

# Sensor láser de fibra óptica con una cavidad de 8.6 km formada por dos rejillas de Bragg usadas como espejos.

M. May-Alarcón, E. A. Kuzin, R. A. Vázquez-Sánchez  
*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica*  
*Apdo. Post. 51 y 216, C.P. 72000 Puebla, Pue., México.*

M. A. Basurto-Pensado  
*Universidad Autónoma del Estado de Morelos*  
*Av. Universidad # 1001; Col. Chamilpa; C.P. 62210*  
*Cuernavaca, Mor., México.*

M. G. Shlyagin, I. Márquez-Borbón  
*Centro de Investigación Científica y de Enseñanza Superior de Ensenada*  
*Ensenada Baja California, C.P. 22860, México*

Recibido el 14 de marzo de 2002; aceptado el 20 de junio de 2002

Se reporta la operación de un sensor láser de fibra óptica formado por una fibra dopada con erbio bombeada a  $980\text{nm}$ ,  $8,67\text{km}$  de fibra pasiva y dos rejillas de Bragg colocadas en los extremos de la cavidad láser. Bajo condiciones normales, las rejillas tienen distintas longitudes de onda de reflexión y no hay generación de emisión láser. Las dos rejillas pueden ser puestas a la misma longitud de onda de reflexión, sometiendo a tensión a la rejilla con longitud de onda de reflexión menor, la cual se usa como el elemento sensor. La generación láser muestra que la rejilla está bajo tensión. Además nuestra configuración nos da la posibilidad de conocer la distancia entre las rejillas midiendo la frecuencia de espaciamiento entre modos del láser. En este trabajo se demuestra que puede ser alcanzada una distancia mínima de  $25\text{m}$  entre rejillas de Bragg consecutivas cuando se analiza el octavo armónico detectado por un analizador de RF.

*Descriptores:* Sensores de fibra; láseres de fibra; amplificadores de fibra dopada con erbio; rejillas de Bragg.

We report the operation of a fiber laser sensor made by an Erbium Doped Fiber pumped at  $980\text{nm}$ , an  $8,67\text{km}$  passive fiber and two fiber Bragg gratings placed at the ends of the laser cavity. Under normal conditions, the Bragg gratings have different reflection wavelengths and laser emission is not generated. The two Bragg gratings can be placed at the same reflection wavelength when the Bragg grating with the lowest reflective wavelength is strained which can be used as a sensor element. The laser generation thus shows that the Bragg grating is under strain. Furthermore, our configuration gives us the possibility for knowing the distance between two Bragg gratings when the laser beating frequency is measured. A measurement precision better than  $25\text{m}$  in  $8,67\text{km}$  is shown to be feasible.

*Keywords:* Fiber sensors; fiber lasers; Erbium doped fiber amplifiers (EDFAs); fiber Bragg gratings.

PACS: 42.55.Wd; 42.60.Da; 42.81.Pa.

## 1. Introducción

Los láseres de fibra óptica han sido diseñados con fibras dopadas con tierras raras debido a su uso potencial en sistemas de comunicación o como sensores [1-3]. Los láseres de fibra dopada con erbio que emiten en la región de  $1,55\mu\text{m}$  han atraído más la atención porque esa longitud de onda coincide con la de la región de menos pérdidas para las fibras de sílice. Un láser de fibra es construido colocando un amplificador óptico de fibra dentro de una cavidad [4], la cual puede tener una configuración de Fabry-Perot [5] o de anillo [6]. Los elementos más comunes para formar cavidades son espejos reflectores y rejillas de Bragg de fibra, éstas tienen amplia ventaja sobre los primeros porque son de naturaleza robusta, tiene capacidad de multiplexaje, ancho de banda de reflexión bastante angosto (del orden de  $0,5\text{nm}$ ) y alta reflectividad. Las rejillas de Bragg pueden ser simultáneamente usadas para formar la cavidad y como elementos sensores de tensión y temperatura [7-13].

