

Sensor magneto-óptico de corriente con supresión de birrefringencia lineal mediante espejo de Faraday

Magneto-optic current sensor with Faraday mirror for linear birefringence compensation

Javier Arroyo Breña, Paloma R. Horche^(*), Alfredo Martín Minguez

ETSI de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria 28040 Madrid, Spain.

^(*) Email: phorche@tfo.upm.es

Recibido / Received: 27/06/2012. Revisado / Revised: 04/10/2012. Aceptado / Accepted: 22/10/2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.7149/OPA.45.4.497>

ABSTRACT:

Fiber optic sensors have some advantages in subjects related with electrical current and magnetic field measurement. In spite of the optical fiber utilization advantages we have to take into account undesirable effects, which are present in real non-ideal optical fibers. In telecommunication and sensor application fields the presence of inherent and induced birefringence is crucial. The presence of birefringence may cause an undesirable change in the polarization state. In order to compensate the linear birefringence a promising method has been chosen. This method employs orthogonal polarization conjugation in the back propagation direction of the light wave in the fiber. A study and a simulation of an experimental setup are realized with the advantage of a significant sensitivity improvement.

Key words: Fiber Optic Current Sensor, Magneto-Optic Effect, Faraday Mirror, Linear Birefringence.

RESUMEN:

Los sensores de fibra óptica presentan algunas ventajas en el área de la medición de la corriente eléctrica y el campo magnético. A pesar de estas ventajas se deben tener en cuenta algunos efectos no deseados que se presentan en la práctica, como la presencia de birrefringencia lineal inducida, en el campo de las telecomunicaciones y tecnología de sensores, ya que puede provocar un cambio indeseado del estado de polarización en la fibra. En este artículo se expone un prometedor método para la compensación de la birrefringencia lineal, empleando conjugación ortogonal de la polarización con propagación inversa en la fibra óptica. Se ha realizado un estudio y una simulación sobre una configuración experimental, donde se ha verificado una mejora notable de la sensibilidad del sensor.

Palabras clave: Sensor de Corriente de Fibra Óptica, Efecto Magneto-Óptico, Espejo de Faraday, Birrefringencia Lineal.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. M. Gaugitsch, H. Hauser, "Optimization of a magneto-optical light modulator", *J. Lightwave Technol.* **17**, 2633–2644 (1999).
- [2]. A. E. Craig, K. Chang, *Handbook of Optical Components and Engineering*, John Wiley & Sons Inc. (2003)
- [3]. K. Kurosawa, K. Shirakawa, T. Kikuchi, "Development of optical fiber current sensors and their applications", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific*, pp. 1-6, Dalian, China (2005).
- [4]. M. Aerssens, A. Gusarov, B. Brichard, V. Massaut, P. Mégret, M. Wullpart, "Faraday effect based optical fiber current sensors for tokamaks", *ANIMMA 2011, Proc. 2nd International Conference on*

- Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications*, art. No. 6172868 (2011).
- [5]. S. Zhou, X. Zhang, "Simulation of linear birefringence reduction in fiber-optical current sensor", *IEEE Photonic. Tech. Lett.* **19**, 1568-1570 (2007).
- [6]. A. Rose, Z. F. Ren, G. W. Day, "Twisting and annealing optical fiber for current sensors", *J. Lightwave Technol.* **14**, 2492 - 2498 (1996).
- [7]. R. I. Laming, D. N. Payne, "Electric current sensors employing spun highly birefringent optical fibers", *J. Lightwave Technol.* **7**, 2084-2094 (1989).
- [8]. D. Tang, A. H. Rose, G. W. Day, S. M. Etzel, "Annealing of lineal birefringence in single mode fiber coils: Application to optical fiber current sensors", *J. Lightwave Technol.* **9**, 1031-1037 (1991).
- [9]. P. Drexler, P. Fiala, "Suppression of polarimetric birefringence effect in optical fiber and its application for pulsed current sensing", *2009 International Waveform Diversity and Design Conference Proceedings, WDD2009*, art. No. 4800339, 173-177 (2009).
- [10]. M. Pavlů, *The Suppression of Mechanical Stress Impacts in Fiber Optic Transmission Systems*, Bachelor's Thesis. Brno: FEEC, Brno University of Technology (2008).
- [11]. J. Arroyo, *Sensores de Fibra Óptica para Aplicaciones Industriales*, Proyecto Fin de Carrera, ETSI Telecomunicación, Madrid (2012).
- [12] D. Alasia, L. Thevenaz, "A novel all-fiber configuration for a flexible polarimetric current sensor", *Meas. Sci. Technol.* **15**, 1525-1530 (2004).

1. Introducción

La monitorización de la corriente eléctrica es uno de los principales requerimientos en las instalaciones de generación eléctrica, y en las cada vez más complejas redes de distribución para facilitar las funciones de control, protección y supervisión. Las compañías eléctricas no pueden permitirse mediciones poco precisas debido al impacto económico que supone, y además necesitan disponer de una información continua del estado de la red mediante la monitorización de múltiples puntos de la misma. A medida que, en relación a la creciente demanda, se elevan los niveles de voltaje y la complejidad de las líneas, también crecen proporcionalmente los inconvenientes de los sensores de corriente convencionales como son el tamaño, el peso, el coste, el ruido inducido electromagnéticamente y la dificultad de instalación.

Los sensores de fibra óptica, como por ejemplo, los basados en redes de difracción de Bragg, o en la medida del campo evanescente producido en la propagación de la señal óptica a través de la fibra, presentan ventajas con respecto a los sensores convencionales de corriente eléctrica, ya que, son compactos e inmunes al ruido electromagnético, ofrecen un amplio rango lineal de medidas sin saturación, mejorando la sensibilidad, reducen la

contaminación asociada a los aislantes empleados y posibilitan la monitorización a largas distancias, incorporando todas las ventajas de los sistemas de comunicaciones ópticas. En las últimas décadas, el desarrollo de sensores magneto-ópticos mediante el empleo de fibra óptica, ha generado algunas oportunidades y ventajas para dar solución a los problemas que presentan los sensores convencionales no ópticos. En estos sensores, los tres efectos magneto-ópticos principales que se consideran son: el efecto Cotton-Mouton, el efecto Kerr y el efecto Faraday [1-3]. Entre ellos, el efecto Faraday es el más utilizado para su aplicación en los sensores de corriente.

