

# Investigación experimental del espejo de lazo óptico no lineal con un acoplador simétrico y una placa retardadora de un cuarto de onda en el lazo

F. Gutiérrez-Zainos<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Universidad del Papaloapan Campus Tuxtepec,  
Calle Circuito Central No 200 Col. Parque Industrial Tuxtepec, Oaxaca. C.P. 68400, México.

B. Ibarra-Escamilla, E.A. Kuzin y U. Ruíz-Corona  
<sup>b</sup>Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE),  
L.E. Erro No 1, Tonantzintla Puebla, Pue. C. P. 72000, México.

O. Pottiez

Postdoctoral Research of FNRS, Belgian Fund for Scientific Research,  
Service d'Electromagnétisme et de Télécommunications, Faculté Polytechnique de Mons,  
Boulevard Dolez 31, B-7000 Mons, Belgium.

Recibido el 1 de octubre de 2004; aceptado el 24 de agosto de 2005

Investigamos experimentalmente la configuración de un espejo de lazo óptico no lineal de fibra formado por un acoplador simétrico, fibra altamente torcida y una placa retardadora de un cuarto de onda insertada en el lazo como controlador de polarización. La placa retardadora se utiliza para crear una asimetría en polarización y se usa la rotación de la polarización no lineal para producir un retraso en fase entre los haces que se propagan dentro del lazo de fibra. Rotando la placa retardadora podemos también variar la característica de transmisión. Algunas ventajas que logramos con esta configuración, en comparación con otros dispositivos similares, son un alto contraste entre el máximo y el mínimo de transmisión y una flexibilidad en el ajuste de su curva característica de transmisión. Con esto tenemos la posibilidad de usarlo para reducir fluctuaciones de amplitud en un tren de pulsos óptico.

*Descriptores:* Interferómetro de Sagnac; óptica no lineal; dispositivos de fibra óptica.

We research experimentally the configuration of an non linear optical fiber loop mirror, with a symmetrical coupler, highly twisted low-birefringence fiber and a quarter-wave retarder plate inserted into the loop as polarization controller. The retarder plate is used to create an asymmetry in polarization and the nonlinear polarization rotation is used to produce a differential phase shift between the counter-propagating beams in the fiber loop. It is possible to change the transmission behavior with the rotation of the retarder plate. Some advantages that we get with this configuration, in comparison with others similar devices are high contrast between the maximum and minimum of the transmission and flexibility in the adjustment of its transmission characteristic curve. With this, we have the possibility to use it to reduce the amplitude fluctuations in a train of optical pulses.

*Keywords:* Sagnac interferometer; nonlinear optics; fiber-optic devices.

PACS: 42.65.Pc; 42.81.Pa; 42.81.Gs; 42.65.Jx

## 1. Introducción

El espejo de lazo óptico no lineal (NOLM, por sus siglas en inglés), llamado también interferómetro de Sagnac de fibra óptica (Fig. 1), esta formado por un acoplador de cuatro puertos con dos de estos puertos unidos por un lazo de fibra [1]. Si nosotros introducimos un haz de luz (E1) por uno de los puertos (P1) del acoplador, éste será dividido en dos haces que viajan dentro del lazo en direcciones contrarias, uno se propagará en sentido de las manecillas del reloj y otro en sentido contrario a las manecillas del reloj. Estos haces viajan a lo largo del lazo de fibra para entrar nuevamente al acoplador para recombinarse y producir un haz de salida (E2) que se conoce como señal transmitida. Para bajas potencias, en el caso ideal con fibras sin birrefringencia, los caminos ópticos de ambos haces contra-propagándose son iguales y el espejo tiene alta reflexión y baja transmisión.

La transmisión puede ser calculada de la fórmula [2]

$$T = 1 - 4\alpha(1 - \alpha), \tag{1}$$

donde  $\alpha$  es la constante de acoplamiento del acoplador. Con esta configuración el lazo óptico se ha propuesto como demultiplexor [3].

