

## Sensor diferencial de fibra óptica

J. Tapia-Mercado<sup>a</sup>, A. García-Weidner, M.L. Galindo-Cavazos, A. V. Khomenko, M. A. García-Zarate

<sup>a</sup>Universidad Autónoma de Baja California,

Apartado Postal 1880, Ensenada B.C., 22860, México

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada,

Apartado Postal 2732, Ensenada B.C., 22860, México

Recibido el 12 de mayo de 2003; aceptado el 12 de agosto de 2003

En este trabajo se describe un sensor diferencial de temperatura que usa la técnica de la interferometría de baja coherencia con procesamiento de señales basado en el barrido de fase. El sensor incluye un interferómetro compensado formado por dos secciones de fibra altamente birrefringente, además de un esquema polarimétrico que incluye un prisma Wollaston y un polarizador que permite tener la interferencia entre dos modos ortogonales de polarización de la fibra HB. El sensor permite la medición de la diferencia de temperatura entre dos puntos con alta sensibilidad. El sensor propuesto puede ser utilizado en calorimetría para la medición de potencia de láseres. Se describe la estructura del sensor, el método de procesamiento de señales y se presentan resultados experimentales.

*Descriptor:* Sensores de fibra óptica; interferometría de luz blanca; fibra birrefringente.

A differential temperature sensor employing a low-coherence interferometry technique with signal processing based on phase scanning is described. The sensor is composed of a compensated interferometer formed by two sections of a high-birefringence fiber and a polarimetric scheme, which includes Wollaston prism and polarizer, permitting the interference between two orthogonally polarization modes. The sensor allows the measurements of the difference in temperature, between two points with high sensitivity. The sensor can be used in calorimetry for laser power measurements. The details of the sensor configuration and signal processing method along with experimental results are described.

*Keywords:* Fiber-optics sensors; white light interferometry; birefringent fiber.

PACS: 42.81.-i; 42.81.Gs; 42.81.Pa

### 1. Introducción

Los sensores de fibra óptica basados en la interferometría de luz blanca han probado ser dispositivos convenientes para proporcionar la combinación de medidas con un gran intervalo dinámico y una alta exactitud [1–3]. Otras características importantes son su insensibilidad a las fluctuaciones de potencia óptica y su habilidad para funcionar como sensor multiplexado, lo cual hace estos sensores prometedores para una gran variedad de aplicaciones [3]. El precio que se paga por estas ventajas es la relativa complejidad del procesado de la señal de salida, comparado con el de los sensores convencionales de fibra óptica basados en intensidad. Los sensores interferométricos de baja coherencia permiten determinar el valor del mensurando a través del análisis del patrón de franjas interferométricas en el dominio espectral o en el dominio de fase [2]. En este trabajo se describe un sensor diferencial de temperatura usando la técnica de la interferometría de baja coherencia con procesamiento de señales basado en el barrido de fase. El sensor incluye un interferómetro compensado formado por dos secciones de fibra altamente birrefringente, además de un esquema polarimétrico que incluye como elemento principal un prisma Wollaston que permite tener la interferencia entre dos modos ortogonales de polarización de la fibra birrefringente. El sensor compensado de fibra óptica fue propuesto inicialmente en 1984 por J. P. Dakin con el fin de reducir la sensibilidad del sensor a las fluctuaciones de presión y temperatura ambiente [4]. La compensación de las fluctuaciones se logra al unir dos secciones de igual

longitud de fibra altamente birrefringente con sus correspondientes ejes rápidos rotados  $90^\circ$ . Ambas fibras son expuestas a los mismos cambios de condiciones ambientales, de tal forma que el retardo entre los modos de polarización de una sección de la fibra birrefringente compensa el retardo de la otra. Aunque el sensor polarimétrico de Dakin no se basa en la interferometría de baja coherencia, éste sirvió de inspiración para el desarrollo de varios trabajos de investigación sobre sensores interferométricos de luz blanca que utilizan la idea de compensación de temperatura para medir presión hidrostática y esfuerzos longitudinales sobre la fibra [5–8]. El sensor propuesto en este trabajo permite la medición de la diferencia de temperatura entre dos puntos con alta sensibilidad. El sensor incluye un interferómetro compensado, que en contraste con los esquemas presentados en la literatura, éste sirve para dos propósitos principales: proporcionar la medida de la diferencia de temperatura entre dos puntos y aumentar la sensibilidad del sensor. El sensor diferencial puede ser utilizado en calorimetría; por ejemplo, para la medición de potencia de láseres. Se describe la estructura del sensor, el método de procesamiento de señales y se presentan resultados experimentales.

