

# Caracterización de rejillas de Bragg en fibra óptica

H.H. Cerecedo-Núñez\* y L.A. Zenteno-Sánchez  
*Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., León, Gto.*

G.E. Torres-Cisneros†  
*FIMEE, Universidad de Guanajuato, Salamanca, Guanajuato*

Recibido el 27 de febrero de 1997; aceptado el 27 de enero de 1999

Se reporta la caracterización del espectro de reflexión de rejillas de Bragg cuando en éstas se producen cambios inducidos por temperatura o deformación. Se aplica la teoría básica de filtros interferenciales multicapas para describir el comportamiento de dichas rejillas bajo los cambios mencionados. Con los resultados de esta caracterización se sugiere que mediante el uso de varias rejillas de Bragg es posible construir un sensor de temperatura cuasi-distribuido, y usando sólo una rejilla de Bragg un sensor de deformación o de temperatura. Además, esta misma caracterización nos permite medir los coeficientes termo-óptico de primero y segundo orden, así como el coeficiente elasto-óptico de primer orden, con lo cual a la vez se obtiene un método alternativo para determinar estos coeficientes.

*Keywords:* Fibras ópticas; sensores de fibra; dispositivos de fibra

We report characterization of fiber Bragg grating spectra, subjected to external changes of temperature and strain. We applied the basic theory of dielectric thin film layers to describe the behaviour of gratings under such changes. This characterisation suggests a quasi-distributed temperature or strain sensor. In addition, this characterization allows to measure the first and second order thermal-optic coefficient, and the first order elast-optical coefficient, representing an alternative technique for its determination.

*Descriptores:* Optical fiber; optical fiber sensors; optical fiber devices

PACS: 42.81.-i; 42.81.pa; 42.81.wg

## 1. Introducción

Como sabemos, existen en la actualidad varios tipos de sensores de temperatura. Por ejemplo, el termómetro de mercurio es relativamente exacto ( $\sim 0.5^\circ\text{C}$  de resolución), pero su rango de funcionamiento es limitado ( $\sim -10$  a  $150^\circ\text{C}$ ). Existen también los termómetros de gas que tienen un amplio intervalo de medición y son muy exactos, pero por lo general son grandes o voluminosos, lo cual hace que sea difícil medir temperaturas en regiones pequeñas. También hay los termómetros de resistencia, termistores y termopares, los cuales son compactos y útiles, pero la desventaja de éstos es que son susceptibles a campos electromagnéticos.

Las fibras de sílice ( $\text{SiO}_2$ , bióxido de silicio) son atractivas en aplicaciones como sensores de temperatura. En general, los sensores de fibra óptica son potencialmente atractivos debido a que son compactos, ligeros, confiables, con un rango de medición tan amplio como los convencionales. Además, por ser medios dieléctricos, estos sensores no interactúan con campos electromagnéticos. Sin embargo, en la actualidad, una desventaja de estos es su elevado costo.

Actualmente, existe una gran cantidad de sensores de temperatura con fibra óptica y varias técnicas para sensar. Una revisión de estas técnicas y sensores se puede encontrar en las Refs. 1 y 2.

Con base en la caracterización de las rejillas de Bragg y como una alternativa a las desventajas en el rango de sensado y acceso a medios electromagnéticos<sup>a</sup>, se sugiere la uti-

lización de una arreglo en serie de rejillas de Bragg en fibra óptica como un sensor cuasi-distribuido<sup>b</sup> de temperatura, o bien, un sensor de deformaciones o temperatura.

Este trabajo se divide de la siguiente manera: En la Sec. 2 se da una descripción básica de lo que es una rejilla de Bragg, así como algunos de los parámetros que la caracterizan. También se explica la variación de estos parámetros ante cambios de temperatura y deformación. En la Sec. 3 se explica la caracterización experimental que se realizó ante cambios de temperatura y deformación. En la Sec. 4 se determinan los coeficientes termo-óptico y elasto-óptico mediante las rejillas caracterizadas y, finalmente, en la Sec. 5 se exponen las conclusiones de este trabajo.

