

# Estudio experimental de un láser sintonizable en longitud de onda usando un filtro de Sagnac con selectividad espectral mediante cambios en la temperatura

A. González-García, O. Pottiez y R. Grajales-Coutiño

*Centro de Investigaciones en Óptica,*

*Loma del Bosque 115, Col. Lomas del Campestre, León, Gto. 37150, México,*

*e-mail: mscingagg@cio.mx*

Recibido el 29 de octubre de 2009; aceptado el 17 de junio de 2010

Demostremos experimentalmente una configuración sencilla para el desarrollo de un láser de anillo toda fibra en el régimen de múltiples longitudes de onda. El láser incluye un segmento de fibra dopada con erbio y un interferómetro de Sagnac que actúa como filtro espectral, formado por 7 m de fibra de alta birrefringencia (HiBi, *High Birefringence*) y un acoplador simétrico. Dependiendo del ajuste de placas retardadoras en el anillo y en el filtro de Sagnac, se puede obtener laseo para una longitud de onda sintonizable o a varias longitudes de onda simultáneamente. Además analizamos los efectos de la temperatura sobre la respuesta del filtro de Sagnac. Se observaron regímenes de sintonización de una longitud de onda y múltiples longitudes de onda simultáneamente al variar la temperatura.

*Descriptor:* Filtro de Sagnac; fibras ópticas; láser de fibra óptica.

We demonstrated experimentally a simple configuration to perform wavelength-tuning and multi-wavelength operation in an Erbium-doped fiber ring laser that includes a fiber-optic Sagnac interferometer as spectral filter formed by 7 m of high birefringence fiber and a symmetric coupler. We analyzed the temperature effect on the Sagnac filter response. Through temperature control, we were able to perform wavelength-tuning and multi-wavelength operation in the laser.

*Keywords:* Sagnac filter; optical fibers; fiber-optic laser.

PACS: 42.55.Wd; 42.81.Gs; 42.81.Qb

## 1. Introducción

En muchas aplicaciones, tales como multiplexado por división de longitud de onda (WDM, *Wavelength Division Multiplexing*), sensores de fibras y la calibración de instrumentos ópticos, se requieren de fuentes láseres sintonizables y de múltiples longitudes de onda. En este trabajo estudiamos experimentalmente una configuración sencilla en la que se incluye un filtro de Sagnac para implementar un láser en anillo de fibra en el régimen de múltiples longitudes de onda. Como una posible fuente para redes WDM, los láseres de múltiples longitudes de onda han sido investigados extensivamente hasta la actualidad. Muchos métodos han sido propuestos y demostrados. Por ejemplo, los láseres de múltiples longitudes de onda con fibra dopada de erbio (EDF, *Erbium-doped fiber*) han sido demostrados usando el efecto de filtrado periódico de una fibra birrefringente en serie con un polarizador [1], insertando un filtro tipo peine en la cavidad láser [2], usando rejillas de Bragg de fibra [3] o por desplazamiento de la frecuencia dentro de la cavidad de los modos de oscilación [4]. En muchos casos, los láseres de múltiples longitudes de onda involucran el enfriamiento del medio amplificador, como medio de estabilización del láser que opera en el régimen de múltiples longitudes de onda cuando la separación entre longitudes de onda es menor de 1 nm, debido al relativo ensanchamiento homogéneo del espectro del amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA, *Erbium-doped fiber amplifier*) y la subsecuente competencia por la ganancia entre los modos de oscilación.

