

Eliminación de ruido de ASE en una fibra dopada con erbio empleando un filtro basado en el interferómetro de Sagnac con fibra de Hi-Bi en el lazo

A. Flores-Rosas, E.A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla y M. Bello-Jiménez

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), Lufs Enrique Erro No 1, Tonantzintla, Puebla, 72000, México, e-mail: aflores@susu.inaoe.mx, ekuz@inaoe.mx, baldemar@inaoe.mx

Recibido el 6 de noviembre de 2007; aceptado el 5 de marzo de 2008

Investigamos experimentalmente la aplicación de un filtro térmicamente sintonizable, basado en el interferómetro de Sagnac (SI, *Sagnac interferometer*) con fibra de alta birrefringencia (Hi-Bi, *high birefringence*) en el lazo para eliminar la mayor contribución del ruido producido por amplificación de emisión espontánea (ASE, *amplified spontaneous emission*) en una fibra dopada con erbio. El SI proporciona una transmitancia periódica que depende de la longitud de onda, la cual es empleada como filtro pasa banda si se selecciona adecuadamente la longitud de la fibra de Hi-Bi en el lazo, además, debido a su alta sensibilidad a variaciones de temperatura, es posible ajustar la transmitancia del SI y emplearlo como filtro térmicamente sintonizable. Los resultados experimentales muestran que es posible eliminar la mayor contribución del ruido de ASE (pico alrededor de 1530 nm), por lo que este dispositivo ofrece un gran potencial para ser empleado en amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFAs, *Erbium-doped fiber amplifiers*) como supresor de ruido de ASE.

Descriptores: Interferómetro de Sagnac; birrefringencia; filtros ópticos.

We experimentally investigate the application of a thermally tunable filter based on a Sagnac interferometer with high birefringence (Hi-Bi) fiber in the loop to eliminate the biggest contribution in the amplified spontaneous emission (ASE) noise in an Erbium-doped fiber (EDF). The Sagnac interferometer provides a periodic transmittance that depends on the wavelength, which is used as a bandpass filter if it is selected the length of the Hi-Bi fiber appropriately in the loop. Furthermore due to its high sensibility to temperature variations, it is possible to adjust the transmittance of the interferometer and to use it like thermally tunable filter. The experimental results show that it is possible to eliminate the biggest contribution of ASE (peak around 1530 nm) and therefore this device offers a great potential to be used in Erbium-doped fiber amplifiers (EDFAs) like suppressive of ASE noise.

Keywords: Sagnac interferometer; birefringence; optical filters.

PACS: 07.60.Vg; 42.81.Gs; 42.79.Dj; 42.81.Pa

1. Introducción

El rápido crecimiento de los sistemas de comunicación por fibra óptica ha creado una fuerte demanda de dispositivos, tales como fuentes de luz, dispositivos WDM (*wavelength-division-multiplexed*) y dispositivos todo-fibra. Especialmente dentro de estos últimos, los filtros todo-fibra son muy atractivos por sus propiedades de bajas pérdidas, menor tamaño y alto desempeño, comparados con los filtros ópticos convencionales. En la actualidad existen diferentes técnicas que han sido propuestas para realizar esta aplicación, las cuales hacen uso de elementos tales como filtros sintonizables acusto-ópticos [1, 2], filtros Mach-Zehnder [3], filtros Fabry-Perot [4, 5], rejillas de Bragg [6] y rejillas de periodo largo [7]. Las rejillas de periodo largo (LPGs, *Long-period gratings*) tienen muchas aplicaciones, una de estas es el aplanado de la ganancia en los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFAs, *Erbium-doped fiber amplifiers*) [8]. Sin embargo, el espectro de una LPG normalmente sólo tiene un pico de atenuación alrededor de 1550 nm y no puede cumplir con este requerimiento. Para esta aplicación se requiere de un perfil espectral especial y con múltiples picos. Varias técnicas se han reportado para lograr que el espectro de las LPGs produzca este perfil especial [9–11]. Una desventaja de las LPGs es que cuando se incrementa excesivamente la presión mecánica se presenta una inestabilidad y la alta sensibilidad en la curvatura de

la fibra puede causar cambios indeseables en la respuesta espectral.

