

## Modulador acusto-óptico en amplitud de fibra óptica basado en ondas acústicas de flexión

M. Bello-Jiménez

*Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Universidad Autónoma de San Luis Potosí,  
Av. Karakorum 1470 Lomas 4a Secc., 78210 San Luis Potosí, S.L.P, México,  
e-mail: m.bello@cactus.iico.uaslp.mx*

C. Cuadrado-Laborde

*Optical Metrology Lab., Instituto de Física Rosario (CONICET-UNR),  
Ocampo y Esmeralda, S2000EZP Rosario, Argentina,  
e-mail: christian.cuadrado@uv.es*

A. Díez, J. L. Cruz, y M. V. Andrés

*Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo, ICMUV, Universidad de Valencia,  
c/ Dr. Moliner 50, Burjassot, 46100 Valencia, España,  
e-mail: antonio.diez@uv.es; jose.l.cruz@uv.es; miguel.andres@uv.es*

Received 18 December 2013; accepted 8 April 2014

Se reporta un estudio experimental de la operación de un modulador acusto-óptico (MAO) de fibra óptica basado en la interacción acusto-óptica producida por ondas acústicas de flexión estacionarias. Concentramos nuestra atención en los efectos de reducir el diámetro en la fibra óptica como mecanismo para optimizar la respuesta espectral del MAO. Como caso particular reportamos un modulador de 70  $\mu\text{m}$  de diámetro con una alta profundidad de modulación (60 %), bajas pérdidas por inserción (1.3 dB) y un ancho ancho de banda a 3 dB de 40 nm que opera en el rango de los megahertz. Los resultados obtenidos demuestran que el incluir fibras estrechadas se puede considerar como un grado extra de libertad en el diseño del modulador para controlar el ancho de banda.

*Descriptores:* Fibras ópticas; moduladores ópticos; dispositivos acusto-ópticos.

An experimental study of an in-fiber acousto-optic modulator (AOM) based on the acousto-optic interaction produced by standing flexural acoustic waves is reported. We focus our attention in the effects of a gradual reduction in the optical fiber as the mechanisms to improve the spectral response of the AOM. As a particular case we report a 70- $\mu\text{m}$  fiber AOM. Our approach permits the implementation of high modulation depth (60 %), low optical loss (1.3 dB) and a 3 dB broad modulation bandwidth of 40 nm, operating in the MHz frequency range. The experimental results demonstrate that including tapered optical fibers can be regarded as an extra degree of freedom to control the optical bandwidth of the modulator.

*Keywords:* Fiber optics; optical modulators; acousto-optical devices.

PACS: 42.81.-i; 07.60.Vg; 42.79.Hp; 42.79.Jq.

### 1. Introducción

En años recientes los dispositivos acuso-ópticos (AO) de fibra óptica basados en onda acústicas de flexión han recibido un gran interés debido a sus aplicaciones como desplazadores de frecuencia [1], filtros AO sintonizables [2] y moduladores de luz [3], los cuales tienen un gran potencial de aplicación en el marco del desarrollo de dispositivos AO todo-fibra. Su principio de operación se basa en el acoplamiento intermodal inducido por una onda acústica de flexión; cuando la onda acústica se propaga a lo largo de la fibra esta produce una perturbación periódica en el índice de refracción la cual puede conllevar a un acoplamiento intermodal resonante entre el modo fundamental del núcleo y alguno de los modos del revestimiento en la fibra óptica [1-3]. El resultado de esta interacción AO es similar al obtenido por una rejilla asimétrica convencional de periodo largo (LPG, long period fiber grating), de tal forma que podemos analizar esta interacción acusto-óptica como la versión dinámica de una

LPG asimétrica, cuya transmisión se puede controlar dinámicamente mediante la amplitud y frecuencia de la onda acústica. A la salida del dispositivo solo la luz que permanece guiada por el núcleo es transmitida, y la transmisión exhibe uno o varios picos de atenuación a las longitudes de onda donde ocurre el acoplamiento intermodal resonante.