En este trabajo, proponemos y demostramos experimentalmente un láser sintonizable hecho de fibra dopada con erbio usando un filtro birrefringente de Sagnac [5], el cual presenta muchas ventajas. Además de su fácil diseño, la configuración de Sagnac, donde los dos haces que se propagan por el mismo camino óptico, es más robusta a cambios ambientales que otros esquemas interferométricos. Una ventaja de este dispositivo es que no depende de la polarización de entrada [5], que lo hace compatible con la luz polarizada aleatoriamente proveniente de sistemas de transmisión por fibra óptica. La función del filtro espectral se extiende intrínsecamente sobre un amplio ancho de banda, mientras que el ancho de banda de una ventana de transmisión para un canal individual solamente depende de la birrefringencia del lazo y puede de esta forma ensancharse o angostarse de una manera arbitraria. Muchos esquemas fueron propuestos incluyendo uno o varios filtros de Sagnac, algunas veces en combinación con otros elementos de filtrado [6-12]. En las Refs. 9 y 10 los láseres sintonizables de una longitud de onda fueron demostrados usando filtros de Sagnac en serie. En la Ref. 12 un esquema de un láser de múltiples longitudes de onda fue propuesto, en el cual se usaron tanto un filtro de Sagnac como dos rejillas de Bragg como elementos de filtrado y permitió la generación de dos a tres longitudes de onda muy cercanas a la temperatura ambiente. En este trabajo, demostramos experimentalmente tanto la sintonización de una longitud de onda y la conmutación de múltiples longitudes de onda en un láser de fibra óptica dopada con erbio, el cual incluye un filtro de Sagnac y además su sensibilidad espectral a los cambios de

temperatura. En la práctica es bien conocida la alta sensibilidad a los cambios de temperatura de la fibra birrefringente que hace parte del filtro de Sagnac. Para propósitos de estudio de los efectos de la temperatura en la respuesta de selectividad espectral del filtro, la fibra está libre de esfuerzos inducidos. Además los cambios de presión en el segmento de la fibra birrefringente, debido a un retardador de onda y la presión atmosférica, se consideran despreciables para este propósito: es decir el filtro está libre de esfuerzos externos. Con estas condiciones la temperatura es el único parámetro que modifica el espectro del filtro. En este filtro el periodo de la respuesta espectral es proporcional a la longitud de la sección de la fibra expuesta a los cambios de temperatura. Los cambios de temperatura afectan tanto a la birrefringencia como a la longitud expuesta al cambio de temperatura [15]. La longitud de onda en el máximo de transmisión cambia al modificar la birrefringencia y así la sensibilidad se puede expresar teniendo en cuenta los desplazamientos del pico de onda con la temperatura. El efecto de la temperatura resulta en una inestabilidad en las líneas de laseo y en un cambio en el ancho de banda del filtro. El estudio de la sensibilidad térmica del filtro demuestra que es posible cambiar el espectro de transmisión hacia una longitud de onda determinada, variando la temperatura [16]. Sin embargo en este trabajo experimental, la variación de la temperatura no modificó el periodo del espectro del filtro y se observó por otra parte un corrimiento en el espectro de transmisión hacia una longitud de onda determinada.

## 2. Configuración experimental

La configuración experimental se muestra en la Fig. 1. La cavidad en anillo incluye 4 m de fibra dopada con erbio bombeada con un diodo láser a 980 nm. Un aislador óptico fue colocado para asegurar que la propagación de la luz sea unidireccional. El filtro de Sagnac incluye un acoplador simétrico (3-dB), dos retardadores de onda y un segmento de 7 m de fibra HiBi. El retardador de onda (WR1, *Wave Retarder*) es un retardador de media onda el cual se obtiene haciendo 6 vueltas a la fibra en un diámetro determinado. El retardador de onda WR2 se obtiene mediante la aplicación de presión mecánica en un segmento de la fibra birrefringente cuya longitud de repetición es < 5 mm. El espectro de transmisión es una función sinusoidal de la longitud de onda [5], cuyo periodo (o separación entre canales) puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{0c} L_B}{L} \tag{1}$$

donde  $L_B$  es la longitud de repetición,  $\lambda_{0c}$  es la longitud de onda central y  $L$  es la longitud de la fibra birrefringente. El valor obtenido experimentalmente para el periodo del filtro fue de 0.85 nm (Fig. 2), mientras que el teórico fue de 1.17 nm; este valor está muy cercano al valor calculado usando la Ec. (1), usando los siguientes parámetros,  $L_B = 5$  mm,  $\lambda_{0c} = 1550$  nm y  $L = 7$  m. El espectro de transmisión puede

ser desplazado sobre un periodo completo ajustando la orientación del WR1 y mediante la orientación y aplicación de presión al WR2 en el filtro de Sagnac.

La cavidad en anillo, también incluye un polarizador lineal y varios retardadores. El polarizador, junto con la pequeña birrefringencia residual presente en la cavidad en anillo, es responsable de un efecto de filtrado [13,14]. Como la birrefringencia de la fibra es pequeña (no se usó ningún segmento de fibra HiBi en la cavidad en anillo), este efecto induce una lenta variación de pérdidas que dependen de la longitud de onda, las cuales pueden ser ajustadas por medio de la orientación de las placas retardadoras dentro de la cavidad en anillo o el filtro de Sagnac.

