

# Un nuevo método para medición de birrefringencias bajas en fibras ópticas

B. Ibarra Escamilla<sup>1</sup>, E. Kuzin, J.M. Estudillo Ayala, R. Rojas Laguna y A.L. Adriano  
*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*  
*Apartados postales 51 y 216, 72000 Puebla, Pue., Mexico.*  
<sup>1</sup>*e-mail: baldemar@inaoep.mx*

Recibido el 18 de agosto de 1998; aceptado el 11 de noviembre de 1998

Presentamos un nuevo método de medición de birrefringencias bajas en fibras ópticas. Este método está basado en la torsión de fibra utilizando el interferómetro de Sagnac de fibra óptica, es muy simple y no necesariamente necesitamos utilizar luz polarizada. Se puede usar para la medición una sección de fibra más corta que una longitud de repetición. Se presentan resultados experimentales para una fibra óptica de una longitud de repetición de 2.3 m.

*Descriptores:* Fibra óptica; birrefringencia

We present a new method for measuring low birefringence in optical fiber. This method is based in the twist to fiber used the Sagnac interferometer to optical fiber, it's very simple and does not require use polarization light. A fiber section of a length shorter than the polarization beat length can be used for measurement. Experimental results for an optical fiber with a beat length of 2.3 m are presented.

*Keywords:* Optical fiber; birefringence

PACS: 42.81.Cn; 42.81.Gs

## 1. Introducción

Hay muchos métodos para medir birrefringencia de fibras, pero la mayoría de éstos son para fibras de alta birrefringencia [1, 2]. Muchas de las técnicas experimentales propuestas para medir birrefringencia de fibras utilizan para la medición una sección de fibra de varias longitudes de repetición [3]. Debido a lo anterior es difícil utilizar dichas técnicas puesto que en fibras de baja birrefringencia una sección de varias longitudes de repetición significa usar una sección de fibra de varios metros de longitud. Se ha presentado un método para medición de bajas birrefringencias, basado en la torsión de fibra [4], el cual permite medir birrefringencia de fibras de 0.25 a 80 m de longitud de repetición y utilizan para la medición una sección de fibra más corta que una longitud de repetición. En el método de la Ref. 4 se necesita ajustar el eje de polarización del haz de entrada con alguno de los ejes principales de la fibra, lo cual en la práctica es muy difícil. Aquí presentamos un nuevo método basado en la torsión de fibra utilizando el interferómetro de Sagnac de fibra óptica. Este método es muy simple y no necesitamos ajustar los ejes principales de la fibra con el eje de polarización del haz, además no necesariamente necesitamos utilizar luz polarizada. Examinamos numérica y experimentalmente el uso del interferómetro de Sagnac para la medición de birrefringencias bajas de fibras ópticas.

## 2. Descripción del arreglo

La configuración discutida es presentada en la Fig. 1. Éste consiste de un divisor de haz con relación de división de in-

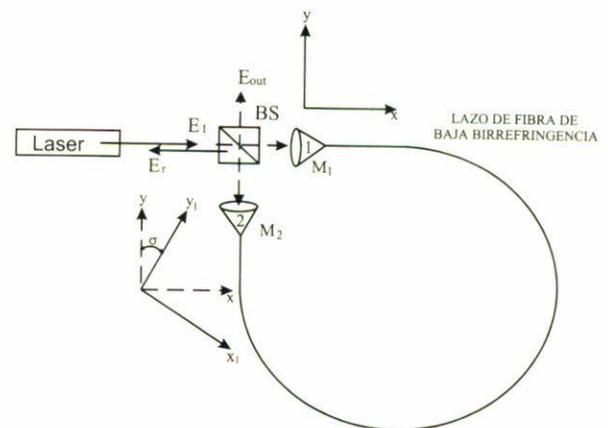


FIGURA 1. Esquema del NOLM bajo discusión.