En el marco del desarrollo de moduladores AO de fibra óptica que exploten las ventajas de la interacción acusto-óptica se han propuesto varias alternativas [4-13]. Entre estas, hemos propuesto una técnica de modulación basada en el acoplamiento intermodal inducido por ondas acústicas de flexión estacionarias en una fibra estándar [12,13]. Este nuevo tipo de modulador proporciona una modulación estable que puede emplearse para realizar el amarre de modos activo en un láser pulsado todo-fibra. Sin embargo, el esquema de modulación limita su funcionamiento a anchos de banda reducidos (1.5 nm), lo que es una limitante para sistemas que requieren un mayor ancho de banda. En este trabajo nuestro propósito es reportar una versión mejorada del modulador AO e im-

plementar fibras estrechadas como mecanismo para la optimización de la respuesta espectral del modulador. Como resultado del trabajo experimental reportamos profundidades grandes de modulación (60%), bajas pérdidas por inserción (1.3 dB) y un ancho de banda que depende del diámetro final de la fibra estrechada. Como caso particular reportamos un modulador acusto-óptico basado en una fibra estrechada de  $70 \mu\text{m}$  de diámetro, el cual muestra un ancho de banda a 3 dB de 40 nm. En comparación con esquemas similares de modulación, estos resultados se pueden considerar entre los mejores en el desarrollo de moduladores AO todo-fibra.

A continuación iniciamos la Sec. 2 con la descripción del modulador basado en una fibra óptica estándar. Posteriormente, en la Sec. 3 se describen los resultados de implementar fibras estrechadas como mecanismo para optimizar la respuesta espectral en el modulador. Finalmente, nuestras conclusiones se presentan en la Sec. 4.

## 2. El modulador acusto-óptico de fibra óptica

El esquema experimental del modulador acusto-óptico (MAO) se muestra en la Fig. 1. El modulador consiste de una fuente de radio-frecuencia (RF), un disco piezoeléctrico (DP), una bocina de aluminio y una sección de fibra sin polímero protector para prevenir la atenuación de la onda acústica. Para el caso particular de nuestro modulador la sección fibra sin recubrimiento es de 27.5 cm de longitud, para la cual empleamos una fibra monomodo estándar modelo Corning LEAF optical fiber, con una apertura numérica de 0.14, un diámetro en su revestimiento de  $125 \mu\text{m}$  y un diámetro modal de  $9.6 \mu\text{m}$  a 1550 nm. El DP se excita con una fuente de RF para producir la onda acústica de flexión que se transmite a la fibra óptica con la bocina de aluminio. La bocina está unida al DP y concentra las vibraciones acústicas en la fibra. Con el propósito de producir una onda acústica estacionaria, la fibra sin recubrimiento se fija firmemente en un

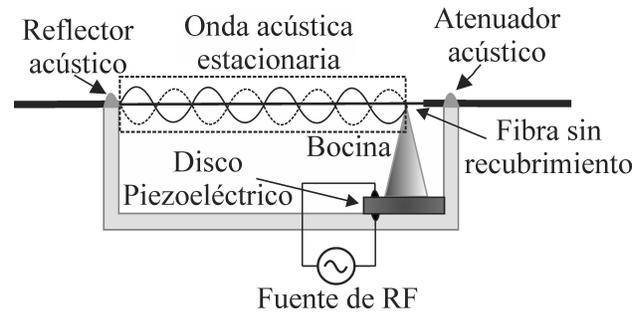


FIGURA 1. Esquema experimental del modulador acusto-óptico de fibra óptica.

extremo del modulador donde se induce reflexión acústica, mientras que en el otro extremo la onda acústica es atenuada. En el reflector acústico la fibra sin recubrimiento es inmersa en un pequeño bloque de estaño, el cual produce la reflexión acústica, mientras que el atenuador basa su operación en la atenuación acústica inducida por la presencia del polímero protector en la fibra óptica, para este caso la fibra con polímero se fija a la base del modulador formándose el atenuador acústico.

Cuando la onda de flexión se propaga a lo largo de la fibra sin recubrimiento se genera una perturbación periódica del índice de refracción. Como resultado de esta interacción se produce un acoplamiento intermodal entre el modo fundamental del núcleo y alguno de los modos del revestimiento de la fibra óptica [1-3]. Así, las propiedades de la LPG inducida acústicamente pueden controlarse variando las características de amplitud y frecuencia la onda acústica. La naturaleza resonante del acoplamiento intermodal hace posible que solo la luz que satisface la condición de ajuste de fase se beneficie de un intercambio de energía entre el modo del núcleo y alguno de los modos del revestimiento. A la salida del MAO sólo la luz que permanece guiada en el núcleo se transmite, y el acoplamiento intermodal resulta en la aparición de un pico de atenuación en el espectro. Este fenómeno se ilustra en la