Si la intensidad del haz de luz es suficientemente alta, aparecen algunos fenómenos no lineales y el índice de refrac-

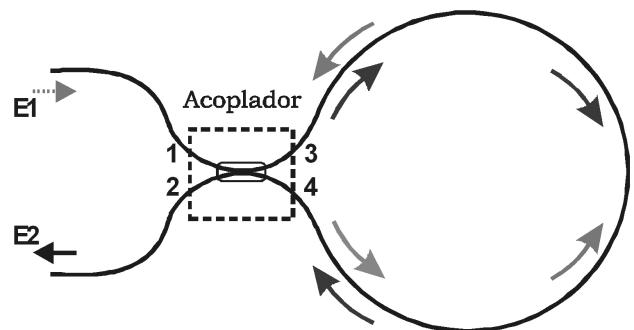


FIGURA 1. Esquema del NOLM bajo discusión.

ción del núcleo de la fibra crece según

$$n(\varpi, I) = n_0 + n_2 I, \tag{2}$$

donde  $\varpi$  es la frecuencia del campo óptico,  $n_0$  es el índice de refracción lineal,  $n_2$  es el coeficiente de índice no lineal, ( $n_2 = 2.6 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$  para fibras de silicio) e  $I$  es la intensidad óptica del haz de luz dentro de la fibra.

Considerando dos haces con la misma longitud de onda propagándose en el lazo, una diferencia de fase no lineal puede aparecer entre ellos si sus potencias llegan a ser diferentes. En la realización de un ciclo, los haces se recombinan en el acoplador y dependiendo del retraso de fase que tengan al momento de recombinarse, éstos se sumarán o se restarán provocando una variación en la característica de transmisión del NOLM, entonces, la velocidad de fase es dependiente de la intensidad y el dispositivo responde a las diferencias en fase entre los haces traslapados. Es así como la característica de transmisión es función del desplazamiento de fase no lineal entre los haces contra-propagándose en el lazo y atribuido a la auto-modulación de fase (SPM, por sus siglas en inglés). Si estos haces tienen igual magnitud, entonces el dispositivo se comporta como un espejo. Para los haces que se propagan dentro del lazo con diferentes amplitudes la transmisión del NOLM está dada por [2]

$$T = 1 - 2\alpha(1 - \alpha)\{1 + \cos[I_{in}(1 - 2\alpha)2\pi n_2 L/\lambda]\}, \tag{3}$$

donde  $I_{in}$  es la intensidad de entrada,  $L$  es la longitud de propagación y  $\lambda$  la longitud de onda del haz que viaja dentro del lazo de fibra. El corrimiento de fase adquirido durante la propagación es entonces  $\phi = I_{in}2\pi n_2 L/\lambda$  (en nuestro caso empleamos  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ , que es la señal del láser de figura ocho). De esta manera, al NOLM se le ha propuesto también como dispositivo de conmutación óptica ultra-rápida [4], para amarre de modos pasivo de láser [5], etc.

En un NOLM convencional que utiliza un acoplador asimétrico,  $\alpha \neq 0.5$ , se tienen diferentes amplitudes contra-propagándose en el lazo. Sin embargo, el contraste (razón entre el máximo y mínimo de transmisión,  $C = T_{m\acute{a}x}/T_{m\acute{i}n}$  donde  $T_{m\acute{a}x}$  es la transmisión máxima,  $T_{m\acute{i}n}$  es la transmisión mínima) es bajo, ya que aun cuando la transmisión máxima se encuentre cercana a uno, la transmisión para bajas potencias no es cero [6] [ver Eq. (1)]. Es posible alcanzar una transmisión mínima igual a cero si se utiliza un acoplador simétrico y colocando un elemento asimétrico, como un atenuador, en alguno de los extremos del lazo. Con esto se puede tener un contraste muy alto pero al introducir el atenuador dentro del lazo se introducen pérdidas de señal al sistema.

Por otra parte, un corrimiento de fase entre dos haces de igual amplitud puede aparecer si los haces que se contra-propagan tienen distinto estado de polarización [7]. Esto se puede lograr si introducimos dentro del lazo del NOLM un dispositivo de control de polarización. El dispositivo de control estará afectando la polarización de los haces dentro del lazo, de tal manera que se produce una diferencia de fase entre los haces contra-propagándose y por lo tanto la variación de la transmisión del NOLM.

Nosotros proponemos un esquema del NOLM tomando un acoplador simétrico, fibra de baja birrefringencia y altamente torcida y una placa retardadora de un cuarto de onda (QWP, por sus siglas en inglés) insertada en el lazo. Utilizamos una entrada con polarización circular. En nuestro arreglo, la QWP es insertada de forma asimétrica en el lazo y agrega modulación de fase cruzada (XPM, por sus siglas en inglés) que juega un papel importante en la transmisión del NOLM. La QWP cambia los estados de polarización circular a lineal de los haces contra-propagándose y su orientación en relación a los ejes principales de la fibra. Así la fase de los haces a la salida del NOLM se ve afectada influyendo en su característica de transmisión.

