

"Refractive Index and Temperature Detection Using a SMS Interferometer integrated in an Erbium-Doped Fiber Ring Laser"

"Detección de índice de refracción y temperatura mediante un interferómetro SMS integrado en un láser de anillo basado en fibra dopada con erbio"

S. Diaz^{1,2,S*}, Ignacio R. Matías^{1,2,S}

1. Department of Electrical, Electronic and Communications Engineering, Public University of Navarre, 31006 Pamplona, Spain

2. Institute of Smart Cities, Public University of Navarre, 31006 Pamplona, Spain

(*) E-mail: sylvia.diaz@unavarra.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Received: 23/05/2025

Accepted: 29/10/2025

DOI: 10.7149/OPA.58.4.51217

ABSTRACT:

In this work, a dual parameter sensing of refractive index and temperature sensor based on an interferometric design integrating single-mode fiber (SMF), no-core multimode fiber (NCF), and single-mode fiber (SMF) was developed and experimentally validated. The SMS structure was used as a filter and incorporated into an erbium-doped fiber ring laser to enhance the sensor's detection accuracy. Experimental results demonstrate that the sensor exhibits an excellent linear response in the refractive index detection, with a sensitivity of 96.639 nm/RIU over a measurement range from 1.346 to 1.406 and remarkable temperature sensitivity.

Key words: Optical sensors, fiber ring lasers, multimode fiber, refractive index (RI) sensitivity, single-mode fiber (SMF).

RESUMEN:

En este trabajo se desarrolló y validó experimentalmente un sensor dual de índice de refracción y de temperatura basado en un diseño interferométrico que integra fibra monomodo (SMF), fibra multimodo sin núcleo (NCF) y nuevamente fibra monomodo (SMF). La estructura SMS se utilizó como filtro y se incorporó en un láser en anillo de fibra dopada con erbio para mejorar la precisión de detección del sensor. Los resultados experimentales muestran que el sensor presenta una excelente respuesta lineal en la detección del índice de refracción, con una sensibilidad de 96.639 nm/RIU en un rango de medición de 1.346 a 1.406, además de una notable sensibilidad con la temperatura.

Palabras clave: Sensores ópticos, láseres de anillo de fibra, fibra multimodo, sensibilidad del índice de refracción (RI), fibra monomodo (SMF).

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] S. Zhang, X. Dong, T. Li, et al, "Simultaneous measurement of relative humidity and temperature with PCF-MZI cascaded by fiber Bragg grating," Optics Communications **303**, 42-45 (2013).
- [2] M. Y. M. Noor, N. Khalili, I. Skinner, et al, "Optical humidity sensor based on air guided photonic crystal fiber," Photonic Sensors **2**, 277-282 (2012).
- [3] L. H. Chen, T. Li, C. C. Chan, et al, "Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor," Sensors and Actuators B: Chemical **169**, 167-172 (2012).
- [4] J. L. Santos, and F. Farahi, "Handbook of Optical Sensors," CRC Press (2015).



