

Calorímetro dual de fibra óptica

J. Tapia-Mercado,^{1,2} A.V. Khomenko,¹ A. García-Weidner¹ y M.A. García-Zarate¹

¹Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
Carretera Tij.-Ens. km. 107, Apartado postal 2732, Ensenada, B.C. México

²Universidad Autónoma de Baja California
Carretera Tij.- Ens. km. 106, 22800 Ensenada, B.C. México

Recibido el 25 de abril de 2000; aceptado el 13 de julio de 2000

Se describe un calorímetro de fibra óptica con dos sensores de temperatura basados en un interferómetro tipo Sagnac con fibra birrefringente, el cual puede medir potencias láser con gran exactitud. Un sensor mide la temperatura del material absorbente del calorímetro, la cual depende de la potencia de la radiación láser incidente, mientras que el otro monitorea los cambios de temperatura en la cabeza del calorímetro. Los resultados experimentales muestran mediciones de potencia óptica entre 0 y 8 W con una exactitud de 0.3 mW y una constante de tiempo de 5.5 seg.

Descriptores: Calorímetros y sensores de fibra óptica

We describe a fiber-optic calorimeter with two temperature sensors based on a birefringent fiber Sagnac interferometer for high accurate laser power measurements. One sensor measures the absorbers temperature that depends on the power of incident laser radiation, whereas the other one is for monitoring the head calorimeters temperature. Experimental results shown measurements of optical power between 0 and 8 W with an accuracy of 0.3 mW and a time constant of 5.5 sec.

Keywords: Calorimeters and fiber optic sensors

PACS: 07.20.F; 42.81.P

1. Introduction

En estos últimos años los calorímetros de alta sensibilidad se han convertido en un instrumento de gran importancia para diferentes áreas de la industria y la ciencia. Entre estas áreas están el desarrollo de nuevos materiales, como lo son los superconductores de alta temperatura, los nuevos materiales magnéticos y el control de calidad de alimentos, sólo por mencionar algunos. Un área muy importante del uso de los calorímetros es la medición de potencia y energía de láseres. En un calorímetro convencional se genera una señal eléctrica cuando se absorbe la energía de radiación de un láser en la cabeza del sensor [1]. La desventaja de estos calorímetros se evidencia cuando están situados cerca de láseres que operan con altos voltajes o altas frecuencias, ya que en estas situaciones sufren de ruido electromagnético. Algunos de los calorímetros de fibra óptica utilizan a las fibras ópticas como el elemento sensor [1, 2], mientras que en otros tipos de calorímetros se utiliza a la fibra únicamente para tener un acceso óptico de la fuente de luz con el área a sensar [3]. El desarrollo de estos calorímetros se debe principalmente al gran auge que se ha dado en los sensores de temperatura de fibra óptica [4-7]. Los calorímetros de fibra óptica tienen en este caso grandes ventajas debido a la inmunidad de las fibras a la interferencia electromagnética y por ser además medios aislantes.

En este trabajo se describe un calorímetro de fibra óptica con dos sensores de temperatura basados en un interferómetro de Sagnac de fibra birrefringente y en la técnica de interferometría de baja coherencia con barrido espectral.

Un sensor mide la temperatura del material absorbente del calorímetro, que depende de la potencia de la radiación láser incidente. Los cambios de temperatura provocan cambios en la birrefringencia de la fibra que forma el lazo de Sagnac, provocando a su vez cambios en la modulación del espectro de la luz en la salida del interferómetro. Esto nos permite determinar la temperatura mediante el cálculo de la modulación de la fase. El elemento básico del arreglo óptico del sensor es el interferómetro de Sagnac de fibra altamente birrefringente con torsión de $\pi/2$. Este tipo de interferómetro es independiente de la polarización [8] y elimina la necesidad de utilizar cualquier óptica de polarización en el arreglo del sensor y además permite el uso de una fuente de luz no polarizada.

2. Principio de operación

Todos los calorímetros de esta clase tienen en común el hecho de absorber una fracción de la radiación incidente, lo cual causa un incremento en la temperatura. Dependiendo del tipo de calorímetro, este incremento de temperatura provoca varios efectos secundarios. También tienen en común que para alcanzar una máxima absorción de la radiación, éstos tienen que estar pintados de negro, esto es, son altamente absorbentes para un amplio intervalo de longitudes de onda. Consecuentemente, esta característica los hace esencialmente no selectivos en el espectro cromático y preferentemente apreciados para radiometría.

