

Internet Electronic Journal*

Nanociencia et Moletrónica

Junio 2013, Vol.11, N°1, pp 2057-2064

Técnica de medición interferométrica espectral de la birrefringencia en fibras de cristal fotónico

E. Molina-Flores, B. A. Ramírez-Solís

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica
CA. Nanotrónica Blvd 18 Sur y Av. San Claudio, CU, Col San Manuel, CP.72000 Puebla, Méx.
emolina@ece.buap.mx

recibido: 16.03.13

revisado: 22.04.13

publicado: 31.07.13

Citation of the article;

E. Molina-Flores, B. A. Ramírez-Solís. Técnica de medición interferométrica espectral de la birrefringencia en fibras de cristal fotónico, Int. Electron J. Nanoc. Moletrón, 2013, Vol. 11, N°1, 2057-2064

Técnica de medición interferométrica espectral de la birrefringencia en fibras de cristal fotónico

E. Molina-Flores, B. A. Ramírez-Solís

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Facultad de Ciencias de la Electrónica
CA. Nanotrónica Blvd 18 Sur y Av. San Claudio, CU, Col San Manuel, CP.72000 Puebla, Méx.
emolina@ece.buap.mx

recibido: 16.03.13

revisado: 22.04.13

publicado: 31.07.13

Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón., 2013, Vol.11 , N° 1, pp 2057-2064

Resumen

Se demuestra la posibilidad de realizar la medición de la birrefringencia de fibras de cristal fotónico preservadoras de la polarización, empleando una técnica interferométrica-espectral. Las fibras de cristal fotónico preservadoras de la polarización, empleadas presentaron valores de alta birrefringencia de 5.7×10^{-4} a 6.7×10^{-4} , debido a que fueron de distinto fabricantes, pero todas funcionales en la vecindad de los 1550 nm. Un tramo L, de cada fibra birrefringente formó parte del lazo del interferómetro de Sagnac, produciendo un espectro de transmitancia dependiente de la longitud de onda para cada interferómetro de Sagnac conformado. Los datos espectrales se registraron mediante un analizador de espectro óptico de alta precisión, mismos que se consideraron para calcular los valores de birrefringencia asociados a cada ejemplar de fibra de cristal fotónico preservadora de la polarización, cuyos valores se verificaron compatibles con el rango de valores anticipados por sus fabricantes.

Palabras clave: fibra óptica, preservadora de la polarización, interferómetro, cristal fotónico.

1. Introducción

Las fibras de cristal fotónico (*photonic cristal fiber*, PCF), también conocidas como fibras ópticas micro-estructuradas, son una nueva clase de fibra óptica que ha generado un gran interés en la investigación en los últimos años [1-3]. La fibra de cristal fotónico (PCF) puede proporcionar propiedades que la fibra óptica ordinaria no puede. Estas pueden ser: operación monomodal desde los UV a los IR con grandes diámetros de campo de modal, el rendimiento altamente no lineal para la generación de súper continuo, apertura numérica (NA) valores que van desde los muy bajos hasta aproximadamente 0,9, propiedades optimizadas de dispersión, y la orientación de núcleo de aire, entre otros. Las aplicaciones de fibras de cristal fotónico incluyen la espectroscopia, la metrología, la biomedicina, las imágenes, las telecomunicaciones, el mecanizado industrial y militar, y la lista sigue creciendo ya que la tecnología se convierte en una línea principal. Las fibras de cristal fotónico se dividen generalmente en dos categorías principales: fibras de índice guiado que tienen un núcleo sólido, y las de banda prohibida fotónica o fibras de guía de aire, las que tienen elementos micro-estructurados periódicos y un núcleo de material de índice de refracción bajo (por ejemplo, núcleo hueco).

La flexibilidad en el diseño de la PCF, las distingue de las fibras convencionales, y varias PCF se han desarrollado enfocándolas para diferentes aplicaciones tales como la detección con fibra óptica [4-6]. Las fibras fotónicas preservadoras de la polarización (*polarization-maintaining*, PM-PCF), ahora son comercialmente disponibles, y poseen como principales características una alta birrefringencia y baja sensibilidad a la temperatura. Las PM-PCF implementadas en los lazos de los interferómetros de Sagnac (IS) han funcionado apropiadamente para propósitos de detección tensión mecánica, y variaciones de temperatura [7-10].