Con este esquema logramos obtener una transmisión máxima de aproximadamente el 100 % a una potencia de entrada de 30 W valor pico, y una transmisión mínima muy cercana a 0, con lo que logramos obtener un contraste alto de alrededor de 3000, lo que hace a nuestro sistema muy atractivo para diferentes usos como reducción de fluctuaciones de amplitud de un tren de pulsos ópticos.

## 2. Arreglo experimental

La Fig. 2 muestra el arreglo experimental con un acoplador simétrico (0.5/0.5) y una QWP insertada en uno de los extremos del lazo. La QWP está formada por una sección de fibra enrollada en un cilindro pequeño con el diámetro apropiadamente determinado para una placa de un cuarto de onda [8]. Los extremos de esta sección de fibra son empalmados a la fibra del acoplador 0.5/0.5 y al lazo de fibra.

Usamos 500 m de fibra estándar Corning SFM-28 en el lazo de fibra, ésta es de baja birrefringencia y altamente torcida, con una razón de torsión de 43 rad/m. Con la alta torsión estamos induciendo birrefringencia circular (actividad óptica) a nuestro sistema con el objeto de reducir los efectos provocados por la birrefringencia lineal presente en la fibra, que es difícil de controlar y depende de las condiciones ambientales, lo cual marca la inestabilidad del NOLM. El objetivo que tiene la QWP es el de crear una asimetría en polarización entre los haces contra-propagándose. Como fuente de luz de entrada usamos un tren de pulsos de 0.8 MHz (el ancho de los pulsos es de  $\approx 0.2 \text{ ns}$ ) de un láser de figura ocho a 1550 nm y 1 mW de potencia promedio [9]. Este láser está formado por

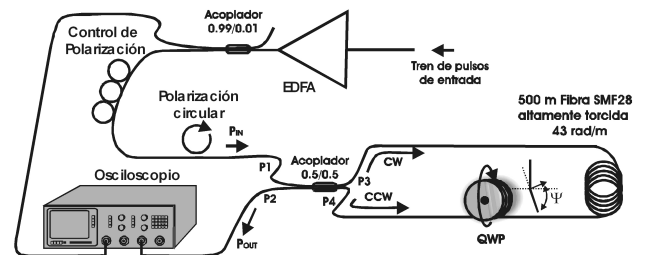


FIGURA 2. Arreglo experimental del NOLM.

un acoplador simétrico, los dos puertos de salida están unidos por una longitud de fibra estándar de 220 m y altamente torcida para formar el lazo de un NOLM, así como un controlador de polarización dentro del lazo. Los puertos de la entrada están unidos por un amplificador de fibra y diversos elementos para controlar la polarización y la dirección de propagación de la señal. Los pulsos del láser de figura 8 con una longitud de onda  $\lambda = 1550$  nm son amplificados por un amplificador de fibra dopada con Erblio (Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA) [10] diseñado para operar esta longitud de onda. La longitud de onda de bombeo de este EDFA es de 980 nm. La fibra dopada con erbio tiene una longitud de 10 m y una concentración de iones de erbio de 1000 ppm. La ganancia a pequeña señal de ese amplificador es de 18.5 dB. Una fracción de la potencia de entrada fue extraída del tren de pulsos por un acoplador 0.99/0.01 para monitorear la señal de entrada a nuestro sistema. Antes de entrar al NOLM los pulsos son polarizados circularmente por medio de un controlador de polarización. El acoplador simétrico divide el haz de entrada en dos haces con igual amplitud sin cambiar su estado de polarización, un haz viaja en sentido de las manecillas del reloj (CW) y el otro en sentido contrario a las manecillas del reloj (CCW). Debido a la posición asimétrica de la QWP (cerca del puerto P4 del acoplador) estos haces se propagan en el lazo con diferentes estados de polarización, la placa retardadora cambia la polarización circular a polarización lineal. Entonces, la salida del NOLM es obtenida por la combinación de dos haces polarizados linealmente y dependiendo de la diferencia de fase que acumulan estos al propagarse por el lazo, pueden interferir, ya sea total o parcialmente [7,11]. Cuando rotamos la QWP un ángulo  $\Psi$ , ambos haces experimentarán la misma rotación en sus estados de polarización, de esta manera, rotando la QWP podemos ajustar la transmisión del NOLM y por lo tanto su conmutación. Los pulsos de entrada se monitorearon en uno de los puertos de salida del acoplador 0.99/0.01 y los pulsos de salida se monitorearon en el puerto P2 del acoplador 0.5/0.5. Estos fueron detectados por un par de fotodetectores de InGaAs con un ancho de banda de 1 GHz los cuales resolvían perfectamente su amplitud pico. La transmisión fue obtenida de la razón entre los voltajes pico de entrada y salida en un osciloscopio digital a 20 GHz.