## 2. Descripción básica de una rejilla de Bragg en fibra óptica

Una rejilla de Bragg es un arreglo periódico de "placas" o "películas" de dos índices de refracción diferentes, denominados índice de refracción alto  $n_H$  ( $\sim 1.4563$ ) e índice de refracción bajo  $n_L$  ( $\sim 1.456$ ) (ver Fig. 1). Estas rejillas tienen un periodo fundamental  $\Lambda \approx \lambda/2n$ , donde  $\lambda$  es la longitud de onda con máxima reflectividad, llamada longitud de onda de Bragg ( $\lambda_B \equiv \lambda$ ) y  $n$  es el índice de refracción promedio entre  $n_L$  y  $n_H$ . Por ejemplo, una rejilla de  $\lambda_B \sim 1550$  nm y  $n \sim 1.45615$  puede llegar a tener una longitud  $L \sim 10$  mm (o

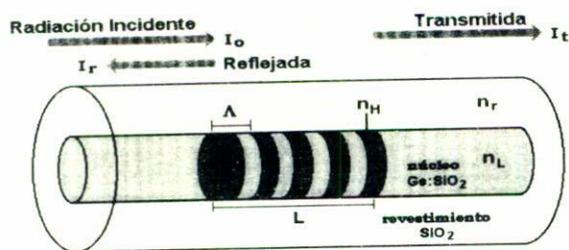


FIGURA 1. Ubicación de una rejilla de Bragg dentro del núcleo de una fibra óptica.

más) con un periodo fundamental de  $\Lambda \sim 532.23$  nm. Este arreglo periódico que compone a la rejilla se forma sólo en el núcleo de una fibra óptica por lo general monomodal (ver Fig. 1), ya que éste es el que contiene las moléculas activantes, que a la vez originan la formación de las rejillas de Bragg [3].

La rejilla de Bragg se puede formar por varios métodos, pero en todos ellos se hace incidir un patrón de interferencia que proviene de una fuente intensa de luz láser ultravioleta sobre el núcleo de la fibra óptica, lo cual produce una modulación del índice de refracción del núcleo de la fibra, o una rejilla de fase en el núcleo de la fibra óptica [3]. El proceso de grabado se lleva a cabo por medio de un efecto de fotosensibilidad [4].

En una explicación simple, la rejilla de Bragg se encuentra colocada dentro del núcleo de la fibra óptica, de tal forma que la luz confinada  $I_o$ , dentro del núcleo de la fibra, incide perpendicularmente sobre las películas que forman la rejilla de Bragg, (ver Fig. 1).

La forma en que operan las rejillas de Bragg es la siguiente: Parte de la luz  $I_o$  que incide sobre ellas es transmitida  $I_t$  y la otra parte es reflejada  $I_r$ , la rejilla de Bragg tiene una alta reflectancia debido a que las placas tienen un espesor óptico de  $\lambda/4$  y por lo tanto los rayos que se van reflejando en cada superficie se encuentran en fase al salir por la primera interfase [5].

El comportamiento de la luz reflejada por una rejilla de Bragg puede describirse considerando a ésta como un ensamble de películas delgadas y haciendo un análisis de la luz reflejada. Rigurosamente, el tratamiento teórico de estas rejillas de Bragg debe hacerse (y se ha hecho) basándose en la teoría de acoplamiento entre modos difractados por las perturbaciones periódicas débiles del índice de refracción en la fibra [6]. Sin embargo en la Ref. 7 se muestra que resulta igualmente correcto el modelamiento de las rejillas de Bragg utilizando la teoría bien conocida de filtros interferenciales multicapas a base de películas delgadas, en el caso de un traslape perfecto del modo fundamental incidente y reflejado de la fibra.

Siguiendo entonces el análisis de la teoría de filtros interferenciales multicapas [7, 8], se obtiene que la longitud de onda reflejada con mayor intensidad por un arreglo de películas delgadas, con un periodo fundamental  $\Lambda$ , está dada por la siguiente relación:

$$\lambda_B = 2n\Lambda, \tag{1}$$

donde  $n_H \approx n_L = n$ , es el índice de refracción de las películas delgadas. A  $\lambda_B$  se le denomina longitud de onda de Bragg. Físicamente, un ensamble de películas delgadas que satisface esta ecuación dará lugar a una alta reflectancia a la longitud de onda especificada por (1), debido a que los rayos reflejados por cada una de las interfases interfieren constructivamente en la superficie inicial.