La técnica que se presenta en este trabajo es de tipo interferométrica-espectral, debido a que la PM-PCF llega a formar parte del interferómetro de Sagnac (IS) [11], de tal manera que su parámetro de birrefringencia, se involucra en la función y espectro de transmitancia del IS. Es de este espectro, que se toman los datos medidos, que en conjunto con las relaciones deducidas en el planteamiento de esta técnica, permiten la determinación de tan importante parámetro para el diseño de sensores basados en este IS. Los parámetros de resolución, exactitud y precisión en la medición de la longitud de onda, serán tan pequeños como sean los del analizador espectral óptico (*optical spectrum analyzer*, OSA) empleado: 0.1 ppm, 1 ppm, y ± 2 ppm, respectivamente (para un OSA 202 Thorlabs®).

2. Principio funcionamiento del IS con lazo PM-PCF de longitud L

En esta sección se hace una breve revisión sobre el principio de funcionamiento del interferómetro de Sagnac [12]. Como se ilustra en la Fig. 1, se compone de un acoplador (50/50:1550 nm) de fibra óptica (*single mode fiber*, SMF) 3-dB y un tramo de PM-PCF (PM-1550-01, Thorlabs®). El recuadro muestra una micrografía

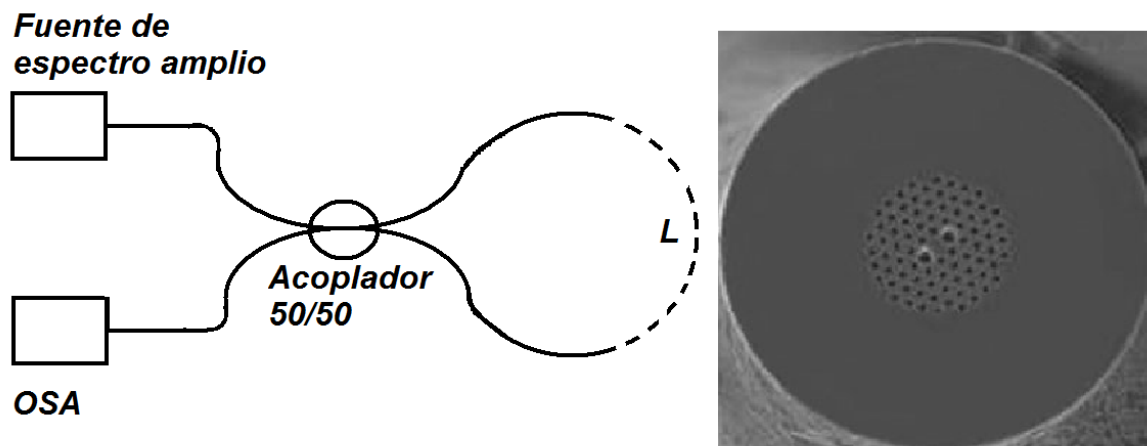


Fig. 1. Esquema básico de un IS con lazo de longitud L de PM-PCF (PM-PCF indicada con línea punteada, el recuadro muestra la sección transversal en imagen SEM).

electrónica de barrido (*scanner electronic micrography*, SEM) de la sección transversal de la PM-PCF. El PM-PCF interconecta los dos puertos de salida del acoplador. Las pérdidas por acoplamiento del empalme entre la PM-PCF y la SMF, fue de menos de 3 dB. La intensidad de la irradiación infrarroja de la fuente, se divide en partes iguales por el acoplador, en dos haces que se contrapropagan en el lazo del IS. Estos haces al pasar por el acoplador, uno de ellos se le llama haz acoplado porque experimenta un retardo en fase de $\pi/2$, con respecto al haz que mantiene su propagación en la misma fibra del acoplador. En haces en su contrapropagación, experimentan diferentes caminos ópticos debido a la birrefringencia de la PM-PCF, así los dos haces reingresan nuevamente al acoplador y produciéndose la interferencia entre este par de haces. Para averiguar la respuesta de filtro de este interferómetro, se emplea una fuente infrarroja de espectro amplio y con una distribución de intensidades plana, en la vecindad de 1550 nm. Esto provoca una salida típica del IS, un patrón de intensidades de perfil cosenoidal en el dominio de las longitudes de onda, espectro que puede ser medido con un analizador OSA. La función de transmitancia del IS se expresa a través de la Ec. (1):