- [5] D. A. Krohn, T. MacDougall, A. Mendez, "Fiber optic sensors: fundamentals and applications," 4th ed., SPIE Press, Bellingham, WA (2015).
- [6] A. B. Socorro, I. Del Villar, J. M. Corres, F. J. Arregui, I. R. Matias, "Mode transition in complex refractive index coated single-mode-multimode-single-mode structure," *Optics Express* **21**, 12668-12682 (2013).
- [7] S. Diaz, M. A. Armendáriz and I. R. Matías, "Single-mode-Multimode-Single-mode fiber (SMS): Exploring Environmental Sensing Capabilities," *IEEE Sensors Lett.* **8**, 1-4 (2024).
- [8] S. Diaz and I. R. Matías, "Refractive Index Sensor Using a SMS Fiber in an Erbium-Doped Fiber Ring Laser," in *IEEE Sensors Letters*, **9**, 1-4 (2025).
- [9] I. Del Villar, A. B. Socorro, J. M. Corres, F. J. Arregui, I. R. Matias, "Optimization of Sensors Based on Multimode Interference in Single-Mode-Multimode-Single-Mode Structure," in *Journal of Lightwave Technol.*, **31**, 3460-3467 (2013).
- [10] Q. Wu, Y. Semenova, P. Wang, and G. Farrell, "High sensitivity SMS fiber structure based refractometer—Analysis and experiment," in *Opt. Exp.*, **19**, 7937–7944 (2011).
- [11] S. Silva, E. G. P. Pachon, M. A. R. Franco, J. G. Hayashi, F. X. Malcata, O. Frazão, P. Jorge, and C. M. B. Cordeiro, "Ultrahigh-sensitivity temperature fiber sensor based on multimode interference," *Appl. Opt.* **51**, 3236–3242 (2012).
- [12] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *J. Lightwave Technol.* **13**, 615–627 (1995).
- [13] O. Fuentes, I. Del Villar, J. R. Vento, A. B. Socorro, E. E. Gallego, J. M. Corres, I. R. Matías, "Increasing the sensitivity of an optic level sensor with a wavelength and phase sensitive single-mode multimode single-mode (SMS) fiber structure," *IEEE Sensors Journal* **17**, 5515-5522 (2017).
- [14] Z. W. Yin, L. A. Gao, S. C. Liu, L. A. Zhang, F. X. Wu, L. Chen, X. F. Chen, "Fiber ring laser sensor for temperature measurement," *IEEE J. Lightwave Technol.* **28**, 3403–3408 (2010).
- [15] J. Shi, Y. Y. Wang, D. G. Xu, H. W. Zhang, G. H. Su, et al. "Temperature sensor based on fiber ring laser with Sagnac loop," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28**, 794–797 (2016).
- [16] C. Li, T. G. Ning, J. Li, C. Zhang, C. B. Zhang, H. Lin, L. Pei, "Fiber-optic laser sensor based on all-fiber multipath Mach-Zehnder interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28**, 1908–1911 (2016).
- [17] J. X. Liu, M. Wang, X. Liang, Y. Dong, H. Xiao, S. S. Jian, "Erbium-doped fiber ring laser based on few-mode-singlemode-few-mode fiber structure for refractive index measurement," *Opt. Laser Technol.* **93**, 74–78 (2017).
- [18] H. Xiong, B. Xu, D. N. Wang, "Temperature insensitive optical fiber laser bend sensor with a low detection limit," *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27**, 2599–2602 (2015).
- [19] Z. Kang, J. Sun, Y. Bai, S. Jian (2015), "Twin-core fiber-based erbium-doped fiber laser sensor for decoupling measurement of temperature and strain," *IEEE Sensor J.* **15**, 6828–6832 (2015).
- [20] M. Han, F. W. Guo, Y. F. Lu, "Optical fiber refractometer based on cladding mode Bragg grating," *Optics Lett.* **35**, 399–401 (2010).
- [21] H. J. Patrick, A. D. Kersey, F. Bucholtz, "Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction," *IEEE Journal of Lightwave Technol.* **16**, 1606–1612 (1998).
- [22] M. N. Ng, Z. H. Chen, K. S. Chiang, "Temperature compensation of long-period fiber grating for refractive-index sensing with bending effect," *IEEE Photonics Technology Lett.* **14**, 361–362, (2002).
- [23] M. Deng, C. P. Tang, T. Zhu, L. C. Xu, M. Han, "Refractive index measurement using photonic crystal fiber based Fabry Perot interferometer", *Applied Optics*, **49**, 1593–1598 (2010)
- [24] Z. Tian, S. S. H. Yam, H. P. Loock, "Refractive index sensor based on an abrupt taper Michelson interferometer in a single-mode fiber," *Optics Lett.* **33**, 1105–1107 (2008).
- [25] W. W. Qian, C. C. Chan, C. L. Zhao, Y. Liu, T. Li, L. Hu, M. K. Ni, X. Y. Dong (2012), "Photonic crystal fiber refractive index sensor based on a fiber Bragg grating demodulation," *Sensors and Actuators B*, **166**, 761-765 (2012).



1. Introducción

Los sensores de fibra óptica han encontrado aplicaciones extensas en la tecnología de sensores ópticos, especialmente para medir parámetros como temperatura, deformación, índice de refracción (RI) y humedad. En los últimos años, se han introducido diversas configuraciones de interferómetros completamente de fibra, incluyendo diseños basados en fibras de cristal fotónico (PCF) [1-2] y fibras de núcleo hueco [3]. Muchos de estos sensores se centran en medir un único parámetro.