Uno de los primeros modelos de un calorímetro de fibra óptica para mediciones láser fue propuesto por Hirose *et al.* en 1987 [9]. En este trabajo se mostró que si la potencia P de

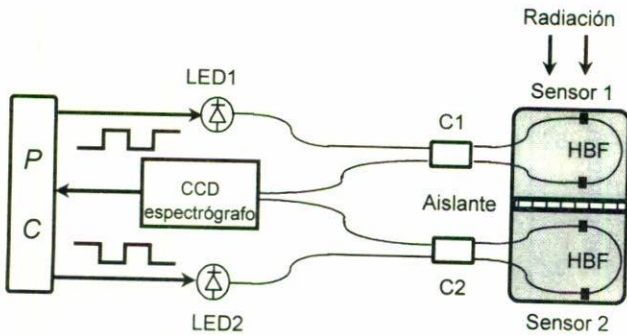


FIGURA 1. Arreglo experimental del calorímetro.

radiación de un láser incide sobre una longitud L de una fibra óptica, entonces el incremento de temperatura alcanzado ΔT está dado por la ecuación

$$\Delta T = \frac{a}{\rho} P (1 - e^{-t/\tau}), \quad \tau = \frac{C}{\rho L}, \quad (1)$$

donde a es el coeficiente de absorción de la fibra óptica, ρ es su coeficiente de radiación, C es su capacidad térmica y τ es la constante de tiempo. Esta última constante es uno de los parámetros más importantes en un calorímetro, la cual es una medida de la inercia del sensor y del tiempo de respuesta. En estado estacionario el incremento de temperatura ΔT es proporcional al incremento en la potencia ΔP . Un cambio en la temperatura de la fibra se manifiesta como un desplazamiento de la fase en la señal, principalmente debido a que el cambio de temperatura induce un cambio en la birrefringencia de la fibra que está siendo usada como elemento sensor. Se sabe que las respuestas a las mediciones de temperatura del interferómetro tienen una incertidumbre baja cuando se determina la fase absoluta de la señal de salida, la cual es proporcional a la diferencia de camino óptico. Por esto, para la medición de la temperatura, calculamos la fase del espectro de modulación de la señal usando un método que permite recobrar la información de la fase, con gran precisión, a partir de la intensidad [10].

3. Estructura del calorímetro

La cabeza del calorímetro se muestra por el área sombreada de la Fig. 1. Está formada por dos sensores de temperatura iguales, los cuales tienen la estructura de un interferómetro de Sagnac. Entre los dos sensores se ha colocado un pedazo de cartón corrugado de 4 mm de espesor, el cual actúa como una barrera aislante con la finalidad de aumentar la diferencia entre las temperaturas de los sensores. Cada lazo de fibra birrefringente HBF es introducida en una cubierta de aluminio pintada de negro, cuyo espesor es de $25 \mu\text{m}$ y sus lados miden 4 cm. El lazo de fibra tiene un diámetro de 2 cm y la longitud de la fibra birrefringente es de 40 cm. Ambos sensores están dentro de un recipiente cilíndrico de vidrio pintado de negro, con una ventana de entrada de 2 cm de diámetro, a través de la cual se capta la radiación incidente del láser.

4. Arreglo experimental

La configuración del experimento es mostrada en la Fig. 1. La luz emitida por dos diodos láser LED es introducida a una fibra óptica y es canalizada a los sensores 1 y 2, respectivamente. Los LEDs son similares, tienen un espectro centrado en 890 nm y con un ancho de banda de aproximadamente 100 nm. Los LEDs operan alternadamente mediante unos pulsos de control enviados por una computadora personal PC, lo cual permitirá separar la señal grabada proveniente de los dos sensores. En cada sensor, el interferómetro está formado por un acoplador monomodal con dos puertos (C1 y C2), interconectados mediante una fibra altamente birrefringente (HBF) de 40 cm de longitud enrollada formando un lazo de 2 cm de diámetro. Los acopladores monomodales C1 y C2 son insensibles a la polarización y tienen una razón de división de 50:50 para una longitud de onda de 850 nm. La parte sensible del sensor 1, que está constituida por el lazo de fibra birrefringente HBF, fue encerrado con una envoltura de papel aluminio pintado de negro, el cual funciona como un absorbente de luz no selectivo. Ambos interferómetros fueron montados dentro de la cabeza del calorímetro. El material absorbente fue expuesto a la radiación incidente a través de una ventana, mientras que el sensor 2 fue colocado justo atrás del sistema absorbente con la finalidad de monitorear la temperatura dentro de la cabeza de la sonda. Los puertos de salida de los interferómetros fueron conectados a un espectrógrafo CCD por medio de una fibra monomodal. El CCD tiene un arreglo de detectores de 1024 elementos sensibles y con esto se puede grabar en una computadora personal un espectro de aproximadamente 150 nm de ancho de banda, para posteriormente procesar la información de la señal. El espectro a la salida del sensor tiene una modulación cosenoidal, debido a la interferencia de los modos de polarización ortogonales de la fibra birrefringente torcida. La intensidad de salida detectada por el espectrógrafo CCD puede ser escrita como