En la construcción de sensores remotos con láseres de fibra óptica, la longitud de la cavidad juega un papel importan-

te porque dentro de ella pueden oscilar muchos modos longitudinales, cada uno separado por una frecuencia de espaciamiento intermodal,  $(\nu_F)$ . Esta frecuencia de espaciamiento es inversamente proporcional a la longitud de la cavidad. Para sensado remoto, un láser de fibra que tiene cavidades con diferentes longitudes genera diferentes frecuencias de espaciamiento intermodal. Esas frecuencias pueden ser medidas con un analizador de radio frecuencia (RF) y la longitud de la cavidad puede ser calculada. Un sistema con diferentes longitudes de cavidad puede ser implementado colocando varias rejillas de Bragg en serie. Para distinguir dos rejillas consecutivas, primero es necesario medir experimentalmente el ancho de banda de las frecuencias generadas por la cavidad y después calcular la distancia de mínima entre las rejillas. Un paso previo a la utilización de este arreglo como sensor láser multipunto con cavidad larga es la caracterización del mismo como sensor puntual, midiendo las características de ancho de banda de los armónicos de RF.

En este trabajo reportamos la construcción de un láser de fibra óptica de  $8,67\text{km}$ , cuya cavidad está formada por dos

rejillas de Bragg. El objetivo de este trabajo es medir el ancho de banda del fundamental y los armónicos de la frecuencia de espaciamiento entre modos longitudinales consecutivos y determinar la separación mínima entre rejillas para poder distinguir dos rejillas consecutivas.

## 2. El arreglo experimental

El arreglo experimental es mostrado en la Fig. 1. Un láser de semiconductor a 980 nm de onda continua fue usado para bombear la fibra dopada con erbio. Este láser y la fibra dopada fueron unidos a través de un WDM. La fibra dopada tiene una longitud de 6,5 m y una concentración de iones de erbio de 450 ppm (ppm=partes por millón). La rejilla  $R_1$  fue empalmada por fusión a la fibra dopada, esta rejilla tiene una longitud de onda de Bragg ( $\lambda_{B-1}$ ) de 1536,4 nm y su extremo fue colocado en líquido de inmersión, tetracloruro de carbono ( $CCL_4$ ), para evitar las reflexiones de Fresnel. El WDM permite también hacer la conexión entre la fibra dopada y la fibra pasiva de 8,67 km de longitud. La segunda rejilla ( $R_2$ ) fue conectada a la fibra pasiva a través de un acoplador 90/10 por medio de la terminal que proporciona el 90 % de la señal. Esta rejilla tiene una longitud de onda de Bragg ( $\lambda_{B-2}$ ), la cual es 1.34 nm menor que la  $\lambda_{B-1}$ . La rejilla  $R_2$  se fijó por un extremo y se estiró por el otro con una combinación de resortes y un micrómetro. Al ser estirada la rejilla se genera una tensión longitudinal que hace que varíen las propiedades ópticas de la rejilla en proporción a la tensión aplicada y como resultado final se tiene el corrimiento de la longitud de onda de Bragg. Ésta a su vez varía debido al cambio en la periodicidad de la rejilla y al cambio fotoelástico inducido en el índice de refracción. La translación en longitud de onda para una deformación longitudinal está dada por [2,10]

$$\Delta\lambda = \lambda_B (1 - pe) \varepsilon, \tag{1}$$

donde  $pe$  es la constante fotoelástica efectiva;  $\varepsilon$  es la deformación porcentual ( $\Delta\ell/\ell$ ),  $\ell$  es la longitud de la rejilla de Bragg y  $\lambda_B$  la longitud de onda de Bragg.

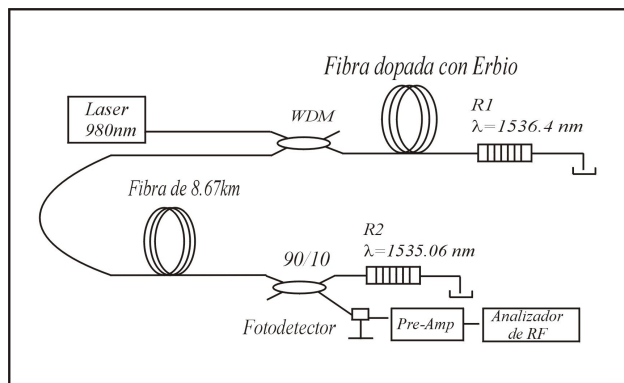


FIGURA 1. Arreglo experimental. La longitud de la cavidad es de 8,67 km. La rejilla  $R_2$  sirve como reflector y como el elemento sensor.