La utilidad de las rejillas de Bragg para aplicaciones en un sensor de temperatura o deformación se obtiene a partir de la Ec. (1) al considerar en ella los cambios que sufre la longitud de onda de Bragg ante cambios de temperatura o deformación, es decir,

$$d\lambda_B = 2[n\Lambda + \Lambda dn]. \tag{2}$$

Al considerar los cambios por temperatura y deformación en el periodo fundamental y el índice de refracción de la rejilla, esta ecuación se transforma en<sup>e</sup>

$$d\lambda_B = 2 \left\{ n \left[ \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Big|_S dT + \frac{\partial \Lambda}{\partial S} \Big|_T dS \right] + \Lambda \left[ \frac{\partial n}{\partial T} \Big|_S dT + \frac{\partial n}{\partial S} \Big|_T dS \right] \right\}. \tag{3}$$

Normalizando esta ecuación con respecto a la longitud de onda de Bragg a una cierta temperatura de referencia, y después de realizar algunos arreglos [7], se obtiene

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = [\alpha_T + \text{T.O.}]dT + [1 + \text{E.O.}]dS. \tag{4}$$

Lo anterior se realiza con la finalidad de identificar algunos coeficientes y separar términos que dependen de la temperatura y de la deformación. Si ahora,

$$A \equiv \alpha_T + \text{T.O.} = \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Big|_S + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \Big|_S \right] dT$$

y

$$B \equiv 1 + \text{E.O.} = \left[ 1 + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial S} \Big|_T \right] dS$$

entonces

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_B} = A dT + B dS, \tag{5}$$

lo cual expresa la variación relativa de la longitud de onda de Bragg cuando se tienen cambios de temperatura o deformación en una rejilla de Bragg. En esta expresión hemos definido a  $A$  como la suma entre los coeficientes de expansión térmica ( $\alpha_T$ ) y el coeficiente termo-óptico (T.O.) y  $B$  está relacionado con el coeficiente elasto-óptico (E.O.).

Con este resultado podemos ver que es posible utilizar una o más rejillas de Bragg para detectar cambios de temperatura o deformación de un medio externo. Esto, a través de las modificaciones internas que sufran los parámetros de la rejilla, tales como el periodo y el índice de refracción de la rejilla de Bragg. Lo cual nos lleva a la posibilidad de utilizar,

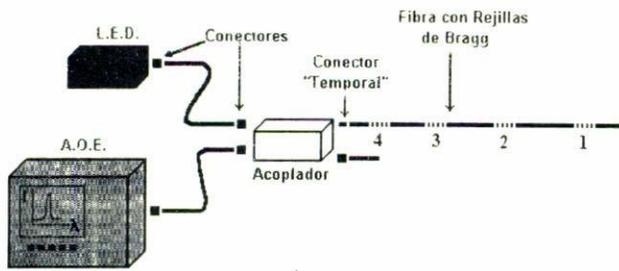


FIGURA 2. Arreglo (con cuatro rejillas) para sensor temperatura.

por ejemplo, varias rejillas de Bragg empalmadas una con otra y utilizarlas como un sensor de temperatura cuasi-distribuido.

En la caracterización experimental que se realizó, y que a continuación se describirá, los coeficientes  $A$  y  $B$  de la Ec. (5) fueron los que se determinaron.

### 3. Caracterización experimental

La caracterización de las rejillas de Bragg ante los cambios de temperatura y deformación se hizo por separado, ya que experimentalmente no es fácil distinguir entre los cambios de temperatura y deformación de una rejilla al mismo tiempo de monitoreo. Por lo que montamos dos arreglos diferentes para medir cada perturbación por separado.

