

Efectos No-Lineales en Fibras Ópticas: Acoplador direccional e Interferómetro de Sagnac

Non-Linear Effects in Optical Fibers: Directional Coupler and Sagnac Interferometer

Karla L. Cano-García¹, Javier A. González-Rodríguez¹, Jesús A. Esparza-González¹, Eduardo Cabrera-López¹,
D. Jáuregui-Vázquez² y R. Rojas-Laguna¹

¹División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., 36885, México.

²Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), División de Física Aplicada-Departamento de Óptica, Carretera Ensenada-Tijuana, No. 3918, Zona Playitas, Ensenada 22860, México

kl.canogarcia@ugto.mx; jaqonzalezrodriguez@ugto.mx; ja.esperzaqonzalez@ugto.mx; e.cabrerarlopez@ugto.mx; diauregui@cicese.mx; rlaguna@ugto.mx

Resumen

En este trabajo reportamos resultados numéricos del comportamiento de un haz de luz con polarización circular y elíptica propagándose en una fibra de baja birrefringencia. Se analizan las ecuaciones que describen el comportamiento de un acoplador direccional de cuatro puertos y se presentan los primeros resultados experimentales que se obtuvieron de la fabricación de estos dispositivos.

Palabras clave: Efectos no-lineales; Fibras estrechadas; Acopladores de Fibra; Polarización.

Introducción

La respuesta de un medio óptico, cuando se le aplica un haz de luz láser se vuelve no-lineal cuando la densidad de polarización del medio depende de forma no-lineal con la intensidad del campo del láser que se esté utilizando. Tomando como referencia las ecuaciones de Maxwell, estas polarizaciones no-lineales serán una fuente de nuevas radiaciones. Es conocido en óptica no-lineal que la polarizabilidad no-lineal es responsable de muchos fenómenos importantes, como la dispersión Estimulada Raman (SRS), la dispersión Estimulada de Brillouin (SBS), la generación de armónicos, la mezcla de frecuencias (mezcla de cuatro ondas, Four-Wave Mixing), la conjugación de fase y la refracción no lineal (Agrawal, 1989; Akhmanov, 1972; Bloembergen, 1964; Butcher et al., 1990; Shen, 1984; Yariv, 1989; Boyd, 1992). Los orígenes de estas polarizaciones no lineales pueden ser microscópicos o macroscópicos, dependiendo de si la respuesta no-lineal proviene de la excitación electrónica dentro de un átomo o una molécula, o de excitaciones acústicas de la mayor parte de los átomos. Dado que diferentes excitaciones tienen tiempos de respuesta diferentes, las no linealidades correspondientes también tienen tiempos de respuesta diferentes. En un medio no-lineal isotrópico, la refracción no-lineal se manifiesta de muchas maneras. La birrefringencia no-lineal (o rotación de polarización no-lineal) es uno de los fenómenos más interesantes, desde que se descubrió en 1964 (Maker, P.D. Maker, Terhune, R. W. and Savage, C. M. 1964), y ha encontrado utilidad en muchas aplicaciones. Básicamente, hay dos razones que hacen que la birrefringencia no lineal sea práctica. Uno proviene del hecho de que su respuesta no-lineal es casi instantánea, lo que lo hace muy deseable en dispositivos ópticos de banda ancha, como conmutadores ópticos con anchos de banda de THz. La otra razón está relacionada con la tecnología actual en la fabricación de las fibras ópticas. El tamaño pequeño del modo y la pérdida (0.2 dB/km en la región infrarroja cercana a 1550 nm) extremadamente baja hacen que las fibras ópticas sean un medio no-lineal ideal. El tamaño pequeño del modo hace posible obtener una alta intensidad con una potencia relativamente baja, mientras que una baja pérdida hace posible utilizar mayores longitudes de fibra óptica para que se pueda acumular suficiente modulación de fase no-lineal.

Debido a que la birrefringencia no lineal o birrefringencia autoinducida en medios ópticos *Kerr* ha encontrado muchas aplicaciones, en este trabajo se presentan resultados numéricos del comportamiento de un haz de luz a través de un acoplador de cuatro puertos, analizándose de manera separada la evolución de un haz de

luz polarizado linealmente propagándose en un tramo de fibra birrefringente. Además, se presenta la metodología para la fabricación de acopladores de fibra utilizando una maquina *estrechadora*.