### 2. Descripción del sensor

El esquema del sensor propuesto es mostrado en la Fig. 1. La fuente de luz es una lámpara de tungsteno de luz blanca. La luz de la fuente pasa por un filtro F, que transmite en la ven-

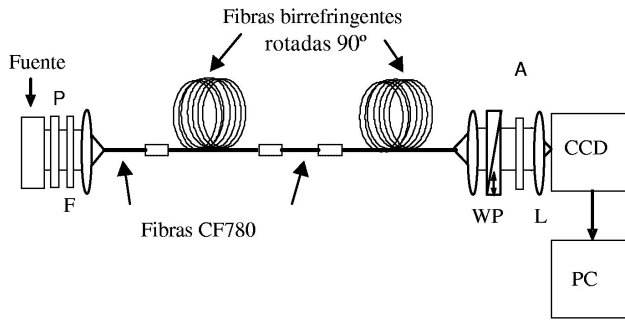


FIGURA 1. Arreglo experimental del sensor.

tana de longitudes de onda de 780 a 900 nm, y por un polarizador lineal P. Posteriormente es acoplada a una fibra monomodo estándar de 10 cm de longitud. La fibra es de la marca Corning Flexor 780, la cual se comporta como monomodo en el intervalo de trabajo. Esta fibra es utilizada para conectar la fuente de luz con la fibra birrefringente. El interferómetro de detección es en este caso un interferómetro compensado. Este último está formado por dos secciones de fibra altamente birrefringente unidas con sus correspondientes ejes rápidos rotados 90°. Es decir, el eje rápido de una fibra debe de estar alineado con el eje lento de la otra fibra birrefringente. Para lograr la alineación de las fibras birrefringentes se utiliza una sección de 10 cm de fibra monomodo estándar cuya torsión permite el ajuste de los ejes hasta lograr obtener el máximo de modulación del patrón de salida. La torsión de la fibra estándar no birrefringente nos provee de un procedimiento de alineación simple y práctico. La fibra birrefringente es del tipo corbata de moño (F-SPF) con una birrefringencia nominal  $\Delta n \geq 4 \times 10^{-4}$ , una longitud de onda de corte  $\lambda = 730 \pm 70nm$ . La longitud de las fibras birrefringentes es de 51 y 53 cm, respectivamente. La medición de la temperatura está basada en el monitoreo de la diferencia en camino óptico de los modos de polarización, el cual es directamente proporcional, en este caso, a la diferencia de temperatura de las dos secciones de fibra birrefringente. La compensación se da en la diferencia de fase obtenida al rotar 90° los ejes rápidos de dos secciones de fibra birrefringente. La luz a la salida del sensor es colimada y pasa a través de un esquema polarimétrico compuesto por un prisma Wollaston (WP) y un analizador de polarización A, el cual permite separar espacialmente dos modos ortogonales de polarización de la fibra y convertir sus polarizaciones a polarizaciones paralelas. Finalmente, los dos rayos que corresponden a los modos de polarización se expanden por una lente L y se superponen con un cierto ángulo  $\theta$  sobre un CCD. Así, la señal a la salida del CCD es equivalente a la señal que puede resultar de un barrido del desbalance del interferómetro. El detector del CCD tiene un arreglo de 1024 elementos sensitivos y puede grabar distribuciones de intensidad de aproximadamente 35 mm de ancho en una computadora para su posterior procesamiento. La intensidad detectada por el CCD está dada por [8]