tensidad de  $\alpha = 0.5/0.5$ . El haz de entrada es introducido al divisor de haz (BS), donde es dividido en dos haces que se hacen incidir en los objetivos del microscopio 1 y 2. Estos objetivos están montados en unos acopladores de fibra óptica (M1 y M2, respectivamente), mediante los cuales se introduce el haz de luz al lazo de fibra de baja birrefringencia, dicho lazo une a estos acopladores de fibra óptica, este lazo de fibra es torcido con un ángulo de torsión de  $\sigma = \tau z$ ,  $\tau$  es la relación de torsión de la fibra (en grados por metro) y  $z$  es la longitud de la fibra. Los dos haces viajan a través del lazo de fibra en direcciones opuestas y salen de los objetivos e inciden en el divisor donde se produce la interferencia, después del divisor tenemos un haz reflejado con un campo eléctrico denominado por  $E_r$  y un haz transmitido con un campo eléctrico denominado por  $E_{out}$ .

### 3. Análisis numérico

La relación general para los campos de salida ha sido obtenida en la Ref. 5. Si el haz de entrada tiene un campo eléctrico dado por  $E_1$ , el campo transmitido  $E_2$  está dado por:

$$E_{out} = \begin{pmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} (2\alpha - 1)J_{xx} & (1 - \alpha)J_{xy} + \alpha J_{yx} \\ -\alpha J_{xy} - (1 - \alpha)J_{yx} & (1 - 2\alpha)J_{xx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{pmatrix},$$

donde  $J_{ij}$  (con  $i, j = x, y$ ) es descrita por la matriz de Jones.

La matriz de Jones para el lazo con fibra de baja birrefringencia puede ser representada como un producto de cinco matrices:

$$J = \begin{pmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{pmatrix} = ABCDE, \quad (2)$$

donde los operadores matriciales  $A$  y  $E$  representan la orientación de los ejes principales de la fibra con respecto a los ejes de laboratorio en las entradas del lazo de fibra en los objetivos 1 y 2, respectivamente, estas matrices son las siguientes:

$$A = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$E = \begin{pmatrix} \cos(\tau z + \theta) & -\sin(\tau z + \theta) \\ \sin(\tau z + \theta) & \cos(\tau z + \theta) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

donde  $\theta$  y  $\tau z + \theta$  son los ángulos de rotación de los ejes principales de la fibra con respecto a los ejes de laboratorio en las entradas del lazo de fibra en los acopladores de fibra óptica M1 y M2, respectivamente. Como solamente torcemos un extremo del lazo de fibra y éste es en M2, entonces el ángulo de rotación en la entrada del lazo en el acoplador de fibra óptica M1 se puede tomar igual a cero, es decir,  $\theta = 0$ .

Por otro lado,  $B$  y  $D$  representan los extremos del lazo de fibra en los acopladores de fibra óptica M1 y M2, respectivamente, y debido a que se colocan en un portafibras para sujetar la fibra, estos extremos no sufren torsión. Estas matrices son

$$B = D = \begin{pmatrix} \exp(-i\delta_l 2) & 0 \\ 0 & \exp(i\delta_l 2) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

donde  $\delta_l = (2\pi\lambda)z\Delta n$  se denomina retardancia lineal,  $\Delta n = n_y - n_x$  es conocida como la birrefringencia lineal y la longitud de repetición esta definida como  $L_b = \lambda\Delta n$  [6].

La matriz  $C$  representa la fibra torcida, esta matriz está dada como

$$C = \begin{pmatrix} P & -Q^* \\ Q & P^* \end{pmatrix}, \quad (6)$$

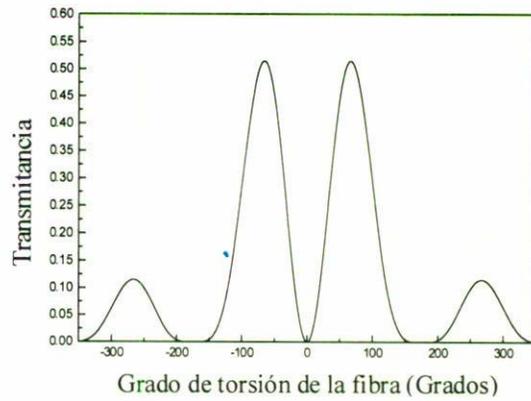


FIGURA 2. Dependencia de la transmitancia de salida contra el grado de torsión de la fibra para una  $L_b = 2$  m y una  $z = 1$  m.

