

CALORÍMETRO LÁSER DE FIBRA ÓPTICA

J. Tapia-Mercado^a, A.V. Khomenko, A. García-Weidner y M. A. García-Zárate.

CICESE/División de Física Aplicada; km. 107 carretera Tijuana-Ensenada, 22860 Ensenada, B.C.

^aUABC/Facultad de Ciencias; km. 106 carretera Tijuana-Ensenada, 22800 Ensenada, B.C., México.

Tel. (6) 1745050, fax (6) 1750553, e-mail: jtapia@cicese.mx

Resumen: Se describe el funcionamiento de un calorímetro láser del tipo conducción, compuesto por un sensor doble de temperatura de fibra óptica. El sensor emplea dos interferómetros de fibra óptica insensibles a la polarización tipo Sagnac, con secciones de fibra birrefringente. La dependencia de la temperatura de las secciones birrefringentes es monitoreada mediante una técnica interferométrica de baja coherencia en el dominio espectral. Se analiza el modelo térmico del calorímetro y se muestra que es posible reducir el tiempo de respuesta, si la potencia láser es medida usando la diferencia $\Delta T = T_1 - bT_2$, donde T_1 y T_2 son las lecturas del sensor doble, b es un factor de escalamiento; permitiendo realizar mediciones aunque la cabeza de la sonda no esté en equilibrio térmico. Además, se realiza el análisis del funcionamiento del sensor para optimizar la sensibilidad y precisión de éste. Se presentan resultados experimentales que confirman los resultados teóricos.

INTRODUCCIÓN

Un calorímetro es cualquier instrumento en el cual la radiación de energía incidente es convertida a calor y medida como tal [1]. Un calorímetro para mediciones láser debe reunir diversos requerimientos; debe tener una responsividad alta con un gran intervalo dinámico y un tiempo de respuesta corto; debe ser compacto y proveer mediciones independientes de la temperatura ambiente; debe también ser sencillo, barato y práctico. Actualmente, el desarrollo de estos calorímetros se debe principalmente al impulso dado por los sensores de temperatura de fibra óptica [2], ya que un calorímetro de fibra óptica tiene grandes ventajas debido a la inmunidad de las fibras a la interferencia electromagnética y, además, por ser medios dieléctricos.

En este trabajo se describe un calorímetro para mediciones de potencia láser que satisface los requerimientos mencionados anteriormente. El calorímetro ha sido diseñado como un calorímetro tipo gradiente con un sensor doble de temperatura de fibra óptica. El sensor está basado en una técnica interferométrica de luz blanca con procesado del patrón de franjas en el dominio espectral [3]. Se analiza el funcionamiento del sensor y se muestra como la sensibilidad depende de los parámetros de los componentes del sensor y del procesado del espectro de salida. Aunque los resultados del análisis pueden aplicarse para la optimización de cualquier sensor interferométrico, este trabajo se enfoca en los sensores basados en el interferómetro de Sagnac que tiene fibra altamente birrefringente con torsión de $\pi/2$ como elemento sensor. Un aspecto importante de este esquema es su insensibilidad a las fluctuaciones de

potencia óptica y a la polarización de la luz. La sonda del calorímetro es compacta, no metálica y puede ser usada para mediciones en un amplio rango de longitudes de onda incluso para mediciones de potencia en microondas.

MODELO DEL CALORÍMETRO LÁSER

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; siendo esto último el efecto principal de los calorímetros. 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, estos tienen que estar pintados de negro, esto es, son altamente absorbentes para un amplio intervalo de longitudes de onda, desde el ultravioleta hasta el lejano infrarrojo. Para eliminar los efectos del cambio en la temperatura ambiente y para mejorar el tiempo de respuesta del calorímetro se usa un diseño de un sensor doble de temperatura. Un sensor mide la temperatura del absorbente, mientras que el segundo sensor se utiliza para monitorear la temperatura en el interior de la cabeza de la sonda. Aunque este sensor no está expuesto a la radiación incidente, su lectura también depende de la potencia a medir.