#### 3.1. Caracterización ante cambios de temperatura

Para realizar esta caracterización se tomaron en cuenta cuatro rejillas de Bragg, las cuales se empalmaron por fusión en un orden tal que la intensidad de la radiación incidente en ellas no disminuyera al ir pasando de una rejilla a otra. El arreglo experimental se muestra en la Fig. 2 el cual está formado por un acoplador direccional 50/50 de cuatro puertos. En el puerto de entrada se observa un LED de aproximadamente 100 nm de ancho espectral (centrado aproximadamente en 1550 nm), en el puerto de salida se conecta un analizador óptico espectral (AOE) con un rango de detección de 400 a 1750 nm y con una resolución de 0.1 nm. En el otro extremo del acoplador se conecta el conjunto de cuatro rejillas empalmadas, las cuales se etiquetaron para una mejor identificación. El último puerto del acoplador queda libre y sin efecto alguno.

Lo que nos interesaba investigar era cómo se comportaba el espectro de una de las rejillas ante la presencia de los espectros de las otras. Lo que se hizo entonces fue introducir la luz del LED hacia el acoplador. El acoplador guía parte de la radiación del LED hacia las rejillas, las cuales a la vez reflejan un porcentaje de la luz incidente en ellas. Esta porción de la luz reflejada pasa nuevamente por el acoplador y una parte de ella llega al analizador óptico. En el analizador se observan las características espectrales de cada uno de los espectros reflejados por las rejillas.

Con esto, el primer paso fue someter una las rejillas a cambios de temperatura manteniendo constante la tensión de

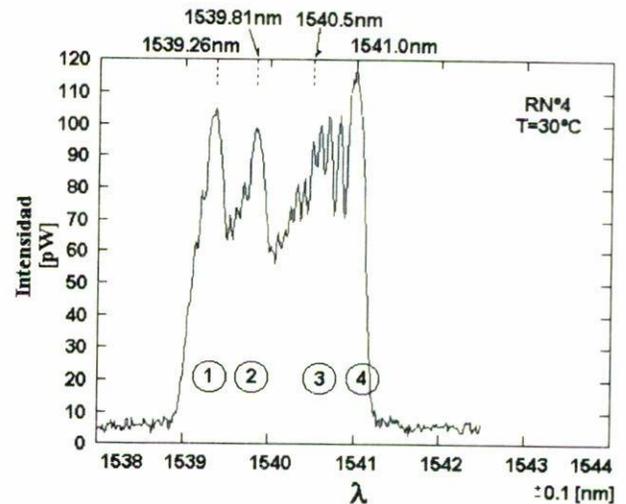


FIGURA 3. Espectro óptico de cuatro rejillas de Bragg a igual temperatura.

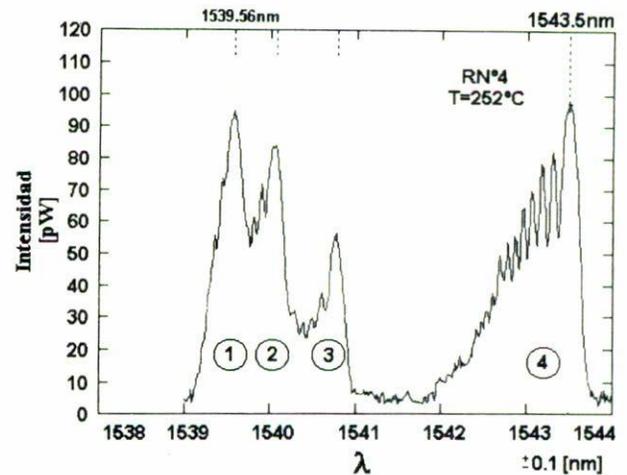


FIGURA 4. Espectro óptico de la rejilla de Bragg No. 4 a 252°C.

las fibras. El espectro en reflexión de las cuatro rejillas se muestra en la Fig. 3, en la cual se observan las longitudes de onda pico de cada una de ellas, a temperatura ambiente ( $\sim 30^\circ\text{C}$ ). El espectro de cada rejilla se etiquetó con un número para una mejor identificación. A continuación, en la Fig. 4, se observa cómo la rejilla No. 4 se separa del conjunto de espectros (de 1541 nm a 1543.50 nm) al incrementar la temperatura de  $30^\circ\text{C}$  a  $252^\circ\text{C}$ . Además, en este espectro se observa un ligero desplazamiento de las otras rejillas, esto se debe a que éstas estaban muy cerca de "la fuente de calor" y, por lo tanto, también se calentaron (aproximadamente  $20^\circ\text{C}$ ). El ancho de banda del espectro de reflexión de cada rejilla es de  $\sim 0.5$  nm y no se observa un cambio apreciable en él, con cambios de temperatura. La Fig. 5 muestra los datos que se obtuvieron directamente de este mismo experimento, en ella se estima una razón de desplazamiento de  $0.01$  nm/ $^\circ\text{C}$ . En esta misma figura se observan dos trayectorias diferentes; es