En el caso de los sensores de fibra óptica basados en el efecto Faraday, la medida de la corriente se realiza a través del cambio del estado de polarización de la luz (SOP). El principal inconveniente de esta tecnología es la presencia de birrefringencia lineal en la fibra, que, es un fenómeno aleatorio y difícil de eliminar. La birrefringencia lineal provoca un desfase entre las dos polarizaciones del modo fundamental afectando al SOP y por tanto, perturba la medida. Como la sílice (SiO_2) tiene una constante de Verdet, que tiene en cuenta el estado magneto-óptico del material, relativamente baja ($V = 3,67 \text{ rad}\cdot\text{T}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ para el núcleo de la fibra, $\lambda = 633 \text{ nm}$), para aumentar

la sensibilidad del sensor, el elemento conductor se rodea de varias vueltas de fibra en forma de espiras [4]. El arrollamiento de la fibra provoca stress mecánico, y por tanto la aparición de birrefringencia lineal en su núcleo. También puede ser inducida por otros efectos mecánicos (vibraciones) o térmicos, por ello, es importante intentar suprimirla o compensarla. En caso contrario, la polarización lineal de la onda de luz se transforma en polarización elíptica confundiendo con la rotación debida al efecto Faraday y disminuyendo la sensibilidad del sensor [5].

Se han desarrollado varios métodos para la supresión de la birrefringencia lineal. El método básico utiliza una fibra girada (*twisted single mode fiber*) [6] y una aproximación similar, que emplea fibras de alta birrefringencia (*Spun HiBi fibers*) [7]. En este tipo de fibras, se impone una birrefringencia circular latente en la fibra, superior a la birrefringencia lineal, que se combina con la birrefringencia circular inducida por el campo magnético, que se desea evaluar. Con ambos tipos de fibras puede anularse la birrefringencia lineal. La desventaja de estos métodos es la fuerte dependencia con la temperatura de la birrefringencia circular latente.

La utilización de fibras tratadas a altas temperaturas ("fiber annealing") [8] es otra solución al problema. El rollo de fibra se fija a un conducto cerámico y se expone a altas temperaturas con un crecimiento paulatino de la misma. Cuando la temperatura alcanza 800°C, se estabiliza durante varias horas. Tras ello, la temperatura se va disminuyendo 0,1°C/min. La influencia del tratamiento a altas temperaturas reduce el stress mecánico interno en la fibra y la proporción de birrefringencia lineal. La dependencia con la temperatura de la birrefringencia lineal residual también se ve reducida.

En este trabajo primero se analiza, desde un punto de vista teórico, y a continuación, se efectúa una simulación de uno de los métodos más ventajosos para la compensación de la birrefringencia lineal, basado en la compensación del retardo entre las componentes de onda ortogonales, mediante un reflector que permite la propagación inversa de

la onda con las componentes ortogonales conjugadas. La simulación demuestra una mejora de la sensibilidad del sensor [9], lo que facilita su implementación en entornos industriales.

2. Principio de funcionamiento

Los sensores ópticos de corriente se basan, mayoritariamente, en el efecto Faraday. Este efecto magneto-óptico puede describirse como la inducción de una birrefringencia circular en un material, generada por el campo magnético. Para luz linealmente polarizada, propagándose en la dirección del campo magnético, esto produce una rotación de la dirección de polarización. Así, cuando la luz atraviesa un material dieléctrico (fibra óptica), inmerso en un campo magnético, su polarización rotará proporcionalmente a la intensidad del campo. El ángulo girado sigue la ecuación:

$$\theta_F = \mu V H l, \quad (1)$$

donde l es la longitud de interacción, μ la permeabilidad del material y H el campo magnético, que es proporcional a la corriente que circula por el conductor, y V la constante de Verdet que determina las propiedades magneto-ópticas del medio y depende de la longitud de onda.

Este efecto se denomina Efecto Faraday y es el principio básico de funcionamiento de los sensores de fibra óptica para la medida de la corriente. La Ec. (1) predice una rotación θ_F de la polarización directamente proporcional a H , en la longitud de interacción l . Las propiedades básicas del efecto son su alta linealidad con la corriente según indica la ley de Ampere, y su dependencia con la temperatura y longitud de onda.

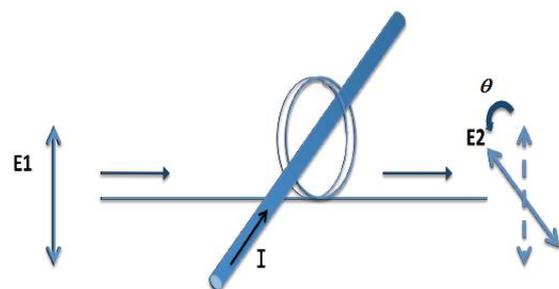


Fig. 1. Efecto Faraday en una fibra óptica que rodea un conductor.

La Fig. 1 muestra el principio de funcionamiento del sensor donde una fibra óptica monomodo sirve como elemento magneto-óptico.

El efecto Faraday es no recíproco, dependiendo de la dirección relativa de propagación de la luz. Si la rotación en la ida se produce en un sentido, se producirá en el contrario a la vuelta. Sin embargo la birrefringencia lineal es un efecto recíproco, de tal modo que no importa el sentido de propagación de la luz sino si se propaga por el eje lento o rápido. Las componentes están intercambiadas en el sensor con OCR y la rotación debida al efecto Faraday afecta doblemente a la luz precisamente por la no reciprocidad del efecto. La solución objeto de estudio explota la no reciprocidad del efecto Faraday y la reciprocidad de la birrefringencia lineal.