Se han propuesto varias técnicas para construir filtros ópticos usando un interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente [12–14]. Sin embargo, la aplicación del SI como filtro para eliminar la mayor contribución del ruido de ASE en una fibra dopada con erbio aún no ha sido reportada. En este artículo proponemos un filtro térmicamente sintonizable basado en el SI con fibra de alta birrefringencia en el lazo, el cual proporciona una transmitancia periódica que depende fuertemente de la longitud de onda, del grado de birrefringencia y de la longitud de la fibra de Hi-Bi en el lazo. Dicha fibra es empleada como filtro pasa banda si se selecciona adecuadamente su longitud [12], además debido a su alta sensibilidad a variaciones de temperatura [15], nos permite ajustar su transmitancia empleándolo como un filtro térmicamente sintonizable. Los resultados obtenidos muestran que es posible eliminar la mayor contribución de ASE (pico alrededor de 1530 nm) en una EDF, por lo que este dispositivo ofrece un gran potencial para ser empleado en amplificadores de fibra dopada con erbio como supresor de ASE.

2. Principio de operación

El SI con fibra de Hi-Bi en el lazo se muestra esquemáticamente en la Fig. 1. Este dispositivo consiste de un acoplador

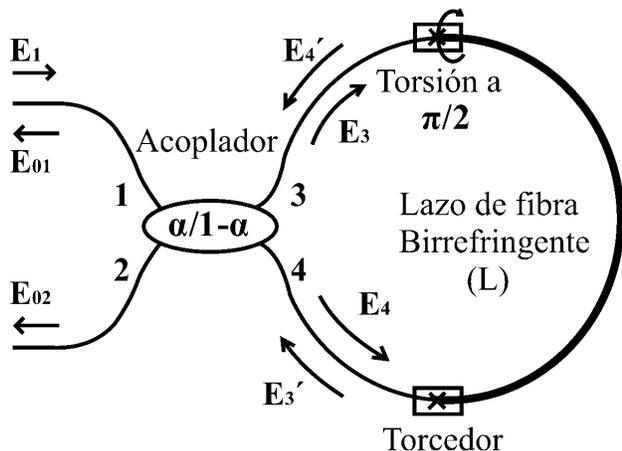


FIGURA 1. Interferómetro de Sagnac con fibra de Hi-Bi en el lazo.

direccional de fibra monomodo de cuatro puertos, en el cual dos de sus puertos están conectados entre sí por medio de la fibra de Hi-Bi formando un lazo de fibra.

En la práctica, si hacemos incidir un haz de luz por el puerto de entrada 1, su campo estará representado por la siguiente ecuación:

$$E_i = \hat{e}_x E_x + \hat{e}_y E_y, \tag{1}$$

donde \hat{e}_x y \hat{e}_y son los vectores unitarios correspondientes a los ejes de referencia x e y de la fibra de Hi-Bi, respectivamente, E_x y E_y son las componentes ortogonales de polarización del campo incidente expresadas por:

$$E_x = E_i \cos \phi, \tag{2}$$

$$E_y = E_i \sin \phi, \tag{3}$$

donde ϕ es el ángulo entre el eje de polarización del campo incidente y el eje x . El haz incidente se dividirá en dos haces que se propagarán por los puertos 3 y 4 con una razón de acoplamiento α y $1-\alpha$, respectivamente, como se muestra a continuación:

$$E_3 = \alpha^{1/2} (\hat{e}_x E_x + \hat{e}_y E_y), \tag{4}$$

$$E_4 = i(1-\alpha)^{1/2} (\hat{e}_x E_x + \hat{e}_y E_y), \tag{5}$$

donde el término i en la Ec. (5) representa un cambio de fase de $\pi/2$ que experimenta el haz transmitido por el acoplador (del puerto 1 al 4). Estos haces se contrapropagarán dentro del lazo del interferómetro y serán descompuestos en dos componentes de polarización correspondientes a la alineación de los ejes lento y rápido (ejes x e y) de la fibra de Hi-Bi para dirigirse nuevamente al acoplador. Para facilitar nuestro análisis consideramos que los ejes en los extremos de la fibra de Hi-Bi, están rotados $\pi/2$ uno con respecto al otro, y renombrando a los campos E_3 y E_4 como E'_3 y E'_4 después de propagarse en la fibra de Hi-Bi (ver Fig. 1), por

