

# Interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente y torcida en lazo

E. KUZIN, M. RAMÍREZ RENERO, B. IBARRA ESCAMILLA, J. SÁNCHEZ-MONDRAGÓN  
Y H. CERECEDO NUÑEZ

*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica  
Apartados postales 51 y 216, 72000 Puebla, Pue., México*

Recibido el 9 de abril de 1996; aceptado el 29 de enero de 1997

RESUMEN. El interferómetro propuesto en este trabajo presenta un coeficiente de transmisión y de reflexión que dependen de la birrefringencia y de la longitud de la fibra. Se muestra que este interferómetro puede ser usado como un sensor ambiental de tipo polarimétrico. La característica específica del interferómetro es su insensibilidad a la polarización de la luz en la entrada. La operación del interferómetro fue mostrada en la medición de temperatura.

ABSTRACT. The interferometer proposed in this work has a coefficient of transmission and reflection depending on the birrefringence and the length of the fiber. It is showed that it can be used as a polarimetric type sensor of the environmental conditions. The specific feature of the interferometer is its insensitivity to an input light polarization. The operation of the interferometer was demonstrated by measuring temperature.

PACS: 42.10.jd; 42.10.Jd; 42.10.Nh; 42.10.Qj

## 1. INTRODUCCIÓN

El interferómetro de lazo o bien interferómetro de Sagnac es el más práctico de los dispositivos interferométricos de fibra, debido a que presenta gran estabilidad y es insensible a perturbaciones externas. El interferómetro consta principalmente de un acoplador direccional con sus salidas conectadas entre sí mediante fibra óptica [1]. Normalmente los dos haces que se propagan en ambos sentidos del lazo tienen polarización lineal y son paralelos entre sí. En este caso el interferómetro actúa como un espejo con un coeficiente de reflexión cercano a 1, debido a que el desplazamiento de fase entre ambas ondas en el lazo es cero.

Si en el lazo se introduce un haz con alta potencia hay un cambio de fase debido a efectos no lineales y se observan el crecimiento de la transmisión y la disminución de la reflexión. Este fenómeno se usa para desarrollar compuertas no lineales para *switches* [2, 3] y en láseres para lograr amarre de modos (*mode locking*) [4, 5].

En esta contribución discutimos la posibilidad de usar un interferómetro de lazo, usando fibra óptica birrefringente y torcida. En este caso se propagan en la fibra dos haces polarizados ortogonalmente, donde el coeficiente de reflexión depende de la diferencia de fases entre ellos. Esto puede proveer, por ejemplo, un coeficiente de reflexión bajo para

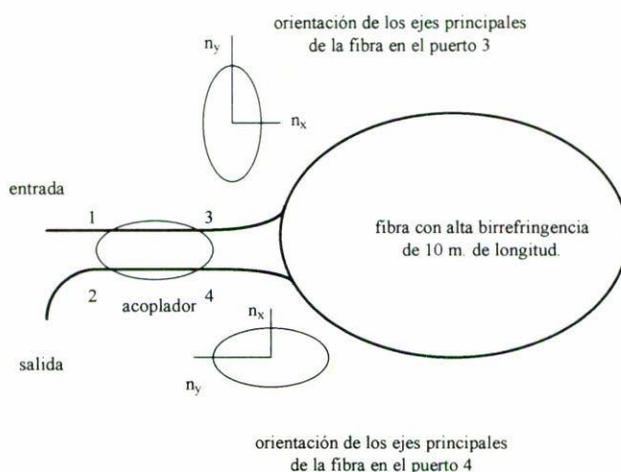


FIGURA 1. Interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente y torcida.

intensidad de la luz baja y un coeficiente alto para intensidad alta, o da la posibilidad de usar el interferómetro como sensor de ambiente como lo demostramos en la sección de resultados experimentales.

## 2. PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

El principio de operación del interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente y torcida está mostrado en la Fig. 1. El haz del láser entra en el anillo a través del acoplador, mediante los haces de entrada en los puertos 1 y 2. Los haces a la salida de los puertos 3 y 4 entran a la fibra birrefringente. La distinción más importante entre el interferómetro estudiado en este trabajo y el interferómetro de Sagnac convencional es que en el primero la fibra está torcida  $\pi/2$ , como se muestra en la Fig. 1.