El arreglo experimental que se muestra en la Fig. 1 fue usado para probar experimentalmente los efectos de la temperatura en la respuesta de la selectividad espectral del filtro. Para ello, se optó por eliminar la presión mecánica ejercida en el WR2 y se dejó al descubierto un segmento de 4 cm aproximadamente de fibra HiBi, para que éste sea la única parte de la fibra HiBi que haga contacto con la variación de la temperatura. En un segmento de la fibra dopada con erbio se le aplicó presión externa junto con un estiramiento para de esta forma eliminar la birrefringencia residual de la fibra dopada.

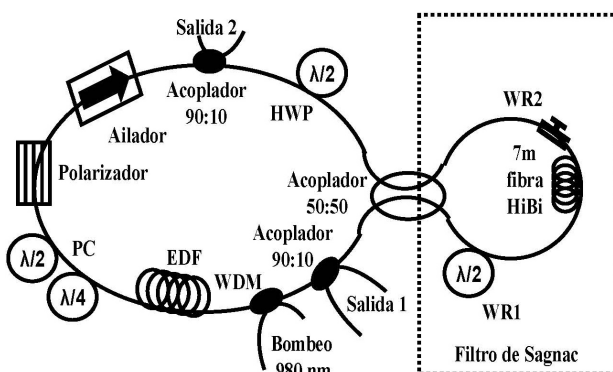


FIGURA 1. Esquema de la configuración bajo estudio.

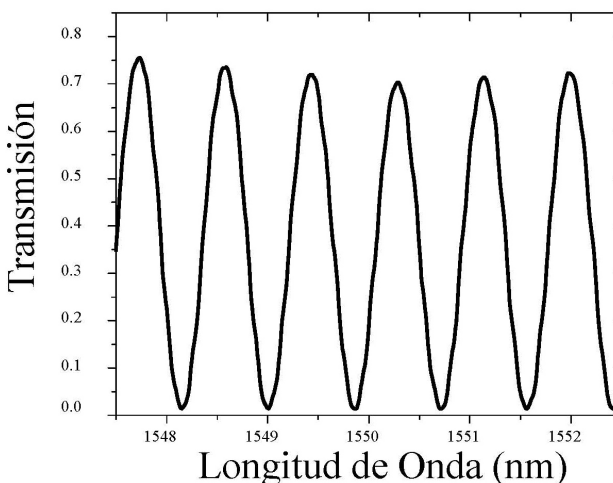


FIGURA 2. Espectro de transmisión del filtro de Sagnac.