Una vez que las longitudes de onda de trabajo de las dos rejillas son las mismas, se crea una cavidad óptica retroalimentada a la longitud de onda determinada por las rejillas de Bragg. Por lo tanto, el láser de fibra es creado colocando la fibra pasiva de 8,67 km y el amplificador óptico (formado por el láser de bombeo a 980 nm y la fibra dopada) dentro de la cavidad formada por las dos rejillas de Bragg. La longitud de la cavidad es determinada por la separación de las rejillas, ( $L_0$ ), la cual incluye la longitud de la fibra dopada y la de la fibra pasiva. En nuestro arreglo, la longitud de la última es mucho mayor que la de la primera, por lo tanto la longitud de la fibra pasiva es considerada como la longitud la cavidad. El sistema tiene una frecuencia de espaciamiento intermodal inversamente proporcional a  $L_0$  dada por [8]

$$\nu_F = \frac{c}{2nL_0}, \tag{2}$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $n$  es el índice de refracción promedio del sistema. Entonces, la salida láser tiene una frecuencia intermodal ( $\nu_F$ ) y una longitud de onda de emisión láser de 1536,4 nm. La frecuencia de espaciamiento intermodal fue detectada con un analizador de RF con un ancho de banda de 100 kHz.

## 3. Resultados experimentales y discusión

Una vez que  $\lambda_{B-2} = \lambda_{B-1}$ , un haz láser es generado a la salida del sistema, el cual es tomado por la terminal con el 10 % del acoplador 90/10. El haz óptico es medido con un fotodetector de germanio. Esa señal óptica es convertida a una señal eléctrica que es amplificada y después enviada al analizador de RF. Con el analizador se miden las características de frecuencia de espaciamiento intermodal de la señal fundamental y sus armónicos, así como sus anchos de banda. El ancho de banda de los armónicos fue medido con el criterio del ancho de banda completo a la mitad del máximo ( $FWHM$ ). El objetivo de medir el ancho de banda de los picos y en particular el del pico 8 es para determinar la distancia mínima entre dos rejillas consecutivas cuando se quiere aplicar este sensor como un sensor multipunto. El pico 8 es de interés porque es el máximo pico que se puede detectar con el analizador de RF y además su ancho de banda está dentro del mismo rango que los otros picos.

En la Fig. 2 se observan 8 picos centrados a frecuencias armónicas de la señal fundamental. El pico 1 (P1) se ubica a una frecuencia experimental,  $\nu_{F1-E} = 11,75$  kHz, la cual está en concordancia con la frecuencia intermodal teórica,  $\nu_{F1-T} = 11,78$  kHz. Esta última fue calculada a partir de la Ec. (2) con  $n = 1,468$  y  $L_0 = 8,67$  km. En la Fig. 2 se muestran 8 picos porque el ancho de banda ( $BW_{RF}$ ) del RF

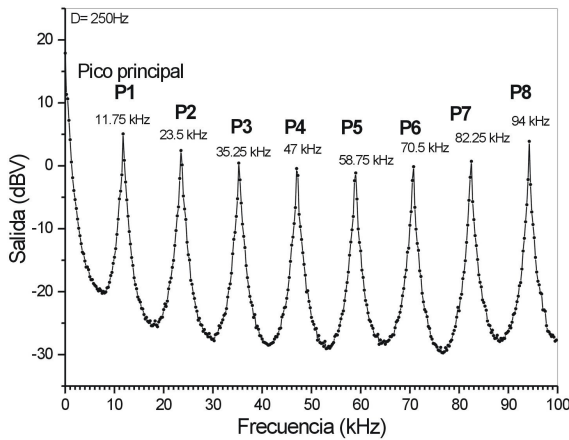


FIGURA 2. En esta gráfica son mostrados el pico principal y sus armónicos para una longitud de cavidad de 8,67 km.

