

Láser de fibra óptica compuesto por dos cavidades acopladas: aplicación como sensor de fibra óptica

R.A. Vázquez-Sánchez*, E.A. Kuzin y B. Ibarra-Escamilla
*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),
Apartado postal 51 y 216, Puebla, Pue., 72000 México,
e-mail: ravsa100@hotmail.com; ravsa@inaoep.mx

M. May Alarcón
*Universidad Autónoma del Carmen (UNACAR),
Av. 56 No. 4 por Av. Concordia*

M. Shlyagin y I. Márquez Borbón
*Centro de Investigación Científica y de Enseñanza Superior de Ensenada (CICESE),
Ensenada Baja California, CP 22860, México*

Recibido el 12 de junio de 2003; aceptado el 20 de enero de 2004

En este trabajo se presenta un láser de fibra óptica formado por 2 cavidades acopladas y construidas con 3 rejillas de Bragg de fibra óptica. Se utiliza una rejilla de referencia y dos rejillas sensoras que tienen menor longitud de onda de reflexión. La rejilla de referencia con las dos rejillas sensoras forman dos cavidades: una interna con longitud de 4230 metros y una externa con longitud de 4277 metros. Midiendo la frecuencia de espaciamiento intermodal para una cavidad en resonancia y desplazando estos picos de frecuencia al hacer resonar gradualmente a la otra cavidad, se demuestra que es posible utilizar este arreglo como un sensor en dos puntos, así como la posibilidad de determinar la diferencia en temperatura o tensión a la que se hallan estos dos puntos.

Descriptores: Láseres de fibra; sensores de fibra; amplificadores de fibra dopada con erbio; rejillas de Bragg.

We show an optical fiber laser sensor which consist of two cavities coupled and three fiber Bragg gratings. We used one Bragg grating (called reference) and two Bragg gratings (called sensors), which have the lower reflection wavelength. The reference grating with the two sensors grating make two cavities: first one is the internal cavity which has 4230 m of length and the another one is the external cavity which has 4277 m of length. Measuring the laser beating frequency for a resonance cavity and moving the frequency peaks when the another cavity is put in resonance, we prove that the arrangement can be used as a two points sensor for determining the difference of temperature or stress between these two points.

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

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

1. Introducción

Las rejillas de Bragg de fibra óptica son dispositivos que han generado un enorme interés para ser aplicadas en diversas áreas de investigación que incluyen comunicaciones ópticas, sensores y láseres de fibra [1, 2]. El interés se debe a las características que presenta este dispositivo, como son: inmunidad al ruido electromagnético, alta sensibilidad y tamaño reducido, entre otras. Una característica importante que tienen las rejillas y por la cual son aplicadas en arreglos de sensores, es que al tensarlas o al cambiarles la temperatura, cambian su longitud de onda de reflexión [3]. En estos arreglos el principio básico comúnmente utilizado es el de monitorear los cambios en la longitud de onda de Bragg reflejada por la rejilla producidos por la tensión o la temperatura aplicada [4]. En esquemas de láseres de fibra una extensión de fibra dopada con tierras raras (amplificador óptico) es colocada en una cavidad resonante. Esta cavidad puede estar formada por rejillas de Bragg que se utilizan como espejos reflectores [5-7] y que además pueden estar funcionando como elementos sensores de temperatura y tensión [8-12].

En este trabajo se reporta la construcción de un láser de fibra que está compuesto por dos cavidades acopladas construidas con tres rejillas de Bragg de fibra óptica. Una rejilla con longitud de onda de reflexión grande forma una cavidad interna y una cavidad externa con dos rejillas con longitud de onda de reflexión menor. Si cualquiera de las dos cavidades es puesta en resonancia, es decir, si la longitud de onda de reflexión de las rejillas que la forman se igualan, con un analizador de RF (radiofrecuencias) podemos medir la frecuencia de espaciamiento existente entre dos modos longitudinales adyacentes y con este parámetro podemos conocer la longitud de la cavidad. De esta forma el arreglo puede ser utilizado como un sensor de dos puntos. Además, si una de las cavidades está en resonancia y la otra cavidad gradualmente es puesta en resonancia, podemos desplazar los picos de frecuencia hacia valores mayores o menores, demostrando con esto que existe la posibilidad de conocer la diferencia de temperatura o tensión a la que se encuentran esos dos puntos. Con esto, el objetivo principal de este trabajo es la investigación de una técnica, operada en el dominio de las radiofrecuencias,

utilizada para monitorear la actividad de un láser de fibra con aplicación como sensor remoto de fibra óptica.