Por simplicidad consideramos, primero, que los haces en los puertos 3 y 4 tienen polarización lineal y coinciden, digamos, con el eje  $y$  en el puerto 3 y con el eje  $x$  en el puerto 4. Los ejes  $x$  e  $y$  son los ejes principales de la fibra birrefringente y presentan, como es sabido, diferentes índices de refracción. Entonces los haces que recorren la fibra en direcciones opuestas están polarizados ortogonalmente dentro de la fibra, y por eso tienen velocidades de grupo y de fase diferentes. Después de recorrer el anillo y salir de la fibra los haces tienen polarización lineal y paralela uno del otro, pero ortogonal a la polarización con la cual entraron a la fibra. Debido a la interferencia en el acoplador, la potencia del haz en la salida del interferómetro depende de la diferencia de fase entre los haces. La última depende de la birrefringencia, longitud de fibra y longitud de onda de la luz.

Se puede analizar el funcionamiento del interferómetro simplemente usando la función de transferencia de un acoplador de fibras de cuatro-puertos. Los campos de entrada y salida del acoplador pueden ser estudiados por un análisis de los modos acoplados, dado por [6]

$$\begin{aligned} E_3 &= \alpha^{1/2} E_1 + (1 - \alpha)^{1/2} E_2, \\ E_4 &= i(1 - \alpha)^{1/2} E_1 + \alpha^{1/2} E_2, \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $E_1$  y  $E_2$  son las amplitudes del campo en las entradas a los puertos 1 y 2, respectivamente;  $E_3$  y  $E_4$  son las amplitudes de los campos en la salida de los puertos 3 y 4, respectivamente;  $\alpha$  es un coeficiente de la división de la intensidad.

Para una sola entrada  $E_1$ , cuando  $E_2 = 0$ , con una polarización arbitraria de la luz en el puerto 1, los campos en las salidas del acoplador pueden ser representados como

$$\begin{aligned} E_3^{\parallel} &= \alpha^{1/2} E_1^{\parallel}, \\ E_4^{\parallel} &= i(1 - \alpha)^{1/2} E_1^{\parallel}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} E_3^{\perp} &= \alpha^{1/2} E_1^{\perp}, \\ E_4^{\perp} &= i(1 - \alpha)^{1/2} E_1^{\perp}; \end{aligned} \quad (3)$$

donde  $E^{\parallel}$  y  $E^{\perp}$  son paralelos a los ejes  $x$  e  $y$  respectivamente de la fibra en la salida 3. Debido a la torsión de la fibra, en la salida 4, los campos  $E^{\parallel}$  y  $E^{\perp}$  son paralelos a  $y$  y  $x$ , respectivamente.

El campo  $E^{\parallel}$  tiene un cambio de fase para la luz que recorre el anillo en el sentido de 4 a 3 igual a  $k_y L$ , donde  $k_y$  es el número de onda de la luz con polarización paralela al eje  $y$ , y  $L$  es la longitud de la fibra que forma el anillo. De la misma manera, el cambio de fase de este campo  $E^{\parallel}$ , pero que recorre el anillo en el sentido de 3 a 4 es  $k_x L$ , donde  $k_x$  es el número de onda de la luz con polarización paralela al eje  $x$ .

Para obtener los campos a la salida del interferómetro, es necesario aplicar la Ec. (1) a los campos de entrada  $E_3$  y  $E_4$ . El resultado es

$$E_{2,\text{out}}^{\parallel} = i(1 - \alpha)^{1/2} \left[ i(1 - \alpha)^{1/2} E_{\text{in}}^{\parallel} e^{ik_y L} \right] + \alpha^{1/2} \left[ \alpha^{1/2} E_{\text{in}}^{\parallel} e^{ik_x L} \right], \quad (4)$$

o, equivalentemente,

$$E_{2,\text{out}}^{\parallel} = E_{\text{in}}^{\parallel} e^{ik_x L} \left[ (\alpha - 1) e^{i(k_y - k_x)L} + \alpha \right], \quad (5)$$