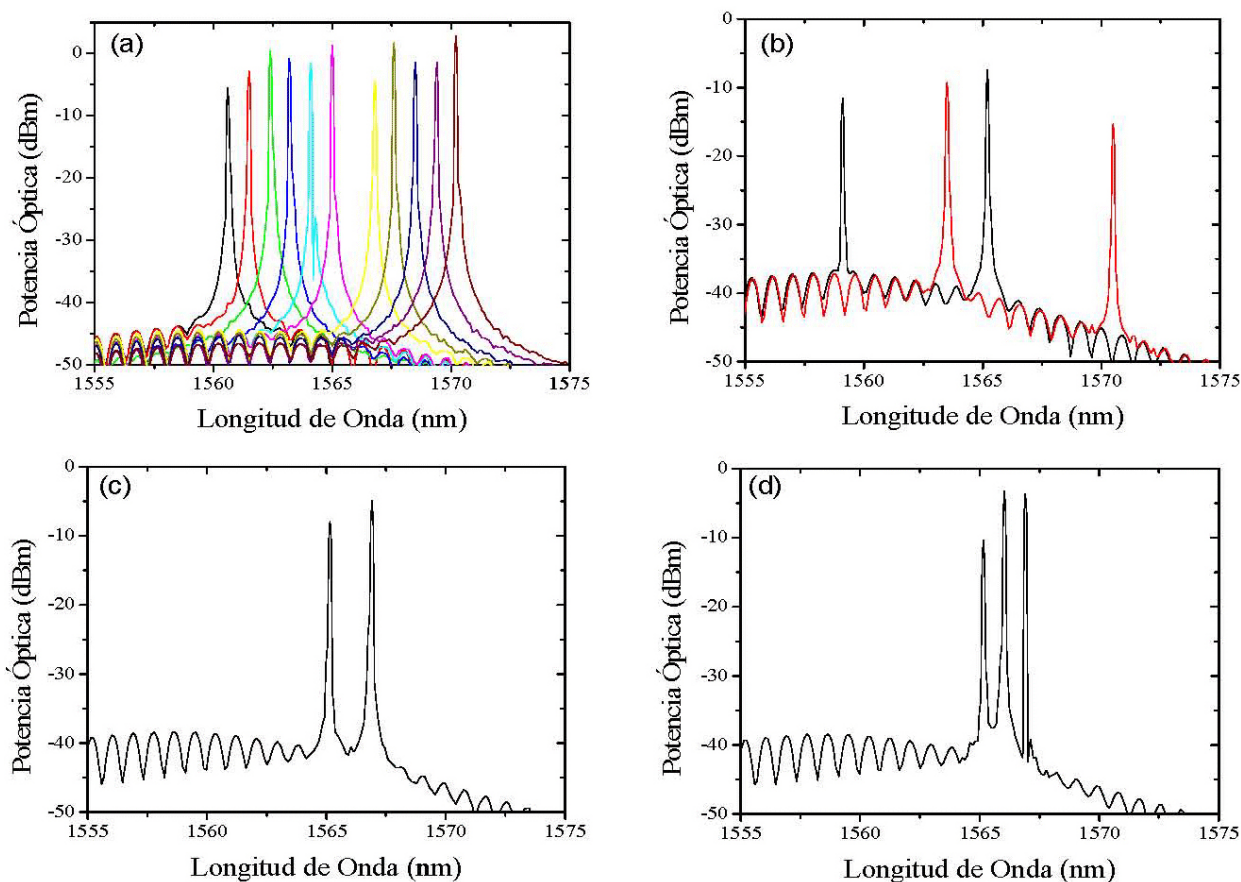


FIGURA 3. Espectro de salida del láser, el cual incluye 7 m de fibra con alta birrefringencia. (a) Operación en una sintonización de longitud de onda de 1560.65 a 1570.2 nm; (b) doble sintonización de longitud de onda en 1559.1 y 1565.2 nm y en 1563.6 y 1570.5 nm; (c) doble longitud de onda en 1565.15 y 1566.91 nm; (d) tripe longitud de onda en 1565.15, 1566.03 y 1566.91 nm.

### 3. Resultados y discusión

Dependiendo del ajuste de las placas retardadoras, fueron observados regímenes de una y múltiples longitudes de onda. Dentro del régimen de una longitud de onda, la longitud de onda de láser puede ser discretamente sintonizada en pasos de 0.85 nm desde 1560.65 nm hasta 1570.2 nm ajustando las placas retardadoras en la cavidad de anillo (Fig. 3a). El rango de sintonización es cerca de 10 nm. Para otro pequeño ajuste de la orientación de los retardadores, el láser se observó simultáneamente para dos longitudes de onda las cuales se pudieron sintonizar continuamente sobre varios nanómetros (Fig. 3b). La Fig. 3b muestra el régimen de dos longitudes de onda en 1559.1 nm y 1565.2 nm, respectivamente con una separación de 6.1 nm (aproximadamente 7 periodos del filtro de Sagnac), y en 1563.5 nm y 1570 nm, presentando una separación de 7.1 nm (aproximadamente 8 periodos del filtro de Sagnac). También se observó un régimen de dos longitudes de onda en 1565.15 nm y 1566.91 nm con una separación de tan sólo 1.76 nm, lo que equivale aproximadamente a 2 periodos del filtro de Sagnac (Fig. 3c). Es notable que para dos longitudes de onda tan cercanas las oscilaciones fueron relativamente estables a temperatura ambiente. Se mantuvo de esta forma por un periodo de más de 5 minutos, consideran-