2. Arreglo experimental

En la Fig. 1 se muestra el arreglo experimental. Un tramo de 6 metros de fibra dopada con una concentración de 300 ppm (partes por millón) de iones de erbio es colocada en una cavidad que está formada por tres rejillas de Bragg de fibra. La luz a 980 nm proporcionada por un diodo láser de semiconductor de onda continua fue utilizada para bombear a la fibra dopada con erbio. Un acoplador del tipo WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) fue utilizado para acoplar la luz del diodo láser al sistema y dos de sus terminales fueron unidas con la fibra dopada y con un acoplador divisor 90/10. La rejilla R_1 fue unida por un extremo a la terminal que proporciona el 90% de señal del acoplador divisor y el otro extremo fue sumergido en líquido acoplador de índices para evitar las reflexiones de Fresnel. Esta rejilla tiene una longitud de onda de Bragg de 1536.4 nm ($\lambda_{B-R1} = 1536.4$ nm). La rejilla R_3 fue empalmada por fusión con la fibra dopada a través de 4230 m de fibra pasiva. Esta rejilla tiene una longitud de onda de Bragg de 1535.2 nm ($\lambda_{B-R3} = 1535.2$ nm). Por disponibilidad, 47 m de fibra pasiva fueron utilizados para unir a la rejilla R_3 con la rejilla R_2 . La rejilla R_2 tiene una longitud de onda de Bragg de 1535.06 nm ($\lambda_{B-R2} = 1535.06$ nm). La fibra pasiva es monomodo y el coeficiente de reflexión de las rejillas es del orden de 6% para R_2 y R_3 , y del orden de 20% para R_1 , mientras que el ancho de banda a la mitad del máximo de las tres rejillas es del orden de 0.2 nm. Para estirar tanto a la rejilla R_2 como a la rejilla R_3 en forma individual o simultánea, se utilizaron resortes para sujetarlas y bases con tornillos micrométricos para un tensado gradual.

Para que exista retroalimentación óptica en nuestro sistema, es decir, para que se cree una cavidad resonante, es necesario igualar las longitudes de onda de Bragg de las rejillas que formarán la cavidad. Una forma de lograr esto es estirando cualquiera de las rejillas R_2 o R_3 para que sus longitudes de onda de Bragg sean iguales a la de la rejilla R_1 . Esto es, al aplicar tensión longitudinal a una rejilla, se cambian sus propiedades ópticas en una forma proporcional a la tensión trayendo como resultado un corrimiento de su longitud de onda de Bragg, siendo ésta una de las características importantes de las rejillas de Bragg por las que son ampliamente utilizadas en redes de sensores.

Una ecuación que relaciona el cambio en la longitud de onda de Bragg ($\Delta\lambda_B$) con la tensión aplicada es [13]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_e)\varepsilon, \quad (1)$$

donde ρ_e es una constante fotoelástica efectiva, λ_B es la longitud de onda de Bragg y ε es la tensión longitudinal aplicada.