3. Montaje para la supresión de la birrefringencia lineal

La Fig. 2, [9], muestra el esquema de un sensor de fibra óptica con propagación inversa basado en un espejo de Faraday. Como fuente se utiliza un diodo láser (LD) y el elemento sensor se compone de N vueltas de una fibra óptica monomodo. Excepto el tramo de fibra sensora, el haz se propaga no guiado por lo que es necesario utilizar colimadores (C1, C2 y C3) para enfocar el haz.

El haz colimado por C1 está, generalmente, polarizado elípticamente. El polarizador P asegura una polarización lineal inicial 45° , de tal modo, que estableciendo una diferencia de 45° en el azimut, entre el polarizador (P) y el analizador de polarización (PBS), se obtiene una respuesta lineal óptima con máxima sensibilidad. Tras pasar por el divisor de potencia (NBS), el haz se acopla a la fibra sensora, mediante el colimador C2. En el tramo de fibra la polarización rota por el efecto Faraday θ_F y a esto se le suma la variación de la polarización θ_L inducida por los efectos externos ya mencionados (curvaturas, vibraciones, etc.).

C3 enfoca el haz sobre el OCR (*orthoconjugate retroreflector*), que lo refleja y

rota su polarización. Al atravesar el OCR, las componentes de campo transversal y longitudinal experimentan una rotación de 45° y debido a la reflexión en el espejo, pasan dos veces por el rotador de Faraday, resultado una rotación total $\theta = 90^\circ$. Por tanto, se produce un intercambio de las componentes ortogonales de la onda entre el eje lento (eje x, 0 grados) y el eje rápido (eje y, 90 grados). El desplazamiento de fase producido en el camino de ida dentro de la fibra, al ser un fenómeno recíproco, se ecualiza en el camino de vuelta e idealmente desaparece la influencia de la birrefringencia lineal, θ_L . En la práctica, la reflexión de la luz mantiene cierta birrefringencia residual. Además, en el mismo trayecto de vuelta, debido a la no reciprocidad del efecto Faraday, la luz experimentará nuevamente una rotación θ_F acumulando un giro doble $2\theta_F$ en el trayecto completo de ida y vuelta, con la consecuente mejora de la sensibilidad.

El haz divergente que sale de la fibra se colima en C2 y se enfoca en el NBS que lo refleja parcialmente hacia el divisor de polarización (PBS). El PBS actúa como un analizador de la polarización dividiendo la señal óptica en dos componentes ortogonales. Cada una de ellas incide sobre un fotodetector distinto, PD1 y PD2. El tratamiento polarimétrico de estas dos medidas proporcionará la rotación de polarización $2\theta_F$ que ha sufrido la luz en función de la corriente que se desea medir.

Así, con este montaje se consigue una doble función, por un lado se suprime la birrefringencia lineal de la fibra y por otro se aumenta la sensibilidad del sensor. La

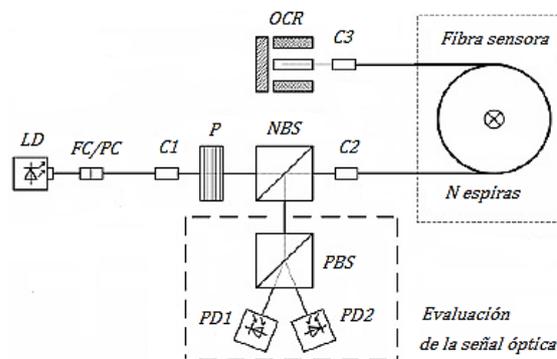


Fig. 2. Esquema del sensor magneto-óptico de corriente con supresión de birrefringencia lineal.

comprobación teórica de la supresión de la birrefringencia lineal puede comprobarse a través del cálculo de Jones, que se describirá a continuación.

4. Análisis teórico del OCR

A través del cálculo de Jones, se puede hacer un análisis del sensor óptico de corriente con OCR. El esquema analizado se muestra en la Fig. 3, [9]. Para simplificar, en el siguiente análisis no se tiene en cuenta las pérdidas de potencia en la fibra y sus componentes ópticos y también se supone que la birrefringencia lineal de la fibra es inducida sólo por curvaturas, ya que en la práctica esto puede conseguirse en gran medida con las actuales fibras comercialmente disponibles [10].

La luz a la entrada de una fibra óptica se describe mediante el vector Jones J_1 . Se considera un ángulo de polarización de entrada 45° respecto a la vertical. La fibra se describe mediante su matriz de transferencia TOF y la onda de luz atraviesa la fibra alterándose su estado de polarización. El vector resultante a la salida J_2 estará relacionado con J_1 mediante la expresión:

$$\begin{aligned}
 J_2 &= T_{OF} \cdot J_1 = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \alpha + j\beta & -\gamma \\ \gamma & \alpha - j\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos\Delta + \frac{j\delta \sin\Delta}{2\Delta} & -\frac{\delta \sin\Delta}{\Delta} \\ \frac{\delta \sin\Delta}{\Delta} & \cos\Delta - \frac{j\delta \sin\Delta}{2\Delta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)
 \end{aligned}$$

donde α , β y γ representan las componentes de la birrefringencia lineal y circular de la fibra. El vector J_2 presenta, generalmente, una polarización elíptica con una desviación de fase Δ , [5]:

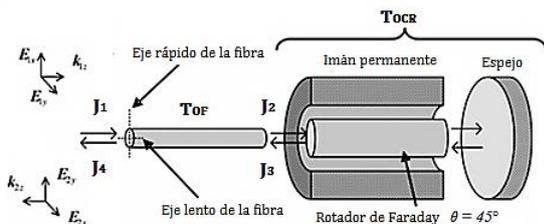


Fig. 2. Descripción del OCR y cálculo de Jones.

$$\Delta = \sqrt{\vartheta^2 + \left(\frac{\delta}{2}\right)^2}, \quad (3)$$

que es la media geométrica de los desplazamientos de fase ϑ y δ que son impuestos por la birrefringencia circular y la birrefringencia lineal indeseada, respectivamente.