do la fuerte competencia de modos debido al ensanchamiento homogéneo del medio de ganancia. Además, cuando ajustamos cuidadosamente la orientación del retardador de onda, pudimos observar un régimen de tres longitudes de onda en 1565.15 nm, 1566.03 nm y 1566.91 nm con una separación de 0.88 nm (un periodo del filtro de Sagnac) (Fig. 3d). El régimen de tres longitudes de onda se mantuvo durante 20 barridos del analizador de espectro óptico (aproximadamente 20 segundos) antes de desaparecer. En este caso, sin embargo, la amplitud de la primera línea de láser fue muy inestable. El experimento se realizó en las horas de la mañana, y repetimos el experimento a diferentes horas del día para observar si el régimen de múltiples longitudes de onda con separación del orden del nanómetro aparecía nuevamente. Sin embargo, esta operación no fue observada nuevamente. Por otra parte, aparecieron tres longitudes de onda con una separación mayor (muchos periodos del filtro de Sagnac) a la reportada en este trabajo. Nuestros resultados muestran de esta forma que regímenes de múltiples longitudes de onda (dos y tres longitudes de onda) con una separación muy pequeña (menor de 1 nm) son posibles en un láser de anillo de fibra dopada de erbio a temperatura ambiente; sin embargo éste requiere de un ajuste muy fino en el control de las pérdidas para ca-

da longitud de onda. Las perturbaciones ambientales (como cambios de temperatura y vibraciones mecánicas, entre otras) son también responsables en la inestabilidad de las líneas de láser; en particular, para que el dispositivo pueda operar en este régimen de manera estable para periodos muy prolongados, se requiere un esquema de control de temperatura.

Para el caso, de la selectividad espectral del láser mediante cambios en la temperatura externa para un segmento de la fibra HiBi, el WR2 se deja libre de presión externa quedando al descubierto el segmento de fibra birrefringente. Se varió la temperatura en un intervalo de  $26.6^{\circ}\text{C}$  hasta  $100^{\circ}\text{C}$ . Se utilizó un multímetro digital con una punta termopar tipo K