Los mecanismos de detección en fibra óptica, como el índice de refracción (RI), la fluorescencia y la absorción, se utilizan ampliamente para detectar diversas propiedades físicas, químicas y biomédicas. A lo largo del tiempo, se han diseñado y fabricado numerosos sensores ópticos de fibra, tales como interferómetros Fabry-Perot (FPI), interferómetros multimodo (MMI), redes de difracción Bragg (FBG), interferómetros Mach-Zehnder (MZI), fibras de cristal fotónico (PCF) y rejillas de periodo largo (LPG). Para alterar la propagación de la luz dentro de la fibra, se han desarrollado técnicas como el estrechamiento, grabado químico, curvado y pulido lateral [4-5]. Una de las aproximaciones para crear un sensor MMI consiste en colocar una fibra multimodo (MMF) entre dos fibras monomodo (SMF), formando una estructura SMS de monomodo-multimodo-monomodo (SMS) [6-12]. O. Fuentes et al. fabricaron y analizaron un sensor SMS para detectar cambios en el nivel de líquido [13]. Al comparar este diseño con una estructura SMS grabada, lograron una mejora de 2,77 veces en la sensibilidad. El sensor grabado tenía un diámetro de 50 μm .

El avance de los láseres de fibra se ha vuelto cada vez más importante en campos como las telecomunicaciones y la metrología óptica, principalmente debido a su alta estabilidad, eficiencia y adecuación para operar dentro del espectro de comunicación óptica. En este contexto, los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) son especialmente atractivos. Las innovaciones recientes en el diseño de cavidades láser, especialmente aquellas que involucren configuraciones en anillo con estructuras interferométricas sofisticadas, presentan oportunidades prometedoras para mejorar aún más el rendimiento de los láseres de fibra.

En los últimos años, los sensores basados en interferómetros han ganado atención debido a su bajo costo, diseño sencillo y sensibilidad moderada. Sin embargo, la presencia de múltiples modos de interferencia dentro del interferómetro lleva a un espectro de salida amplio y desordenado, lo que dificulta la identificación de los picos resonantes. Para abordar este problema, se han utilizado cada vez más láseres de fibra para obtener los espectros de salida de los interferómetros, permitiendo la medición de parámetros como temperatura [14,15], índice de refracción [16,17], curvatura [18] y deformación [19].

El índice de refracción (RI) es crucial en los campos químico, físico y biológico. Se han desarrollado diversos sensores de índice de refracción basados en redes de difracción Bragg (FBG) [20], rejillas de fibra de periodo largo (LPG) [21,22] e interferómetros [23-25]. Sin embargo, los procesos de fabricación de FBG y LPG son conocidos por su complejidad. Si bien los interferómetros ofrecen alta sensibilidad, requieren técnicas de fabricación especializadas y suelen tener una resolución pobre al medir desplazamientos espectrales, lo que dificulta la detección de picos o valles de interferencia específicos.

En este trabajo, se ha implementado experimentalmente un sistema de láser de anillo de fibra basado en una estructura de fibra SMS para investigar sus características de detección del índice de refracción y de la temperatura. En esta configuración, la fibra sin núcleo no solo actúa como sensor, sino también como filtro de banda pasante del láser. Cuando la temperatura o el índice de refracción varían, la banda pasante del filtro se modifica, lo que provoca un cambio en la longitud de onda de emisión del láser. Por lo tanto, al monitorizar la variación de la longitud de onda de emisión mediante un analizador de espectros óptico (OSA), se puede demodular la información del índice de refracción y de la temperatura.

2. Configuración experimental

La configuración interferométrica propuesta en la Fig. 1 integra tres tipos de fibras ópticas: fibra monomodo (SMF), fibra multimodo sin núcleo (NCF) y otro segmento de fibra monomodo (SMF). Esta estructura genera un efecto de interferencia que mejora la selectividad en longitud de onda y la estabilidad del láser.

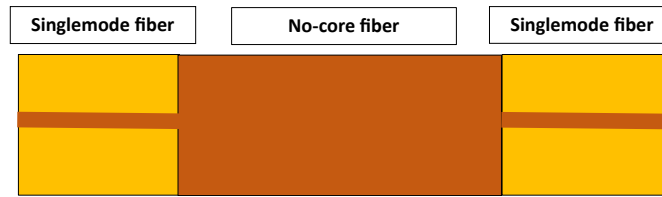


Fig. 1. Configuración de la SMS.

A diferencia de las fibras multimodo, las fibras SMS permiten la propagación de un solo modo, lo que minimiza la dispersión de la señal. Esta característica las hace ideales para la transmisión de datos a largas distancias. La configuración SMS incorpora dos fibras monomodo (SMF) idénticas empalmadas en ambos extremos de una fibra multimodo sin núcleo (NCF). Cuando la luz pasa de la SMF a la NCF, se genera una onda de propagación multimodo. Cada modo dentro de la NCF posee una constante de propagación única, lo que da lugar a una interferencia intermodal.