consiguiente las expresiones para estos campos son

$$E'_3 = \alpha^{1/2} [\hat{e}_y E_x \exp(i\Phi_{Lx}) + \hat{e}_x E_y \exp(i\Phi_{Ly})], \tag{6}$$

$$E'_4 = i(1-\alpha)^{1/2} [\hat{e}_y E_x \exp(i\Phi_{Ly}) + \hat{e}_x E_y \exp(i\Phi_{Lx})], \tag{7}$$

donde Φ es la fase que adquieren los campos al propagarse en el lazo del interferómetro, la cual está definida por

$$\Phi_{Lj} = \frac{2\pi n_j L}{\lambda}, \tag{8}$$

donde $j = x, y$; L es la longitud de la fibra birrefringente y λ es la longitud de onda del campo incidente. La longitud de la fibra birrefringente se regula de acuerdo a la respuesta espectral que se quiera obtener.

Los campos E'_3 y E'_4 ingresan al acoplador por los puertos 4 y 3, respectivamente, y como resultado dos campos de salida (campos E_{01} y E_{02}) salen del SI definidos por

$$E_{01} = \alpha^{1/2} E'_4 + i(1-\alpha)^{1/2} E'_3, \tag{9}$$

$$E_{02} = \alpha^{1/2} E'_3 + i(1-\alpha)^{1/2} E'_4. \tag{10}$$

Finalmente, sustituyendo las Ecs. (6) y (7) en (10), obtenemos una expresión para la transmitancia del SI con fibra de Hi-Bi en el lazo,

$$T = \frac{|E_{02}|^2}{|E_i|^2} = 1 - 2\alpha(1-\alpha) \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L \Delta n \right) \right], \tag{11}$$

donde Δn es la diferencia del índice de refracción entre los ejes lento y rápido de la fibra de Hi-Bi.

Basándonos en este análisis, es claro que la transmitancia es una función periódica que depende fuertemente de λ y de los corrimientos de fase que experimentan los haces al contrapropagarse en el lazo del SI. Analizando el argumento del término cosenoidal en la Ec. (11), el periodo de la transmitancia $\Delta\lambda$, puede obtenerse por medio de la siguiente expresión [16]:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{\Delta n L}. \tag{12}$$

Por otra parte, es bien conocido que estos dispositivos son altamente sensibles a cambios de temperatura, los cuales ocasionan un desplazamiento en la transmitancia del interferómetro [15]. Este efecto es analizado considerando una dependencia de la temperatura T en el índice de refracción del argumento del término cosenoidal de la Ec. (11). Expandiendo en series de Taylor alrededor de la temperatura T obtenemos la siguiente expresión:

$$T = 1 - 2\alpha(1-\alpha) \times \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L \left(\Delta n(T) + \frac{d\Delta n}{dT} (T - T_0) \right) \right) \right], \tag{13}$$

donde la posición de la transmitancia dependerá linealmente del segundo término del argumento de la Ec. (13), donde

el desplazamiento de un ciclo completo de la transmitancia ocurre cuando

$$\frac{2\pi}{\lambda} L \left(\frac{d\Delta n}{dT} (T - T_0) \right) = 2\pi. \tag{14}$$

Por lo tanto, es claro que variando la temperatura en la fibra del lazo podemos desplazar la transmitancia del interferómetro, esto nos permitirá ajustar la transmitancia a la longitud de onda deseada.

2.1. Ajuste del interferómetro de Sagnac

Debido al cambio de fase entre los haces polarizados ortogonalmente que se contrapropagan en el lazo del interferómetro, su operación óptima está limitada por el ajuste de los ejes de polarización de la fibra de Hi-Bi. Por tal motivo, la torsión en los empalmes del lazo (ver Fig. 1) nos permite alinear los ejes de polarización y producir cambios en la profundidad de modulación *PM*, definida por la siguiente expresión:

$$PM = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x} + I_{m\acute{i}n}}, \tag{15}$$

donde *I_{max}* e *I_{min}* son las intensidades máxima y mínima transmitidas por el interferómetro respectivamente. Para nuestro análisis, la profundidad de modulación en el haz transmitido del SI está expresada por la siguiente ecuación:

$$PM = \frac{2\alpha(1 - \alpha)}{1 - 2\alpha(1 - \alpha)}, \tag{16}$$

donde se observa que ésta depende fuertemente de la razón $\alpha/(1-\alpha)$ del acoplador.