Si se caracteriza el rotador de Faraday y el espejo a través de la matriz T_{OCR} , tras un viaje de ida y vuelta, a la salida del OCR se tiene:

$$J_3 = T_{OCR} \cdot J_2. \quad (4)$$

La luz se vuelve a propagar por la fibra en sentido contrario y a su salida se tiene

$$J_4 = T_{OF} \cdot J_3. \quad (5)$$

El vector resultante es relativamente difícil de analizar, con respecto a la investigación de la birrefringencia lineal. Para solucionar esto, se va a estudiar por separado los casos, cuando sólo está presente la birrefringencia lineal o sólo la circular. El estado de polarización resultante será dado por la superposición de ambos casos.

Si se considera la presencia de birrefringencia lineal δ únicamente ($\vartheta = 0$), la Ec. (2) quedaría de la siguiente forma:

$$J'_2 = T_{OF} \cdot J_1. \quad (6)$$

Después de la propagación completa en sentido contrario, a la salida de la fibra en este caso, se obtiene [9]

$$\begin{aligned}
 J'_4 &= T_{OF} \cdot T_{OCR} \cdot J'_2 = \\
 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos^2 \frac{\delta}{2} + \sin^2 \frac{\delta}{2} & \\ -\left(\cos^2 \frac{\delta}{2} + \sin^2 \frac{\delta}{2}\right) & \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Según (7), al final de la fibra se obtiene una onda linealmente polarizada. El estado de polarización es rotado con un ángulo de 90° y la influencia de la birrefringencia lineal ha desaparecido

En el segundo caso, se considera únicamente la presencia de birrefringencia circular ($\delta = 0$), que es inducida por el campo magnético medido. La onda a la entrada del OCR es descrita por el vector

$$J_2'' = T_{OF} \cdot J_1. \quad (8)$$

En este caso, a la salida de la fibra, la onda es descrita por el vector [9]:

$$J_4'' = T_{OF} \cdot T_{OCR} \cdot J_2'' = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \sin 2\vartheta + \cos 2\vartheta \\ \sin 2\vartheta - \cos 2\vartheta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_{out,p} \\ E_{out,s} \end{pmatrix}, \quad (9)$$

donde los subíndices p y s representan las componentes ortogonales del vector de salida de campo eléctrico.

El término 2ϑ en la Ec. (9) representa el desplazamiento de fase debido a la birrefringencia circular inducida por el campo magnético. La luz viaja por la fibra dos veces, experimentando una doble rotación 2ϑ . A la salida de la fibra, el estado de polarización puede evaluarse por medio de polarimetría dual. Ambas componentes del vector J_4 se pueden detectar separando los canales con polarizadores ortogonales mediante un "polarizing beam splitter". Las componentes del vector de Jones $E_{out,p}$ y $E_{out,s}$ representan intensidades del campo eléctrico.

Tanto la potencia, como los voltajes y corrientes a la salida del detector, son proporcionales al cuadrado de las intensidades de campo eléctrico en ambos canales, como puede observarse en la Ec. (10). La dependencia de las magnitudes de señal detectadas con la rotación de polarización se muestra en la Fig. 4 para los dos canales. Si se emplea un método de evaluación "diferencia sobre suma" de las señales de salida, para ángulos pequeños de rotación se puede ver su rasgo lineal

$$I_p = \frac{1}{2} |\sin 2\vartheta + \cos 2\vartheta|^2, \quad (10a)$$

$$I_s = \frac{1}{2} |\sin 2\vartheta - \cos 2\vartheta|^2, \quad (10b)$$

$$S_{out} = \frac{I_p - I_s}{I_p + I_s} = \sin 4\vartheta \approx 4\vartheta. \quad (10c)$$

En conclusión, a través del cálculo de Jones descrito, puede comprobarse teóricamente la compensación de la birrefringencia lineal asociada a curvaturas, mediante el empleo de un OCR o rotador de Faraday con espejo. A continuación, se muestra una posible configuración de un sensor óptico de corriente que utiliza este elemento para su simulación.

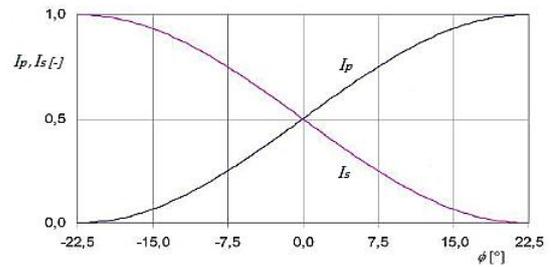


Fig. 4. Dependencia de las magnitudes de señal detectadas con respecto a la rotación de polarización (ϑ).

5. Configuración de la simulación del sensor óptico de corriente

La Fig. 5 muestra esquemáticamente el montaje simulado del sensor representado en la Fig. 2. Para analizar el comportamiento del sensor, se ha empleado un programa de simulación comercial (Optiwave) que permite analizar tanto sistemas ópticos como eléctricos. Este programa está enfocado a los sistemas de comunicaciones ópticas, por lo que ha sido necesario readaptar algunos componentes o emplear componentes equivalentes con características compatibles al elemento simulado. Así, por ejemplo, el espejo de Faraday (OCR) se ha simulado mediante dos rotadores de Faraday de 45° (*Polarization Rotator 1* y *3*), al igual que la rotación de polarización que induce la corriente a medir a través del efecto Faraday. Para este último efecto, se han colocado dos rotadores con rotación θ_F , (*Polarization Rotator* y *Polarization Rotator 2*). La variación de la polarización asociada a curvaturas en la fibra o birrefringencia lineal inducida θ_L , se simula mediante dos elementos (*Polarization Delay*) que introducen un retardo diferente para cada componente ortogonal de polarización, estableciendo así un eje rápido y un eje lento en la fibra, a la ida y a la vuelta. Por lo tanto, el montaje de la Fig. 5 tiene como objetivo fundamental la compensación de la birrefringencia lineal tal como se deduce de la simulación.