donde

$$P = \cos(\eta z) - \frac{j(\delta_l 2) \sin(\eta z)}{\eta}, \quad (6a)$$

$$Q = \frac{\left(1 - \frac{g}{2}\right) \tau \sin(\eta z)}{\eta}, \quad (6b)$$

$$\eta = (\delta_l 2)^2 + \left[\left(1 - \frac{g}{2}\right) \tau\right]^2, \quad (6c)$$

donde  $g \approx 0.13 - 0.16$  está definido como el coeficiente fotoelástico para fibras de silicio [7, 8]. Ésta es la matriz general de Jones para cualquier fibra torcida uniformemente y sin cambio de la birrefringencia lineal a lo largo del lazo de fibra.

La intensidad transmitida es igual a  $I_{out} = K E_{out}^2$ , donde  $K$  es una constante que depende de las unidades que se estén utilizando. La transmitancia de salida es igual a

$$T_2 = I_{out} I_m \quad (7)$$

donde  $I_m = K E_1^2$ .

Las Ecs. (2) a la (6) fueron sustituidas en la Ec. (1) y ésta a la vez se sustituyo en la Ec. (7), la cual fue resuelta numéricamente. En la Fig. 2 se muestra la dependencia de la transmitancia de salida contra el grado de torsión de la fibra para una  $L_b = 2$  m y una  $z = 1$  m. En esta figura podemos observar que dependiendo del grado de torsión que se aplique a la fibra, la transmisión cambia de un primer mínimo igual a cero (este primer mínimo debe de ser cuando no tenemos torsión) a un primer máximo igual 0.52. El ángulo que hay del primer mínimo al primer máximo es de  $68^\circ$ . La longitud de onda que se considero en estas simulaciones fue de  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ .

En la Fig. 3 se muestra la dependencia del primer máximo de transmitancia de salida contra la razón entre la longitud de la fibra  $z$  y la longitud de repetición  $L_b$  (este primer máximo se considera a partir de que la torsión de la fibra es cero y generalmente es el punto donde tenemos máxima transmitancia) para razones de  $z/L_b$  desde 0 hasta 1. En esta gráfica observamos que tenemos el mismo valor de transmitancia para dos diferentes razones de  $z/L_b$ , esto se debe a que depen-

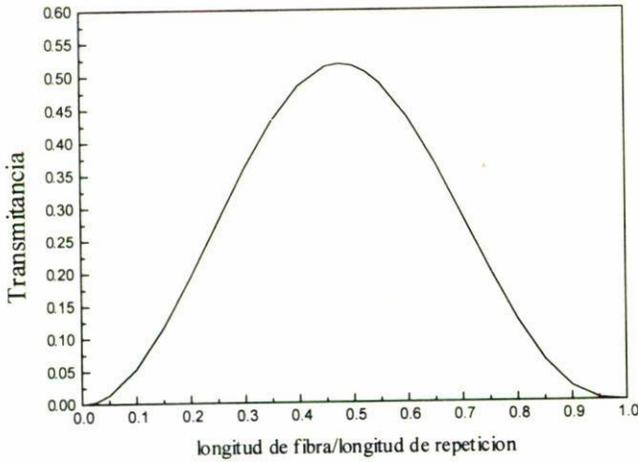


FIGURA 3. Dependencia del primer máximo de transmitancia de salida contra la razón entre la longitud de la fibra  $z$  y la longitud de repetición  $L_b$  para razones de  $z/L_b$  desde 0 hasta 1.