Marco Teórico

1. Acoplador Direccional de 4 Puertos

Con la llegada del acoplador de baja pérdida se han podido construir nuevos dispositivos y sistemas basados en fibra óptica. Un acoplador tiene dos puertos de entrada y dos de salida, Figura 1. Cuando la luz ingresa en una de las entradas esta se divide entre sus dos salidas y la relación de la división depende de la longitud y los parámetros ópticos del acoplador. Al unir un puerto de entrada y salida con una fibra óptica, se puede formar un lazo, de esta manera haciendo posible el diseño de un resonador óptico, líneas de retardo y algunos otros sistemas.

Iniciamos el análisis del acoplador considerando los campos generados por el bombeo del láser como se muestra en la Figura 1.

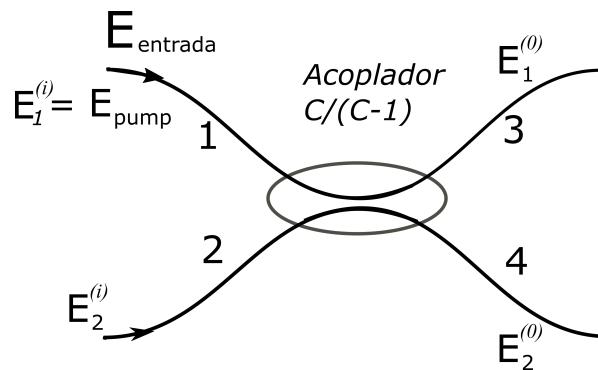


Figura 1. Acoplador de fibra óptica de cuatro puertos, se caracteriza por Cz donde C es el Coeficiente de acoplamiento y z es la Longitud efectiva

Para nuestro análisis tomamos la entrada $E_1^{(i)}$ como constante $E_1^{(i)} = E_{pump}$. Siempre se supondrá un campo polarizado linealmente, por lo cual todos los casos E significa el número complejo que describe la amplitud del campo y así como una sola frecuencia de bombeo ω está involucrada, de modo que el factor $\exp(i\omega t)$ siempre se elimina del problema. Inicialmente, $E_2^{(2)}$ es cero y el campo de salida $E_1^{(0)}$ es solo el efecto del campo del láser que pasa a través del acoplador. Este campo es llamado $E_{1,1}^{(0)}$.

Ahora se considera los campos de salida $E_{1,2}^{(0)}, E_{1,3}^{(0)}, \dots, E_{1,n}^{(0)}, \dots$. Tomados en intervalos de tiempo t , que son suficientes para que el campo se propague alrededor y a través del lazo del acoplador (si el lazo se cierra para obtener un interferómetro). Por lo tanto, $E_{1,n}^{(0)}$ es el efecto de $E_1^{(i)}$, es decir, el campo que induce láser E_{pump} y la entrada $E_{2,n-1}^{(i)}$ combinándose a través del acoplador donde $E_{2,n-1}^{(i)}$ es solo $E_{1,n-1}^{(0)}$ después de propagarse por el lazo. Y cuyo objetivo es el cálculo de $E_{1,n}^{(0)}$.

El efecto del acoplador es representado convenientemente mediante una matriz de 2×2 que opera sobre los campos eléctricos incidentes (complejos).

Para un acoplador sin pérdidas, donde $\bar{\beta}$ es la constante de propagación de una fibra aislada, z es su longitud efectiva y C es el *coeficiente de acoplamiento*.

$$\begin{pmatrix} E_1^{(0)} \\ E_2^{(0)} \end{pmatrix} = e^{i\bar{\beta}z} \begin{pmatrix} \cos(Cz) & i \operatorname{sen}(Cz) \\ i \operatorname{sen}(Cz) & \cos(Cz) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^{(i)} \\ E_2^{(i)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Si existe algún tipo de pérdida involucrada cuando la luz atraviesa el acoplador $\bar{\beta}$ tendrá una parte imaginaria ia_c . Cuyo campo de bombeo del láser E_{pump} es sustituido por $E_1^{(i)}$.

Es así como podemos describir la salida (n+1) como:

$$E_{1,n+1}^{(0)} = e^{i\bar{\beta}z} \{ E_{pump} \cos(Cz) + i \sin(Cz) E_{2,n}^{(i)} \} \quad (2)$$

El campo del láser constante E_{pump} se tomará como real (esto simplemente establece el valor de cero como referencia para el paso de nuestros campos) y así definiendo el número real.

$$A = E_{pump} \cos(Cz) \quad (3)$$

2. Proceso de Fabricación de Acopladores de cuatro puertos de Fibra Óptica

Para la elaboración de los acopladores se utilizan 20 cm (por cada brazo) de fibra óptica estándar SMF-28. Se unen dos tramos de fibra a la mitad. Se retiran 4 ± 0.10 cm del recubrimiento plástico (protección mecánica) y se trenzan entre sí en el área donde se retiró el recubrimiento plástico, con el objetivo de obtener 5 a 7 nudos, los extremos se unen con adhesivo Ciano acrilato (Kola loka) para mantener fijo el trenzado, ver Figura 2.