### 3. Resultados experimentales

La Fig. 3 muestra la transmisión lineal,  $T = P_{OUT}/P_{IN}$  ( $P_{OUT}$  es la potencia de salida,  $P_{IN}$  es la potencia de entrada) en función del ángulo de rotación  $\Psi$  de la QWP (el ajuste  $\Psi = 0^\circ$  es arbitrario). En este caso utilizamos el láser en onda continua y con una potencia fija de 1 mW. Se puede observar que aparecen dos picos en un periodo de alrededor de 190 grados con diferente transmisión, el primero situado a un ángulo  $\Psi = 63^\circ$  (puntos A), con un máximo de transmisión del 42% y mayor que el segundo que está situado a un ángulo  $\Psi = 155^\circ$  (puntos B) y tiene una transmisión máxima del 7%. El pico del punto A se repite en el punto E con un ángulo

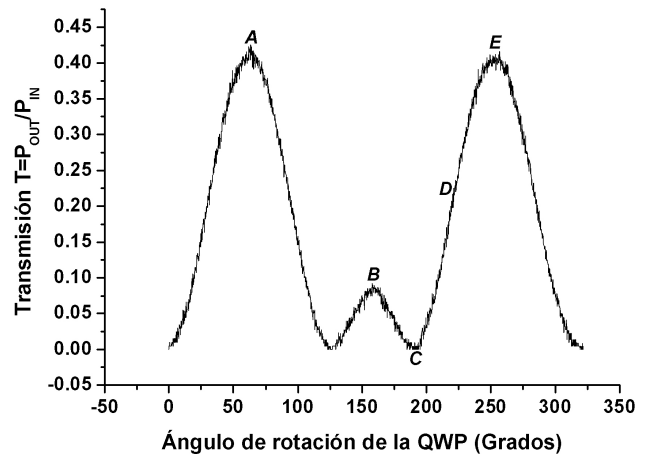


FIGURA 3. Transmisión lineal contra ángulo de rotación  $\Psi$  de la QWP a bajas potencias.

lo  $\Psi = 257^\circ$ . Esta característica sinusoidal se vuelve a repetir si rotamos aún más el ángulo de la QWP.

La transmisión no lineal fue obtenida variando la amplificación del EDFA, la idea ahora es observar el comportamiento de la transmisión del NOLM en función de la potencia de entrada  $P_{IN}$  para diferentes ángulos  $\Psi$  de la QWP (puntos C, D y E de la curva de la Fig. 3). En este caso usamos el tren de pulsos del láser modulado por un tren de pulsos adicional de 20 Hz en forma de rampa. [Esto nos permitía obtener pulsos que variaban entre 0 hasta aproximadamente 50 W de potencia pico a la entrada del NOLM ( $P_{IN}$ )] y así tener una curva continua de transmisión no lineal en función de la potencia de entrada. Los pulsos de salida  $P_{OUT}$ , fueron demodulados por un analizador-demodulador de señal Agilent Technologies (modelo 89441A).

La Fig. 4 muestra la evolución de la transmisión no lineal del NOLM a medida que se aumenta la potencia de entrada, en este caso  $\Psi = 190^\circ$  (punto C en la Fig. 3). La gráfica comienza a partir de aproximadamente 5 W con una transmi-

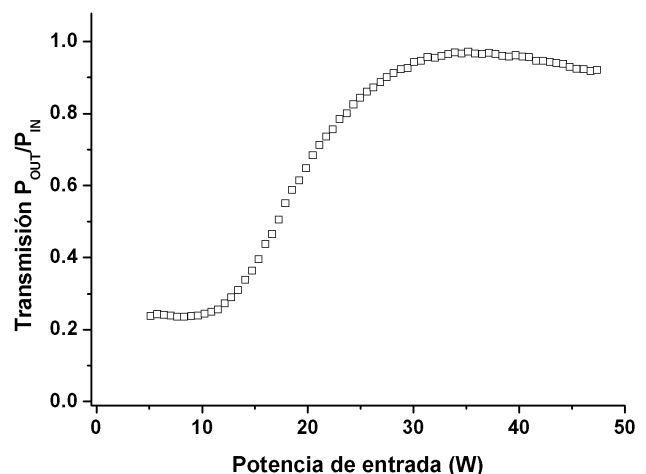


FIGURA 4. Transmisión no lineal contra potencia de entrada  $P_{IN}$  para un ángulo  $\Psi = 190^\circ$ .