La propagación de la luz en una estructura SMS se basa en el acoplamiento de la luz desde la fibra SMF de entrada a varios modos en el segmento NCF, volviéndose a acoplar al modo fundamental de la SMF de salida [9-11]. La luz se propaga a través de diferentes modos en el segmento NCF y, por lo tanto, la fase de los modos es diferente en el punto donde la luz se acopla al segmento SMF de salida. Debido al fenómeno de interferencia multimodal (MMI), se obtienen bandas de transmisión y de atenuación en el espectro óptico. Particularmente, las bandas de transmisión obtenidas por el efecto de autoimagen presentan menos pérdidas [10,12] y su longitud de onda central se puede controlar como función de las dimensiones del segmento NCF, principalmente la longitud del segmento NCF y el diámetro.

En consecuencia, la selección de la longitud de la sección NCF se centra en monitorizar la evolución de la banda producida por el efecto de autoimagen. Con este fin, la aplicación de la siguiente expresión analítica (1) permite obtener la longitud del segmento NCF adecuada para establecer la primera banda de autoimagen en una longitud de onda específica [10]:

$$Z_i = (4 \cdot D^2 \cdot n) / \lambda \quad (1)$$

donde D y n son el diámetro de NCF y el índice de refracción, respectivamente, y λ es la longitud de onda. En vista de la gama de longitudes de onda que se supervisa con la configuración experimental de la Fig. 2, una buena opción es fijar la banda de transmisión en la tercera ventana de comunicaciones ópticas: 1550 nm, que corresponde a la respuesta de la cavidad láser en anillo. A esta longitud de onda, el índice de refracción de la sílice es 1.444, que se puede aplicar a la variable n . Por lo tanto, la longitud del segmento NCF debe ser de 58 mm.

El interferómetro propuesto consiste en dos latiguillos de fibra óptica monomodo estándar, modelo G.652 (9 μm de diámetro de núcleo, 125 μm de diámetro de cubierta) de Telnet Fiber Optic S.L., empalmadas a un segmento central NCF de fibra, modelo NCF125 (125 μm de diámetro de cubierta) de POFC Corp.

La Fig. 2 muestra el montaje experimental del láser en anillo de fibra dopada con erbio. Todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, sin emplear métodos de aislamiento contra vibraciones ni compensación térmica. Como se muestra, un multiplexor por división en longitud de onda (WDM) que opera a 980/1550 nm inyecta una potencia de bombeo de 100 mW a 978 nm en la cavidad del anillo de fibra. Para mantener una salida láser estable, el diodo láser de bombeo se controla térmicamente. El medio de ganancia, que consiste en 2 metros de fibra dopada con erbio (EDF) de Fibercore Inc., está conectado al puerto común del WDM.

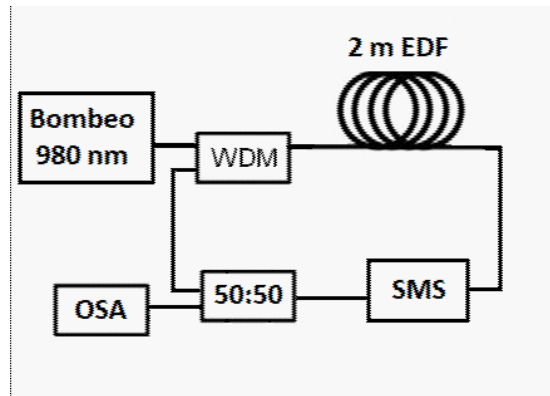


Fig. 2. Esquema del sistema interferométrico.

A continuación, la estructura SMS se implementa como sensor. La señal procedente de la SMS se acopla a un divisor del 50 %, el cual extrae la mitad de la señal de la cavidad del anillo. Esta señal extraída se dirige a un analizador de espectros óptico (OSA) conectado al puerto de salida del acoplador al 50%. Paralelamente, la señal restante se encamina nuevamente hacia el WDM, lo que permite la circulación continua de la luz dentro de la cavidad del anillo.