Cuando las rejillas que forman la cavidad tienen la misma longitud de onda de Bragg, ya existe retroalimentación óptica y la luz retroalimentada tiene una longitud de onda igual a la longitud de onda de Bragg de las rejillas (1536.4 nm). Con

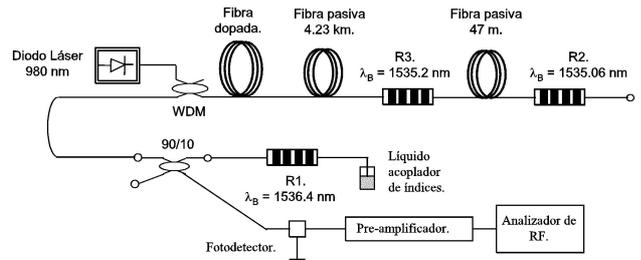


FIGURA 1. Arreglo experimental con dos cavidades de diferente longitud, la cavidad interna con $L_1 = 4230$ m. y la cavidad externa con $L_2 = 4277$ m. Las rejillas R_2 y R_3 son elementos reflectores y elementos sensores.

esto hemos construido un láser en donde el amplificador óptico es la fibra dopada y el diodo láser de semiconductor; la cavidad óptica, con una longitud (L), está formada por las rejillas que funcionan como espejos y por fibra óptica (fibra pasiva y fibra dopada) que separa a las rejillas.

El soporte teórico de este trabajo se encuentra en que la longitud (L) de una cavidad óptica resonante está relacionada en proporción inversa a la frecuencia ν_F que separa dos modos longitudinales adyacentes, esto es [8-10],

$$\nu_F = \frac{c_0}{2nL}, \quad (2)$$

donde c_0 es la velocidad de la luz en el vacío y n es el índice de refracción promedio del sistema. El índice de refracción promedio es índice de refracción del que está compuesto la cavidad resonante ya que ésta está formada por dos tipos de fibra óptica una es la fibra pasiva con $n = 1.468$ y la otra parte por fibra dopada con erbio (fibra activa) con un índice de refracción ligeramente diferente. Pero de esta última son 6 m mientras que de la primera son más de 4 km por lo tanto el índice de refracción promedio es de $n = 1.468$. Para medir el parámetro ν_F se utilizaron un fotodetector conectado a un preamplificador y éste hacia un analizador de RF con un ancho de banda de 100 kHz.

3. Resultados experimentales y discusión

En nuestro arreglo experimental se puede observar que R_1 y R_3 forman la cavidad interna ($L_{1\text{ Real}} = 4230$ m) y R_1 y R_2 forman la cavidad externa ($L_{2\text{ Real}} = 4277$ m). Una cavidad adicional puede ser formada por R_3 y R_2 cuando R_2 tiene la misma longitud de onda de Bragg que R_3 , pero de acuerdo a la Ec. (2), para una cavidad de longitud muy corta la frecuencia de espaciado entre modos será demasiado grande para poder ser medida con el analizador de RF, por esto, esta cavidad no se tomará en cuenta. Cuando una cavidad está formada tomamos la salida del haz láser generado en la terminal que nos proporciona el 10% del acoplador 90/10 y la enviamos a un fotodetector de InGaAs. Esta señal óptica es convertida en una señal eléctrica y después amplificada para poder ser analizada con el analizador de RF.

En la Fig. 2 se muestran 4 picos. Un pico principal (P1) y 3 picos (P2, P3, P4) centrados a frecuen-

cias armónicas del fundamental. Esta señal fue tomada para la cavidad interna. En esta figura se observa que el pico principal (P1) está centrado a una frecuencia experimental, $\nu_F(P1_{EXP}) = 24.25$ kHz, y ocurre cuando $\lambda_{B-R1} = \lambda_{B-R3}$. La frecuencia teórica para este pico, $\nu_F(P1_{TEORICA}) = 24.14$ kHz, es aceptablemente aproximada a la frecuencia experimental. La resolución del analizador es calculada tomando la razón del ancho de banda del analizador (100 kHz) con la cantidad de datos muestreados (400 para este analizador). Con esto, la resolución es de 250 Hz. La cantidad de picos que podemos observar con el analizador depende de la razón del ancho de banda entre la frecuencia del pico principal (24.25 kHz). La frecuencia teórica fue calculada con la Ec. (2) en donde $n = 1.468$ y $L_{1\text{ Real}} = 4230$ m. La frecuencia teórica de los demás picos se calculó utilizando la Ec. (2) con los datos de n y L dados anteriormente y el resultado se multiplicó por el número del pico o armónico.