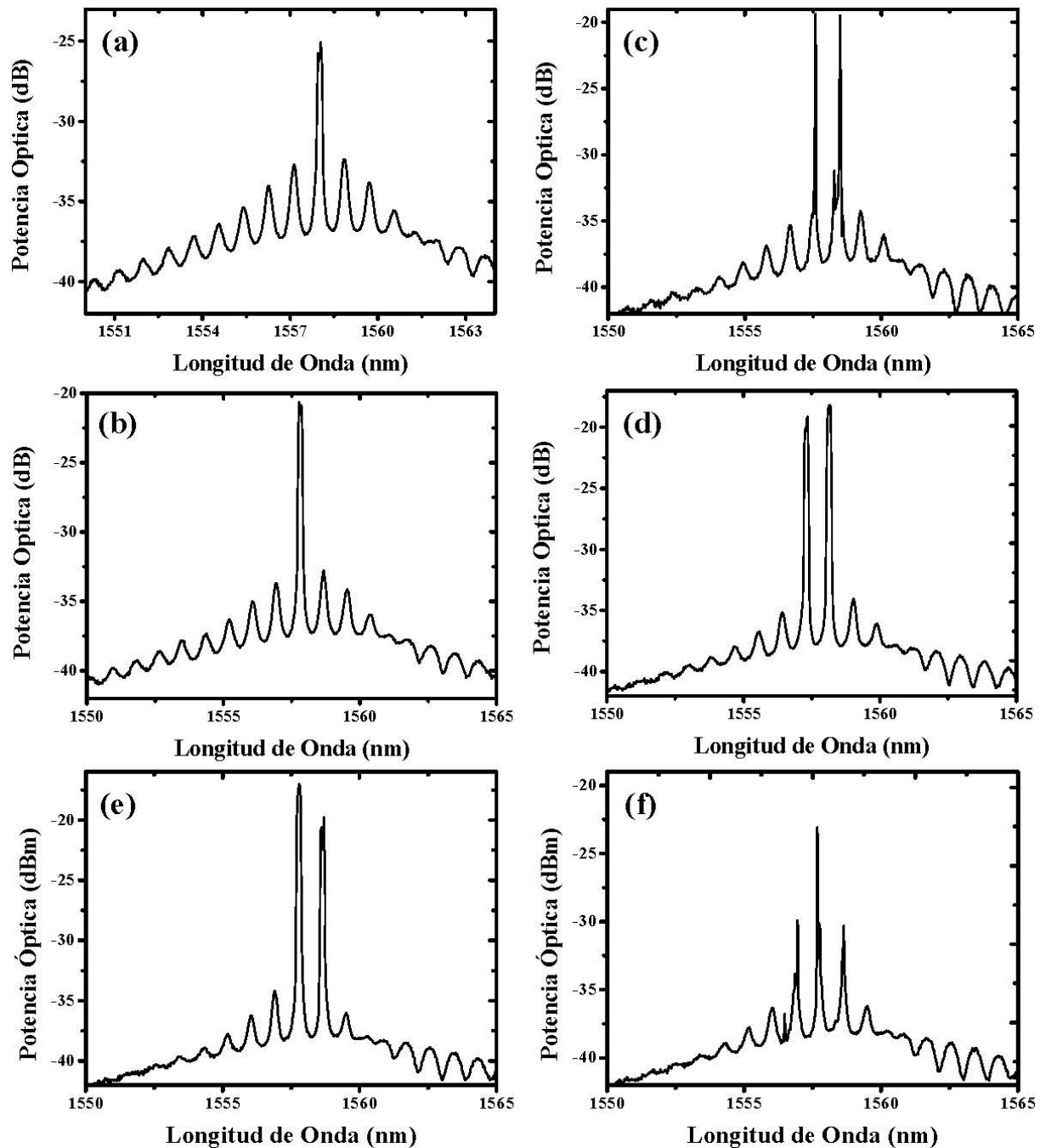


FIGURA 4. Espectro del láser obtenido experimentalmente para diferentes temperaturas. (a) y (b) Sintonización para una longitud de onda de 1558.07 hasta 1558.14 nm, para cambios de temperatura de  $45^{\circ}\text{C}$ , hasta  $56.6^{\circ}\text{C}$ ; (c) y (d) doble sintonización de longitud de onda en 1558.02 y 1558.26 nm y en 1557.94 y 1558.18 nm para cambios de temperatura de  $67.6^{\circ}\text{C}$  y  $70.2^{\circ}\text{C}$ ; (e) doble longitud de onda en 1558.08 y 1558.32 nm, para una temperatura de  $74.2^{\circ}\text{C}$ ; (f) triple longitud de onda en 1556.95, 1557.68 y 1558.64 nm, para una temperatura de  $70^{\circ}\text{C}$ .

para monitorear los cambios de temperatura generados por un foco de 100 W, la cual se encerró en una caja de cartón y cuya luminosidad se reguló mediante un dimmer. De acuerdo a lo que se esperaba el espectro sufrió un corrimiento cuando se aumenta o disminuye la temperatura incidente en la fibra birrefringente; estos cambios fueron selectivos para cada cambio de temperatura es decir los espectros obtenidos al aumentar la temperatura siempre se obtuvieron para cada temperatura analizada por el termopar. El comportamiento del corrimiento de los espectros se muestra en la Fig. 4 cuando se cambia la temperatura de 26.6 hasta 100°C. Es por eso que la alta sensibilidad del láser a los cambios de temperatura hacen que el dispositivo se pueda aprovechar como un elemento selector de líneas de laseo para una, dos y tres longitudes de onda y a partir de ello podemos obtener una sintonización del láser para una longitud de onda y múltiples longitudes de onda variando la orientación de las placas retardadoras incluidas en la cavidad en anillo y en el filtro de Sagnac; estos cambios se muestran en la Fig. 4.

No se pudo obtener una cuantificación precisa para el desplazamiento de la temperatura sobre un periodo completo del espectro del filtro de Sagnac, debido a la mala sintonización de la temperatura por parte del *dimmer* y al sistema rudimentario que se implementó para la generación de la variación de la temperatura que incidiría en la sección descubierta de 4 cm de fibra birrefringente que hace parte del filtro de Sagnac. Se observó que al aumentar la temperatura existe un desplazamiento hacia longitudes más cortas en las líneas de laseo.

