de tres secciones de fibra unidas por el método de fusión térmica por arco eléctrico utilizando una empalmadora comercial

El dispositivo de detección propuesto se fabricó mediante una estructura interferométrica compuesta por una sección de fibra óptica monomodo sin núcleo (COF, por sus siglas en inglés, **Coreless Optical Fiber**) empalmada entre dos segmentos de fibra monomodo estándar (SMF–COF–SMF), donde la sección central actúa como la región activa de detección. Con el propósito de optimizar la interacción entre las ondas acústicas incidentes y la estructura óptica, el dispositivo fue encapsulado en una solución acuosa de alcohol al 50%. Este medio líquido actúa como un acoplador acústico eficiente que facilita la transferencia de energía mecánica hacia el elemento sensor, incrementando significativamente la sensibilidad del sistema ante perturbaciones sonoras.

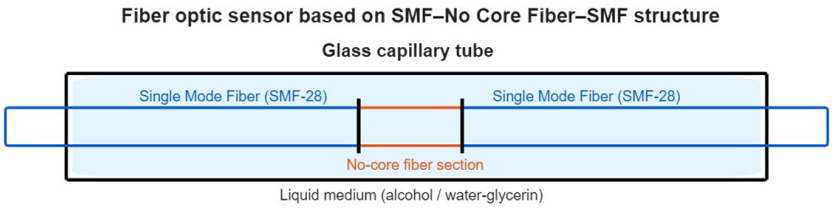


Figura 1. Esquema del sensor óptico basado en empalmes SMF-fibra sin núcleo-SMF encapsulados en un capilar

El esquema óptico empleado consistió en una fuente láser pulsada que opera a una longitud de onda central de 1064 nm. La señal emitida se propagó inicialmente a través de un carrete de 1 km de fibra monomodo estándar (SMF-28), seguido de un segmento de fibra de alta no linealidad (HNLF-ZS). Antes de ingresar a la estructura de detección, la señal óptica se hizo pasar por un controlador de polarización compuesto por placas de retardo de **λ**/2, **λ**/4 y **λ**/2 (PC), lo que permitió manipular con precisión el estado de polarización de la luz y maximizar la visibilidad de las franjas en la respuesta interferométrica. Cabe resaltar que la excitación acústica se realizó mediante una bocina colocada a una distancia de 1cm.

Finalmente, la señal óptica transmitida a través del sensor fue capturada, monitoreada y registrada mediante un sistema de adquisición de datos para su posterior análisis espectral y temporal.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

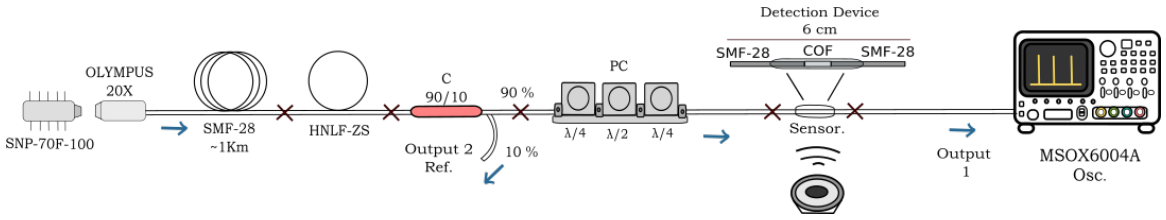


Figura 2. Arreglo experimental utilizado para la caracterización del sensor acústico.

Dispositivo

Para evaluar el impacto de las propiedades del medio de acoplamiento en la sensibilidad acústica, se fabricaron dos dispositivos con la misma geometría interferométrica, variando únicamente el fluido infiltrado en el interior del contenedor.

El proceso de manufactura se realizó mediante el método de empalme por fusión térmica asistido por arco eléctrico. Se unió secuencialmente un segmento de fibra monomodo estándar (SMF-28), un fragmento de fibra sin núcleo (COF) con una longitud axial de 2 mm —que define la región activa de detección—, y finalmente otro segmento de SMF-28. La región del empalme se introdujo dentro de un tubo capilar de vidrio de 7 cm de longitud, asegurando que la zona activa quedara localizada en el centro geométrico del capilar.