El láser simulado es un LD emitiendo 10 mW de potencia óptica a una longitud de onda de 633 nm (la luz visible facilita la mecánica del acoplo de luz entre las diferentes etapas). Una condición indispensable para el buen

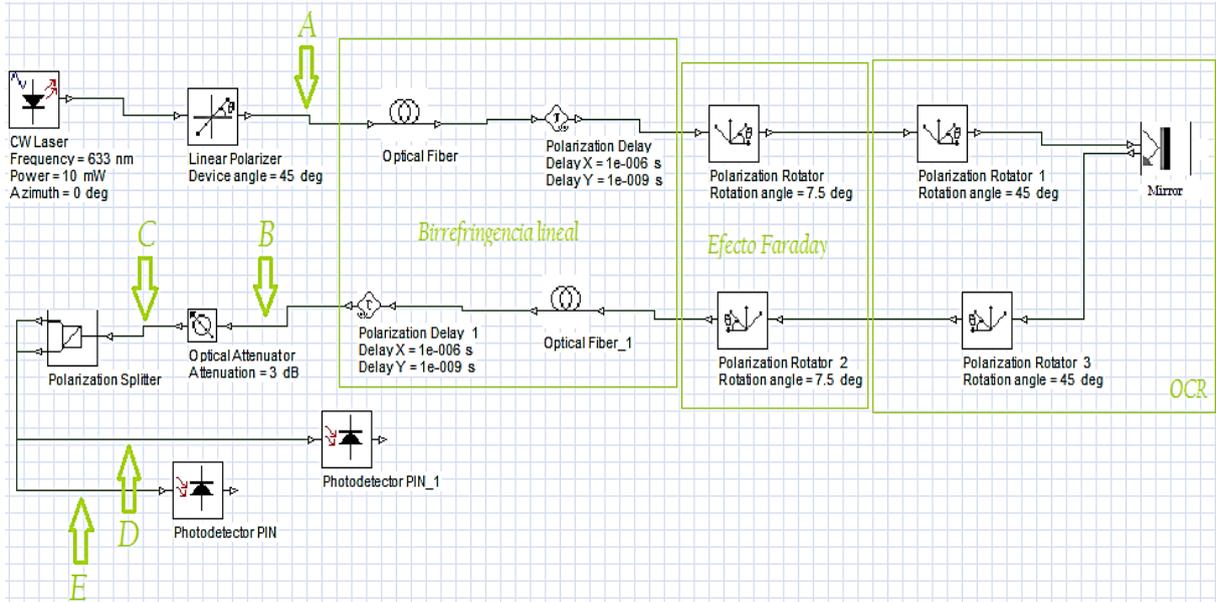


Fig. 5. Esquema de simulación del sensor de corriente con espejo de Faraday (OCR).

funcionamiento del sensor es que la fibra propague un único modo a la longitud de onda de uso. Las fibras monomodo (SMF) utilizadas en comunicaciones ópticas son monomodo a partir de una $\lambda_c = 1260$ nm, por lo que hubo que readaptar la fibra simulada (*Optical Fiber*) para cumplir esta condición a la longitud de onda de 633 nm. Para ello se han empleado los datos obtenidos de las hojas de características de la fibra SM600 (Thorlabs) con un diámetro de núcleo/cubierta de 4,3/125 μm . Con el fin de simular las trayectorias de ida y vuelta por la fibra se han empleado dos tramos de fibra (*Optical Fiber* y *Optical Fiber 1*).

Los conectores ópticos se suponen de alta gama tipo FC con pulido PC o APC con el objeto de evitar reflexiones y cambios en la polarización. La tarea de fotodetección se ha simulado mediante fotodiodos PIN, indicados para radiaciones dentro del espectro visible e infrarrojo cercano. Para llevar a cabo la simulación se han utilizado los siguientes valores de atenuación:

- Atenuación de los conectores \rightarrow 0.3 dB,
- Atenuación de la fibra \rightarrow 15 dB/km (según catálogo),
- Atenuación del NBS \rightarrow 3 dB (pérdida de 1/2 señal).
- Atenuación del OCR \rightarrow 2 dB.

6. Análisis de la simulación del sensor

Para comprobar el funcionamiento del sensor se proponen varios escenarios. El primero supone la ausencia de corriente eléctrica. Tras ello, se ha supuesto una rotación de polarización fija, debida al efecto Faraday, igual a 15° . También, se han realizado dos simulaciones con iteraciones progresivas, con dos rangos de variación angular, entre -90° y 90° y entre -25° y 25° , de tal forma que pueda comprobarse la evolución de la respuesta del sensor en función de la variación de la corriente. Todos estos escenarios muestran una respuesta del sensor y una sensibilidad mejorada con respecto a otros montajes sin compensación, gracias a la supresión de la birrefringencia lineal. En el último escenario, para analizar el efecto que causaría este fenómeno no deseado, se muestra la respuesta del sensor para diferentes magnitudes de birrefringencia lineal sin compensación (sin rotador de Faraday).

En los diferentes supuestos se facilitan mediciones en distintas localizaciones del montaje, tanto desde el punto de vista de potencia como desde el punto de vista de polarización, de tal forma que se pueda comprobar la coherencia de los resultados obtenidos. Se da también una visión de la esfera de Poincaré y de los parámetros de Stokes

(s_0, s_1, s_2, s_3), donde s_0 indica la intensidad del haz óptico, y el resto de parámetros el tipo de la polarización. La esfera de Poincaré constituye un modelo adecuado para la representación de estados de polarización de la luz en coordenadas esféricas (los tres últimos parámetros de Stokes): el parámetro s_1 representa la polarización horizontal o vertical; el s_2 la proximidad a una polarización lineal de 45° y el s_3 , indica el carácter circular de la polarización [11].

6.a. Escenario sin corriente ($\theta_F = 0^\circ$)

En el caso ideal, a la salida del polarizador lineal de 45° (Fig. 5, punto A), la potencia disminuye a la mitad respecto a la potencia óptica de entrada, debido a la atenuación sufrida en el polarizador. El vector de Stokes es $(s_1, s_2, s_3) = (0, 1, 0)$. En este primer escenario ($\theta_F = 0^\circ$, la rotación que sufre la luz (90°) es únicamente la impuesta por el OCR. El vector de Stokes en este caso se modifica y pasa a valer $(0, -1, 0)$, la polarización sigue siendo lineal 45° , pero con signo negativo, como puede observarse en la Fig. 6, la cual muestra la medida tomada a la salida del espejo de Faraday (Fig. 5, punto B).