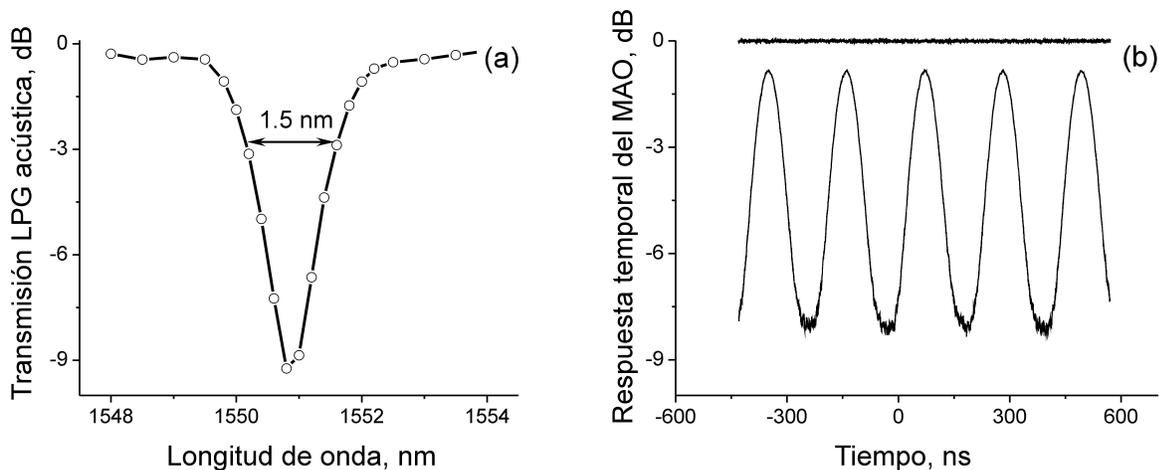


FIGURA 2. (a) Transmisión espectral de la LPG inducida acústicamente en el MAO alrededor de la resonancia localizada en 1550.8 nm. (b) Traza del osciloscopio que corresponde a la transmisión temporal del MAO grabada a la longitud de onda de resonancia; el nivel de referencia es la línea continua correspondiente a 0 dB de transmisión. En ambos casos  $f_a = 2.37315 \text{ MHz}$  y  $V_{DP} = 18 \text{ V}$ .

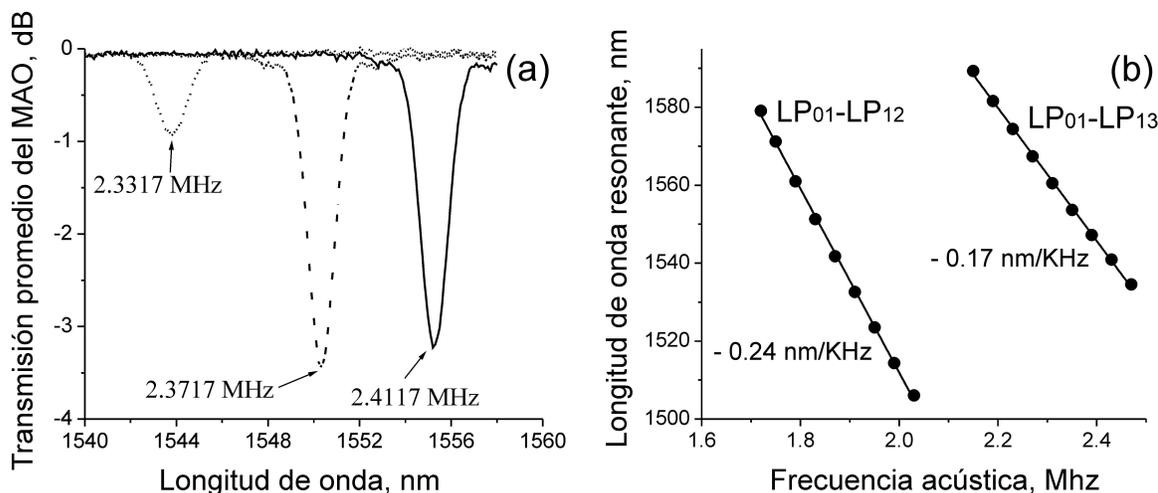


FIGURA 3. (a) Transmisión espectral para un voltaje de RF constante de 18 V y tres frecuencia acústicas diferentes: (i) 2.3317 MHz, (ii) 2.3717 MHz y (iii) 2.4117 MHz. (b) Desplazamiento de la longitud de onda resonante en función de la frecuencia acústica.