$$I(x) = I_0(x)[1 + \gamma(x - x_0)\cos(2k_0x\sin\frac{\theta}{2})], \quad (1)$$

donde  $x$  es una coordenada a lo largo del CCD,  $I_0(x)$  es la intensidad promedio en la salida,  $k_0$  es el número de onda,  $\gamma(x - x_0)$  es la función de coherencia de la fuente y representa la envolvente de las franjas de interferencia,  $x_0$  es el punto de compensación del desbalance del interferómetro de detección donde la visibilidad de las franjas del patrón de interferencia tienen su máximo. Cuando la temperatura de la primera sección de la fibra birrefringente se aumenta, el máximo de visibilidad se mueve a la derecha aumentando a su vez el valor de  $x_0$ . Ahora, si el incremento de temperatura es en la segunda sección de la fibra birrefringente, correspondiendo a una diferencia de temperaturas negativa, entonces el máximo de visibilidad es movido a la izquierda. Por esta razón, la posición del máximo de visibilidad nos permite determinar la diferencia de temperatura y su signo. Es sabido que la birrefringencia  $\Delta n$  de las fibras birrefringentes de tensión inducida depende monótonamente de la temperatura de la fibra, al menos para intervalos de temperatura entre 0 y 300°C [9]. En este trabajo se ha utilizado una fibra cuya birrefringencia  $\Delta n$  ha sido determinada en un trabajo anterior [10], para un intervalo de temperatura entre 20 y 140°C, donde se demuestra que  $\Delta n$  puede ser expresada con alta precisión mediante la expresión

$$\Delta n = \alpha(T - T_0), \quad (2)$$

donde  $T$  es la temperatura ambiente,  $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}$  y  $T_0 = 1080^\circ C$ . Esta relación permite conocer la diferencia de fase  $\Delta\varphi$  entre los eigenmodos de polarización de la fibra birrefringente, la cual está dada por

$$\Delta\varphi(\Delta T) = \frac{2\pi}{\lambda}(L_1T_1 - L_2T_2), \quad (3)$$

donde  $L_1$  y  $L_2$  son las longitudes de las secciones de fibra birrefringente, respectivamente;  $T_1$  y  $T_2$  son las temperaturas de estas secciones y  $\lambda$  es la longitud de onda. En el caso de un interferómetro totalmente compensado, cuando  $L_1 = L_2 = L$ , tenemos

$$\Delta\varphi(\Delta T) = \frac{2\pi}{\lambda}\alpha L\Delta T, \quad (4)$$

lo cual nos permite medir la diferencia de temperatura  $\Delta T$ . En otras palabras, la Ec. (4) muestra que el sensor opera como sensor diferencial, es decir, con una sección de fibra funcionando como sensor de referencia y la otra actuando como el sensor expuesto al parámetro físico que se desea estimar. Además de determinar la diferencia de temperatura, es posible conocer también su signo. Este último nos indica qué sección de fibra funciona como la fibra sensora y cuál como la fibra de referencia, permitiendo el cambio de fibra de referencia a sensora y viceversa. Aunque en teoría se requiere que  $L_1 = L_2 = L$ , en la práctica esto es difícil, ya que el proceso del corte de la fibra en el laboratorio genera siempre una pequeña diferencia en las longitudes. Cuando  $L_1 \approx L_2$ , esta diferencia en las longitudes de la fibra no afecta los resultados, ya que sólo provoca un desplazamiento del centro del patrón de interferencia. Con este sensor diferencial se puede realizar el monitoreo de la diferencia de temperatura entre

dos puntos que puede ser útil para calorimetría de flujo. Un ejemplo de un calorímetro de este tipo, desarrollado para mediciones de potencia de láseres, se presenta en la Ref. 11. La ventaja de usar un sensor diferencial en calorimetría consiste en eliminar el esquema de doble sensor propuesto en trabajos anteriores [10, 11], reduciendo así el número de fuentes de luz y agilizando el procesamiento de los datos. El uso del barrido de fase elimina el espectrógrafo.