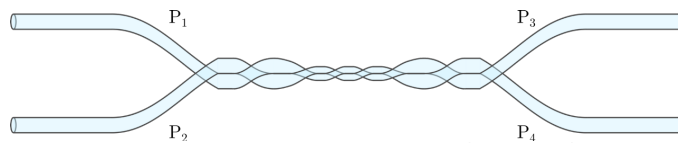


Figura 2. Acoplador de fibra óptica de cuatro puertos, realizado con la técnica de fusión y estiramiento

Para el adelgazado de la fibra se requiere hacer uso de la máquina estrechadora, Figura 3. Se ingresa al menú de los parámetros, la primera variable que se ajusta es el diámetro del cuello en un rango de 12 -15 μm . La velocidad de estiramiento total se fija con un valor de 6mm/min, la velocidad del quemador en 4mm/seg. Se validan los parámetros y se inicia el proceso. Posteriormente, se ingresa al menú que controla los gases del quemador, en esta etapa, se utilizan butano y oxígeno mezclados en distintas proporciones.

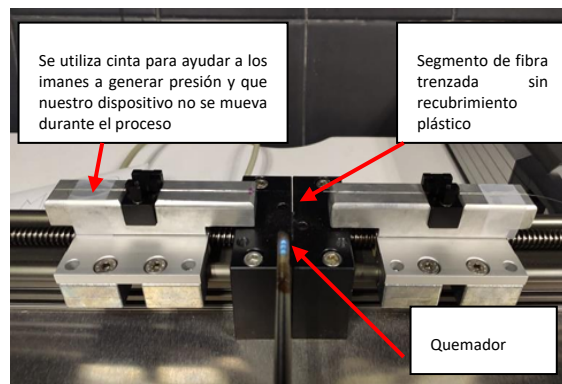


Figura 3. Estrechadora de Fibra Óptica

Finalmente, se procede a colocar el dispositivo a adelgazar sobre la máquina, y se inicia el proceso con la técnica de barrido de flama.

3. Evolución de un haz de Luz en una Fibra óptica Birrefringente

A potencias bajas o en una fibra óptica con alta birrefringencia, la luz polarizada linealmente a lo largo de cualquiera de los ejes principales de la fibra mantendrá su estado de polarización. En ese sentido, los dos ejes principales son totalmente equivalentes. Por lo general, se supone que esta equivalencia también se mantiene a intensidades altas y que un haz de luz intenso orientado a lo largo de cualquier eje no sufrirá cambios en su polarización, salvo imperfecciones que causen dispersión entre los ejes. Por otra parte, a intensidades altas en fibras con baja birrefringencia, la birrefringencia inducida a través del efecto *Kerr* óptico se vuelve comparable con la birrefringencia *natural (residual)* de la fibra óptica. En estas condiciones surge una asimetría entre los ejes principales de las fibras. La birrefringencia inducida se suma a la birrefringencia natural de la luz polarizada a lo largo del eje lento, que sigue siendo un centro de guía estable. Para la luz polarizada a lo largo del eje rápido, las birrefringencias inducida y natural tienden a cancelarse, lo que hace que el eje rápido se convierta en un punto de silla inestable. Las pequeñas desviaciones de la luz polarizada linealmente o la perfecta alineación del campo de entrada a lo largo del eje rápido conducen a estados de polarización de salida muy diferentes. Una característica de esta inestabilidad de polarización es que, pequeños cambios en la intensidad de entrada pueden generar grandes cambios en la intensidad transmitida a través de un polarizador cruzado en la salida de la fibra.

La evolución del estado de polarización de la luz no-lineal en un medio birrefringente se describe convenientemente mediante las ecuaciones de onda acopladas para modos ortogonales polarizados circularmente c_+ y c_- . (Winful, 1985):