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)[1 - 2\beta(1 - \beta)](1 + m \cos \varphi), \quad (2)$$

donde $I(\lambda)$ es la intensidad de entrada en el acoplador, β es el coeficiente de acoplamiento de intensidades luminosas, m es la modulación del espectro de salida, $m = 2\beta(1 - \beta)/[1 - 2\beta(1 - \beta)]$, φ es la fase entre los dos eigenmodos de la fibra birrefringente, $\varphi = 2\pi\Delta nL/\lambda$, Δn es la birrefringencia de la fibra y L es la longitud de la fibra birrefringente. El propósito de realizar un procesamiento digital del espectro $I(\lambda)$, es el de calcular la fase φ , la cual está relacionada directamente con la temperatura de la fibra birrefringente. Este procesamiento se realiza por medio del método propuesto en la Ref. 10.

5. Resultados experimentales

Para la calibración del calorímetro, determinamos experimentalmente la dependencia del cambio de temperatura ΔT con respecto a la potencia de luz incidente sobre la cabeza del

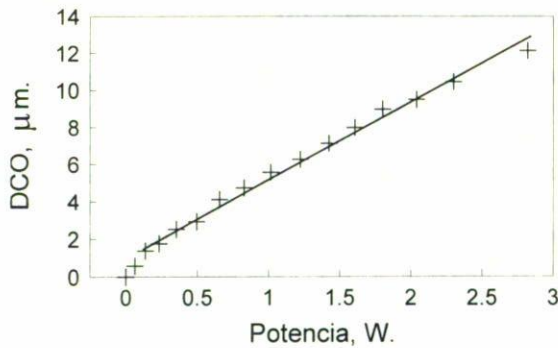


FIGURA 2. Curva de calibración.

calorímetro. Se monitorea el cambio de la diferencia de camino óptico (cambio de fase) en función de las variaciones de la radiación incidente en orden ascendente y descendente. Es decir, se realizan mediciones incrementando la potencia de la fuente externa desde el 10% hasta el 100% de su potencia, y disminuyéndola posteriormente hasta el 5%. Para la calibración usamos una fuente de luz blanca de tungsteno, con un regulador de voltaje que permite controlar la potencia de la luz. Para determinar la potencia incidente al calorímetro se utilizó un detector de potencia con una incertidumbre en las mediciones de 1 mW.

La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos, estos representan la diferencia de camino óptico como una función de la potencia de la fuente incidente sobre el calorímetro. La curva de calibración del calorímetro es estrictamente lineal. La sensibilidad S_c de este calorímetro es bastante aceptable, experimentalmente se obtuvo $S_c = 4.2 \mu\text{m}/\text{W}$.

Usando el método propuesto en la Ref. 10 se tiene que la sensibilidad S_S de los sensores de temperatura es del orden de $S_S = 0.22 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$, es decir, un cambio de un grado en la temperatura corresponde a una variación de $0.22 \mu\text{m}$ en el camino óptico. La Fig. 3 muestra la respuesta de los sensores a la temperatura como una función del tiempo, cuando una luz blanca de 3 W de potencia ilumina el sistema absorbente. Se encontró que la temperatura medida por los sensores se incrementa durante unos cuantos minutos después de haber empezado la iluminación, mientras que la diferencia en la lectura de la temperatura de los sensores se estabiliza en pocos segundos. Esto hace que la diferencia de temperatura sea conveniente para determinar de manera rápida y continua la potencia absoluta. El material absorbente incrementa su temperatura en aproximadamente 19°C por cada watt de radiación incidente, por lo que su sensibilidad S_a es de $S_a = 19^\circ\text{C}/\text{W}$. En la Fig. 4 se muestran las respuestas del calorímetro para diferentes niveles de potencia incidente (1.2 W y 2.1 W). La curva experimental se ajusta muy bien a la relación exponencial $P(t) = P_0[1 - e^{-t/\tau}]$, con $\tau = 5.5$ seg. El tiempo de respuesta obtenido es más grande que el de algunos calorímetros convencionales [11] pero menor en un 50% que el reportado para calorímetros de fibra óptica [9]. Para estimar una medida de la incertidumbre δP , se realizan muchas medidas de una potencia constante y la incerti-

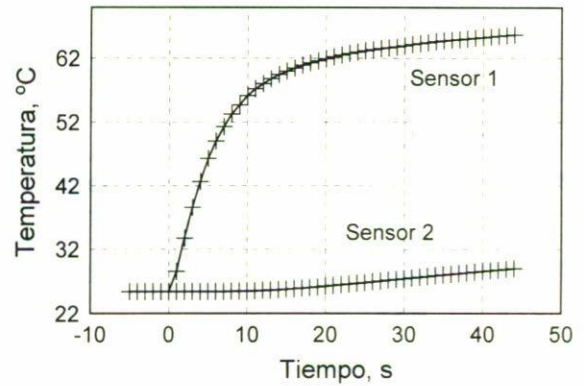


FIGURA 3. Respuesta de los dos sensores de temperatura como función del tiempo.