Fig. 2(a), donde se muestra la transmisión espectral para la LPG inducida en el MAO al aplicar una señal de RF de 2.37315 MHz y un voltaje de 18 V ( $V_{DP}$ ) al disco piezoeléctrico (de aquí en adelante los valores del voltaje indican la amplitud pico-pico). Los valores específicos de la frecuencia de RF y el voltaje  $V_{DP}$  fueron obtenidos experimentalmente y corresponden al máximo acoplamiento intermodal. La respuesta espectral muestra una transmisión mínima de 9 dB a una longitud de onda óptica resonante ( $\lambda_R$ ) de 1550.8 nm; a esta longitud de onda ocurre la máxima transferencia de energía entre el modo del núcleo y el modo del revestimiento [3]. En el modulador, y como consecuencia de la onda acústica estacionaria, la perturbación acústica oscila en el tiempo y la salida del MAO presenta una modulación en amplitud a una frecuencia que es el doble de la frecuencia acústica ( $f_m = 2 \times f_a$ ). La Fig. 2(b) muestra la transmisión temporal del MAO obtenida a la longitud de onda resonante bajo las mismas condiciones aplicadas en la Fig. 2(a). Puede observarse que la modulación en amplitud se produce a una frecuencia de 4.75 MHz, es decir, a dos veces la frecuencia de la onda acústica ( $f_a = 2.37315$  MHz).

El hecho de que el coeficiente de reflexión acústico no sea exactamente 1, hace que el máximo de la transmisión óptica sea ligeramente menor al nivel de referencia (la transmisión de la fibra cuando no hay onda acústica). Por lo tanto, la transmisión máxima en la señal modulada determina las pérdidas por inserción del MAO a una longitud de onda óptica, frecuencia de RF y voltaje aplicado al DP. La diferencia entre el máximo y mínimo de la transmisión determina la profundidad de la modulación. De estos resultados podemos destacar las bajas pérdidas por inserción de 0.75 dB y la profundidad de modulación máxima de 72 %.

Una característica importante del MAO es su dependencia en frecuencia; cuando la frecuencia acústica cambia también lo hace el periodo de la perturbación ( $\Lambda$ ), y en consecuencia la condición de ajuste de fase se satisface a una lon-

gitud de onda óptica diferente. La Fig. 3(a) ilustra el desplazamiento en longitud de onda de las resonancias del MAO en función de la frecuencia acústica. Los tres espectros reportados en la Fig. 3(a) corresponden a tres frecuencias acústicas diferentes que dan lugar a una caída en la transmisión a diferentes longitudes de onda resonantes. Para este caso, puesto que la transmisión oscila en el tiempo, el espectro medido muestra una transmisión promedio. Las diferentes profundidades en la atenuación deben su origen a la respuesta en frecuencia no plana del piezoeléctrico, una característica muy común en este tipo de dispositivos. Para el caso específico de nuestro modulador, el mayor acoplamiento se encontró alrededor de la longitud de onda óptica de 1551 nm y un acoplamiento entre los modos LP01-LP13. Consecuentemente, el máximo acoplamiento y la máxima profundidad de modulación se obtienen alrededor de esta longitud de onda óptica, como se muestra en la Fig. 2. La Fig. 3(b) muestra el desplazamiento de la longitud de onda resonante en función de la frecuencia acústica  $f_a$ . La razón de cambio medida resulta ser -0.17 nm/KHz y -0.24 nm/KHz para el acoplamiento entre los modos LP01-LP12 y LP01-LP13, respectivamente.

El ancho de banda del MAO lo obtenemos midiendo la profundidad de modulación en función de la longitud de onda óptica, manteniendo la frecuencia acústica y el voltaje de RF constantes. La Fig. 4(a) muestra la dependencia de la profundidad de modulación alrededor de la longitud de onda de resonancia, 1551 nm, cuando  $f_a = 2.37315$  MHz y  $V_{DP} = 18$  V se mantienen fijos. Como se puede apreciar alrededor de la longitud de onda de resonancia la profundidad de modulación decrece simétricamente exhibiendo un ancho total a la mitad del máximo (FWHM, full width at half maximum) de 1.5 nm, y con una profundidad de modulación máxima del 72 %. En el modulador puesto que también se forma un resonador acústico, es interesante cuantificar el desintonizado en frecuencia  $\Delta f_a$ . Con este propósito la longitud de onda resonante y el voltaje aplicado al piezoeléctrico se mantienen