El cálculo del incremento de temperatura se basa en el modelo de un detector térmico doble, el cual es mostrado en la figura 1. El absorbente de luz con el sensor 1 es representado por una placa, la cual está conectada a una segunda placa que representa la cabeza de la sonda que alberga el sensor de referencia 2. Estas placas tienen una capacitancia térmica C_1 y C_2 , respectivamente, y

el enlace conductor entre ellas tiene una resistencia térmica R_1 . La última placa está conectada a través de un segundo enlace, con resistencia térmica R_2 , a un sumidero de calor que es comparativamente de mayor masa, con capacitancia térmica grande, tal que su temperatura T_0 se mantiene prácticamente constante durante las mediciones. La radiación incidente incrementa la temperatura de las placas, T_1 y T_2 respectivamente, las cuales pueden encontrarse mediante la solución de las ecuaciones

$$C_1 \frac{dT_1}{dt} = P - \frac{T_1 - T_2}{R_1}, \quad (1)$$

$$C_2 \frac{dT_2}{dt} = \frac{T_1 - T_2}{R_1} - \frac{T_2 - T_0}{R_2}, \quad (2)$$

donde P es la potencia de la parte absorbida de la radiación incidente. Si $P(t)$ es una función escalón en $t=0$, las lecturas de los sensores son $T_1 = T_2 = T_0$, entonces las soluciones para las ecuaciones (1) y (2) están dadas por

$$T_1(t) = T_{p1} \left(1 - a_1 e^{-t/t_1} - a_2 e^{-t/t_2}\right) + T_0, \quad (3)$$

$$T_2(t) = T_{p2} \left(1 - a_3 e^{-t/t_1} - a_4 e^{-t/t_2}\right) + T_0, \quad (4)$$

donde $T_{p1} = P(R_1 + R_2)$ y $T_{p2} = PR_2$ son los incrementos finales de temperatura para el primer y segundo sensor, respectivamente. La constante de tiempo t_1 es el tiempo característico para establecer el balance térmico entre los sensores, mientras que t_2 es la constante de tiempo para alcanzar el equilibrio térmico entre la cabeza de la sonda y el sumidero de calor.

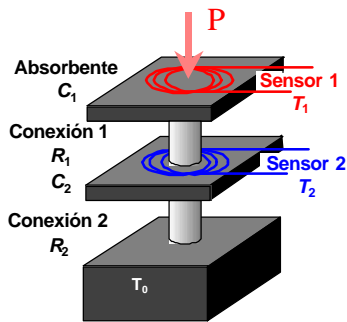


Figura 1. Modelo del calorímetro de fibra óptica.

$$t_{1,2} = \left(p \oplus \sqrt{p^2 - 4C_1 R_1 C_2 R_2}\right) / 2, \quad (5)$$

donde $p = C_1(R_1 + R_2) + C_2 R_2$. Las constantes

$$a_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \text{ están dadas por } a_1 = \frac{d_2 - 1}{d_2 - d_1},$$

$$a_2 = \frac{1 - d_1}{d_2 - d_1}, \quad a_3 = d_1 a_1, \quad a_4 = d_2 a_2 \quad \text{y}$$

$$d_{1,2} = \left(1 - C_1 R_1 / I_{1,2}\right) (R_1 + R_2) / R_2.$$

De estas ecuaciones se puede conocer la diferencia $\Delta T(t)$ entre la lectura del primer sensor $T_1(t)$ y la lectura escalada $bT_2(t)$ del sensor de referencia, donde b es el factor de escalamiento.

$$\Delta T(t) = T_1(t) - bT_2(t) - T_0(1 - b), \quad (6)$$

así que cuando la cabeza de la sonda está en equilibrio con el medio ambiente $\Delta T = 0$. En el caso especial cuando

$$b = \left(1 - \frac{C_1 R_1}{t_2}\right)^{-1}, \quad (7)$$

entonces la condición $a_2 T_{p1} - a_4 T_{p2} = 0$ es satisfecha dejando la expresión para $\Delta T(t)$ solamente con el término exponencial e^{-t/t_1} que tiene la constante de tiempo más pequeña t_1 ,