Cuando la cavidad externa es creada, ($\lambda_{B-R1} = \lambda_{B-R2}$), aparecen una serie de 4 picos semejantes a los presentados anteriormente. Estos picos se pueden observar en la Fig. 3. Para el cálculo de la frecuencia teórica de los picos la longitud de la cavidad es ahora $L_{2\text{ Real}} = 4277$ m. Esta cavidad de longitud más grande dará como resultado que los picos estén centrados a frecuencias menores que los mostrados anteriormente para la cavidad interna.

Comparando la frecuencia a la que ocurren los picos de la Fig. 2 con los picos de la Fig. 3 observamos que existe una diferencia más notable en la frecuencia de los picos 4 (P4). Debido a que el analizador de RF tiene un ancho de banda de 100 kHz (observado en el eje x de las Figs. 2 y 3) y la información desplegada la divide entre 400 datos, por lo tanto se tiene una resolución de 250 Hz entre dos datos consecutivos como es indicado en la parte superior derecha de las Figs. 2 y 3. Cuando se disminuye el ancho de banda a 6.25 kHz y como el número de datos muestreados es 400 la resolución mejora a 15.625 Hz como es mostrado en las Figs. 4, 5 y 7. Entonces, seleccionando un ancho de banda de 6.25 kHz en el analizador, son estudiadas las características individuales de cada pico para cada cavidad enfocando nuestro mayor interés a los picos 4 (P4). Este interés se debe a lo observado en la comparación de las Figs. 2 y 3, en donde la diferencia en frecuencia entre los picos es mayor para los picos 4. La frecuencia a la que se encuentran centrados los picos 4 (P4) así como también su ancho de banda se pueden observar en la Fig. 4. El pico de la derecha está centrado en una frecuencia experimental, $\nu_F(P4_{EXP}) = 96.462$ kHz y tiene un ancho de banda (*Bandwidth*), $BW = 220$ Hz. Este pico ocurre cuando la cavidad interna está formada ($\lambda_{B-R1} = \lambda_{B-R3}$). La frecuencia medida se utilizó para calcular la longitud de esta cavidad y se encontró que $L_{1\text{ Exp}} = 4234$ m, encontrándose en concordancia con la longitud real mostrada en el arreglo ($L_{1\text{ Real}} = 4230$ m) en donde no se tomó en cuenta la longitud de fibra que tienen los 2 acopladores (WDM y el divisor 90/10). Esta longitud experimental calculada de la cavidad fue determinada con la Ec. (2) en donde se despegó a L y

el resultado se multiplicó por el número de pico o armónico que en este caso fue el pico 4 (P4). Con este mismo procedimiento se calculó la longitud de la cavidad externa, ($\lambda_{B-R1} = \lambda_{B-R2}$), utilizando la frecuencia a la que está centrado el pico de la izquierda, $\nu_F(P4_{EXP}) = 95.578$ kHz; y se determinó que $L_{2\text{ Exp}} = 4273$ m lo cual se aproxima de manera aceptable con la longitud real, $L_{2\text{ Real}} = 4277$ m. El ancho de banda de todos los picos se midió con el criterio del ancho de banda completo a la mitad del máximo (*Full Width Half Maximum: FWHM*) encontrándose un ancho de banda promedio de 220 Hz.