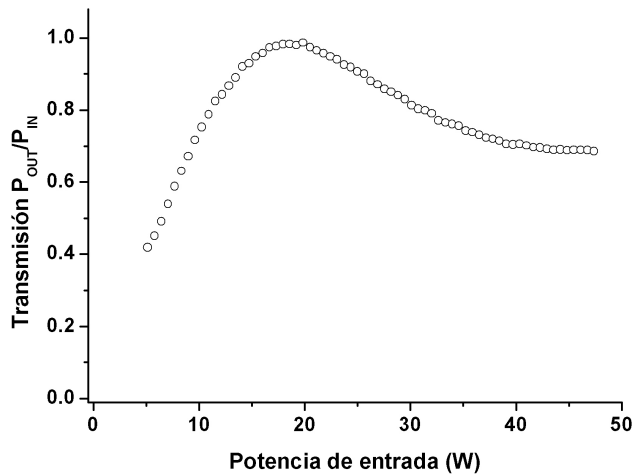


FIGURA 5. Transmisión no lineal del NOLM contra la potencia de entrada  $P_{IN}$  para un ángulo  $\Psi = 225^\circ$ .

sión mínima de alrededor del 28 %, y con una transmisión máxima del 98 %.

Nosotros ignoramos potencias menores a 5 W debido a errores de ajuste al momento de demodular la señal de salida. Sin embargo, la modulación de la señal nos permitía observar, el momento en que se produce la conmutación no lineal y la potencia a la que esta ocurre. En el caso de la Fig. 4 encontramos que la conmutación se produce a un valor  $P_{IN} = 30W$  (en potencia pico). A esta potencia le llamamos potencia crítica [11] que es la potencia a la cual ocurre el máximo de transmisión. Posteriormente, para potencias mayores a este valor, la transmisión comienza a decaer. Este comportamiento se debe a la rotación no lineal de la polarización [12].

La Fig. 5 muestra el comportamiento de la transmisión no lineal en función de la potencia de entrada cuando colocamos  $\Psi = 225^\circ$  (punto *D* en la Fig. 3). Aquí, la transmisión mínima obtenida fue de aproximadamente 40 % y la máxima cercana al 100 %. En este caso encontramos que la conmutación ocurre en alrededor de  $P_{IN} = 20W$ .

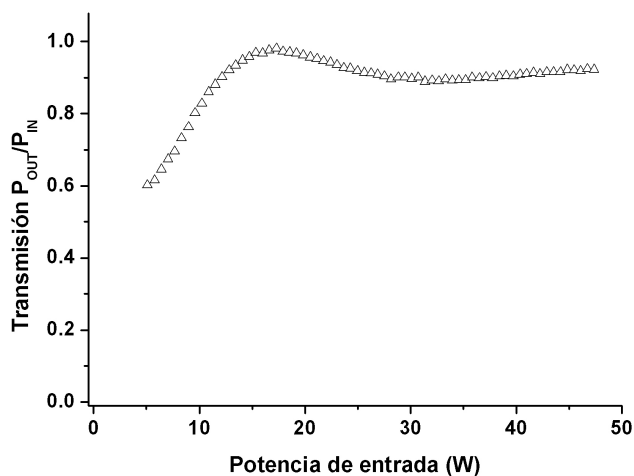


FIGURA 6. Transmisión no lineal del NOLM contra la potencia de entrada  $P_{IN}$  para un ángulo  $\Psi = 250^\circ$ .

La Fig. 6 muestra otro comportamiento no lineal de la transmisión del NOLM, ahora cuando tenemos un ángulo  $\Psi = 250^\circ$  (punto *E* en la Fig. 3). La transmisión mínima obtenida es de alrededor del 60 % y la transmisión máxima de alrededor del 97 %. La conmutación se produce por debajo de 20 W aproximadamente.