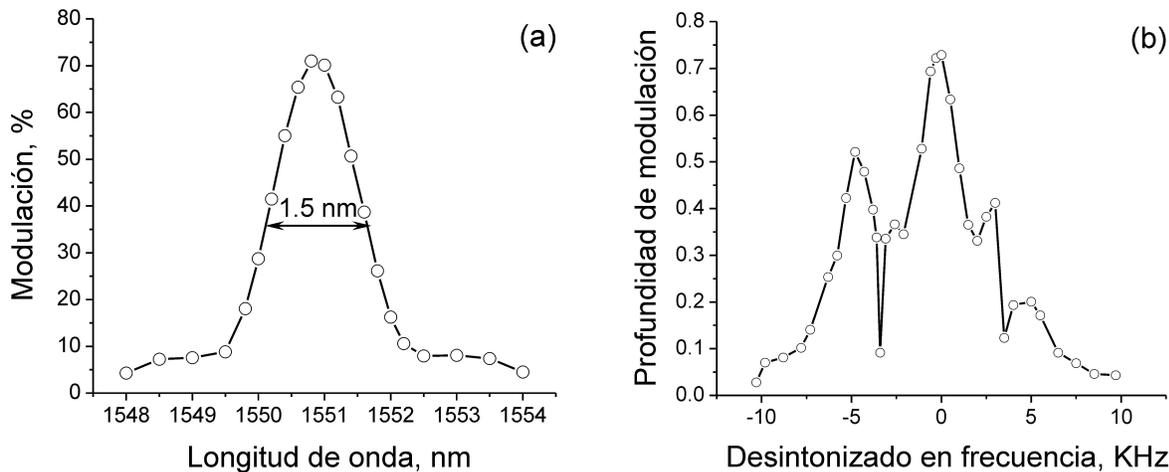


FIGURA 4. (a) Profundidad de modulación en función de la longitud de onda. (b) Profundidad de modulación en función del desintonizado en frecuencia ( $\Delta f_a$ ) manteniendo fijos la longitud de onda resonante (1551 nm) y el voltaje de RF (18 V). La frecuencia central en la Fig. 4(b) es 2.37315 MHz.

constantes en 1551 nm y 18 V, respectivamente. La frecuencia central corresponde a 2.37315 MHz, donde la profundidad de modulación es máxima, y haciendo un barrido en frecuencia obtenemos el desintonizado mostrado en la Fig. 4(b). Como se observa en la figura la modulación decae gradualmente a valores cercanos al cero para frecuencias alrededor de  $\pm 3$  KHz. Para un mayor desintonizado la transmisión oscila y decae gradualmente con una periodicidad aproximada 5 KHz. Por consiguiente, la operación adecuada del MAO está determinada por la frecuencia acústica  $f_a$ , la cual debe seleccionarse para obtener la máxima profundidad de modulación.

### 3. El modulador acusto-óptico de fibra óptica estrechada

Ahora concentramos nuestra atención en los efectos de reducir el diámetro en la fibra óptica del MAO como mecanismo para optimizar su respuesta espectral. Para este propósito la fibra óptica estrechada, mejor conocida por su término en inglés “taper”, se prepara empleando una técnica estándar de fusión y estiramiento, y su diámetro se reduce a  $70 \mu\text{m}$ . En resonancia la longitud de onda resonante ( $\lambda_R$ ) es proporcional a la raíz cuadrada del radio  $R$  de la fibra óptica, y su dependencia esta expresada en la Ec. (1), la cual derivamos siguiendo el análisis desarrollado por Birks *et al.* para una condición de ajuste de fase igual a cero [3]

$$\lambda_R = (n_{co} - n_{cl}) \sqrt{\frac{\pi C_{ext} R}{f_a}} \quad (1)$$

donde  $n_{co}$  y  $n_{cl}$  representan los índices efectivos del modo fundamental del núcleo y del modo del revestimiento, respectivamente,  $C_{ext}$  es la velocidad de la onda extensional,  $5760 \text{ ms}^{-1}$  para la sílice, y  $f_a$  es la frecuencia de la onda acústica. De esta expresión puede observarse que  $\lambda_R$  tiene

una dependencia explícita con respecto a la raíz cuadrada del radio  $R$  de la fibra, e implícitamente a través  $n_{co}$  y  $n_{cl}$  cuya dependencia en  $R$  está determinada por las curvas de dispersión para cada uno de los modos en la fibra. De esta forma, una variación en  $R$  puede ser utilizada para producir un desplazamiento en la longitud de onda resonante. Por lo tanto, imponiendo una reducción gradual del diámetro en la fibra se espera un desplazamiento gradual de  $R$  que contribuya a mejorar la respuesta espectral del modulador. Para conseguir este objetivo la fibra estrechada se fabricó con una transición relativamente larga y un perfil de decaimiento exponencial. La longitud total del taper es de 23.76 cm, que incluye 6.38 cm de longitud en cada una de sus transiciones y 11 cm de lon-