La potencia óptica que llega a la entrada del divisor de polarización (Fig. 5, punto C), es 1 mW. El PBS separa las componentes ortogonales y, al no existir corriente, la potencia de salida para ambas componentes (Fig. 5, puntos D y E) será la misma (0,5 mW). Por tanto, se tendría una situación equivalente a la descrita en la Ec. (7), donde se compensa la birrefringencia lineal, en ausencia de birrefringencia circular. La Fig. 7 representa la esfera de Poincaré a la entrada de ambos fotodetectores, resultando una polarización lineal horizontal y vertical, respectivamente.

6.b. Escenario con corriente constante ($2\theta_F = 15^\circ$)

En este segundo escenario, se supone una corriente constante que genera una rotación de Faraday ($2\theta_F = 15^\circ$), la mitad de esta rotación será inducida en la polarización cuando la luz viaja hacia el OCR y la otra mitad tras reflejarse en él. A la entrada del PBS (punto C), en este caso seguimos teniendo una polarización lineal, pues s_3 sigue siendo nulo como en el escenario

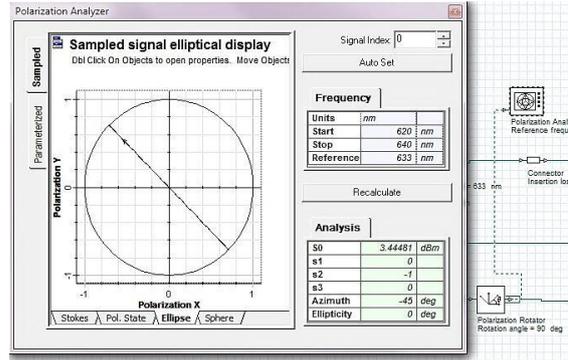


Fig. 6. Polarización a la salida del OCR para un escenario sin corriente.

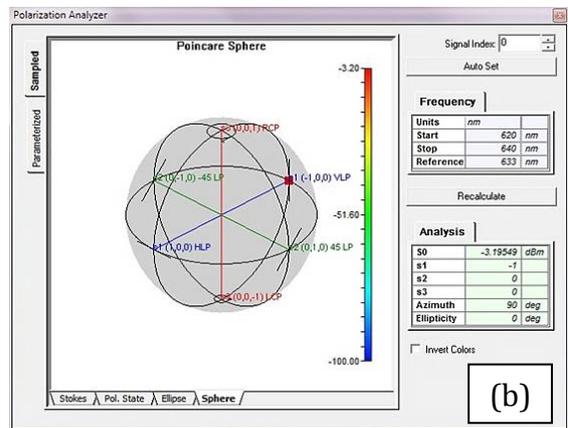
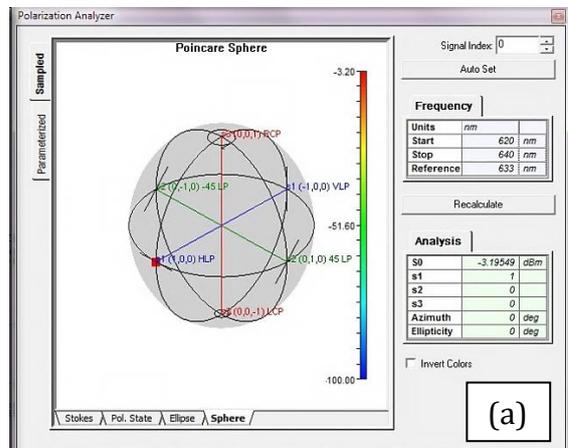


Fig. 7. (a) Esfera de Poincaré en PD1 para $\theta_F = 0^\circ$. (b) Esfera de Poincaré en PD2 para $\theta_F = 0^\circ$.

anterior. La potencia óptica también se conserva con respecto al escenario anterior y es igual a 1 mW aproximadamente. Sin embargo, se puede ver en la Fig. 8 como los parámetros s_1 y s_2 se han modificado, pues debido a la corriente se ha alterado la polarización de la luz, que en

ausencia de corriente era lineal de -45° . Ahora se tiene una polarización lineal de -60° y el vector de Stokes ha pasado de $(0, -1, 0)$ a $(-0.5, -0.87, 0)$.

Esta variación de polarización afecta a la distribución de potencia óptica, que lleva a cabo el PBS entre las componentes ortogonales. Ahora la componente vertical X a la salida del PBS (punto D) tendrá mayor potencia (-0.82 dBm) óptica que la componente horizontal Y (punto E), (-5.59 dBm).

6.c. Escenario con corriente variable
 $(-90^\circ < 2\theta_F = 90^\circ)$

Aquí se supone una corriente eléctrica variable, que provocará una rotación también variable en la polarización de la luz. En este primer caso, se supone un ángulo de rotación que varía entre -90 y 90° . Se ha elaborado una gráfica de la respuesta del sensor, mostrada en la Fig. 9, mediante una simulación con múltiples iteraciones (46 en total) en la que se ha establecido el mismo salto de ángulo entre cada iteración.

De este modo se ha obtenido la respuesta de cada rama (puntos D y E) a la salida del PBS (línea roja y línea verde) en función del ángulo de rotación inducido por el efecto Faraday. Como se puede observar, esta figura es muy similar a la respuesta de un sensor polarimétrico de

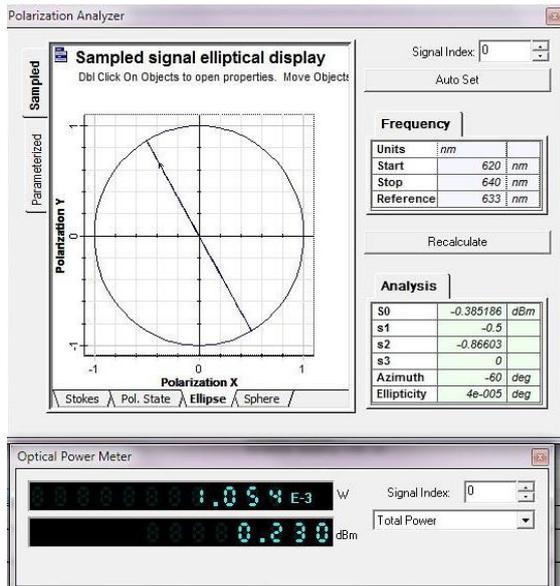


Fig. 8. Polarización y potencia óptica a la entrada del PBS.

corriente ideal [11]. En el siguiente apartado, nos centramos en la zona lineal de la gráfica, ya que esta zona será normalmente la zona de trabajo del sensor, dado su carácter lineal para ángulos pequeños.