$$T(\lambda) = \frac{1}{2}[1 + \cos(\delta)], \quad (1)$$

donde δ es la diferencia de fase que el tramo, L de PM-PCF, introduce a los dos haces que se contrapropagan, y además es dependiente de λ .

$$\delta = \frac{2\pi\Delta n_a L}{\lambda} \quad (2)$$

La periodicidad del espectro de salida, que es el espaciado entre dos mínimos adyacentes o dos máximos adyacentes es $\Delta\lambda = \lambda^2 / \Delta n_a L$, donde Δn_a es la birrefringencia, a temperatura ambiente (21°C), de la PM-PCF. Los cambios en la birrefringencia, debido a los parámetros ambientales, se pueden detectar mediante los corrimientos mínimos del espectro de transmitancia, empleando un OSA. Pero para los propósitos de estas mediciones la PM-PCF estará libre de cualquier estímulo externo.

3. Cálculo teórico de la birrefringencia del lazo de fibra PM-PCF del IS

Para diseñar un IS de características específicas, es preciso tener conocimiento del valor de la diferencia de índices de refracción del lazo de PM-PCF de longitud L . Esta birrefringencia generalmente es deducida de los datos aportados por el fabricante. Sin embargo, con el método que en este trabajo presentamos, ahora puede ser determinada experimentalmente. A continuación se ilustra la deducción teórica del modelo matemático que muestra la interrelación entre las siguientes variables: λ , Δn_a , y L , a temperatura constante (temperatura de laboratorio 21°C). De manera inicial, la diferencia de fase entre los ejes principales de una fibra birrefringente, se expresa en la siguiente Ec.(3):

$$\Delta\Phi = \Phi_x - \Phi_y \quad (3)$$

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y)L \quad (4)$$

Por lo que el grado de birrefringencia se describe de la diferencia, $\Delta n_a = n_x - n_y$. En la siguiente Fig. 2 se ilustra la ubicación de longitudes de onda que refieren a dos máximos adyacentes, del espectro de transmitancia cosenoidal del interferómetro de Sagnac. Para cada longitud de onda de intensidad mínima o máxima, ver la Fig.2, existirá una diferencia de fase que se cumple con Ec.(5) y Ec.(6),

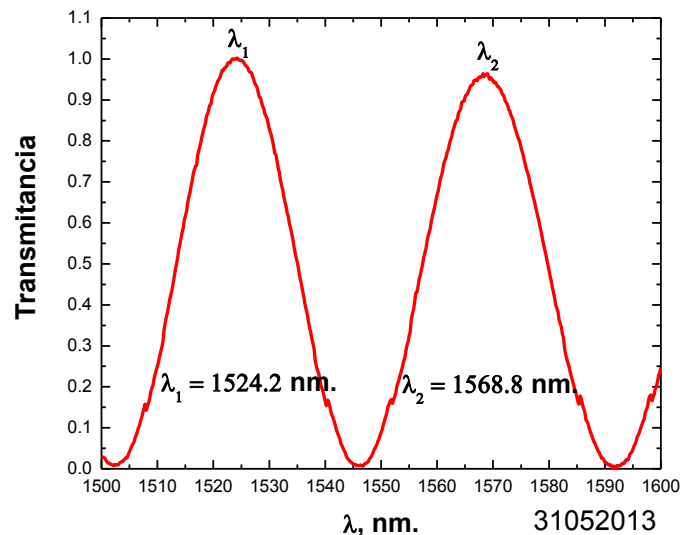


Figura 2: Ubicaciones adyacentes de los máximos para λ_1 y λ_2 , en la función de transmitancia de un IS.