3. Resultados

El índice de refracción de un medio es una propiedad fundamental que influye en la velocidad de propagación de la luz. Las fibras SMS presentan una alta sensibilidad a las variaciones del índice de refracción, lo que las hace especialmente útiles para la detección de cambios en el medio circundante. Esta capacidad resulta de gran interés en aplicaciones de sensores químicos y detección de líquidos. La Tabla 1 muestra la sensibilidad cruzada del índice de refracción para diferentes soluciones.

Con respecto a la Tabla 1, el sensor se probó tanto en aire (con un índice de refracción de 1) como sumergido en agua y en varias soluciones de glicerina en agua con concentraciones del 10%, 20%, 30%, 40% y 50%, respectivamente. Estas soluciones presentan índices de refracción de 1,33; 1,346; 1,361; 1,373; 1,387 y 1,406, como se indica en la Tabla 1. El índice de refracción de cada disolución fue verificado antes de los experimentos utilizando un refractómetro digital METTLER TOLEDO, modelo 30GS, que puede medir índices de refracción entre 1.32 y 1.65, ofreciendo una resolución de 0.0001 y una exactitud de ± 0.0005 . Todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente con el fin de asegurar la estabilidad de las disoluciones y la reproducibilidad de los resultados.

Dado que la variación máxima observada entre el agua y la solución con un 50% de glicerina es de 7,5 nm, se puede afirmar que la sensibilidad cruzada al índice de refracción en el intervalo de 1,33 a 1,406 es de 96,639 nm por unidad de índice de refracción (nm/RIU).

TABLA 1. Índices de refracción y posición del pico de transmitancia para cada solución

Solución	Índice de refracción	Posición del pico de transmitancia (nm)
Aire	1	1547,5
Agua	1,33	1548
Glicerina al 10%	1,346	1549,5
Glicerina al 20%	1,361	1551
Glicerina al 30%	1,373	1552,6
Glicerina al 40%	1,387	1554
Glicerina al 50%	1,406	1555

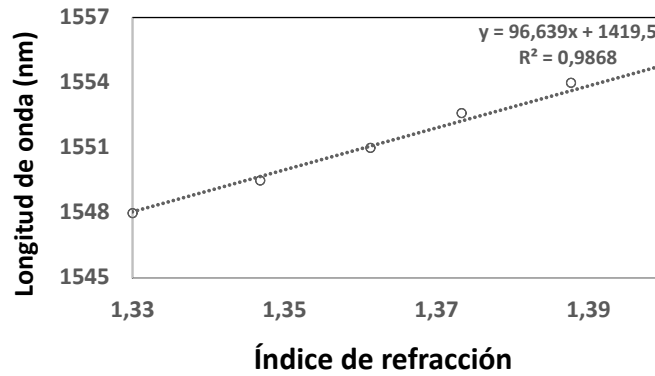


Fig. 3. Variación de la longitud de onda con respecto a cambios en el índice de refracción.

Tal como se muestra en la Fig. 3, la sensibilidad frente al índice de refracción es de 96,639 nm/RIU, con un coeficiente de correlación (R^2) de 0,9868. El ajuste se realizó para el rango de índices de refracción comprendido entre 1,33 y 1,406, representado por la línea discontinua. Se observa que el desplazamiento de la longitud de onda varía de manera directamente proporcional al índice de refracción del entorno.

La estabilidad del sensor SMS se analizó con el sensor sumergido en una solución de glicerina al 10% en agua, como se muestra en la Fig. 4. Una vez que el espectro del láser se estabilizó, se registró el desplazamiento de la longitud de onda cada 5 minutos. Durante un periodo de 30 minutos, la variación máxima observada fue inferior a 0,02 nm.

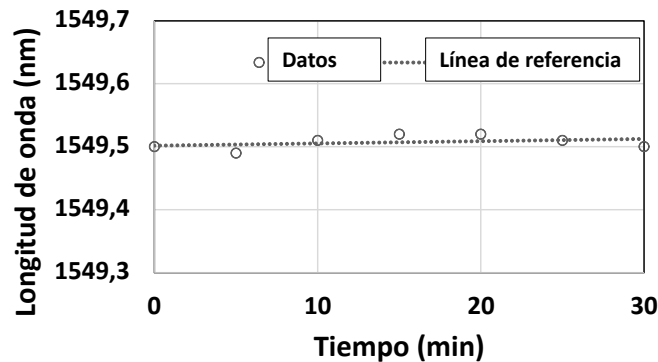


Fig. 4. Longitud de onda en función del tiempo para un sensor sumergido en una solución de glicerina al 10% en agua.