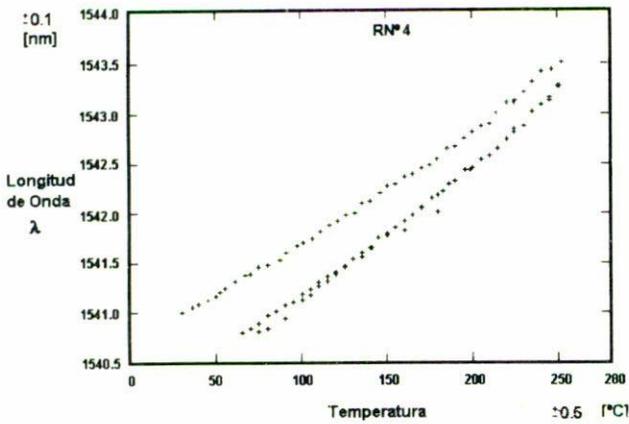


FIGURA 5. Variación de la longitud de onda de Bragg de una rejilla, con cambios de temperatura.

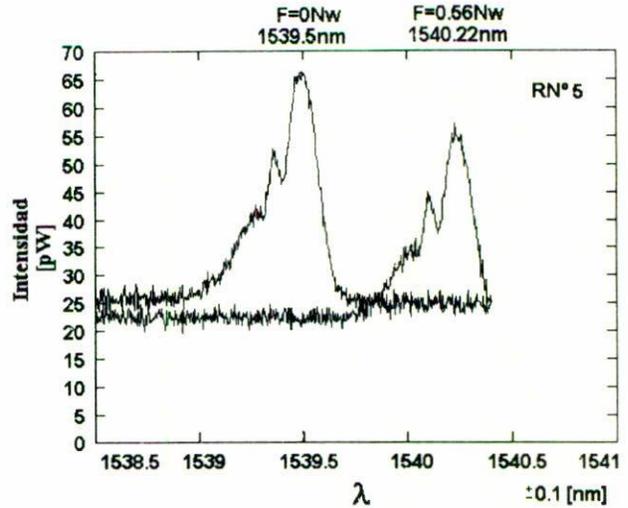


FIGURA 7. Cambio de la longitud de onda de Bragg de una rejilla sometida a tensión externa.

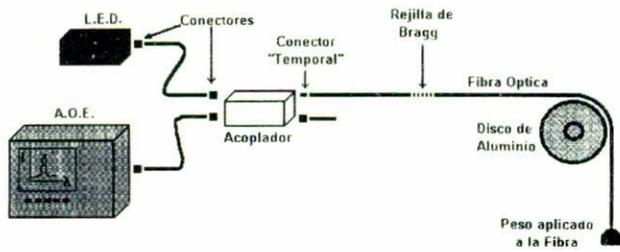


FIGURA 6. Arreglo (con una rejilla de Bragg) para sensar deformaciones.

necesario mencionar que al incrementar por primera vez (trayectoria superior) la temperatura de la rejilla, ésta sufre cambios estructurales internos [3]. Con lo cual, al enfriarse y volver a calentarse ésta sigue una trayectoria diferente (trayectoria inferior) pero definitiva. Esto fue corroborado reproduciendo un par de veces el experimento.