$$\Delta\Phi_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} (n_x - n_y)L \quad (5)$$

$$\Delta\Phi_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} (n_x - n_y)L \quad (6)$$

Pero también, para cada intensidad mínima o máxima existirá un determinado número N de Longitudes de repetición

$$\Delta\Phi_1 = 2\pi N_0 \quad (7)$$

$$\Delta\Phi_2 = 2\pi(N_0 + 1). \quad (8)$$

Igualando las Ecs.(5) y (6) con (7) y (8), respectivamente se obtiene que:

$$\frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta n_a L = 2\pi N_0, \quad (9)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_2} \Delta n_a L = 2\pi(N_0 + 1), \quad (10)$$

con lo cual,

$$\Delta n_a = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \frac{1}{L}, \quad (11)$$

A partir de la Ec.(11), y empleando las características físicas y espectrales determinadas experimentalmente, se puede calcular el grado de birrefringencia, Δn_a , de la fibra de cristal fotónico birrefringente del lazo del Sagnac. Así mismo, se puede estimar, la separación espectral entre dos máximos consecutivos, mediante la Ec.(12):

$$\Delta\lambda = \frac{\bar{\lambda}^2}{\Delta n_a} \frac{1}{L}. \quad (12)$$

Por otro lado, para estimar la longitud de repetición de la fibra birrefringente, se puede utilizar la siguiente Ec.(13):

$$L_B = \frac{\lambda}{\Delta n_a}. \quad (13)$$

4. Determinación experimental de la birrefringencia en fibras PM-PCF

Se montaron los interferómetros de Sagnac, con sus respectivos tramos L de PM-PCF, y empleando la configuración experimental de la Fig. 1, se empleó una fuente de irradiación IR de 1400-1600 nm de envolvente plana (lámpara de Wolframio 100 W), verificándose los espectros de salida correspondientes en el OSA. De estos espectros se registraron los valores de longitud de onda para los cuales, la respectiva función de transmitancia de perfil cosenoidal, alcanzaban sus valores máximos adyacentes, λ_1 y λ_2 . Los datos físicos y espectrales de cada IS, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Características físicas y espectrales del IS

PM-PCF	λ_1, nm	λ_2, nm	L, m
1. F-SM10-PM-Newport [®]	1547.9	1556.5	0.49
2. PM-1550-01-Thorlabs [®]	1546.5	1552.6	0.63
3. LMA-PM-10-NKT Photonics [®]	1528.6	1565.2	0.10
4. F-SM15-PM-Newport	1524.2	1568.4	0.08

En la Tabla 1 se muestran cuatro columnas. De izquierda a derecha, la primera muestra el tipo de PM-PCF que conforma el lazo, las columnas 2 y 3 muestran el valor de las longitudes de onda que le corresponden a los máximos adyacentes de su respectivo espectro de transmitancia; y la columna 4 muestra la longitud L del segmento de la PM-PCF. Para calcular el valor de la birrefringencia de la PM-PCF del lazo del IS, los valores de la Tabla 1 se sustituyen en las Ec.(11) y Ec.(13), para determinar los valores experimentales de Δn_a y de L_B . En la Tabla 2, se muestran los valores de Δn_a y de L_B , medidos experimentalmente, correspondientes a cada arreglo interferométrico.

Tabla 2: Comparación de los valores de birrefringencia proporcionado por los fabricantes y los determinados experimentalmente.

PM-FCP	Δn_a fabricante	Δn_a experimental	L_B, mm
1. F-SM10-PM-Newport [®]	$>1 \times 10^{-4}$	$5,7 \times 10^{-4}$	2.7
2. LMA-PM-10-NKT Photonics [®]	$>1.4 \times 10^{-4}$	$6,0 \times 10^{-4}$	2.6
3. PM-1550-01-Thorlabs [®]	$>3.9 \times 10^{-4}$	$6,3 \times 10^{-4}$	2.4
4. F-SM15-PM-Newport	$>1.9 \times 10^{-4}$	$6,7 \times 10^{-4}$	2.3

En la Tabla 2, se observa que el fabricante simplemente establece un límite inferior respecto al valor de birrefringencia de su PM-PCF, los cuales son perfectamente compatibles con los valores de birrefringencia medidos experimentalmente. Así mismo, Δn_a medido experimentalmente, ratifica su veracidad, debido que satisface perfectamente a la Ec. (1). Las PM-PCF en sometimiento pertenecen a las PM-PCF de alta birrefringencia.