Una vez centrada la estructura, se procedió a la infiltración de los fluidos de prueba para cada espécimen:

- **Dispositivo 1:** Solución de alcohol al 50% v/v.
- **Dispositivo 2:** Mezcla de agua y glicerina en una proporción volumétrica de 50/50.

Finalmente, ambos extremos de los tubos capilares fueron sellados herméticamente con un pegamento epóxico de alta resistencia, garantizando el confinamiento del fluido y evitando la evaporación o fugas durante las pruebas.

Los dispositivos fueron sometidos a un protocolo de caracterización dinámica mediante señales acústicas controladas a diferentes frecuencias. La señal óptica transmitida a través de la red interferométrica se registró en tiempo real y se analizó para cuantificar las variaciones de amplitud y visibilidad de las franjas en función de la excitación aplicada.

Los resultados mostrados y analizados en este trabajo corresponden específicamente al desempeño obtenido por el Dispositivo de detección 1 **(infiltrado con la solución de alcohol al 50%)**, el cual demostró cambios al aplicarle diferentes frecuencias.

Resultados

Se obtuvieron gráficas del comportamiento del sensor midiendo la variación del ancho del pulso (en nanosegundos) en función de la variación de frecuencia acústica aplicada.

El análisis comparativo evidenció que ambos sensores presentan una respuesta de modulación altamente diferenciada dependiendo del fluido infiltrado:

Sensor con Alcohol: Demostró picos de alta sensibilidad en bandas de frecuencia específicas, con un comportamiento dinámico ágil atribuido a la menor densidad y menor viscosidad del alcohol, lo que permite una transmisión acústica rápida hacia el campo evanescente.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

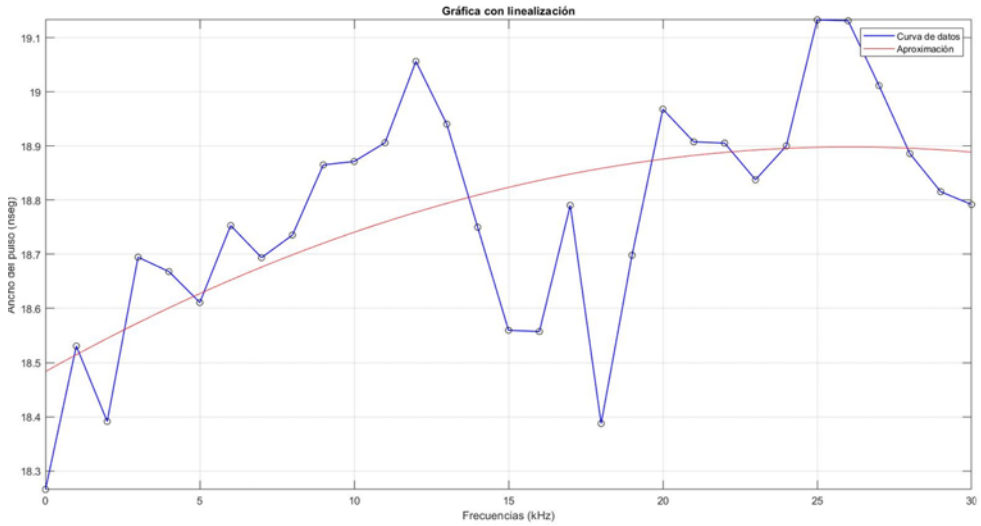


Figura 3. Respuesta del sensor infiltrado con alcohol ante excitación acústica.

Sensor con Agua-Glicerina 50/50: Exhibió una curva de respuesta con una tendencia de linealización superior (curva de aproximación roja), donde la mayor viscosidad y densidad de la mezcla glicerinada amortigua las fluctuaciones abruptas y genera un incremento progresivo y estable en el ancho del pulso a medida que aumenta la frecuencia ultrasónica y acústica.