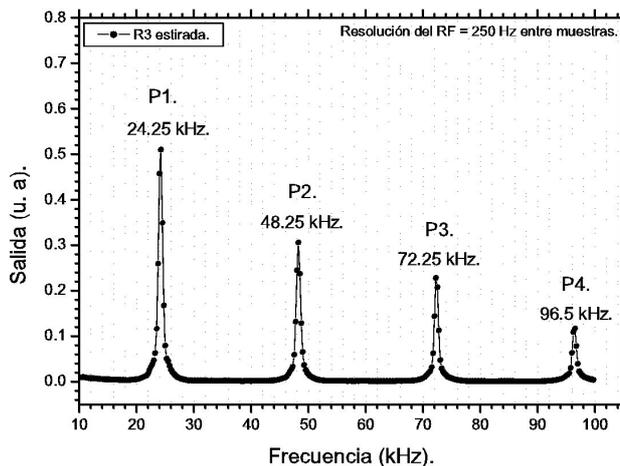


FIGURA 2. Cuatro picos son mostrados cuando la rejilla R₃ es estirada formándose la cavidad interna. Los tres picos P2, P3, P4 se encuentran centrados a frecuencias armónicas del pico principal P1 = 24.25 kHz.

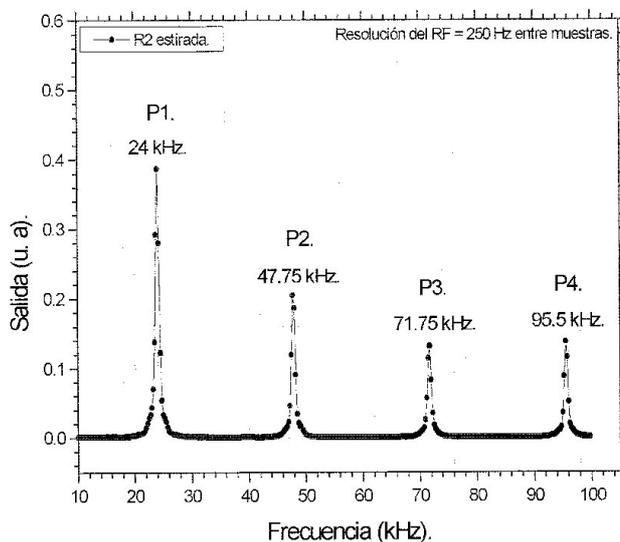


FIGURA 3. Cuando la rejilla R₂ es estirada se forma la cavidad externa. La principal diferencia de esta gráfica con la gráfica de la Fig. 2 es que cuando se estira R₃ se forma la cavidad interna mientras que cuando se estira R₂ se forma la cavidad externa. La frecuencia de emisión del pico 4 (P4) de la Fig. 2 es diferente al pico 4 (P4) de la Fig. 3, razón por la cual es usado el pico P4 para determinar que rejilla está siendo usada como sensor.

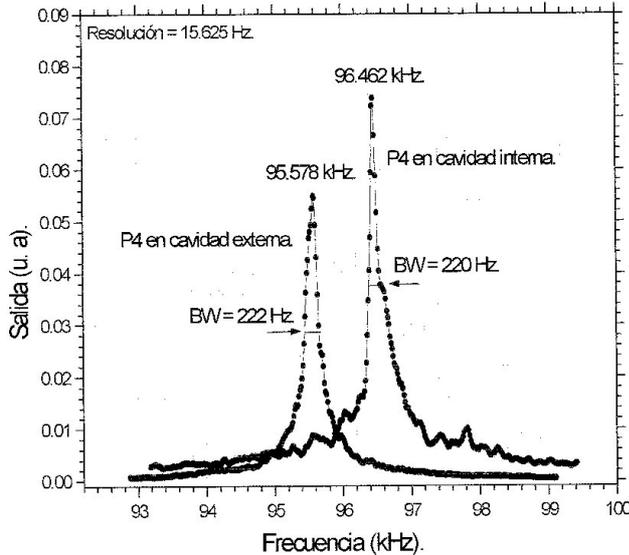


FIGURA 4. Los picos 4 (P4) son mostrados para cuando las dos cavidades son creadas en forma individual.