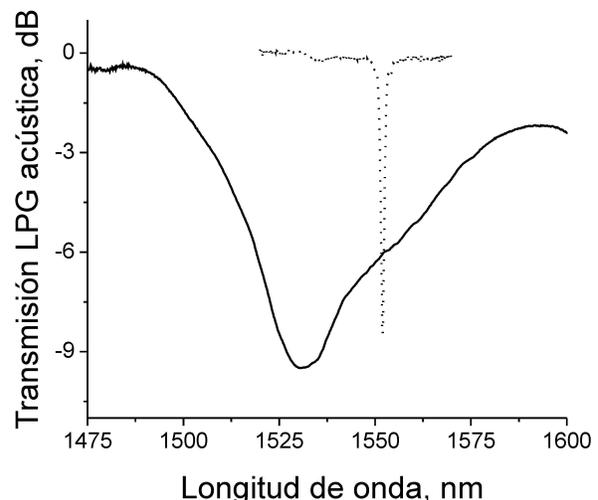


FIGURA 5. Transmisión espectral para una LPG inducida acústicamente en una fibra estrechada biconica de  $70 \mu\text{m}$  (línea sólida). La línea punteada representa la transmisión espectral para una fibra estándar sin estrechar. Las frecuencia acústica se fijaron en 1.014 MHz y 2.37315 MHz, respectivamente.

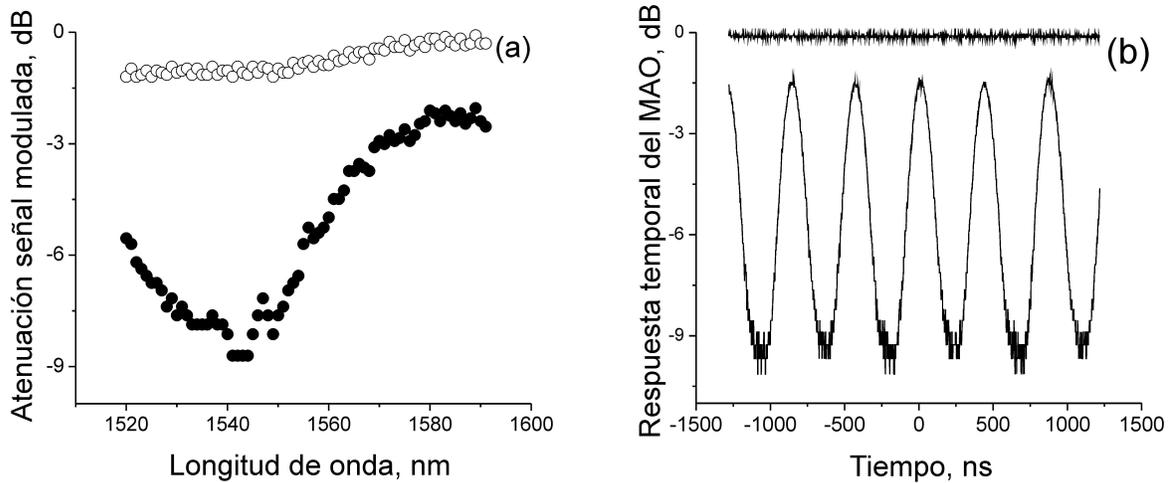


FIGURA 6. (a) Transmisión mínima (círculos sólidos) y transmisión máxima (círculos abiertos) del MAO en función de la longitud de onda óptica alrededor de la resonancia localizada en 1540 nm. (b) Traza del osciloscopio que corresponde a la transmisión del MAO grabada a la longitud de onda de resonancia; el nivel de referencia es la línea a 0 dB. En ambos casos  $f_a = 1.1565$  MHz y  $V_{DP} = 10.2$  V.