6.d. Escenario con corriente variable
 $(-25^\circ < 2\theta_F = 25^\circ)$

La Fig. 10 resume los resultados obtenidos para ángulos pequeños, en ella se puede apreciar la linealidad de la respuesta del sensor, lo que permite asegurar su aplicación en el campo propuesto. En un sensor interesa una respuesta lineal. Se puede observar que para rotaciones, aproximadamente, entre -15° y 15° , la aproximación lineal es totalmente válida. Este escenario se centra en esa zona, ya que será normalmente la zona de trabajo del sensor, dado su carácter lineal para ángulos pequeños.

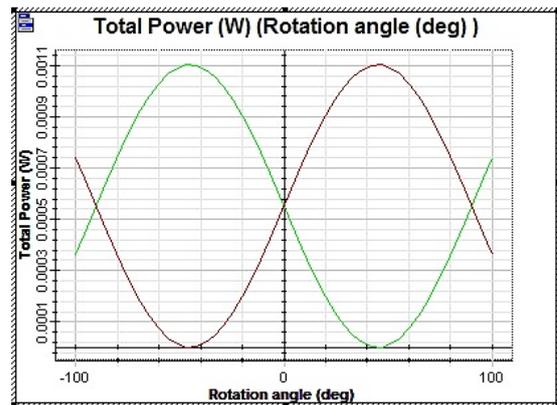


Fig.9. Respuesta a la salida de cada rama del PBS entre -90° y 90° .

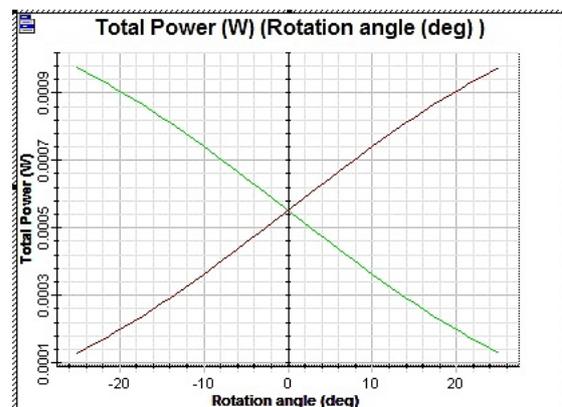


Fig.10. Respuesta a la salida de cada rama del PBS entre -25° y 25° .

El sensor propuesto está diseñado para medidas de corriente en el rango de los kA. El valor de la constante de Verdet limita el valor máximo de corriente que teóricamente puede medirse. Para una fibra de sílice con una constante de Verdet en el núcleo $V = 3.67 \text{ rad}\cdot\text{T}^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$ el valor de corriente máximo detectable, para un solo lazo $N = 1$, es

$$I_{max} = \frac{\theta_{max}}{\mu_0 V N} = \frac{\pi}{4 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3,67 \cdot 1} = 170 \text{ kA.} \quad (11)$$

El rango de medida para la zona lineal estudiada sería por tanto de unos 50 kA como máximo. Se ha expuesto el resultado de la simulación de forma general sin concretar un rango de corrientes de interés, pues depende de la aplicación concreta del sensor

6.e. Escenario con birrefringencia lineal no compensada (θ_L), sin rotador de Faraday

En los apartados anteriores, se han expuesto diferentes escenarios, todos ellos empleando el esquema de compensación de birrefringencia lineal tratado. En este último escenario, para analizar el efecto adverso que puede causar este fenómeno en la respuesta del sensor, tanto en este tipo de configuración como en otros sensores sin compensación, se supone una cierta magnitud de birrefringencia lineal no compensada (θ_L). Para ello, se ha introducido un retardo de polarización adicional en uno de los ejes ortogonales (X) con respecto al otro (Y), de

tal forma que se tiene un eje rápido y un eje lento de propagación en la fibra, como ya se indicó anteriormente. Para la simulación, según el esquema de la Fig. 11, se ha empleado de nuevo un método iterativo, y se ha obtenido la respuesta del sensor para valores de birrefringencia lineal que van desde una magnitud despreciable hasta algunas décimas de femtosegundo donde su incidencia se hace más notable. Este método iterativo se ha aplicado como en los escenarios anteriores, tanto para corriente constante, como variable.

Como puede observarse en la Fig. 12, el margen de potencia a la salida va disminuyendo a medida que el retardo de polarización entre ejes ortogonales se incrementa, siendo ideal para valores casi nulos y notablemente más estrecho para valores cercanos al femtosegundo. El incremento de la birrefringencia lineal por tanto, conlleva una disminución notable de la sensibilidad del sensor y su precisión. La fibra empleada en la simulación es una fibra monomodo para una $\lambda = 633 \text{ nm}$ basada en la fibra SM600 de Thorlabs.