### 3. Procesamiento de la señal y resultados

El interferómetro de detección ilumina el CCD por una luz proveniente de una fuente de baja coherencia. La iluminación de salida contiene un determinado número de franjas con el máximo contraste localizado en  $x_0$ . El número de franjas y su periodo espacial están controlados por el ángulo entre los dos rayos superpuestos sobre el CCD y por el ancho espectral de la fuente. La diferencia de temperatura  $\Delta T$  modifica la diferencia de camino óptico y, por consecuencia, la posición  $x_0$ . Como se muestra en la Ec. (4), la diferencia de fase  $\Delta\varphi$  en el sensor interferométrico varía como una función de la diferencia de temperatura  $\Delta T$ , provocando el desplazamiento del máximo de visibilidad de las franjas, es decir, el cambio de posición de  $x_0$ . La respuesta del sensor diferencial a cualquier cambio en la temperatura se muestra como un desplazamiento del patrón de interferencia. Una vez que se ha grabado el patrón de interferencia por medio del foto detector CCD, se procede al procesamiento de la señal. La meta principal del procesamiento es determinar la posición del punto de mayor contraste del patrón de interferencia para conocer la diferencia de temperatura  $\Delta T$ . En otras palabras, tenemos que determinar la ubicación del máximo de la función de visibilidad de las franjas  $\gamma(x - x_0)$ . Existen diferentes métodos de procesamiento de interferogramas [12, 13]. El método que utilizamos está basado en el algoritmo desarrollado en nuestros trabajos previos para los sensores con barrido espectral [9]. Para extraer el término del coseno modulado de la intensidad de salida  $I(x)$  y determinar la posición del punto de mayor contraste del patrón de interferencia, se necesita eliminar de la Ec. (1) el factor  $I_0(x)$ . Esto puede hacerse usando una intensidad grabada previamente  $I_0(x)$ , sin embargo, para procesar la señal se ha usado un método más exacto y que no depende de las fluctuaciones de intensidad. Como primer paso en el procesamiento de la señal, ésta es suavizada mediante una convolución con una ventana Hanning con la finalidad de eliminar máximos y mínimos falsos producidos por el ruido. Posteriormente, se calculan dos intensidades auxiliares,  $I_{max}(x)$  y  $I_{min}(x)$ , mediante la interpolación de los máximos y mínimos de la intensidad suavizada  $I(x)$ , respectivamente. Usando estas intensidades auxiliares se puede calcular el término del coseno modulado a través de la siguiente expresión:

$$m(x) = \gamma(\Delta\varphi) \cos(\Delta\varphi) = \frac{2I(x) - I_{max}(x) - I_{min}(x)}{I_{max}(x) + I_{min}(x)}. \quad (5)$$

Las Figs. 2 y 3 muestran los pasos utilizados en el procesamiento de los patrones de interferencia. La Fig. 2a muestra una señal típica del patrón de interferencia. Como muestra la Ec. (1), el patrón de franjas de interferencia es afectado por el perfil de iluminación del CCD. En este caso, las franjas están centradas con respecto al perfil de intensidad de la fuente, pero al presentarse un cambio de temperatura éstas se desplazan hacia la izquierda o la derecha, dependiendo si es positiva o negativa. La Fig. 2b muestra el perfil de intensidad de la señal de salida sin el patrón de franjas de interferencia. La señal normalizada, término cosenoidal modulado  $m(x)$ , se obtiene con la Ec. (5) (Fig. 3a). Para obtener la envolvente de las franjas de interferencia se usa una interpolación cúbica entre los máximos de las franjas de interferencia de 3a, la Fig. 3b muestra el resultado de dicha interpolación. Una vez realizado lo anterior se determina la ubicación del máximo de la función de visibilidad de las franjas  $\gamma(x - x_0)$  para conocer el desplazamiento de fase respecto a la temperatura. Para calibrar la respuesta del sensor a la diferencia de temperatura y determinar su sensibilidad, se colocó una sección de fibra