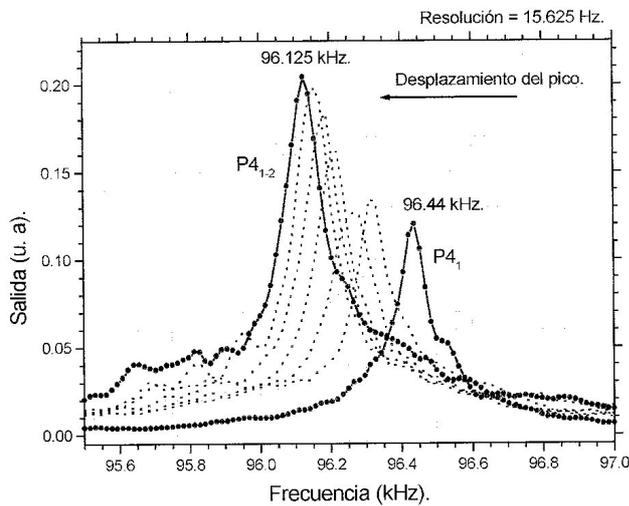


FIGURA 5. El desplazamiento del pico P4₁ es mostrado cuando la rejilla R₃ está estirada fijamente y gradualmente se estira a la rejilla R₂.

En la Fig. 4 mostramos la posición en frecuencia de los picos 4 (P4) cuando las dos cavidades existen individualmente. Esto es, si existe la cavidad interna no existe la cavidad externa y viceversa. Para tener las dos cavidades simultáneamente hacemos $\lambda_{B-R1} = \lambda_{B-R3}$ y gradualmente acercamos λ_{B-R2} a λ_{B-R1} (estiramos gradualmente a R₂). Con esto, obtuvimos los picos mostrados en la Fig. 5. En esta figura observamos que a medida que acercamos λ_{B-R2} a λ_{B-R1} el pico inicial (P4₁) centrado a una frecuencia, $\nu_{F \text{ inicial-1}} = 96.44$ kHz, se recorre gradualmente hacia la izquierda hasta centrarse en una $\nu_{F \text{ Final}} = 96.125$ kHz que corresponde al pico P4₁₋₂ y que ocurre cuando $\lambda_{B-R1} = \lambda_{B-R3} = \lambda_{B-R2} = 1536.4$ nm.

Tomando los datos de la frecuencia en que aparecen centrados los picos en la Fig. 5 y la diferencia en longitud de onda ($\Delta\lambda$) entre λ_{B-R3} y λ_{B-R2} con $\lambda_{B-R3} = 1536.4$ nm,

obtuvimos la gráfica mostrada en la Fig. 6. En esta gráfica se observa que cuando $\Delta\lambda = 0$, la frecuencia del pico es $\nu_{F \text{ Final}} = 96.125$ kHz y cuando $\Delta\lambda = 0.191$ nm la frecuencia del pico es $\nu_{F \text{ inicial-1}} = 96.44$ kHz, con un error de ± 20.62 Hz. La distribución de los puntos se aproximó a una línea recta con la observación de que se tienen errores tanto en el eje de las frecuencias como en el eje $\Delta\lambda$.

El procedimiento anterior fue realizado haciendo ahora $\lambda_{B-R1} = \lambda_{B-R2}$ y acercando gradualmente λ_{B-R3} a λ_{B-R1} obteniendo los resultados mostrados en la Fig. 7. En esta figura se observa que pico inicial P4₂ con una frecuencia $\nu_{F \text{ inicial-2}} = 95.578$ kHz se recorre hacia la derecha hasta posicionarse en una frecuencia $\nu_{F \text{ Final}} = 96.125$ kHz que es cuando $\lambda_{B-R1} = \lambda_{B-R3} = \lambda_{B-R2} = 1536.4$ nm y corresponde al pico P4₁₋₂.