Con estos resultados podemos observar que en el punto *C* de la Fig. 3 obtenemos un mejor desempeño del sistema debido a que obtenemos transmisión máxima  $T_{m\acute{a}x} \approx 1$  y transmisión mínima  $T_{m\acute{i}n} \approx 0.2$ , que se puede minimizar hasta casi 0. Para corroborar esto, sustituimos el láser de figura ocho por un tren de pulsos ópticos de 40 ns con una frecuencia de 400 Hz sin modular, una  $\lambda = 1550$  nm a 1 mW de potencia pico, generados por un láser semiconductor, y amplificados por el EDFA. Variando la amplificación del EDFA, ahora la idea es colocarnos en el punto *C* de la gráfica de la Fig. 3, fijar el ángulo  $\Psi$  de la QWP correspondiente a ese punto e ir aumentando la potencia de los pulsos de entrada.

En la Fig. 7 podemos observar claramente la conmutación del NOLM demostrando su comportamiento no lineal. Esta conmutación ocurre alrededor de los 30 W de potencia de entrada igual que en el caso de la Fig. 4. En este caso obtuvimos una transmisión mínima  $T_{m\acute{i}n} = 3.3 \times 10^{-4}$  y una transmisión máxima  $T_{m\acute{a}x} \approx 1$  lo que nos da un contraste  $C = T_{m\acute{a}x}/T_{m\acute{i}n} \approx 3000$ . Cabe mencionar que esta gráfica fue obtenida punto a punto y sin el analizador, de modo que la transmisión obtenida es absoluta.

Como podemos ver de las Figs. 3 a la 7 el NOLM, propuesto muestra una característica de transmisión dependiente de la potencia de entrada. Cuando esta se incrementa de 0 a un valor igual a la potencia crítica se produce la conmutación no lineal. Para valores de potencia más grande que la potencia crítica la transmisión decrece. Variando el ángulo  $\Psi$  de la QWP, podemos ajustar de manera flexible la transmisión del NOLM. Gracias a esto, podemos sintonizar el NOLM para reducir fluctuaciones de amplitud en trenes de pulsos ópticos cortos [6,13,14].

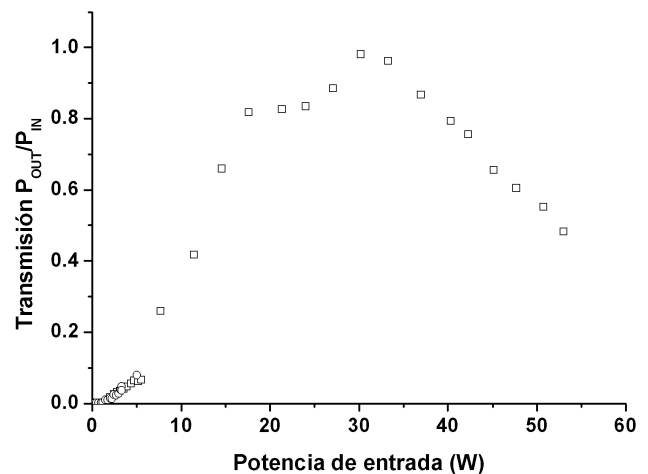


FIGURA 7. Transmisión no lineal del NOLM contra potencia de entrada con un contraste  $C = T_{m\acute{a}x}/T_{m\acute{i}n} \approx 3000$ .