donde,  $E_{2,\text{out}}^{\parallel}$  es la componente  $E^{\parallel}$  en la salida del puerto 2 del acoplador y  $E_{\text{in}}^{\parallel}$  es también la componente  $E^{\parallel}$  a la entrada del puerto 1. De la misma forma, si consideramos los campos  $E^{\perp}$ , obtenemos

$$E_{2,\text{out}}^{\perp} = E_{\text{in}}^{\perp} e^{ik_y L} \left[ (\alpha - 1) e^{i(k_x - k_y)L} + \alpha \right]. \quad (6)$$

Así, la potencia de salida en el puerto 2 es  $P_{2,\text{out}} = |E_{2,\text{out}}^{\parallel}|^2 + |E_{2,\text{out}}^{\perp}|^2$ , es decir,

$$P_{2,\text{out}} = P_{1,\text{in}} [1 - 2\alpha(1 - \alpha)(1 + \cos \delta\varphi)], \quad (7)$$

donde  $P_{1,\text{in}} = |E_{\text{in}}^{\parallel}|^2 + |E_{\text{in}}^{\perp}|^2$ . Si despreciamos las pérdidas que pudiéramos tener, la potencia de salida en el puerto 1 está dada por

$$P_{1,\text{out}} = P_{1,\text{in}} - P_{2,\text{out}}, \quad (8)$$

o, lo que es lo mismo,

$$P_{1,\text{out}} = 2P_{1,\text{in}} \alpha(1 - \alpha)(1 + \cos \delta\varphi), \quad (9)$$

donde  $\varphi = (k_y - k_x)L$  es la diferencia de fase que adquieren las componentes del campo al viajar en el lazo del interferómetro,  $P_{1,\text{in}}$  es la potencia de entrada al puerto 1,  $P_{1,\text{out}}$  y  $P_{2,\text{out}}$  son las potencias de salida en el puerto 1 y en el puerto 2, respectivamente.

Es fácil ver que la intensidad de salida de la luz en los puertos 1 y 2 depende del corrimiento de fase entre las ondas (contrapropagantes) ortogonalmente polarizadas en la fibra birrefringente. El corrimiento de fase puede ser cambiado por una acción externa y por lo tanto este interferómetro puede ser usado como un sensor polarimétrico en su configuración convencional. Al mismo tiempo, la intensidad de las salidas no depende de la polarización de la onda de entrada. Esto puede verse claramente en las Ecs. (7) y (9), puesto que el campo en la entrada del interferómetro lo consideramos como dos campos que se propagan ortogonalmente en los ejes principales de la fibra y de esta manera podemos considerar cualquier polarización, y en estas ecuaciones la potencia de salida no depende de la dirección de propagación de los campos de entrada sino de sus amplitudes.

Se puede determinar la profundidad de modulación, la cual se observa debido al cambio de fase de los campos, es decir, al variar la temperatura también se varían los cambios de fase entre los campos y por lo tanto la potencia de salida, dicha potencia variará de su valor máximo a su valor mínimo dependiendo del incremento de temperatura. De acuerdo a lo anteriormente dicho podemos encontrar la profundidad de modulación de la siguiente manera:

$$m = \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} + P_{\text{min}}}, \quad (10)$$

donde  $P_{\text{max}}$  y  $P_{\text{min}}$  son los valores máximo y mínimo de la potencia a la salida. Según (7) la profundidad de modulación en la salida 2 es

$$m = \frac{2\alpha(1 - \alpha)}{1 - 2\alpha(1 - \alpha)}. \quad (11)$$

Podemos observar que la profundidad de modulación  $m$  depende solamente del coeficiente de acoplamiento  $\alpha$  y no depende de otros. La profundidad máxima es igual a 1 y se observa cuando  $\alpha = 0.5$ .