5. Conclusiones

Se presentó una técnica de medición interferométrica-espectral para determinar experimentalmente la birrefringencia de las fibras de cristal fotónico. Esta técnica realmente aplica para fibras de cristal fotónico preservadoras de la polarización que se les desconoce su valor nominal de birrefringencia. Para su determinación, es necesario que un segmento L, de esta fibra forme parte del lazo del Interferómetro de Sagnac para obtenerle su correspondiente espectro de transmitancia, e interpretar sus valores arrojados de acuerdo con los modelos presentados en este trabajo. Esta técnica interferométrica basada en el interferómetro de Sagnac, es una alternativa que compite con el método tradicional basado en la elipsometría polarimétrica. Tal método es precisamente utilizado por los fabricantes para medir y reportar los valores nominales de sus productos PM-PCF. Sin embargo, la técnica

nuestra interferométrica-espectral es experimental, y sistemáticamente exacta y confiable como lo sea el analizador de espectros ópticos empleado.

6. Agradecimientos

Agradecimientos por su apoyo parcial a la Vicerrectoría de investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) de la BUAP (ref. DAPJ-ING10-G), y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo mediante el proyecto ref. J51757.

7. Referencias y sitios de internet

- [1] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, *All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding*, Opt. Lett. 21(19), 1547–1549 (1996).
- [2] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. S. Russell, *Endlessly single-mode photonic crystal fiber*, Opt. Lett. 22(13), 961–963 (1997).
- [3] P. St. J. Russell, *Photonic crystal fibers*, Science 299(5605), 358–362 (2003).
- [4] T. M. Monro, W. Belardi, K. Furusawa, J. C. Baggett, N. G. R. Broderick, and D. J. Richardson, *Sensing with microstructured optical fibres*, Meas. Sci. Technol. 12(7), 854–858 (2001).
- [5] B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook, R. S. Windeler, and A. Hale, *Microstructured optical fiber devices*, Opt. Express 9(13), 698–713 (2001), <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?URI=OPEX-9-13-698>.
- [6] O. Frazão, J. L. Santos, F. M. Araujo, and L. A. Ferreira, *Optical sensing with photonic crystal fibers*, Laser Photon. Rev. 2(6), 449–459 (2008).
- [7] D.-H. Kim, and J. U. Kang, *Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity*, Opt. Express 12(19), 4490–4495 (2004), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-12-19-4490>.
- [8] H. Y. Fu, H. Y. Tam, L. Y. Shao, X. Dong, P. K. Wai, C. Lu, and S. K. Khijwania, *Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer*, Appl. Opt. 47(15), 2835–2839 (2008).
- [9] O. Frazão, J. M. Baptista, J. L. Santos, and P. Roy, *Curvature sensor using a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric hole regions in a Sagnac interferometer*, Appl. Opt. 47(13), 2520–2523 (2008).
- [10] G. Kim, T. Cho, K. Hwang, K. Lee, K. S. Lee, Y.-G. Han, and S. B. Lee, *Strain and temperature sensitivities of an elliptical hollow-core photonic bandgap fiber based on Sagnac interferometer*, Opt. Express 17(4), 2481–2486 (2009), <http://www.opticsinfobase.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-17-4-2481>.
- [11] M. L. V. Tse, H. Y. Tam, L. B. Fu, B. K. Thomas, L. Dong, C. Lu, and P. K. A. Wai, *Fusion splicing holey fibers and single-mode fibers: A simple method to reduce loss and increase strength*, IEEE Photon. Technol. Lett. 21(3), 164–166 (2009).
- [12] B. Mortimore, *Fiber Loop Reflectors*, J. Lightwave Technol. 6(7), 1217–1224 (1988).