El procedimiento de ajuste consiste en torcer ambos brazos del interferómetro, con la finalidad de alinear la orientación de la polarización de la luz con los ejes de la birrefringencia de la fibra del lazo. Para realizar este alineamiento, a pesar de que los puertos de salida del acoplador están empalmados por fusión a las terminales de la fibra de Hi-Bi, al aplicar una torsión en la región del empalme existe una rotación de los ejes ortogonales de polarización, por lo que se puede conseguir que los ejes coincidan para una máxima transferencia de energía. La torsión en los empalmes provee un simple y práctico procedimiento de ajuste del interferómetro. Para una explicación más detallada acerca de este procedimiento ver Ref. 17.

3. Resultados experimentales

El arreglo experimental para caracterizar la transmitancia del SI con fibra de Hi-Bi se muestra en la Fig. 2. En esta configuración empleamos una fuente de luz blanca, debido a su ancho espectral, la cual hacemos incidir en una fibra monomodo estándar hacia el puerto de entrada del acoplador (puerto 1). El acoplador tiene una constante de acoplamiento $\alpha=0.5$ (para una *PM=1*) y los haces transmitidos hacia los puertos 3 y 4 se contrapropagarán en el lazo de fibra para posteriormente incidir en el acoplador y obtener un haz transmitido

en el puerto 2. El lazo de fibra consiste del empalme de los puertos 3 y 4 con los extremos de la fibra de Hi-Bi como se aprecia en la figura 2, los torcedores se encuentran conectados en la región de empalme y la fibra de Hi-Bi se encuentra sobre un dispositivo Peltier; dispositivo mediante el cual inducimos cambios de temperatura en el lazo.

Para obtener la transmitancia del interferómetro, descrita por la Ec. (13), hacemos incidir el haz de salida del puerto 2 en un monocromador, el cual funciona como filtro espectral dejando transmitir la longitud de onda deseada, para posteriormente ser detectada y con la ayuda de un amplificador *Lock-in* monitorear la transmitancia del interferómetro en el osciloscopio.

En nuestro experimento empleamos una fibra monomodo de Hi-Bi de la marca Fibercore modelo HB1250G con una longitud de repetición nominal $L_B < 1.5 \text{ mm} @ 633 \text{ nm}$. La longitud óptima de la fibra de Hi-Bi se obtiene mediante la Ec. (12), considerando $\lambda=1550 \text{ nm}$ (longitud de onda de señal) y $\Delta n=4.22 \times 10^{-4}$, de donde obtenemos una longitud de fibra de Hi-Bi en el lazo de $L=15 \text{ cm}$ para obtener una transmitancia con periodo $\Delta\lambda=40 \text{ nm}$. Esta transmitancia nos asegura una separación de 20 nm entre el mínimo y máximo de la transmitancia, lo que nos permitirá suprimir la mayor contribución de ruido de ASE producido por una EDF ajustando la transmitancia mínima en 1530 nm y por tanto la transmitancia máxima en 1550 nm. Los resultados experimentales de esta configuración se muestran en la Fig. 3.

Como se aprecia en la Fig. 3a, los resultados experimentales muestran que la transmitancia del SI tiene un periodo de 45 nm, un valor muy cercano al periodo estimado para el

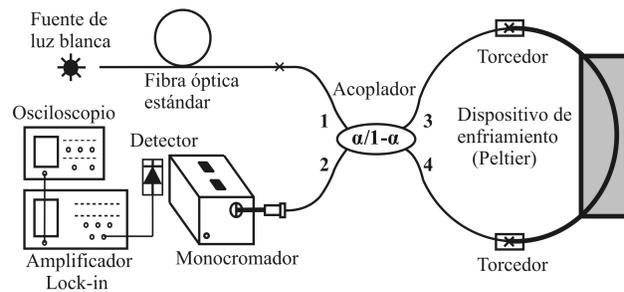


FIGURA 2. Configuración esquemática para caracterizar el interferómetro de Sagnac.