$$\Delta T(t) = T_p \left(1 - e^{-t/t_1}\right), \quad (8)$$

donde T_p es la diferencia de temperatura final calculada con el factor b , cuando el balance térmico entre los dos sensores es alcanzado, $T_p = PR$, R es la resistencia térmica equivalente de la cabeza de la sonda, $R = R_1 C_2 / (bC_1 - C_2)$. La saturación de la diferencia de temperatura T_p se incrementa linealmente con la potencia óptica absorbida P . Debido a que en la práctica $R_1 \ll R_2$ se tiene comunmente que $t_1 \ll t_2$, esto implica una buena conexión térmica entre la segunda placa y el medio ambiente, así que el monitoreo de T_p nos permite determinar rápidamente la potencia P aunque la cabeza de la sonda no este en equilibrio térmico con el medio ambiente.

ARREGLO EXPERIMENTAL

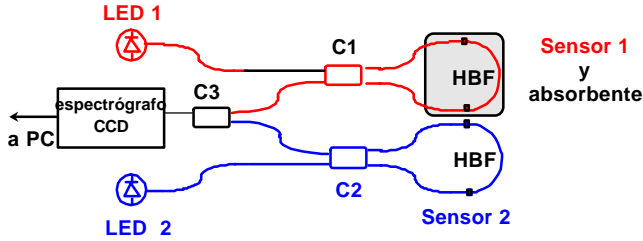


Figura 2. Arreglo experimental del calorímetro.

La configuración del experimento es mostrada en la figura 2. La luz emitida por dos diodos laser 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 permite separar la señal grabada proveniente de los dos sensores. En cada sensor, el interferómetro está formado por un acoplador monomodal con dos puertos interconectados mediante una fibra altamente birrefringente (HBF) de 40 cm de longitud enrollada formando un lazo de 2 cm de diámetro. La longitud de la fibra fue escogida cercana a la longitud óptima para tener la mejor exactitud de las mediciones [4]. 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. Los puertos de salida de los interferómetros son 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 [5]. La intensidad de salida detectada por el espectrógrafo CCD puede ser escrita como

$$I(I) = I_0(I)[1 - 2b(1 - b)](1 + m \cos j), \quad (9)$$

donde $I(I)$ es la intensidad de entrada en el acoplador, b es el coeficiente de acoplamiento de intensidades luminosas, m es la modulación del espectro de salida, $m = 2b(1 - b)/[1 - 2b(1 - b)]$, j es la fase entre los dos eigenmodos de la fibra birrefringente, $j = 2p\Delta nL / I$, 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 $I(I)$, es el de calcular la fase j , la cual está relacionada directamente con la temperatura de la fibra birrefringente. Este procesamiento se realiza por medio del método propuesto en la referencia [6]. Como primer paso, el espectro grabado es suavizado para minimizar el ruido y normalizarlo posteriormente, con el fin de extraer el término de modulación $\cos j$. Para lograr tal cometido se localizan con alta precisión las posiciones espectrales de dos ceros, I_1 y I_2 , en los extremos del $\cos j$ y se cuenta el número de ciclos de modulación entre ellos, N_{12} . La fase de modulación puede ser calculada con gran precisión si el rango espectral del espectro procesado $I_2 - I_1$ y la razón señal ruido SNR satisfacen la condición [6]

$$I_2 - I_1 > \frac{4I}{p\sqrt{\text{SNR}}}. \quad (10)$$

Entonces la fase de modulación en el punto espectral I_0 está dada por

$$j = \frac{2p\Delta n_0 I_1}{n_0 I_0} \left(N + \frac{1}{4} \right), \quad (11)$$

donde N es el orden cero de modulación. Si el arreglo del sensor no satisface la ecuación (10) existe una alta probabilidad de que sea calculada incorrectamente, en este caso la fase j debe ser calculada con baja precisión pero sin ambigüedad. En trabajos previos se ha demostrado que el cambio de la diferencia de camino óptico respecto a los cambios de temperatura es estrictamente lineal en el intervalo de temperatura entre 0 y 300 °C. Para este intervalo, la diferencia de camino óptico (DCO) puede ser expresada como $\text{DCO} = aL(T_f - T)$, donde T es la temperatura ambiente. La responsividad del sensor es para ambos casos, satisfaga o no la condición (10), dada por

$$S = \frac{\partial j}{\partial T} = \frac{2p}{I_0} \frac{\partial(\Delta nL)}{\partial T} \approx \frac{2paL}{I_0}. \quad (12)$$