### 3.2. Caracterización ante deformaciones

En un segundo experimento se observó la respuesta de una sola rejilla cuando se somete a cambios de tensión, manteniendo constante su temperatura. El arreglo se muestra en la Fig. 6 y funciona de una manera similar a la descrita en la sección anterior, pero en este caso sólo se utilizó una rejilla de Bragg debido a la fragilidad que presentan. En este caso se monitoreó una rejilla diferente a las utilizadas en el arreglo anterior. En la Fig. 7 se muestra el espectro desplazado desde la longitud de onda de 1539.5 nm (0 Nw), hasta 1540 nm (0.56 Nw) debido a la aplicación de diferentes tensiones en la fibra óptica. Obteniendo de esto una razón de cambio estimada en 0.012 nm/gr ( $1.1 \times 10^{-3}$  nm/ $\mu$ strain). Los cambios de intensidad en los espectros se deben sólo a pérdidas por desajustes en el empalme de la fibra con el acoplador, al momento de aplicar tensión. La Fig. 8 muestra los datos obtenidos directamente del experimento. Se realizaron varias mediciones, comenzando en cada una de ella cuando la fibra se encontraba relajada (sin tensión).

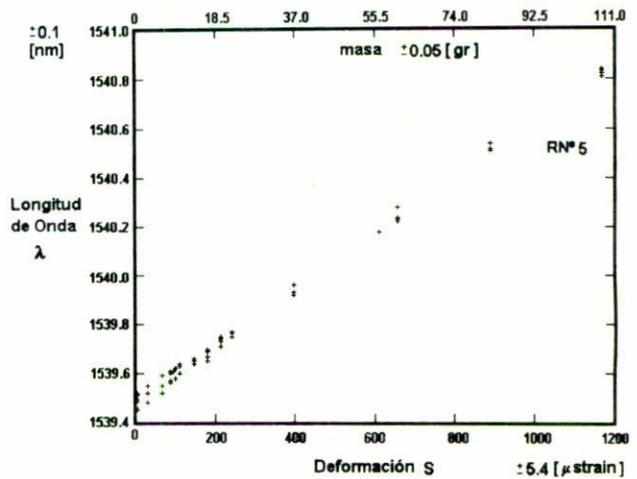


FIGURA 8. Variación de la longitud de onda de Bragg de una rejilla, con cambios de tensión.

### 4. Determinación de coeficientes

A continuación se presenta el análisis de los datos que se obtuvieron en los experimentos antes mencionados. Lo primero que se hizo fue presentar los resultados de una manera diferente a como se obtuvieron; esto con la finalidad de facilitar la interpretación y manejo de ellos.

Partiendo de la Ec. (5), el incremento relativo de la longitud de onda reflejada y el cambio de temperatura, bajo tensión constante, se expresa como

$$\frac{d\lambda}{\lambda_0} = A dT, \tag{6}$$

donde se consideró una longitud de onda de referencia  $\lambda_0 = 1541$  nm a una temperatura de referencia  $T_0 = 30^\circ\text{C}$ . Al expresar los datos de la Fig. 5 en términos de la Ec. (6), se ob-

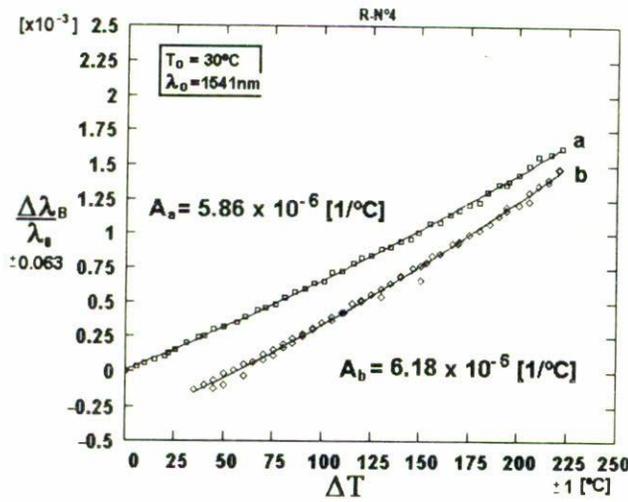


FIGURA 9. Comportamiento experimental de la Ec. (6).

tiene la Fig. 9. En esta figura, los puntos que se observan no se comportan de una manera lineal con la temperatura, por lo que tomamos una corrección ajustando los datos a un polinomio de segundo orden.