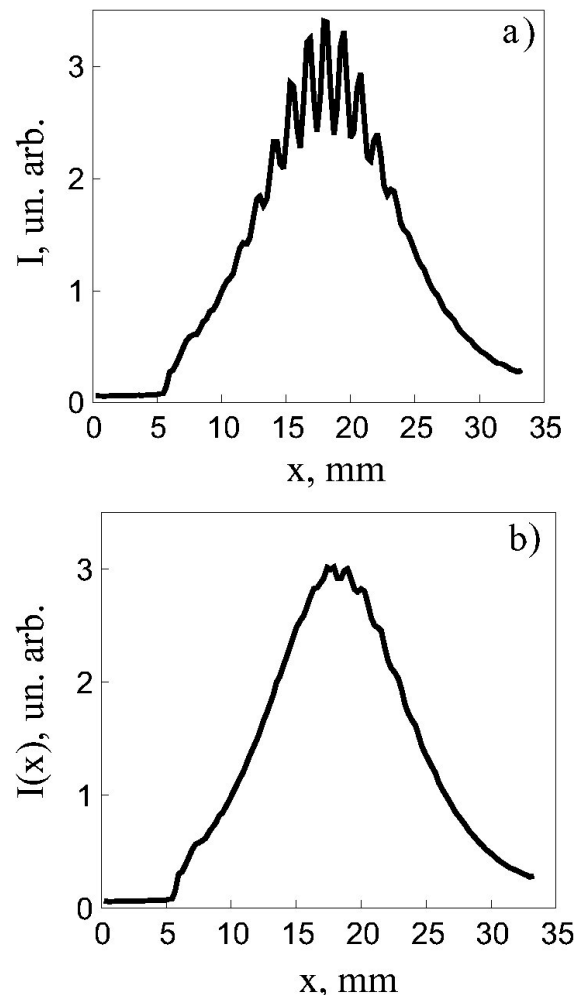


FIGURA 2. a) Patrón de interferencia típico grabado por el CCD , b) intensidad promedio de salida.

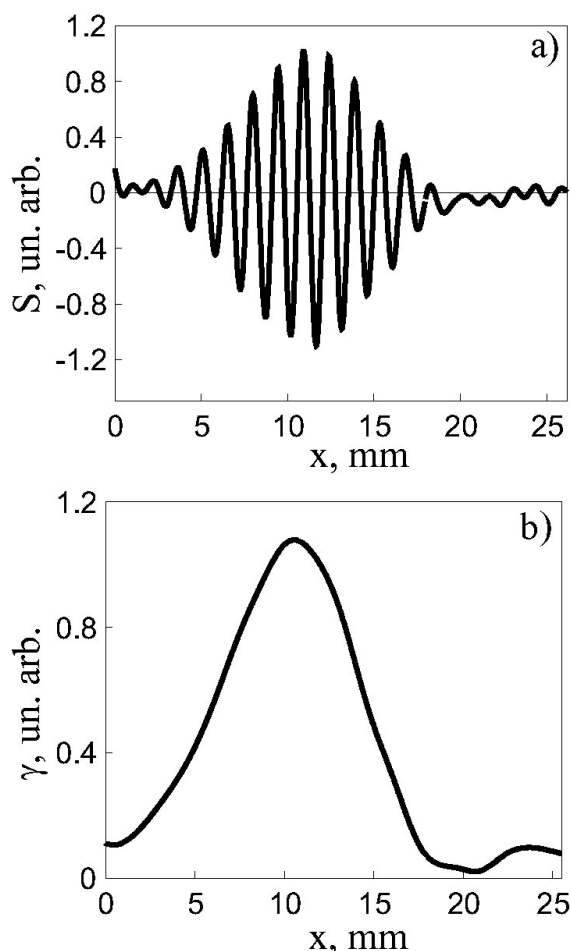


FIGURA 3. a) Señal normalizada, b) envolvente de las franjas de interferencia.

birrefringente en un baño de aceite con temperatura controlada y su respuesta fue medida 100 veces dentro de un intervalo de temperatura entre  $50.3^{\circ}C$  y  $97.7^{\circ}C$ . Es decir, se monitoreó el desplazamiento del máximo de la función de visibilidad de las franjas para conocer el desplazamiento de fase respecto a la temperatura. La sensibilidad del sensor diferencial se puede expresar como

$$S = \frac{\partial x_0}{\partial \Delta T} = \frac{\alpha L}{\text{sen} \frac{\theta}{2}} \quad (6)$$