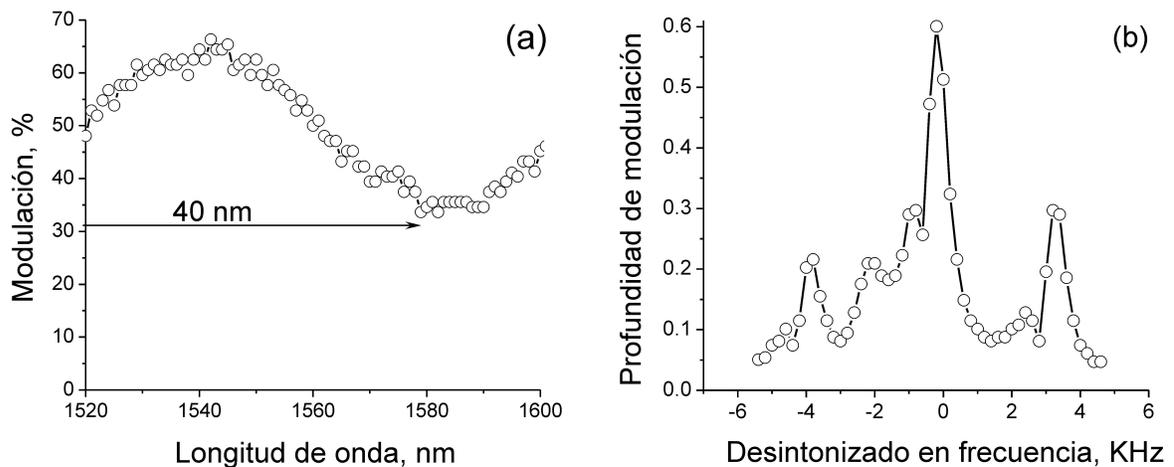


FIGURA 7. (a) Profundidad de modulación en función de la longitud de onda. (b) Profundidad de modulación en función del desintonizado en frecuencia ( $\Delta f_a$ ) manteniendo fijos la longitud de onda resonante en 1545 nm y el voltaje de RF en 10.2 V. La frecuencia central en la Fig. 4(b) es 1.1565 MHz.

gitud en la cintura. En el MAO la longitud total de interacción es 27.5 cm, por lo tanto la fibra estrechada consiste de dos extremos de 1.87 cm de fibra estándar. Como resultado de la interacción acusto-óptica la Fig. 5 muestra la transmisión espectral de la LPG inducida acústicamente en el taper de 70  $\mu\text{m}$ . A manera de comparación y para mostrar el mejoramiento en la respuesta espectral se incluye la transmisión de la fibra óptica sin estrechar. Para estos casos la frecuencia acústica fue seleccionada para producir la máxima transferencia de energía, la frecuencia acústica se fijó en 1.014 MHz y 2.37315 MHz para el taper de 70 m y la fibra sin estrechar, respectivamente.

La transmisión espectral de la LPG acústica revela un ancho de banda a 3 dB de 31.53 nm, con una transmisión mínima de -9.5 dB a la longitud de onda resonante de 1531 nm. Si comparamos estos valores con la respuesta espectral de la fibra sin estrechar (1.5 nm de ancho de banda), entonces po-

demostramos apreciar la mejora lograda con el presente esquema. El ancho de banda se incrementó un factor 20 con respecto a la fibra sin estrechar. El periodo de la LPG acústica se estima en 790 m en la cintura del taper, que se obtiene con la relación de dispersión para una onda de flexión en un cilindro,  $\Lambda = (\pi R C_{\text{ext}} f_a^{-1})^{1/2}$  [3].

La operación como modulador se obtiene cuando inducimos reflexión acústica, bajo esta situación el modulador exhibe una transmisión que oscila en el tiempo como resultado de la formación de una onda estacionaria de flexión, y la transmisión del MAO resulta en una modulación en amplitud a una frecuencia que es el doble de la frecuencia de la onda acústica. En la Fig. 6(a) se muestra la dependencia en longitud de onda para el máximo y mínimo de la señal modulada al aplicar una frecuencia y voltaje al DP de 1.1565 MHz y 10.2 V, respectivamente. La respuesta espectral revela una mínima transmisión de 9 dB a una longitud de onda

de 1545 nm. A esta longitud de onda es donde ocurre la máxima transferencia de energía en el modulador. La Fig. 6(b) muestra la transmisión de la luz en función del tiempo a la longitud de onda resonante y bajo las mismas condiciones descritas en la Fig. 6(a). Se puede observar claramente la modulación en amplitud a una frecuencia de 2.313 MHz, que es dos veces la frecuencia acústica usada (1.1565 MHz). Las mediciones en la Fig. 6 se realizaron iluminando el MAO con un láser sintonizable y detectando la luz transmitida en un osciloscopio estándar. De los resultados presentados enfatizamos una fuerte profundidad de modulación, (60.5 %) y muy bajas pérdidas por inserción (1.3 dB). Si comparamos estos resultados con los mostrados en la sección anterior, la configuración con fibra estrechada mejora sustancialmente la operación espectral del MAO.

Para diversas aplicaciones el modulador tiene un número de características específicas que requieren ser analizadas propiamente, una de ellas es el ancho de banda y lo obtenemos midiendo la profundidad de modulación en función de la longitud de onda óptica, manteniendo fijos la frecuencia acústica y el voltaje de RF. La Fig. 7(a) muestra la dependencia de la modulación alrededor de la longitud de onda resonante de 1545 nm cuando mantenemos fijos la frecuencia acústica ( $f_a$ ) en 1.1565 MHz y el voltaje ( $V_{DP}$ ) en 10.2 V. Como se observa en la figura, a la longitud de onda resonante la profundidad de modulación es máxima y simétricamente decrece para longitudes de onda mayor y menor a  $\lambda_R$ . La medición se realizó iluminando el modulador con un láser sintonizable con una longitud de onda inicial de 1520 nm. La medición del ancho máximo a mitad de altura lo estimamos en 40 nm, con una profundidad de modulación máxima de 60.5 %. La Fig. 7(b) muestra la profundidad de modulación en función del desintonizado en frecuencia  $\Delta f_a$  cuando  $\lambda_R$  y  $V_{DP}$  se mantienen en 1545 nm y 10.2 V, respectivamente. La frecuencia central en la Fig. 7(b) corresponde a 1.1565 MHz; a esta frecuencia la profundidad de modulación es máxima y cae a valores cercanos a cero para frecuencias de desintonizado alrededor de  $\pm 2$  KHz. Para frecuencias de desintonizado mayor la transmisión oscila y decae nuevamente con valores muy cercanos al cero para  $\pm 6$  KHz. De esta forma, la