Así, para la rejilla No. 4 se realizaron dos ajustes (uno para cada trayectoria), los cuales nos arrojan los siguientes coeficientes lineales:  $A_a = 5.86 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (para la trayectoria superior) y  $A_b = 6.18 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  (para la trayectoria inferior), es decir,

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_0} = b + A dT + A'(dT)^2, \quad (7)$$

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_0} = 2.29 \times 10^{-6} + 5.86 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right) dT + 0.0065 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)^2 (dT)^2, \quad (8)$$

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_0} = -380.77 \times 10^{-6} + 6.18 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right) dT + 0.0095 \times 10^{-6} \left(\frac{1}{^\circ\text{C}}\right)^2 (dT)^2, \quad (9)$$

Por otra parte, la relación entre el incremento relativo de la longitud de onda y el incremento de las deformaciones (a temperatura constante) está dada a partir de la Ec. (5), como

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_0} = B dS. \quad (10)$$

Considerando la longitud de onda  $\lambda_0 = 1541 \text{ nm}$  cuando la fibra se encuentra relajada,  $S_0 = 0 \text{ }\mu\text{strains}$ , y realizando cambios similares a los realizados con los datos de temperatura, se obtiene el coeficiente  $B = 0.7478$ , con un comportamiento lineal. El comportamiento de los puntos se muestra en la Fig. 10; para este caso se obtuvo,

$$\frac{d\lambda_B}{\lambda_0} = -9.75 \times 10^{-6} + 0.7478 dS. \quad (11)$$

TABLA I. Coeficientes de las rejillas caracterizadas.

Rejilla	Coefficiente A	Coefficiente B	Coefficiente T.O.
No. 6 <sup>†</sup>	$6.49 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$		$5.94 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
No. 5	$6.13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	0.7478	$5.96 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
No. 4	(a) $5.86 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (b) $6.18 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$		(a) $5.63 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (b) $5.31 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
No. 2 <sup>†</sup>	(a) $7.12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (b) $6.40 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$		(a) $6.57 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ (b) $5.85 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

<sup>†</sup>Estas rejillas son reportadas en la Ref. 7

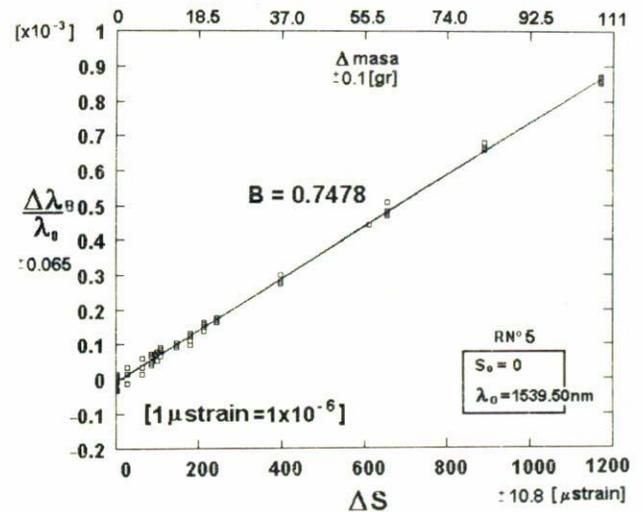


FIGURA 10. Comportamiento experimental de la Ec. (10).

En resumen, de los resultados anteriores podemos hacer estimaciones del valor del coeficiente termo-óptico (T.O.). Considerando de la Ref. 9 el valor del coeficiente de expansión térmica como  $\alpha_T = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  y un promedio aritmético de los valores encontrados del coeficiente A y A' [ver Tabla I y Ec. (7)],  $A = (6.3 \pm 0.2) \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  y  $A' = (0.0089 \pm 0.0036) \times 10^{-6} / (^\circ\text{C})^2$ . Podemos agregar que:

a) El valor estimado del coeficiente termo-óptico (T.O.), utilizando el valor de  $\alpha_T = 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$  y el valor promedio de A, es  $\text{T.O.} \approx 5.75 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ , de donde claramente se ve que  $\text{T.O.}/\alpha_T \approx 10$ .

b) De estas mismas mediciones se puede indicar que el coeficiente termo-óptico a segundo orden es  $d^2n/dT^2 = 2A'n \approx 2.5 \times 10^{-8} / (^\circ\text{C})^2$ . Mientras que en la Ref. 10, con experimentos totalmente independientes a los presentes, se obtuvo que el coeficiente T.O. es  $dn/dT \approx 1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ , comparable a los valores aquí reportados. Más aun, se reporta en esta misma que  $d^2n/dT^2 \approx 1 \times 10^{-8} / (^\circ\text{C})^2$ , también comparable a lo reportado en este trabajo.

c) Finalmente, el único valor reportado del coeficiente B concuerda muy bien con otros valores publicados [11].