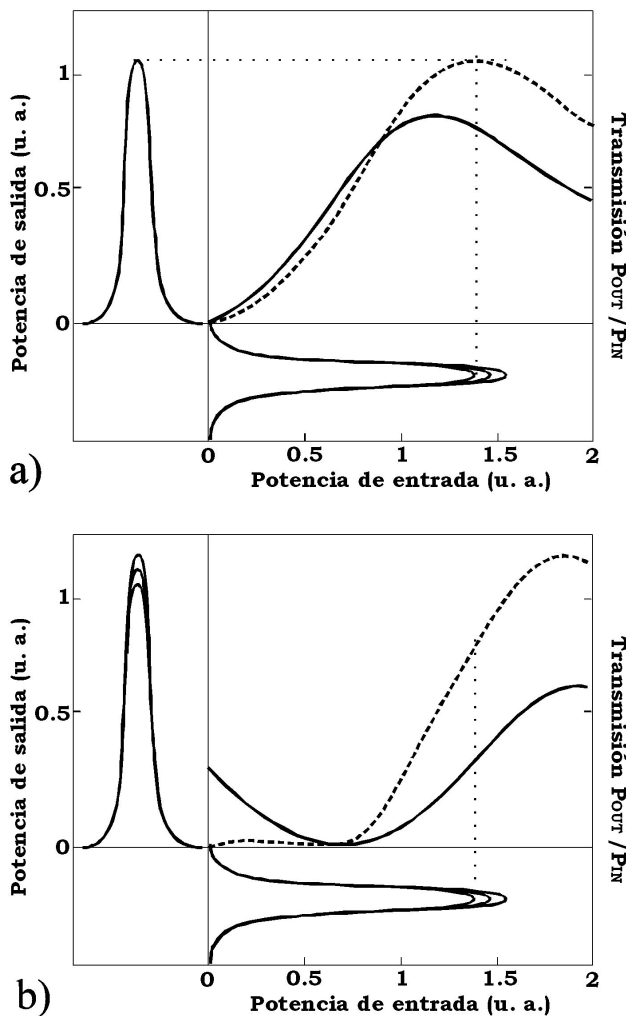


FIGURA 8. a) Reducción de fluctuaciones de amplitud en un pulso. b) Mal ajuste de la curva de transmisión implica amplificación de las fluctuaciones.

Como un ejemplo, ilustramos el efecto que tiene la característica de transmisión del NOLM sobre un tren de pulsos afectado por fluctuaciones de amplitud. En la Fig. 8 están representadas la potencia transmitida por el puerto P2 (línea segmentada) y la transmisión  $T = P_{OUT}/P_{IN}$  (línea continua), ambas en función de la potencia de entrada. Podemos ajustar la forma de la curva para lograr la máxima reducción de las fluctuaciones de amplitud presentes en los pulsos (Fig. 8a). Un mal ajuste de la curva ocasionaría una amplificación de las fluctuaciones (Fig. 8b).

Experimentalmente, se modularon en amplitud los pulsos del láser figura ocho con una señal sinusoidal de 400 Hz y 4W de magnitud constante logramos reducir hasta 20 dB esta modulación. La Fig. 9 muestra las magnitudes de los tres primeros armónicos de la modulación en amplitud en función de la potencia de entrada para tres diferentes posiciones del ángulo  $\Psi$  de la QWP. Estas gráficas fueron obtenidas a través de la demodulación en amplitud en el dominio del tiempo usando el analizador Agilent.