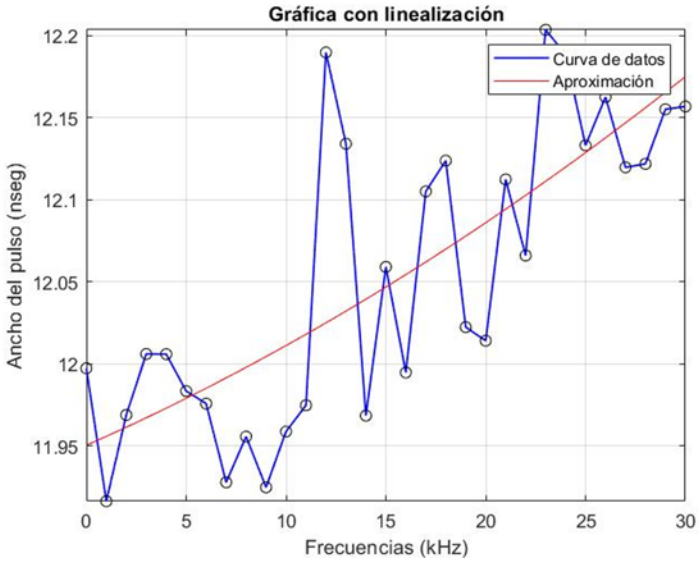


Figura 4. Respuesta del sensor infiltrado con agua-glicerina 50/50.

La diferencia en la respuesta de los sensores puede atribuirse directamente a la variación en el índice de refracción y en las propiedades elasto-mecánicas de los fluidos (densidad y compresibilidad), lo cual influye de manera decisiva en la sensibilidad del sistema ante las perturbaciones acústicas.

El uso del capilar de vidrio resultó fundamental para mejorar la eficiencia del dispositivo, ya que permitió confinar físicamente el líquido y maximizar la interacción entre el campo evanescente de la fibra de 2 mm sin núcleo y el medio externo, incrementando la magnitud de la respuesta del sensor sin requerir diafragmas metálicos ni procesos químicos complejos.

Conclusiones

Se logró diseñar, fabricar y caracterizar exitosamente un sensor acústico funcional y de bajo costo basado en empalmes de fibra óptica con una región sin núcleo (SMF-NCF-SMF). Los resultados experimentales confirman una clara dependencia de la señal óptica (medida a través de las variaciones en el ancho del pulso) tanto con la frecuencia acústica aplicada como con el tipo de fluido utilizado para infiltrar el interior del capilar protector.

Trabajos a futuro

Para continuar con el trabajo de este sensor, se piensan las siguientes actividades para mejorarlo y buscar darle aplicaciones al dispositivo:

1. Caracterizar el comportamiento del sensor utilizando una gama más amplia de mezclas fluidas con gradientes de viscosidad e índice de refracción calibrados, buscando modelar matemáticamente la respuesta de linealización.
2. Desarrollar un diseño de empaquetamiento más resistente a las perturbaciones que proteja el capilar y permita su implementación en lugares industriales.
3. Buscar compactar el tamaño del arreglo y dar aplicaciones médicas en personas con dificultad auditiva, reemplazando los dispositivos electrónicos sensibles al campo electromagnético.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Guanajuato por la organización del programa Veranos de la Ciencia y por la oportunidad de participar en el mismo. También, expresamos nuestra profunda gratitud al Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala y M. en I. Stephanie G. Hernández García por su valiosa aceptación, asesoramiento y el apoyo incondicional brindado a lo largo de las sesiones de este proyecto.

Referencias

Chow, J. H., Littler, I. C. M., Shaddock, D. A., McClelland, D. E., & Gray, M. B. (2008). Acoustic field sensing with optical fiber interferometers. IEEE Sensors Journal, 8(7), 1283–1288.

Hong, G., Chen, B., Liu, S., Chen, P., Liu, B., Xiao, H., Ding, W., Yan, W., & Wang, Y. (2024). Optical fiber acoustic sensor with gold diaphragm based Fabry-Perot interferometer. Sensors and Actuators A: Physical, 366, Artículo 114930.

Wissmeyer, G., Pleitez, M. A., Rosenthal, A., & Ntziachristos, V. (2018). Looking at sound: Optoacoustics with all-optical ultrasound detection. Light: Science & Applications, 7(1), Artículo 53

Yariv, A., & Yeh, P. (2007). Photonics: Optical electronics in modern communications (6^{a} ed) Oxford University Press)