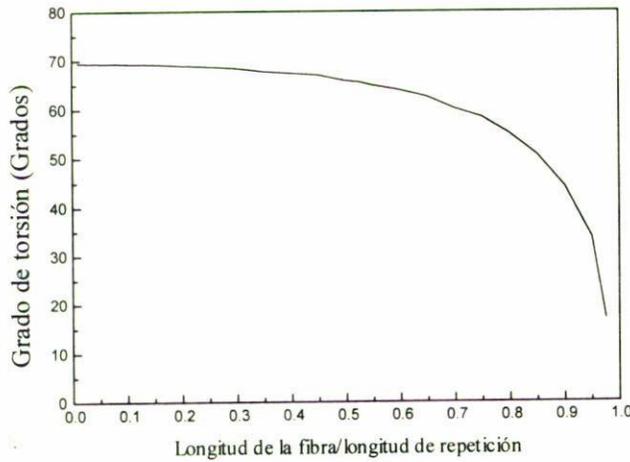


FIGURA 4. Dependencia del grado de torsión contra la razón entre la longitud de la fibra  $z$  y la longitud de repetición  $L_b$ .

diendo del valor de  $L_b$  podemos obtener diferentes transmitancias (desde cero hasta 1). Por ejemplo, para  $0.3L_b$  tenemos una transmitancia de 0.8, para  $0.5L_b$  tenemos una transmitancia de 1, para  $0.7L_b$  tenemos una transmitancia de 0.8 y para  $L_b$  tenemos una transmitancia de 0 [9]. Mediante esta figura podemos encontrar la birrefringencia de una fibra óptica, es decir, experimentalmente podemos obtener la transmitancia máxima con el interferómetro de Sagnac para una longitud de fibra  $z$ , conociendo dicha transmitancia podemos conocer el valor de la razón de  $z/L_b$  con ayuda de la figura, como conocemos el valor de  $z$  podemos obtener el valor de  $L_b$  y finalmente podemos conocer el valor de  $\Delta n$ .

La Fig. 4 muestra la dependencia del grado de torsión contra la razón entre la longitud de la fibra  $z$  y la longitud de repetición  $L_b$ . En esta figura podemos conocer el ángulo de torsión que debemos aplicar a la fibra para encontrar el primer máximo si conocemos el valor de la razón de  $z/L_b$ , es

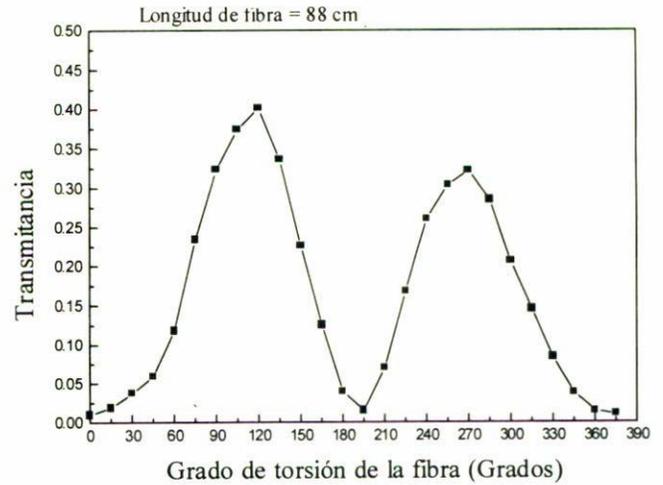


FIGURA 5. Dependencia de la transmitancia contra el grado de torsión para una longitud de fibra de 0.88 m.