Esta consecuencia puede observarse más claramente en el caso de corriente variable ($-22.5^\circ < \theta_f < 22.5^\circ$). En la Fig. 13 se superponen diferentes respuestas del sensor bajo estudio para diferentes magnitudes de birrefringencia lineal. La gráfica indica como en el sensor sin OCR y sin compensación de birrefringencia, disminuye la sensibilidad. Por un lado por la configuración del sensor (la zona

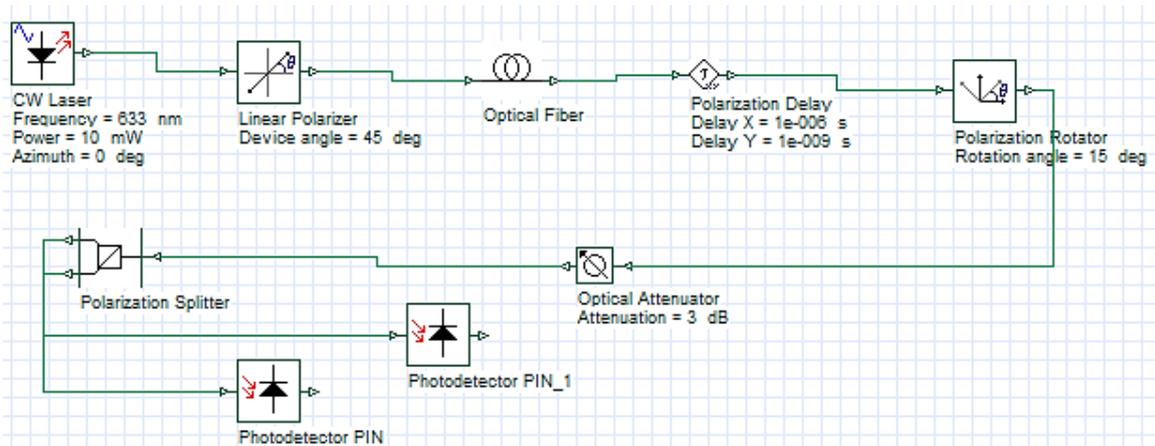


Fig.11. Esquema de simulación del sensor de corriente sin OCR.



Fig.12. Respuesta del sensor para una corriente constante ($\theta_F = 15^\circ$) en función de la birrefringencia lineal o retardo de polarización entre ejes ortogonales.

lineal se reduce a $-7,5^\circ < \theta_F < 7,5^\circ$) que produce menor rotación de polarización para la misma corriente, al no poseer espejo de Faraday, y por otro lado, por el aumento de birrefringencia lineal, que estrecha la respuesta del sensor. A partir de 0.3 femtoseg. la respuesta se estrecha notablemente.

Con la técnica descrita y soluciones similares [12], se ha logrado una medición de la corriente eléctrica con una excelente linealidad y una precisión por debajo del 0,2% del valor máximo

de escala ($\pm 2\text{kA}$), tanto para corriente DC como AC. Mediante la calibración activa de los parámetros del sensor con la variación de la temperatura, se garantiza dicha precisión para un margen amplio de temperaturas (50°C).

7. Conclusiones

El tipo de sensor que se ha descrito representa una manera ventajosa para la medida de corriente DC, AC, y campos magnéticos. El problema de estos sensores es la presencia de birrefringencia lineal latente e inducida. Se ha analizado el esquema de compensación mediante el empleo de un espejo de Faraday, como método y solución prometedora a este inconveniente. Mediante una simulación, se ha comprobado el funcionamiento teórico del sensor y sus componentes para diferentes escenarios, obteniendo una mejora notable de la sensibilidad del sensor, con respecto a otros sensores sin compensación o de lazo cerrado. La configuración simulada es fácil de implementar en la práctica, a expensas de un mayor ajuste de los componentes y procesamiento de señal, proporcionando un sensor estable, inmune a efectos externos y con flexibilidad de instalación. A pesar de las ventajas que tiene la aplicación

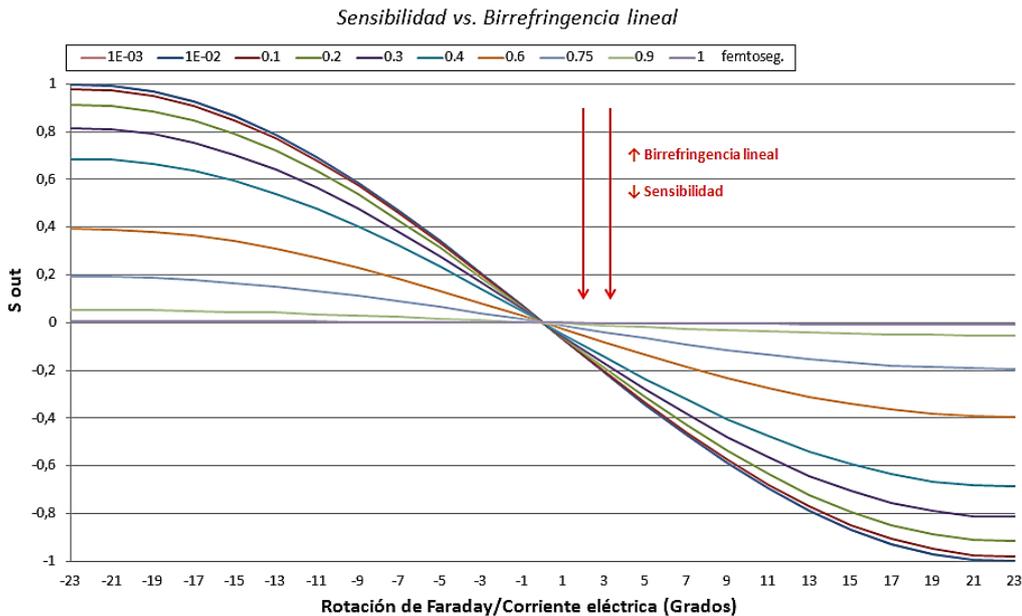


Fig.13. Respuestas del sensor para diferentes magnitudes de birrefringencia lineal, en función de una corriente eléctrica variable ($-22,5^\circ < \theta_F < 22,5^\circ$).

del espejo de Faraday, existen inconvenientes que limitan su uso como la dependencia con la temperatura de la constante de Verdet del rotador, por lo que el espejo de Faraday tiene que estabilizarse térmicamente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a LUMIKER Aplicaciones Tecnológicas, S.L., por la financiación parcial de este trabajo a través del proyecto *“Estudio de viabilidad del desarrollo de sensores ópticos para la medida de corriente y temperatura”* suscrito con la Universidad Politécnica de Madrid.