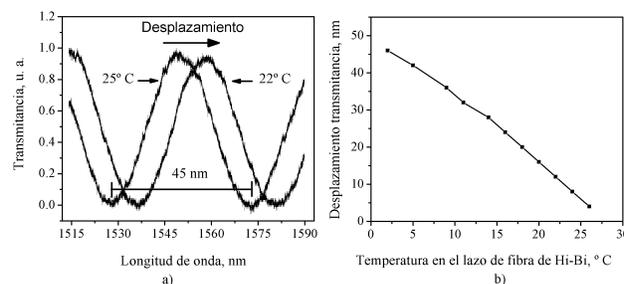


FIGURA 3. a) Transmitancia del interferómetro de Sagnac, b) Desplazamiento de la transmitancia en función de la temperatura inducida en el lazo.

experimento. Además también se observa que la transmitancia tiene un desplazamiento hacia longitudes de onda mayores cuando descendemos la temperatura. Los resultados del corrimiento de la transmitancia en función de la temperatura se muestran en la Fig. 3b. Estos resultados se obtuvieron variando la temperatura en la fibra de Hi-Bi al aplicarle corriente eléctrica a nuestro dispositivo peltier (Fig. 2), la cual se varió de temperatura ambiente hasta cerca de cero grados centígrados. Como se aprecia en la Fig. 3b, el desplazamiento de la transmitancia tiene un comportamiento lineal en función de la temperatura con una razón de $1.73 \text{ nm}/^\circ\text{C}$.

Una vez conocidas las características de nuestro interferómetro, procedemos a probar su efectividad como filtro térmicamente sintonizable para suprimir la mayor contribución de ruido de ASE en una EDF. Para esta aplicación empleamos la configuración mostrada en la Fig. 4, cuya operación es similar a la descrita para la configuración de la Fig. 2, exceptuando que la fuente de luz blanca es reemplazada por un láser de bombeo de 980 nm y la fibra estándar es reemplazada por una EDF. Para esta configuración hemos conectado a los extremos de la EDF un dispositivo WDM, los cuales tienen la función de introducir el haz de bombeo en la EDF por medio del WDM 1 y separar los haces de bombeo y ASE forward (componente de ASE en la misma dirección que el haz de bombeo) por medio del WDM 2. Como se aprecia en la Fig. 4 el haz de ASE forward se propagará a través del interferómetro para posteriormente ser detectado y monitoreado en el osciloscopio.

Los resultados experimentales de esta aplicación se muestran en la Fig. 5. Para esta configuración la EDF tiene una longitud de 15 m y una concentración de iones de Erblio de 1000 ppm, la potencia de bombeo se ajustó en 10 mW y la temperatura en el lazo se varió para ajustar la transmitancia mínima del interferómetro (ver Fig. 3a) en las longitudes de onda de 1530 nm, 1540 nm y 1550 nm con el propósito de visualizar el desempeño del SI como filtro espectral de ASE.

Estos resultados muestran que el desempeño del SI como filtro espectral para eliminar el ruido de ASE depende fuertemente del ajuste de la transmitancia, así como también de la región del espectro que se desea suprimir o transmitir. Es claro que para nuestros propósitos el mejor desempeño se logra ajustando la transmitancia mínima en 1530 nm (Fig. 5b), eliminando la mayor contribución de ruido de ASE, y debido al espaciado de aproximadamente 20 nm entre el mínimo y el máximo de la transmitancia (ver Fig. 3) podemos obtener la transmitancia máxima para longitudes alrededor de 1550 nm. Como se puede observar de la Fig. 3, las regiones del espectro que suprime el SI las refleja hacia longitudes de onda más grandes, cuando se disminuye la temperatura. Para analizar este efecto con más detalle, la transmitancia máxima del SI ha sido ajustada para un intervalo de longitudes de onda entre 1530 y 1560 nm (dentro del espectro de ASE), para posteriormente medir la potencia de ASE transmitida y obtener una gráfica que nos muestre su desempeño como filtro supresor de ASE. Para este experimento la potencia de bombeo se ajustó en 6, 15 y 30 mW, variando así la potencia de