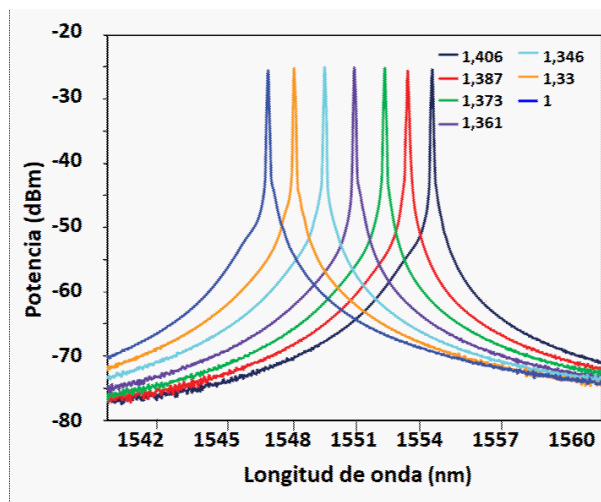


Fig. 5. Espectros de la estructura sensora con distintos valores de índice de refracción.

En la Fig. 5 se presentan los espectros de salida del láser obtenidos para diferentes índices de refracción, donde se muestra una potencia de salida aproximada de -25 dBm y una elevada relación señal-ruido (SNR) de 53 dB. Los resultados experimentales evidencian que, al aumentar el índice de refracción, se produce un desplazamiento hacia longitudes de onda mayores (movimiento al rojo) en la señal del sensor propuesto.

También se analizó el comportamiento de la estructura sensora con la temperatura. Para ello se introdujo el sensor en una cámara climática, variando la temperatura desde los 10°C a los 70°C, tal como se representa en la Fig. 6. Se puede observar su comportamiento lineal con un valor de R^2 cercano a uno y con una sensibilidad de 14 pm/°C.

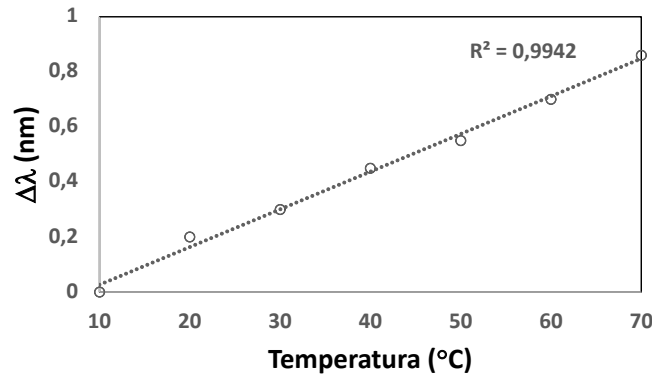


Fig. 6. Variación en longitud de onda del sensor con respecto a la temperatura.

3. Conclusiones

En conclusión, se ha desarrollado y caracterizado un sensor de índice de refracción y de detección de temperatura basado en una estructura SMS, implementado mediante un láser de anillo de fibra dopada con erbio. La inclusión del interferómetro SMS en la cavidad del láser permitió incrementar la resolución de las mediciones a través de la interrogación precisa de la configuración interferométrica. Se efectuaron ensayos experimentales destinados a validar la capacidad del sistema para detectar variaciones en el índice de refracción, mediante la inmersión del sensor en diversas soluciones acuosas de glicerina. Los resultados obtenidos evidencian que el sensor propuesto experimenta un desplazamiento al rojo de la longitud de onda conforme aumenta el índice de refracción del medio. Se determinó una sensibilidad cruzada de 96,639 nm/RIU en el intervalo de índices de refracción comprendido entre 1,33 y 1,406, lo cual pone de manifiesto su elevada sensibilidad frente a variaciones del índice de refracción. Asimismo, se demostró experimentalmente una notable estabilidad, analizando la respuesta del sensor ante cambios relativos del índice durante un periodo de 30 minutos. Es destacable la estabilidad del espectro láser obtenido, que presenta una potencia de salida aproximada de -25 dBm y una alta relación señal-ruido de 53 dB. También se demostró la sensibilidad del sensor con la temperatura, con una sensibilidad de 14 pm/°C y gran linealidad con la temperatura.

En virtud de estas ventajas, la estructura SMS interrogada por un láser de anillo de fibra dopada con erbio se presenta como una solución eficaz para la detección de variaciones en el índice de refracción del medio y de la temperatura, con aplicaciones potencialmente relevantes en el ámbito de la sensórica bioquímica y la detección de líquidos.