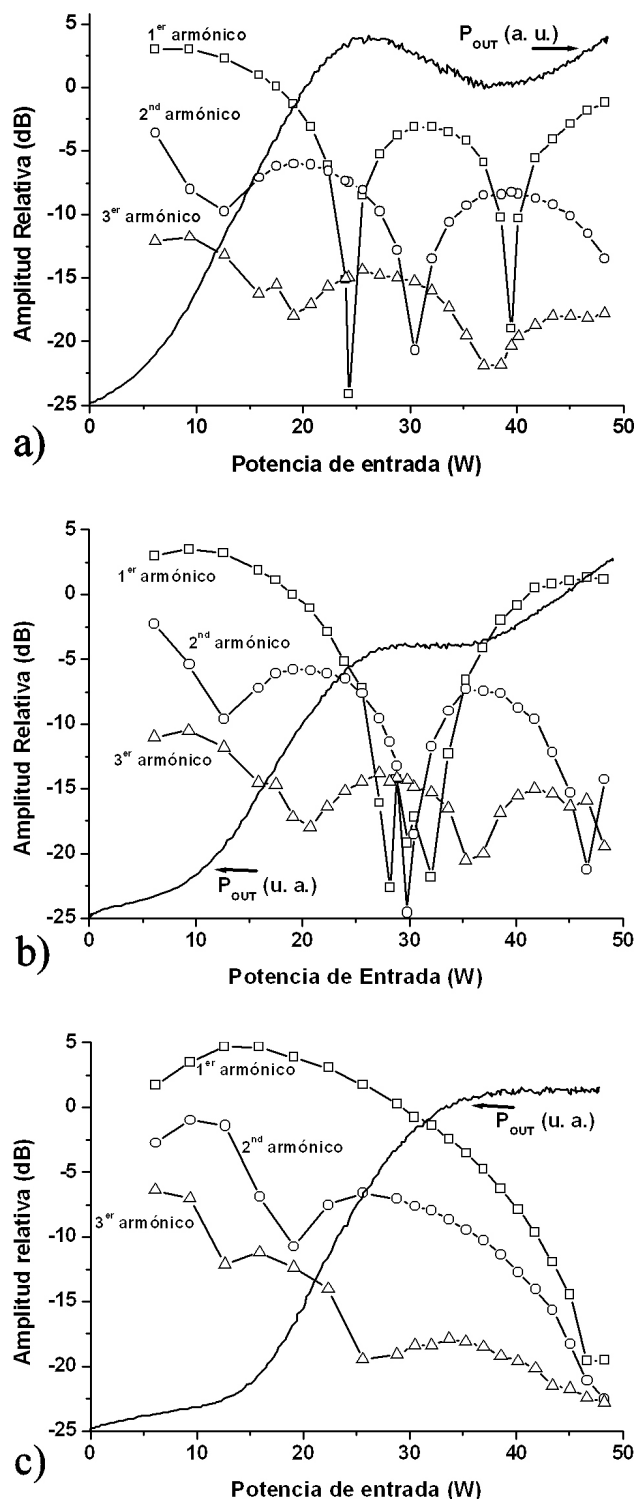


FIGURA 9. Reducción de armónicos de la señal de modulación en amplitud.  $P_{OUT}$  es la potencia de salida en unidades arbitrarias (u.a.)

En la Fig. 9a el primer armónico es reducido hasta 20 dB con aproximadamente una  $P_{IN} = 25$  W, sin embargo, en este punto el segundo armónico está presente con un nivel mayor. Ajustando el ángulo  $\Psi$  de la QWP es posible minimizar simultáneamente los dos primeros armónicos de la modulación

en amplitud como se aprecia en la Fig. 9b. Ajustando más el ángulo  $\Psi$ , la Fig. 9c presenta la situación en que los tres primeros armónicos de la señal de 400 Hz simultáneamente se minimizan. Armónicos de orden mayor no fueron medidos.

#### 4. Conclusiones

En conclusión, analizamos experimentalmente la evolución de la transmisión en función de la potencia de entrada, en una configuración particular del NOLM que incluye un acoplador simétrico, fibra de baja birrefringencia altamente torcida y una QWP insertada de forma asimétrica en el lazo. Usando una señal continua a baja potencia, obtuvimos la evolución de la transmisión lineal del NOLM en función del ángulo de rotación de la QWP. Variando la potencia de entrada del NOLM observamos su característica no lineal y obtuvimos la conmutación

a través de la asimetría en polarización generada por la QWP. Ajustando el ángulo de la QWP esta conmutación puede ser sintonizada fácilmente en algunos valores de potencia de entrada. Con este esquema logramos obtener un alto contraste, en comparación con otros diseños, entre el máximo y mínimo de transmisión, que en nuestro caso resulto de aproximadamente 3000. Logramos experimentalmente, la reducción simultánea de los tres primeros armónicos de una señal de modulación en amplitud inyectada a un tren de pulsos óptico simplemente ajustando el ángulo de rotación de la QWP.

#### Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el proyecto CONACyT No. J36135-A.

- 
1. D.B. Mortimer, *J. Lightwave Technol* **6** (1988) 1217.
  2. N.J. Doran y D. Wood, *Opt. Lett.* **13** (1988) 56.
  3. N.A. Whitaker Jr. *et al.*, *Opt. Lett.* **16** (1991) 1938.
  4. J.D. Moores, K. Bergman, H.A. Haus y E.P. Ippen, *J. Opt. Soc. Am. B* **8** (1991) 594.
  5. I.N. Diling III, *Opt. Lett.* **16** (1991) 539.
  6. M.D. Pelusi, Y. Matsui y A. Suzuki, *IEEE Journal of Quantum Electronics* **35** (1999) 867.
  7. O. Pottiez, E.A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla, J.T. Camas-Anzueto y F. Gutiérrez-Zainos, *Optics Express* **12** (2004) 3878.
  8. H.C. Lefevre, *Electrón Letters* **16** (1980) 778.
  9. E.A. Kuzin, B. Ibarra-Escamilla y D.E. García-Gomez, *Opt. Lett.* **26** (2001) 1559.
  10. J.L. Camas Anzueto, E.A. Kuzin, R. Téllez, B. Ibarra E. y G. Beltrán, *Rev. Mex. Fís.* **50** (2004) 60.
  11. O. Pottiez, E. A. Kuzin, B. Ibarra y F. Méndez, *Opt. Com.* **229** (2004) 147.
  12. E.A. Kuzin, N. Korneev, J.W. Haus y B. Ibarra-Escamilla, *J. Opt. Soc. Am. B.* **18** (2001) 919.
  13. M. Attygalle, A. Nirmalatas y H. F. Liu, *IEEE Photonic Technology Letters* **14** (2002) 543.
  14. K. Smith, E.J. Greer, N.J. Doran, D.M. Bird y K.H. Cameron, *Optics Letters* **17** (1992) 408.