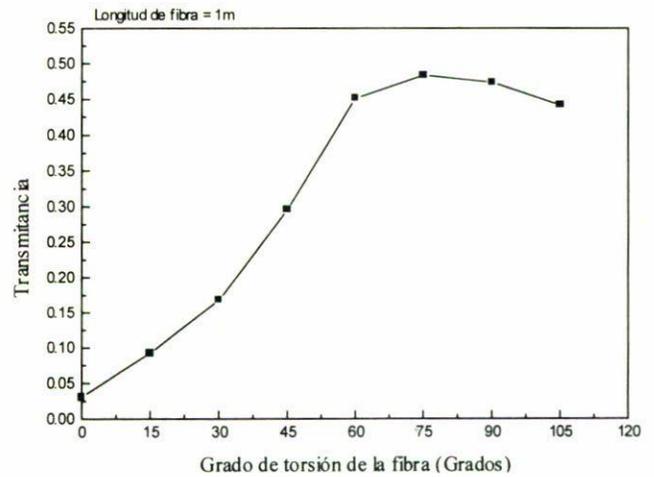


FIGURA 6. Dependencia de la transmitancia contra el grado de torsión para una longitud de fibra de 1 m.

decir, si conocemos la razón de  $z/L_b$  con ayuda de esta figura podemos saber el ángulo con que debemos de torcer la fibra para encontrar el primer máximo.

Experimentalmente utilizamos un láser Nd-YAG a una  $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ , un divisor de haz con una relación de división de intensidad de 0.45/0.40 y una fibra monomodo Newport FS. La Fig. 5 muestra la dependencia de la transmitancia contra el grado de torsión para una longitud de fibra de 0.88 m.

En esta figura observamos que tenemos dos máximos diferentes, esto se debe a que en cada torsión de la fibra se tiene que ajustar la introducción de la luz a la fibra la cual no es la misma para cada torsión, además el intervalo de torsión a torsión es de  $15^\circ$ , lo cual hace más difícil encontrar dos máximos iguales aunque la diferencia de un máximo al otro es relativamente pequeña. Observamos que el máximo de transmisión es de 0.4 a un ángulo de torsión de  $74^\circ$ . Si observamos en la Fig. 3, para una transmitancia de 0.4, la ra-

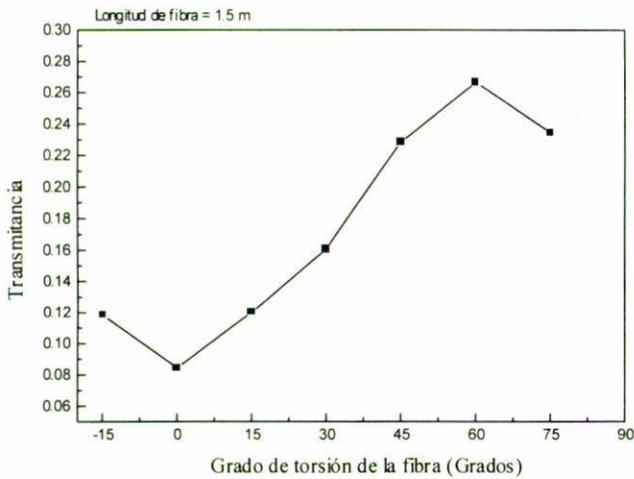


FIGURA 7. Dependencia de la transmitancia contra el grado de torsión para una longitud de fibra de 1.5 m.

zón  $z/L_b = 0.33$ , de donde obtenemos que la longitud de repetición es de 2.6 m. Observando la Fig. 4 encontramos que el ángulo de torsión para esta razón es de  $69^\circ$ , aproximadamente igual que la torsión aplicada experimentalmente. Es importante mencionar que la intensidad de entrada la tomamos como la suma de las dos intensidades que salen de los acopladores de fibra óptica M1 y M2 (ver Fig. 1), esto se debe a que hay mucha pérdida de intensidad (alrededor del 45%) al introducir el haz en la fibra.

En la Fig. 6 se muestra la dependencia de la transmitancia contra el grado de torsión para una longitud de fibra de 1 m. Observamos que el máximo de transmisión es de 0.48 a un ángulo de torsión de  $68^\circ$ . De la Fig. 3 observamos que para esta transmitancia la razón  $z/L_b = 0.4$ , de donde obtenemos que la longitud de repetición es de 2.5 m. Observando la Fig. 4 encontramos que el ángulo de torsión para esta razón es de  $67^\circ$  aproximadamente igual que la torsión aplicada experimentalmente.