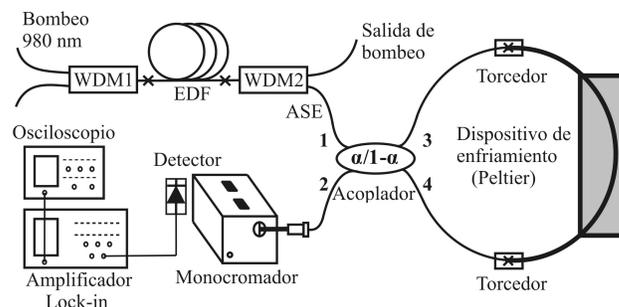


FIGURA 4. Arreglo experimental para filtrar el ruido de ASE de una EDF.

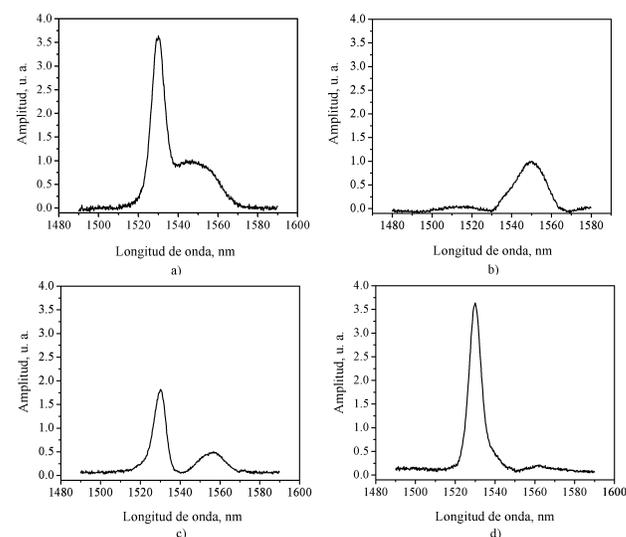


FIGURA 5. Efecto de introducir el SI como filtro espectral de ruido de ASE. a) Espectro de referencia de ASE sin filtrar (generado por una potencia de bombeo de 10 mW), Espectros de ASE ajustando la transmitancia mínima del interferómetro en b) 1530 nm, c) 1540 nm y d) 1550 nm.

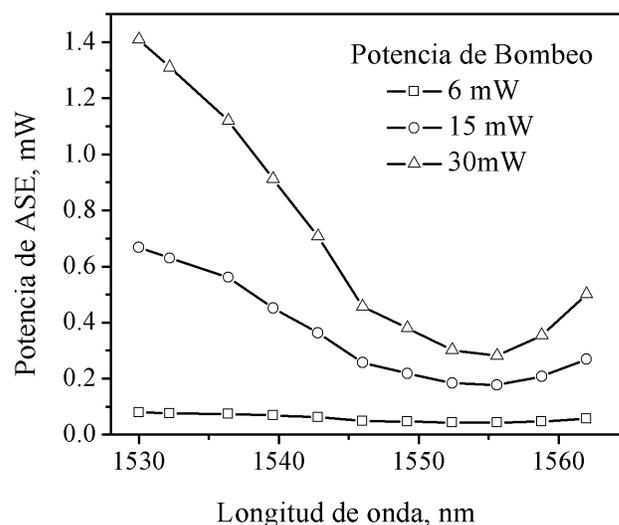


FIGURA 6. Potencia de ASE transmitida, con el SI ajustado a máxima transmitancia para un intervalo de longitudes de onda dentro del espectro de ASE.

ASE que incide en el SI. Los resultados experimentales de esta aplicación se muestran en la Fig. 6.