óptima operación del MAO está determinada por la frecuencia acústica  $f_a$ , la cual debe ser seleccionada para obtener la máxima profundidad y el mínimo desintonizado.

Desde el punto de vista de implementación, el MAO es apropiado como elemento activo en láseres pulsados del tipo todo-fibra, con aplicaciones potenciales en el régimen de pulsos ultracortos por su ancho de banda. Como lo muestran los resultados, el ancho de banda puede ser tan grande como la banda espectral de emisión del Erblio ( $\sim 40$  nm) y puede operar con profundidades de modulación superiores 50 %. Aunado a estos beneficios, sobresalen también las bajas pérdidas por inserción ( $< 2$  dB) y las ventajas inherentes de ser un dispositivo todo-fibra. En la práctica, el incluir fibras estrechadas se puede considerar como un grado extra de libertad para controlar el ancho de banda en el modulador.

## 4. Conclusiones

El modulador acusto-óptico propuesto aprovecha las ventajas del acoplamiento intermodal inducido por ondas acústicas de flexión estacionarias en una fibra estrechada. El esquema propuesto permite la implementación de anchos de banda muy grandes, tan grandes como la banda de emisión de Erblio ( $\sim 40$  nm), exhibiendo altas profundidades de modulación (60 %) y bajas pérdidas por inserción (1.3 dB). Como caso particular se reportó un modulador AO en una configuración que emplea una fibra estrechada bicónica de 70  $\mu\text{m}$  de diámetro. La operación del modulador es adecuada para implementar amarre de modos activos en láseres pulsados todo-fibra.

## Agradecimientos

M. Bello-Jiménez es respaldado por CONACyT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México). C. Cuadrado-Laborde agradece el apoyo financiero al Programa de Investigadores Invitados de la Universidad de Valencia (España). Parte del trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia y la Generalitat Valenciana de España (proyectos TEC2008-05490 y PROMETEO/2009/077, respectivamente).

1. B. Y. Kim, J. N. Blake, H. E. Engan y H. J. Shaw, *Opt. Lett.* **11** (1986) 389.
2. D. Östling y H. E. Engan, *Opt. Lett.* **20** (1995) 1247.
3. T. A. Birks, P. St. Russell y D. O. Culverhouse, *J. Lightw. Technol.* **14** (1996) 2519.
4. D. O. Culverhouse, D. J. Richardson, T. A. Birks y P. St. J. Russell, *Opt. Lett.* **20** (1995) 2381.
5. W. F. Liu, P. St. J. Russell, y L. Dong, *Opt. Lett.* **22** (1997) 1515.
6. M. Y. Jeon, H. K. Lee, K. H. Kim, E. H. Lee, W. Y. Oh, B. Y. Kim, H. W. Lee y Y. W. Koh, *Opt. Commun.* **149** (1998) 312.
7. W. F. Liu, I. M. Liu, L. W. Chung, D. W. Huang y C. C. Yang, *Opt. Lett.* **25** (2000) 1319.
8. D. Zalvidea, N. A. Russo, R. Duchowicz, M. Delgado-Pinar, A. Díez, J. L. Cruz y M. V. Andrés, *Optics Communications* **244** (2005) 315.
9. M.V. Andrés, J. L. Cruz, A. Díez, P. Pérez-Millán y M. Delgado-Pinar, *Laser Phys. Lett.* **5** (2008) 93.
10. C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, M. Delgado-Pinar, J. L. Cruz y M. V. Andrés, *Opt. Lett.* **34** (2009) 1111.
11. C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, J. L. Cruz y M. V. Andrés, *Appl. Phys. B* **99** (2010) 95.

12. M. Bello-Jiménez, C. Cuadrado-Laborde, D. Sáez-Rodríguez, A. Diez, J. L. Cruz y M. V. Andrés, *Opt. Lett.* **35** (2010) 3781.
13. M. Bello-Jiménez, C. Cuadrado-Laborde, A. Diez, J. L. Cruz y M. V. Andrés, *Appl. Phys. B* **105** (2011) 269.