Experimentalmente se obtuvo que la sensibilidad  $S$  del sensor diferencial es  $S = 0.15 \text{ mm}/^{\circ}C$  para  $L = 50 \text{ cm}$ , que está en buena concordancia con la estimación teórica basada en la Ec. (6). Es importante notar que la Ec. (6) muestra que la sensibilidad del sensor se incrementa con la longitud de la fibra birrefringente. El método de barrido de fase que se está usando en este trabajo no pone límite para la longitud de la fibra, es decir, permite ajustar la sensibilidad del sensor a las necesidades de varias aplicaciones particulares. Esta ventaja no existe para los sensores que utilizan un procesamiento de la señal en el dominio espectral, donde es necesario tener una diferencia óptima en las longitudes de las secciones de las fibras birrefringentes. Como se puede ver a través de la Ec. (3), esta necesidad no permite medir la diferencia de temperatura  $\Delta T$  directamente sin conocer la temperatura de cada sección,  $T_1$  y  $T_2$ . Otro parámetro importante del sensor es el intervalo dinámico, que en este caso es una diferencia máxima de temperatura  $\Delta T_{max}$ , el cual es posible medir con el sensor. Este parámetro está determinado por la longitud  $L$  de la fibra birrefringente y por el tamaño de la zona activa de la cámara CCD. Como se mencionó anteriormente, el aumento de  $L$  aumenta la sensibilidad del sensor, pero simultáneamente disminuye  $\Delta T_{max}$ . Tomando en cuenta el tamaño del detector CCD y la longitud de la fibra  $L = 50 \text{ cm}$ , se estima el intervalo dinámico del sensor como aproximadamente  $100^{\circ}C$ .

#### 4. Conclusiones

Se ha presentado la descripción y la construcción experimental de un sensor diferencial de temperatura usando la técnica de la interferometría de baja coherencia con procesamiento de señales basado en el barrido de fase. Se presentaron los resultados del método de procesamiento de señales y se encontró experimentalmente una sensibilidad del orden de  $0.15 \text{ mm}/^{\circ}C$  con un intervalo dinámico del sensor estimado de  $100^{\circ}C$ . Se espera que el sensor diferencial desarrollado en este trabajo pueda ser útil para aplicaciones en calorimetría.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado parcialmente por los Proyectos 139303-E y 35208-A de CONACYT y 1270 de UABC.

1. H.C. Lefevre, *Proc. 7th Int. Conf. on Optical Fibre Sensors, Sydney* (1990) 345.
2. B.T. Meggitt, *Fiber optic white-light interferometric sensors. Optical Fiber Sensor Technology* editado por K. T. V. Grattan y B. T. Meggitt (Chapman & Hall, London, 1995) p. 269.
3. Y. Rao y D.A. Jackson, *Meas. Sci. Technol* **7** (1996) 981.
4. J.P. Dakin, C.A. Wade, *Electronics Letters* **20** (1984) 51.
5. M.G. Xu, M. Johnson, M. Farhadiroushan y J.P. Dakin, *Electronics Letters* **29** (1993) 378.
6. W.J. Bock, W. Urbanczyk, J. Wojcik y M. Beaulie, *IEEE Trans. Inst and Meas* **44** (1995) 694.
7. W. Urbanczyk, P. Kurzynowski y W.A. Wozniak, *Optik* **104** (1997) 153.
8. W.J. Bock, W. Urbanczyk y M. Zaremba, *Optics Communications* **101** (1993) 157.

9. J. Tapia-Mercado, A.V. Khomenko y A. García-Weidner, *J. of Lightwave Technology* **19** (2001) 70.
10. J. Tapia-Mercado, A.V. Khomenko, A. García-Weidner y M.A. García-Zarate, *Rev. Mex. Fís* **46** (2000) 598.
11. A.V. Khomenko, A. García-Weidner, J. Tapia-Mercado y M.A. García-Zarate, *Optics Communications* **19** (2001) 70.
12. S. Chen, A.J. Rogers y B.T. Meggitt, *Optics Letters* **16** (1991) 761.
13. S. Chen, A.W. Palmer, K.T.V. Grattan y B.T. Meggitt, *Applied Optics* **31** (1992) 6003.
14. R.H. Marshall *et al.*, *J. of Lightwave Technology*, **14** (1996) 397.