Como se aprecia en las gráficas de la Fig. 6, a medida que aumenta la potencia de bombeo es más evidente el efecto de introducir el SI como filtro supresor de ruido de ASE en una EDF. De esta figura podemos observar que cuando se ajusta el SI a una transmitancia máxima de 1530 nm (a una temperatura de 25°C, ver Fig. 5d), el ruido de ASE tiene una mayor contribución que cuando se ajusta el SI a una transmitancia máxima de 1550 nm (a una temperatura de 8°C, ver Fig. 5b). Por lo tanto, para eliminar la mayor contribución de ASE en una EDF se debe ajustar el SI a máxima transmitancia para longitudes de onda entre 1550 y 1560 nm (longitudes de onda de señal) ya que en estos puntos la mínima transmitancia del SI suprime la mayor contribución de ruido de ASE (pico alrededor de 1530 nm).

Finalmente, dadas las características del SI y su alta sensibilidad térmica es posible emplearlo como componente intermedio entre dos o más etapas de un EDFA, evitando que la potencia de ASE proveniente de una de las etapas genere una rápida saturación y degrade la ganancia del amplificador.

4. Conclusión

Hemos investigado experimentalmente la aplicación de un filtro térmicamente sintonizable basado en un SI con fibra de Hi-Bi en el lazo para suprimir la mayor contribución de ruido de ASE en una EDF. Experimentalmente se muestra que es posible ajustar el periodo de la transmitancia del interferómetro si se selecciona adecuadamente la longitud de la fibra de Hi-Bi en el lazo, y dada su alta sensibilidad térmica podemos ajustar la transmitancia máxima o mínima del SI a la longitud de onda que se desea transmitir o suprimir. Los resultados experimentales de implementar el interferómetro como filtro térmicamente sintonizable muestran que podemos reducir la mayor contribución de ruido de ASE ajustando la transmitancia mínima en 1530 nm, y obtener una transmitancia máxima para longitudes de onda de señal entre 1550 y 1560 nm. Estas propiedades nos permiten emplear al SI como un filtro espectral entre dos o más etapas de un EDFA y optimizar la ganancia del amplificador.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el apoyo otorgado para el proyecto CONACyT No. 47169.

-
1. Seok Hyun Yun, Bong Wan Lee, Hyang Kyun Kim y Byoung Yoon Kim, *IEEE Photonics Technology letters* **11** (1999) 1229.
 2. R. Feced, C. Alegria, M.N. Zervas y R.I. Laming, *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics* **5** (1999) 1278.
 3. N. Azami, *Optics communications* **263** (2006) 25.
 4. R. Slavík, S. Doucet y S. LaRochelle, *Journal of lightwave technology* **21** (2003) 1059.
 5. C. Lawetz y J.C. Cartledge, *Journal of lightwave technology* **14** (1996) 2467.
 6. Shien-Kuei Liaw, Keang-Po Ho y Sien Chi, *IEEE Photonics Technology letters* **11** (1999) 797.
 7. P.F. Wysocki, J.B. Judkins, R.P. Espindola, M. Andrejco y A.M. Vengsarkar, *IEEE Photonics Technology letters* **9** (1997) 1343.
 8. Bai-Ou Guan *et al.*, *IEEE Photonics Technology letters* **14** (2002) 657.
 9. J.R. Qian y H.F. Chen, *Electronics Letters* **34** (1998) 1132.
 10. A.M. Vengsarkar *et al.*, *Optics Letters* **21** (1996) 336.
 11. D.E. Ceballos-Herrera *et al.*, *Applied Optics* **46** (2007) 307.
 12. Xiaojun Fang, Helin Ji, C.T. Allen, Kenneth Demarest y Lawrence Pelz, *IEEE Photonics Technology letters* **9** (1997) 458.
 13. Yan Han, Qun Li, Xiaoming Liu y Bingkun Zhou, *IEEE Photonics Technology letters* **11** (1999) 90.
 14. Sungwon Kim y Jin U. Kang, *IEEE Photonics Technology letters* **16** (2004) 494.
 15. A.N. Starodumov, L.A. Zenteno, D. Monzon y A.R. Boyain, *Optics communications* **138** (1997) 31.
 16. Chun-Liu Zao, Xiufeng Yang, Chao lu, Wei Jin y M.S. Demokan, *IEEE Photonics Technology letters* **16** (2004) 2535.
 17. E.A. Kuzin, H. Cerecedo Nunez y N. Korneev, *Optics communications* **160** (1999) 37.