Se puede observar que la responsividad del sensor de temperatura se incrementa con la longitud de la fibra birrefringente, en este caso $S \approx 1$ rad/°C. En contraste con la responsividad, la incertidumbre es diferente cuando la fase es calculada satisfaciendo o no la condición (10). Cuando el arreglo experimental satisface esta condición se tiene que

$dT \approx 0.002^\circ\text{C}$. Se tiene que $dT \approx 0.07^\circ\text{C}$ con los mismos parámetro del arreglo experimental y con $I_2 - I_1 = 50 \text{ nm}$ [4].

Cabeza de la sonda del calorímetro

Un esquema de la cabeza de la sonda del calorímetro se muestra en la figura 3. La cabeza está formada por dos sensores de temperatura, los cuales tienen la estructura de un interferómetro de Sagnac. Cada fibra birrefringente es enrollada en un lazo de 2 cm de diámetro e introducida dentro de la cabeza de la sonda. La estructura de la cabeza fue hecha de vidrio y plástico.

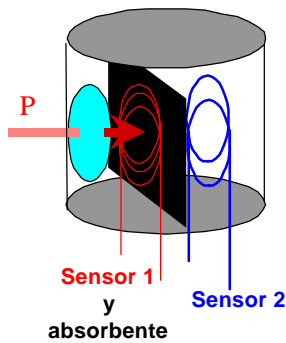


Figura 3. Estructura de la cabeza de la sonda.

El lazo de fibra altamente birrefringente del primer interferómetro fue encerrada en una envoltura pintada de negro, de papel de aluminio o de película plástica. Esta envoltura sirve como un absorbente y fue expuesta a la radiación incidente a través de una ventana de vidrio. El lazo de fibra altamente birrefringente del segundo interferómetro fue colocada atrás del absorbente para monitorear la temperatura dentro de la cabeza de la sonda.

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 calorímetro. Se monitorea el cambio de la diferencia de camino óptico (DCO) 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 fotodiodo como detector de referencia con una

incertidumbre en las mediciones de 1 mW. En el procedimiento de calibración no se tomó en cuenta la respuesta espectral del detector patrón, la cual se necesita considerar para tener una calibración más precisa.

La figura 4 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 calibración del calorímetro es estrictamente lineal. La responsividad S_c de este calorímetro es bastante aceptable, experimentalmente se obtuvo $S_c = 4.2 \mu\text{m}/\text{W}$.

Se tiene que la responsividad 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.

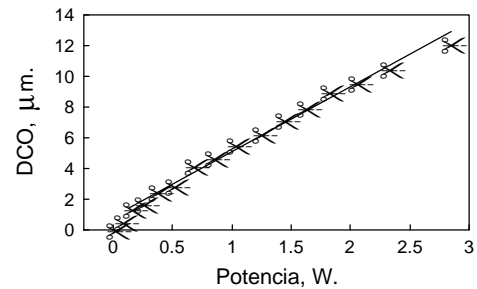


Figura 4. Medición de la linealidad.

La figura 5 muestra las respuestas del calorímetro para diferentes niveles de potencia incidente (1.2 W y 2.1 W) usando como material absorbente una película plástica con $t = 5.5 \text{ seg}$; $b=1.17$ y una repetibilidad de 0.3mW .

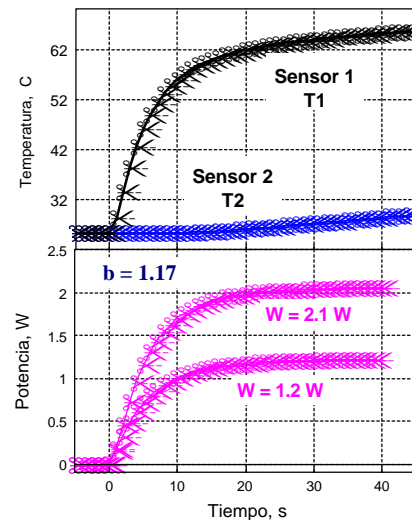


Figura 5. Respuesta del calorímetro usando como absorbente una película plástica.