## 5. Conclusiones

De los resultados de la caracterización de las rejillas de Bragg podemos concluir que es posible utilizar las fibras ópticas para sensor temperatura o deformación, sobre todo en aquellos medios con campos electromagnéticos y no fácilmente accesibles. Para un sensor de temperatura tendríamos un rango efectivo de, por lo menos,  $-25$  a  $250^{\circ}\text{C}$  con una resolución, en nuestro caso, limitada por el detector y no por el sensor mismo.

Un prototipo de sensor de esfuerzos estaría limitado entre  $0$  Nw y  $1.75$  Nw, ya que la sección transversal de la fibra es muy pequeña y el módulo de Young también lo es. Aun así, podría implementarse éste en mediciones de pequeñas deformaciones, pero con una alta sensibilidad. Además, las medi-

ciones de la longitud de onda de Bragg contra esfuerzo que se realizaron sientan las bases para una futura implementación de un sensor cuasi-distribuido de campo eléctrico a través del efecto piezo-eléctrico.

Se aplicó la teoría básica de películas delgadas. Con este análisis y los resultados obtenidos de los experimentos nos indican que el efecto físico dominante, que causa el corrimiento de la longitud de onda de Bragg  $\lambda_B$ , es precisamente el efecto termo-óptico. Dado lo anterior es razonable suponer que la no linealidad de las curvas observadas a altas temperaturas, sea también atribuible al efecto termo-óptico y el alto valor del coeficiente T.O. ( $dn/dT$ ) asociado a corrimientos de la banda de absorción (en el rango UV) del vidrio [4]; su relación al efecto foto-sensitivo aquí estudiado queda como un problema abierto a investigar.

\* Dirección actual: Laboratorio de Fotónica y Física Óptica, INAOE, A.P. 51 y 216, C.P. 72000, Puebla, Pue.

† Este Artículo está dedicado a la memoria del Dr. Gustavo Torres Cisneros.

<sup>a</sup> Una rejilla de Bragg se forma dentro de la fibra óptica y a la vez ésta está fabricada de un material dieléctrico. Esto permite que dicha rejilla se pueda introducir en medios electromagnéticos sin que exista interferencia o ruido en la información que proporciona.

<sup>b</sup> Es decir, se pueden unir en serie un cierto número de rejillas de Bragg o elementos sensores.

<sup>c</sup> En donde  $S = l/l_o = (1/aY)F$ , está definido como la deformación en la fibra,  $l_o$  es la longitud inicial,  $l$  es la longitud que se deforma,  $a$  es la sección transversal del núcleo de la fibra,  $Y$  es el módulo de Young y  $F$  es la fuerza aplicada normalmente a la sección transversal de la fibra.

1. D.A. Krohn, *Fiber Optic Sensors, Fundamentals and Applications*, (ISA, USA, 1988) Cap. 7.

2. J.P. Dakin, *SPIE* **1797** (1992) 76.

3. Raman Kashyap, *Optical fiber technology* **1** (1994) 17.

4. K.O. Hill *et. al.*, *Annu. Rev. Mater. Sci* **23** (1993), 125.

5. H.A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*, Second Edition, (Mc Graw Hill, New York, 1989), Chapt. 2 and 5.

6. A. Yariv and P. Yeh, *Optical Waves in Crystals*, First edition, (Addison Wesley, USA, 1987).

7. H.H. Cerecedo-Núñez, Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones en Optica, Diciembre de 1995.

8. E. Hecht, *Optics*, Second Edition, (Addison-Wesley, USA, 1987) Chapt. 9, p. 346.

9. T. Alavie *et al.*, *SPIE* **1795** (1992) 194.

10. Takahashi and S. Shibata, *J. Non-Cryst. Solids* **30** (1979) 359.

11. W.W. Morey, J.R. Dunphy, and G. Meltz, *SPIE* **1586** (1991) 216.