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La operación de este esquema se muestra midiendo la potencia de la salida como función de la temperatura en la fibra. El esquema del montaje experimental discutida en esta

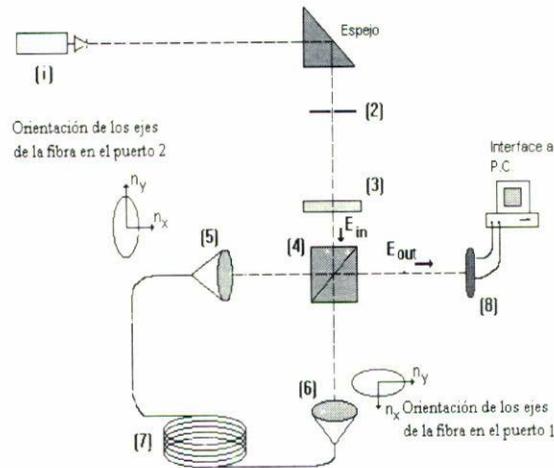


FIGURA 2. Montaje experimental.

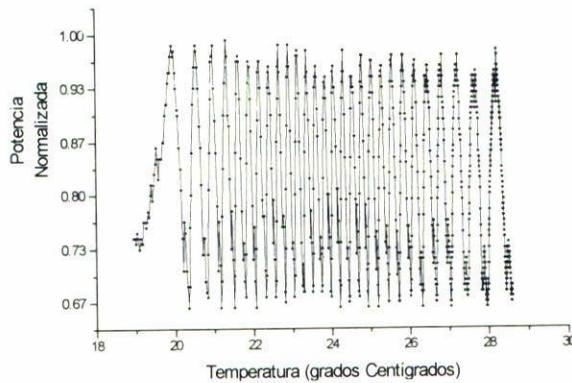


FIGURA 3. Dependencia de la potencia de salida con respecto de la temperatura.

presentación se muestra en la Fig. 2. Este montaje experimental consta de un láser semiconductor de longitud de onda de 780 nm (1), un filtro espacial (2), un retardador ( $\lambda/2$ ) (3), un divisor de la luz insensible a polarización (4), el cual deja pasar el 40% de la radiación y el otro 60% la refleja. Los haces son introducidos a la fibra mediante objetivos de microscopio  $20 \times 0.40$  (5) y (6). La fibra óptica birrefringente (7) es marca Newport, modelo F-SPF, la cual tiene un diámetro de núcleo de  $3.5 \mu\text{m}$ , un diámetro del modo de campo de  $3.5 \mu\text{m}$  a  $4.5 \mu\text{m}$ , y una longitud de 10 m. Un detector de silicio de 10 mm de diámetro (8) se usa para medir la potencia de la luz en la salida del interferómetro. Para variar la temperatura, la fibra se pone en una caja cerrada, con un sistema calefactor en su interior. El divisor de haz tiene la misma función del acoplador y por lo tanto pueden ser usadas las Ecs. (7) y (9) para este caso.

En la Fig. 3 se muestra la dependencia típica de potencia en la salida de la fibra con respecto a la temperatura. Los cambios de temperatura en la fibra producen un cambio en la birrefringencia de la fibra y esto a su vez provoca un cambio en la diferencia de fase

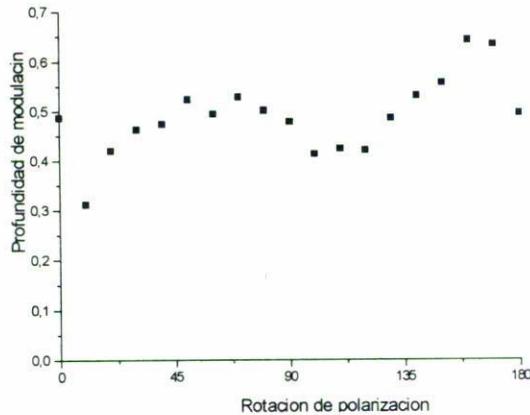


FIGURA 4. Profundidad de modulación con respecto del ángulo de polarización.