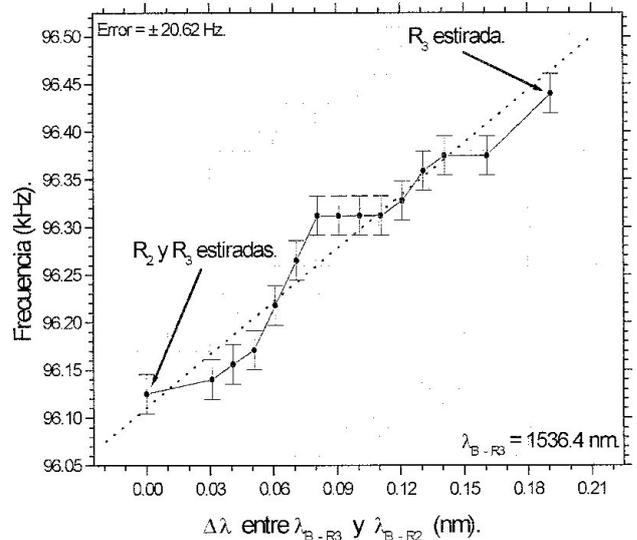


FIGURA 6. Posición en frecuencia del Pico 4 (P4₁) en función de la diferencia de la longitud de onda de Bragg entre las rejillas R₂ y R₃ con $\lambda_{B-R3} = 1536.4$ nm.

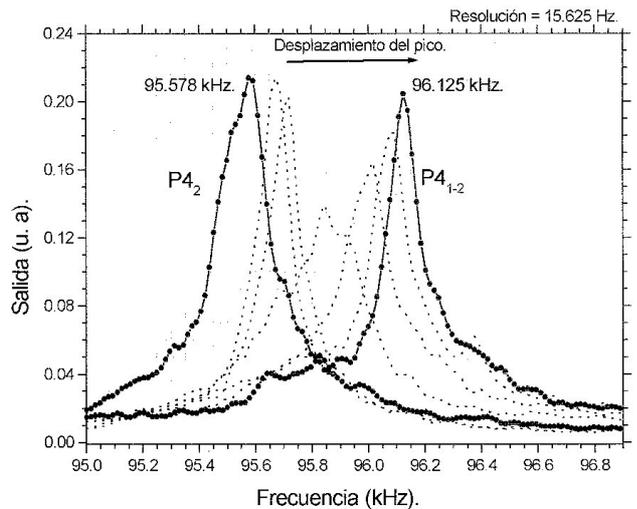


FIGURA 7. El desplazamiento del pico P4₂ es mostrado cuando la rejilla R₂ está estirada fijamente y gradualmente se estira a la rejilla R₃.

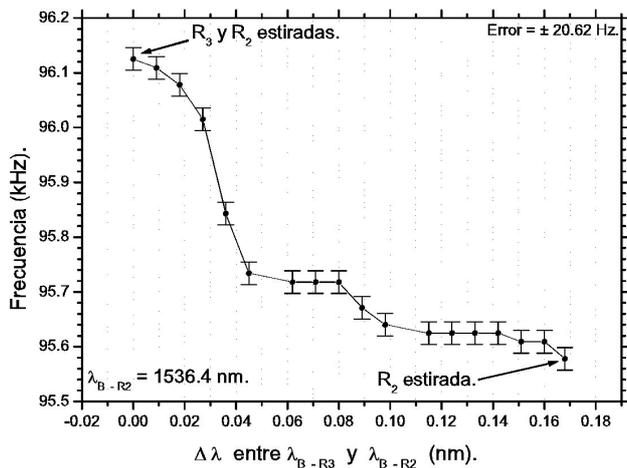


FIGURA 8. Posición en frecuencia del Pico 4 ($P4_2$) en función de la diferencia de la longitud de onda de Bragg entre las rejillas R_2 y R_3 con $\lambda_{B-R2} = 1536.4$ nm.

En la gráfica de la Fig. 8 observamos el cambio de la frecuencia del pico $P4_2$ en función de la diferencia en longitud de onda ($\Delta\lambda$) entre λ_{B-R2} y λ_{B-R3} con $\lambda_{B-R2} = 1536.4$ nm. Se observa que cuando $\Delta\lambda = 0$ la frecuencia del pico es $\nu_{F\text{ Final}} = 96.125$ kHz, lo que significa que $\lambda_{B-R3} = \lambda_{B-R2} = 1536.4$ nm y cuando $\Delta\lambda = 0.168$ nm la frecuencia del pico es $\nu_{F\text{ inicial-2}} = 95.578$ kHz, lo que significa que únicamente la rejilla R_2 está estirada.