es de 100 kHz y el número de picos mostrado es determinado por la razón del ancho de banda con la frecuencia fundamental (11,75 kHz). La resolución del sistema fue determinada por la razón del ancho de banda del RF con el número de datos muestreados (400). Por lo tanto, para un ( $BW_{RF} = 100$  kHz) se tiene una resolución de  $250\text{ Hz}$  entre dato y dato. Ya que se tiene muy baja resolución con los datos anteriores, se midió cada uno de los picos utilizando un ancho de banda del RF menor ( $BW_{RF} = 6,25$  kHz), por lo tanto la resolución fue de  $15,625\text{ Hz}$  entre dato y dato. En la Fig. 3 se muestran los resultados para el pico 8, P8, el cual se encuentra centrado a 94,218 kHz con un ( $BW_{P-8} = 266$  kHz). De lo anterior se observa que disminuyendo el  $BW_{RF}$  se obtiene mayor resolución. El octavo pico corresponde a una frecuencia fundamental de 11,777 kHz. La diferencia entre las frecuencias experimentales de la fundamental de 11,78 kHz y de 11,75 kHz es que la primera fue tomada usando una resolución mayor. El valor promedio de la frecuencia de espaciamiento intermodal experimental fue de 11,78 kHz con una desviación estándar de 7,3 Hz. El objetivo de medir el ancho de banda de los picos ocho (P8) es porque al determinar experimentalmente su ancho de banda podemos entonces colocar una o varias rejillas cerca de la rejilla R2 y poderlas distinguir individualmente con una diferencia de frecuencia de 266 Hz. Entonces, para distinguir teóricamente dos picos cerca del pico 8 ( $(11,78\text{ kHz})(8) = 94,24\text{ kHz}$ ) con una diferencia de frecuencia de 266 Hz tenemos que agregar un tramo de fibra determinado por

$$\Delta L_0 = \frac{2nL_0^2}{Nc} \Delta \nu_F. \tag{3}$$

Esta ecuación surge tomando la variación de la frecuencia intermodal con respecto a la longitud de la cavidad y donde  $N$  es el número de pico usado para distinguir dos rejillas consecutivas. Para el caso de  $N = 1$  y  $\Delta \nu_F = 266$  Hz tenemos un  $\Delta L_0 = 195$  m, mientras que para  $N = 8$  y el mismo  $\Delta \nu_F$  se tiene un  $\Delta L_0 = 25$  m. Observamos que entre más grande es el número de los picos ( $N$ ) podemos colocar menor canti-

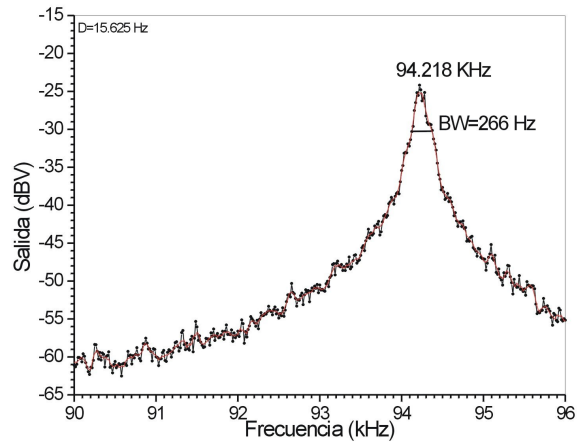


FIGURA 3. El pico ocho es mostrado cuando la rejilla R2 es estirada y se encuentra a la misma longitud de onda que R1.