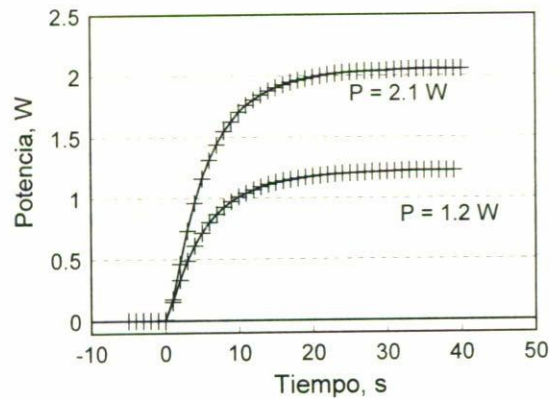


FIGURA 4. Dependencia temporal de las lecturas del calorímetro para dos niveles de potencia incidente.

dumbre fue calculada como la desviación estándar del valor promedio, lo cual nos dio un valor de $\delta P = 0.3 \text{ mW}$. Como se conoce la dependencia de la diferencia de camino óptico con la temperatura, es posible conocer la respuesta del calorímetro a diferentes niveles de potencia de luz incidente. La máxima potencia medible está limitada por la estabilidad de la temperatura en la cubierta plástica de la fibra, y se estima que es de 8 W.

6. Conclusiones

Se ha presentado la descripción y la construcción experimental de un calorímetro de fibra óptica con sensor dual de temperatura para la detección y la realización de mediciones con gran exactitud de potencias láser. Los resultados de los experimentos nos han permitido estimar la sensibilidad, estabilidad y el tiempo de respuesta del calorímetro propuesto. El análisis de éstos muestran principalmente que el orden de sensibilidad es de $4.2 \mu\text{m}/\text{W}$, la constante de tiempo del sensor es aproximadamente de 5.5 seg y la medición de la potencia óptica medida se encuentra entre 0 y 8 W con una exactitud de 0.3 mW. El diseño del sensor dual permite eliminar la influencia de los cambios de temperatura de la cabeza del

sensor provocados por absorción de la luz de alta potencia y por la temperatura ambiente. Ambos sensores están expuestos a las mismas condiciones ambientales, pero sólo uno de ellos está expuesto a la radiación láser cuya potencia se desea estimar; como resultado se logra un calorímetro estable y preciso. El mismo esquema del calorímetro de fibra óptica puede utilizarse para el monitoreo y medición de potencia en longitudes de onda de microondas.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Wolfgang Schmid del Centro Nacional de Metrología por sus valiosas discusiones, a la Subsecretaría de Educación Científica y a la Universidad Autónoma de Baja California por el apoyo PROMEP. Este trabajo fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del Proyecto 26671-A.

1. B. E. Watt, *Appl. Optics* **12** (1973) 2373.
2. T. Kimura, M. Takashima, H. Sakaguchi, and K. Noda, *Elects. and Comm. Part 2* **76** (1993) 25, in Japan.
3. Pepe G. Davis, I. J. Bush, S. Bayliss, and C. Rudy, *SPIE Procc.* **3489** (1999).
4. N. J. Garfield, M. A. Howson, and N. Overend, *Rev.Sci. Instrum.* **69** (1988) 2045.
5. E. A. Kuzin *et al.*, *Optik* **106** (1997) 172.
6. E. De la Rosa, L. A. Zenteno, A. N. Starodumov, and D. Monzon, *Optics Lett.* **22** (1997) 481.
7. J. Tapia-Mercado, A. V. Khomenko, R. Cortés-Martínez, and M. A. García-Zarate, *Optics Comm.* **177** (2000) 219.
8. E. A. Kuzin, H. Cerecedo-Nuñez, and N. Kurneen, *Optics Comm.* **160** (1999) 37.
9. H. Hirose, Y. Yoshida, and S. Kon, *Appl. Optics* **26** (1987) 2461.
10. R. Cortés, A. V. Khomenko, A. N. Starodumov, N. Arzate, and L. A. Zenteno, *Optics Comm.* **154** (1998) 268.
11. S. R. Gunn, *Journal of Physics E: Scientific Instrumentation* **6** (1973) 105.