Observando la distribución de puntos en las Figs. 6 y 8, notamos que no obedecen a una línea recta lo que nos hace pensar en primera instancia que puede ser debido a los errores de medición que se tienen y que se ven reflejados tanto en el eje de frecuencias como en el eje de $\Delta\lambda$. Pero vamos a concluir que esta distribución se debe en gran parte al perfil espectral de las rejillas, los cuales son diferentes y que provocan un traslape no uniforme al estirarse gradualmente cualquiera de las rejillas R_3 o R_2 .

4. Conclusiones

Se reportó la construcción de un láser que está formado por una cavidad interna de una longitud de 4230 m y una cavidad externa con longitud de 4277 m. Midiendo la frecuencia de espaciamiento entre modos longitudinales pudimos calcular la longitud de las dos cavidades, las cuales concordaron de manera aceptable con los datos presentados en el arreglo experimental, dándonos una pauta para presentar a este arreglo como un sensor de dos puntos, en donde las rejillas R_2 y R_3 al mismo tiempo que funcionan como elementos reflectores, actúan como elementos sensores; esto es, al medir la frecuencia de espaciamiento y calcular la longitud, determinaríamos qué sensor está actuando. Se demostró que cuando cualquiera de las rejillas R_2 o R_3 está estirada y se estira gradualmente a la otra, el pico 4 ($P4$) se recorre gradualmente hacia frecuencias mayores o menores dependiendo de que rejilla esté estirada fijamente y que rejilla esté siendo estirada gradualmente. Las gráficas de las Figs. 5 y 7 nos dan a conocer que dependiendo de la posición del pico, sabremos que entre las rejillas sensoras hay diferencia entre sus longitudes de onda de reflexión, lo cual puede ser traducido a una diferencia en tensión o temperatura entre ellas. El pico 4 ($P4$) se centró en una frecuencia de $\nu_{F\text{ Final}} = 96.125$ kHz cuando las tres rejillas tienen la misma longitud de onda de Bragg (las dos cavidades existen). El ancho de banda de todos los armónicos se midió experimentalmente y se concluyó que es de 220 Hz. La diferencia en frecuencia a la que están centrados los picos para las dos cavidades fue más notable analizando los picos 4 ($P4$). Con esto, al tener un analizador de RF con un ancho de banda más grande podríamos resolver mejor los picos y disminuir la longitud de fibra entre rejillas. Con las ventajas de que este sensor es inmune a campos electromagnéticos y no transporta electricidad, la utilidad de este sensor puede ser para monitorear cambios de temperatura o tensión y para detectar fugas de hidrocarburos.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por CONACyT bajo el proyecto 28498-A.

1. A. Othonos, *Rev. Sci. Instrum.* **68** (1997) 4309.
2. C.R. Giles, *J. Lightwave Technol.* **15** (1997) 1391.
3. K.O. Hill and G. Meltz, *J. Lightwave Technol.* **15** (1997) 1263.
4. A.D. Kersey *et al.*, *J. Lightwave Technol.* **15** (1997) 1442.
5. G.A. Ball and W.W. Morey, *Opt. Lett.* **17** (1992) 420.
6. G.A. Ball and W.H. Glenn, *J. Lightwave Technol.* **10** (1992) 1338.
7. J.-L. Archambault and S.G. Grubb, *J. Lightwave Technol.* **15** (1997) 1378
8. M. May-Alarcón *et al.*, *Rev. Mex. Fís.* **48** (2002) 434.
9. M. May Alarcón *et al.*, *Optical Engineering* **42** (2003).
10. A.D. Kersey and W.W. Morey, *Electronics Lett.* **29** (1993) 112.
11. A.D. Kersey and W.W. Morey, *Electronics Lett.* **29** (1993) 964.
12. G.A. Ball, W.W. Morey, and P.K. Cheo, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** (1993) 267.
13. S.M. Melle *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** (1993) 263.