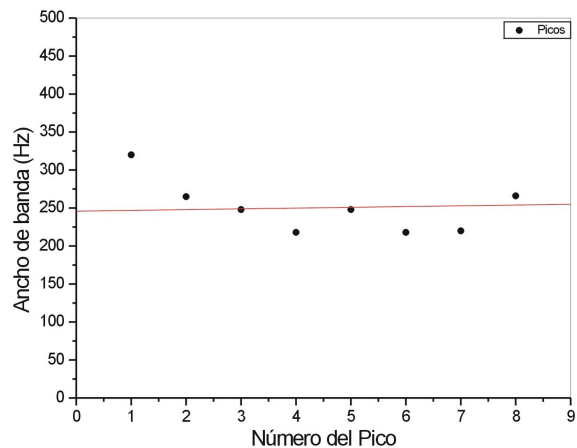


FIGURA 4. En esta gráfica se muestra el ancho de banda para la frecuencia intermodal  $\nu_F = 11,78$  kHz y sus armónicos.

dad de fibra para distinguir dos rejillas independientemente. En la Fig. 4 se observa que el ancho de banda de la frecuencia intermodal y los armónicos es en promedio de 250 Hz.

### 4. Conclusiones

Hemos construido un láser de fibra colocando un amplificador óptico de fibra dentro de una cavidad formada por dos rejillas de Bragg. Como era de esperarse, la frecuencia intermodal fue inversamente proporcional a la longitud de la cavidad. Se ha comprobado que la frecuencia de espaciamiento intermodal experimental está en concordancia con la frecuencia intermodal teórica. El ancho de banda de los armónicos fue determinado experimentalmente y se encontró que es de 250 Hz. Para ese ancho de banda y para el pico 8 se encontró un  $\Delta L_{\text{mín}} = 25$  m para distinguir dos rejillas independientemente. Como  $\Delta L_{\text{mín}}$  depende del número de armónicos detectados por el RF, se puede tener menor distancia entre rejillas de Bragg analizando armónicos de mayor orden con

otro analizador de RF con ancho de banda más grande. Con la caracterización del sensor láser de fibra se tiene la posibilidad de construir un sistema multipunto, donde cada rejilla de Bragg tendrá la doble función de determinar la longitud relativa de cavidad y de ser el elemento sensor. Este sensor láser

puede ser aplicado para detectar fugas de gasolina, porque no genera chispas cuando las rejillas son estiradas (colocadas junto con un polímero que se expande al contacto con la gasolina) haciendo que este sistema active una alarma si un proceso se corrompe.

- 
1. G.A. Ball, W.W. Morey and P.K. Cheo, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** (1993) 267.
  2. T.A. Alavie, S.E. Karr, A. Othonos and R.M. Measures, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** (1993) 1112.
  3. J. Azaña, M. A. Murriel, L.R. Chen and P.W.E. Fellow, *J. Lightwave Technol.* **19** (2001) 646.
  4. G.P. Agrawal, *Applications of nonlinear fiber optics*, (Academic Press, San Diego, California 2001). Chapter 5, pp. 201.
  5. D. Johlen, P. Klose, H. Renner and E. Brinkmeyer, *J. Lightwave Technol.* **18** (2000) 1575.
  6. L. Talaverano, S. Abad, S. Jarabo and M. López-Amo, *J. Lightwave Technol.* **19** (2001) 553.
  7. G.A. Ball, G. Meltz and W.W. Morey, *Opt. Lett.* **18** (1993) 1976.
  8. A.D. Kersey and W.W. Morey, *Electronics Lett.* **29** (1993) 964.
  9. A.D. Kersey and W.W. Morey, *Electronics Lett.* **29** (1993) 112.
  10. S.M. Melle, A. T. Alavie, S. Karr, T. Coroy, K. Liu and R.M. Measures, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** (1993) 263.
  11. M.A. Basurto-Pensado, E.A. Kuzin, C. Archundia-Berra, E. Marroquín, M. May-Alarcón, H.H. Cerecedo-Nez and J.J. Sánchez-Mondragón, *Rev. Mex. Fís.* **46** (2000) 190.
  12. M.A. Basurto-Pensado, E.A. Kuzin, M. May-Alarcón, E. Molina-Flores, D. Tentori-Santa-Cruz, S. Miridonov and M. Shliagin, *OPTIK* **111** (2000) 5.
  13. A. Othonos, A.T. Alavie, S. Melle, S.E. Karr and R.M. Measures, *Opt. Engineering* **32** (1993) 2841.