#### 4. Conclusiones

Hemos estudiado la sintonización de regímenes en múltiples longitudes de onda de un láser de anillo de fibra dopada con erbio, el cual incluye un filtro birrefringente de Sagnac. El filtro de Sagnac incluye un segmento de fibra de alta birrefringencia, el cual induce pérdidas que dependen de la longitud de onda, las cuales pueden ser ajustadas por medio de los retardadores de onda para así obtener sintonización en el régimen de una longitud de onda o para régimen de múltiples longitudes de onda. Ajustes en las pérdidas que dependen de la longitud de onda también están presentes en el láser de cavidad en anillo, el cual incluye un polarizador y fibra con baja birrefringencia así como retardadores de onda para el ajuste.

El uso de un filtro de Sagnac que incluye un gran segmento de fibra HiBi, definirá muchos canales muy angostos en el espectro de ganancia con líneas de laseo muy estables, éstas se pueden obtener ajustando las pérdidas que dependen de la longitud de onda por medio de los retardadores de onda en la cavidad en anillo. La oscilación simultánea de dos y tres longitudes de onda separadas por varios nanómetros es relativamente fácil de observar y las líneas permanecen estables gracias al ensanchamiento no-homogéneo del medio de ganancia. Se observó un régimen de sintonización para dos longitudes de onda sobre varios nanómetros. Finalmente, ajustando las pérdidas que dependen de la longitud de onda, obtuvimos regímenes de dos y tres longitudes de onda con 1.76 nm y 0.88 nm de separación, respectivamente, estos valores son más pequeños que el ancho de banda homogéneo del medio de ganancia a temperatura ambiente. Además, nuestros resultados demuestran que la oscilación simultánea de dos y tres longitudes de onda muy cercanamente separadas es posible en un láser de cavidad en anillo de fibra dopada con erbio, el cual incluye un filtro de Sagnac a temperatura ambiente. Se demuestra que para un mejor control y estabilidad del láser se requiere una estabilización de la temperatura.

Finalmente, se observó que la alta sensibilidad a la temperatura hace que este dispositivo se pueda emplear como un dispositivo selector de líneas de laseo mediante la aplicación de temperatura externa en un segmento de fibra HiBi. La alta sensibilidad de este dispositivo a los cambios de temperatura pueden aprovecharse y ayudar en la sintonización de la respuesta del dispositivo a una longitud de onda determinada o bien emplearse el laser mismo como un sensor de temperatura o en el mejor de los casos como un dispositivo que selecciona longitudes de onda menores útiles en dispositivos WDM donde se requiere que el sistema tenga un ancho de banda muy amplio y en donde las longitudes de onda menores son una de las tareas más difíciles de conseguir para este tipo de sistemas.

#### Agradecimientos

A. González-García fue apoyado por la beca CONACYT número 175708 y O. Pottiez fue apoyado por el proyecto CONACYT número 53990.

1. N. Park y P.F. Wysocki, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** (1996) 1459.
2. J. Chow *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **8** (1996) 60.
3. D. Wei, T. Li y Y. Zhao, *Opt. Lett.* **15** (2000) 1150.
4. S.K. Kim, M.J. Chu y J.H. Lee, *Opt. Comm.* **190** (2001) 291.
5. X. Fang y L.O. Claus, *Opt. Lett.* **20** (1995) 2146.
6. C.S. Kim y J.U. Kang, *Appl. Opt.* **43** (2004) 3151.
7. N.J.C. Libatique y R.K. Jain, *IEEE Photon. Tech. Lett.* **13** (2001) 1283.
8. Y. Shiquan *et al.*, *Photon. Technol. Lett.* **14** (2002) 774.
9. C.-S. Kim, F.N. Farokhrooz y J.U. Kang, *Opt. Lett.* **29** (2004) 1677.
10. I. Huixtlaca-Cuatecalt, G. Beltran-Perez, J. Castillo-Mixcóatl y S. Muñoz-Aguirre. *IEEE J. Quantum Electron.* **44** (2008) 49.
11. M.A. Mirza y G. Stewart, *Appl. Opt.* **47** (2008) 5242.

12. J. Xiujie *et al.*, *Opt. Comm.* 281 (2008) 90.
13. R.M. Sova, C.-S. Kim y J.U. Kang, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** (2002) 287.
14. P.D. Humphrey y J.E. Bowers, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **5** (1993) 32.
15. W. Eickhoff, *Opt. Lett.* **6** (1981) 204.
16. A.N. Starodumov, L.A. Zenteno, D. Monzón y E. de la Rosa, *Appl. Phys. Lett.* (in press).