entre las ondas polarizadas ortogonalmente. Como resultado, se observa la desviación de la intensidad de la salida de su valor máximo a su valor mínimo. En el intervalo de  $19^{\circ}\text{C}$  a  $21^{\circ}\text{C}$  la temperatura tiene que estabilizarse en el interior del medio donde se encuentra la fibra y esto hace que los cambios en la temperatura sean más lentos y por lo tanto también la frecuencia de la modulación sea más lenta. En el intervalo de  $21^{\circ}\text{C}$  a  $27^{\circ}\text{C}$  la temperatura alcanza su estado de estabilidad, por lo que los cambios en la temperatura empiezan a ser más rápidos (de una manera lineal) al igual que la frecuencia de modulación. En el intervalo de  $27^{\circ}\text{C}$  a  $29^{\circ}\text{C}$  los cambios en la temperatura son más lentos y por lo tanto la frecuencia de modulación es lenta. Por estas razones es que solamente tomamos en cuenta los cambios de temperatura de  $21^{\circ}\text{C}$  a  $27^{\circ}\text{C}$ . Cada período de la dependencia corresponde a un cambio de fase  $2\pi$ . Se puede ver (Fig. 3), que esta fibra tiene un cambio de fase igual a  $7.7\pi/^{\circ}\text{C}$ .

Según la Ec. (11) la profundidad de modulación depende del coeficiente de acoplamiento del acoplador y no debe depender de la polarización de la luz. Para checar experimentalmente que la profundidad de modulación no depende de la polarización de entrada, nosotros variamos el retardador (3) a diferentes ángulos con respecto al eje  $x$ . Al variar el retardador obtenemos diferentes estados de polarización en la entrada de la fibra. Los datos experimentales de la profundidad de modulación con respecto al ángulo de la polarización en la entrada del interferómetro se muestran en la Fig. 4. Se puede ver que la profundidad de modulación es menor que la que resulta según (11) y tiene dependencia pequeña del ángulo de polarización. Probablemente este comportamiento está relacionado con la desviación del coeficiente de introducción de la luz en la fibra. En el experimento el cambio del coeficiente se observa dentro de un intervalo de 0.3–0.5 y esto conduce a considerar el cambio en la profundidad de modulación como despreciable.

#### 4. CONCLUSIÓN

Hemos demostrado que la configuración del interferómetro de anillo con fibra birrefringente y torcida tiene una dependencia del coeficiente de reflexión con respecto a la bi-

refringencia de la fibra. Esta propiedad puede usarse de diferentes modos. Uno de ellos es el desarrollo de sensores. La diferencia de fase puede alterarse por el cambio de la temperatura, como está mostrado en este trabajo, pero también por otros parámetros, como presión, campo eléctrico, etc. Un aspecto característico que da importancia a esta contribución es que no es necesario usar ninguna óptica sensitiva a la polarización y que el interferómetro mismo es insensible a la polarización de la señal de entrada, como se puede ver en la Ec. (11) y en los resultados experimentales de la Fig. 4.

Además, las fases pueden cambiarse por las diferencias de la intensidad de la luz, debido a fenómenos no lineales. Los interferómetros de Sagnac convencionales tiene reflexión alta si la potencia de la luz en la entrada es baja y reflexión baja si la potencia es alta. Esta propiedad da la posibilidad de usar el interferómetro para *switcheo* y en láseres para *mode locking* de pulsos. En el caso de nuestro interferómetro es posible lograr una reflexión pequeña para potencias bajas de la luz y una reflexión grande para potencias altas. Con esta característica invertida es posible ampliar las aplicaciones del interferómetro y, por ejemplo, desarrollar esquemas nuevos de láser de fibra, así como elementos de *switcheo* y filtraje de señales ópticas.

#### REFERENCIAS

1. E. Udd, *Fiber Optics Sensors*, (John Wiley, New York, 1989), p. 226.
2. B.K. Nayar, K.J. Blow, and N.J. Doran, *Optical Computing and Processing* **1** (1991) 81.
3. G. Eichmann and R. Alfano, *Optical Engineering* **25** (1986) 91.
4. J.D. Richardson, R.Y. Laming, D.N. Paine, V. Matsas, and M.W. Phillips, *Electron. Lett.* **27** (1991) 542.
5. A.Y. Stentz and R.W. Boyd, *Electron. Lett.* **30** (1994) 1302.
6. N.J. Doran and David Wood, *Opt. Lett.* **13** (1988) 56.