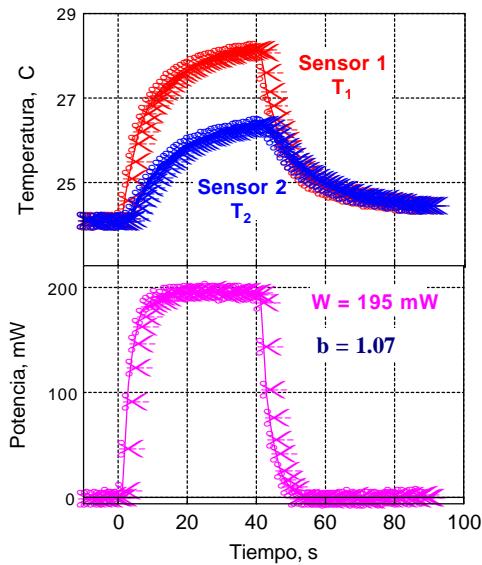


Figura 6. Respuesta del calorímetro usando papel aluminio como absorbente.

La figura 6 muestra los resultados experimentales para un nivel de potencia incidente de 195 mW sobre un material absorbente de papel aluminio pintado de negro con $t = 2.3$ seg, $b=1.07$ y una repetibilidad de 1 mW.

CONCLUSIONES

Se ha presentado la descripción de un calorímetro de fibra óptica con sensor doble de temperatura para la detección y realización de mediciones con gran precisión de potencias láser. Los experimentales nos han permitido estimar la responsividad y el tiempo de respuesta del calorímetro. Se ha realizado un análisis donde se muestra teórica y experimentalmente que el uso como respuesta del calorímetro de la diferencia de temperatura entre los sensores $\Delta T = T_1 - bT_2$, permite reducir el tiempo de respuesta. La constante de tiempo es relativamente pequeña para un detector térmico $t = 2.3$ s y la medición de la potencia óptica medida se encuentra en un intervalo dinámico de 6 W con una repetibilidad de 0.3 mW. Esto permite realizar mediciones aunque la cabeza de la sonda no este en equilibrio térmico. Se han dado expresiones para el parámetro b , donde se muestra que éste es función de la capacidad calorífica y conductividad térmica de los sensores. El diseño del sensor permite eliminar de la influencia de los cambios de temperatura de la cabeza del sensor provocados por absorción de 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

Este trabajo ha sido apoyado parcialmente por CONACyT, México, Proyectos 26671-A y 32249-E. UABC-CICESE, Proyecto 131.

REFERENCIAS

- [1] S. R. Gunn, "Calorimetric measurements of laser energy and power", J. of Physics E: Scientific Instruments, v. 6, 1973, pp. 105-114.
- [2] Pepe G. Davis, I. J. Bush, S. Bayliss, and C. Rudy, "Fiber optic calorimeter", SPIE Procc., v. 3489, 1999, pp. 23-29.
- [3] Y.J. Rao and D. A. Jackson, "Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry", Meas. Sci. Technol., v. 7, n. 7, 1996, pp. 981-999
- [4] J. Tapia-Mercado, A. V. Khomenko, and A. García-Weidner, "Precision and sensitivity optimization for white-light interferometer", J. Lightwave Technol., v. 19, n. 1, 2001.
- [5] E. A. Kuzin, M. A. Basurto-Pensado, B. Ibarra-Escamilla, M. Ramirez-Renero, and H. Cerecedo-Nuñez, "Fiber optic polarimetric type sensors based on the loop interferometer", Optik, v. 106, n. 4, 1997, 172-174.
- [6] R. Cortés, A. V. Khomenko, A. N. Starodumov, N. Arzate, and L. A. Zenteno, "Interferometric fiber-optic temperature with spiral polarization couplers", Optics Comm., v. 154, 1998, 268-272.