En la Fig. 7 se muestra la dependencia de la transmitancia contra el grado de torsión para una longitud de fibra de 1.5 m. Observamos que el máximo de transmisión es de 0.27 a un ángulo de torsión de  $60^\circ$ . De la Fig. 3 observamos que para esta transmitancia la razón  $z/L_b = 0.71$ , de donde obtenemos que la longitud de repetición es de 2.1 m. Observando la Fig. 4 encontramos que el ángulo de torsión para esta razón es de  $60^\circ$  igual que la torsión aplicada experimentalmente.

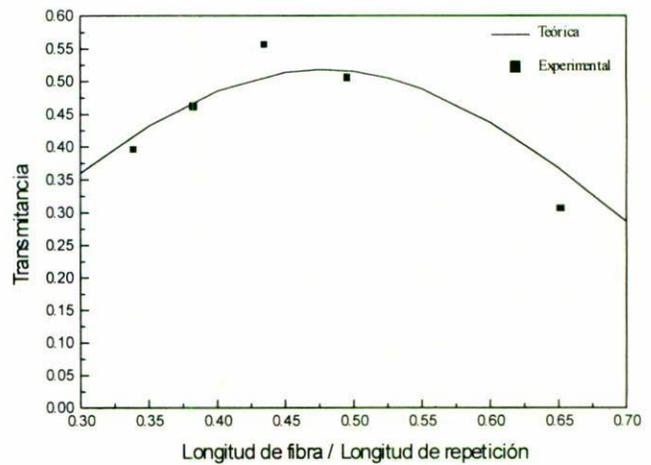


FIGURA 8. Dependencia del primer máximo de transmitancia de salida contra la razón entre la longitud de la fibra  $z$  y la longitud de repetición  $L_b$ .

Finalmente en la Fig. 8 mostramos la dependencia del primer máximo de transmitancia de salida contra la razón entre la longitud de la fibra  $z$  y la longitud de repetición  $L_b$  para razones de  $z/L_b$  de 0.33, 0.4, 0.71, estos datos fueron obtenidos experimentalmente. En esta figura observamos dos gráficas, la de línea punteada que corresponde a los datos teóricos y la de línea continua que corresponde a los datos experimentales. Ambas gráficas son bastante similares, existe una diferencia de aproximadamente el 20% y esto se debe a que de entrada el divisor de haz es de una razón de división de 45/40, es decir, tenemos una pérdida de intensidad de 15%. De los resultados obtenidos deducimos que en promedio para esta fibra tenemos una longitud de repetición de 2.3 m.

#### 4. Conclusiones

En conclusión, hemos presentado un método para medición de bajas birrefringencias en fibras ópticas, con longitudes de repetición mayores a 1 m. El procedimiento de medición es simple y no es necesario usar luz polarizada. Se puede usar para la medición una sección de fibra más corta que una longitud de repetición. El método se probó experimentalmente midiendo la longitud de repetición de una fibra óptica, dicha longitud de repetición fue de 2.3 m.

1. S. Huang and Z. Lin, *Appl. Opt.* **24** (1985) 2355.
2. M. Monerei and P. Lamouler, *Electron. Lett.* **17** (1981) 134.
3. R. Calvani, R. Caponi, and F. Cisternino, *J. of Lightwave Technology* **7** (1981) 1187.
4. A. Rodríguez, A.V. Khomenko, R. Cortés, and A. García-Weidner, *Opt. Lett.* **22** (1997) 877.
5. D.B. Mortimore, *J. of Lightwave Technology* **4** (1988) 1217.

6. Charles Tsao, *Optical Fibre Waveguide Analysis*, (Oxford University Press, 1992), p. 28.
7. R. Ulrich and A. Simon, *Appl. Opt.* **18** (1979) 2241.
8. T.Z. Wolinski and W.J. Bock, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **44** (1995) 707.
9. E.A. Kuzin, et al., *Opt. Commun.* **144** (1997) 60.