$$\frac{dc_+}{dz} = i\kappa c_- + i\beta |c_-|^2 c_+, \quad (5a)$$

$$\frac{dc_-}{dz} = i\kappa c_+ + i\beta |c_+|^2 c_-, \quad (5b)$$

La ecuación (5) muestra que con el aumento de la intensidad hay competencia entre los efectos lineales y no-lineales. Las amplitudes del modo-circular están acopladas debido a la birrefringencia lineal δn a través de $\kappa = \frac{\pi \delta n}{\lambda} = \pi/L_b$, por lo tanto, intercambian energía periódicamente a medida que se propagan, esta birrefringencia natural de la fibra conduce a una evolución del estado de polarización. Los términos de modulación de fase cruzada y β conducen a una diferencia de fase dependiente de la intensidad entre los dos modos y por lo tanto a una rotación de la elipse de polarización (Maker, 1964). El coeficiente no-lineal β es proporcional al índice de refracción de autoenfocamiento n_2 (se le conoce también como índice de refracción no-lineal y es igual a $3.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$, para fibra de silicio). Esta competencia conduce a la asimetría entre los dos ejes y la inestabilidad a lo largo del eje rápido cuando la potencia está cerca de la potencia crítica $P_c = 2\kappa/\beta \text{ W}$. Para una fibra óptica de área efectiva A_{eff} e índice de refracción n , se puede representar a $\beta = 4\pi\chi/3\lambda (\text{W cm})^{-1}$, donde $\chi = 4\pi n_2 \times 10^7 / nc A_{eff}$.

Para haces de luz débiles, se pueden despreciar los términos no lineales en las ecuaciones (5). Por lo tanto, las ecuaciones acopladas se reducen a

$$\begin{aligned} \frac{dc_+}{dz} &= i\kappa c_-, \\ \frac{dc_-}{dz} &= i\kappa c_+, \end{aligned} \quad (6)$$

que representa un oscilador armónico simple con desplazamiento complejo. El estado de polarización está determinado por la relación compleja $\zeta = c_+/c_-$. El azimut de la elipse de polarización es $\theta = (1/2)\arg(\zeta)$, y la elipticidad viene dada por $e = \frac{|\zeta|-1}{|\zeta|+1}$. De la ecuación (6) se puede ver que la elipticidad y el azimut de la elipse de polarización son funciones oscilatorias de la distancia a lo largo de la dirección de propagación, con un período dado por la longitud de repetición (*beat-length*) pulso $L_b = \pi/\kappa$

Resultados

Para la realización de las simulaciones del acoplador se tomaron en cuenta los siguientes parámetros. En primer lugar, la reducción de la matriz (1) presentada anteriormente y cuya reducción puede ser representada mediante un sistema de ecuaciones más pequeño:

$$E_{1s} = e^{i\bar{\beta}z} [E_{1input} \cos(Cz)] \quad (4)$$

$$E_{2s} = e^{i\bar{\beta}z} [iE_{1input} \sin(Cz)] \quad (5)$$

Estas ecuaciones son el resultado de la simplificación de la matriz presentada, la cual nos ayuda a entender su comportamiento dentro del sistema. Esto es debido a que una de las entradas presentes dentro del sistema recibe una retroalimentación de la salida procedente de una estas. Lo que hace que su comportamiento se vea reducido a estas dos ecuaciones, la cual como se aprecia está ligada a la entrada de E_{1input} .

Para la realización de las gráficas consideramos su análisis en un sistema complejo para de esta manera poder apreciar de mejor el comportamiento de los campos eléctricos incidentes. A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos.

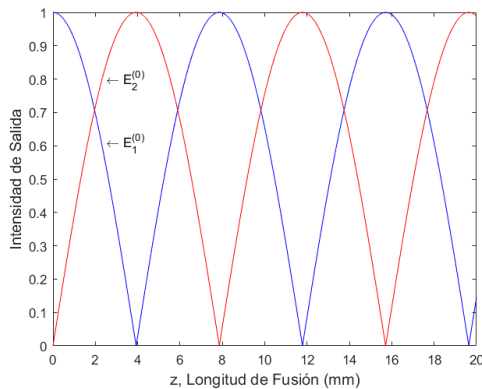


Figura 4. Intensidad de salida utilizando $C=0.4$

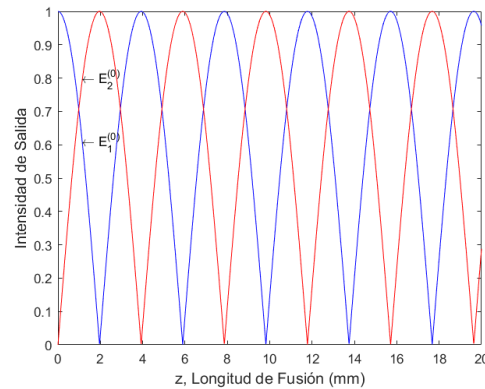


Figura 5. Intensidad de salida utilizando $C=0.8$

Las figuras 4 y 5, se obtuvieron evaluando las ecuaciones 4 y 5, para estos casos se empleó una $\bar{\beta} = 0.0204$. De estas figuras se puede observar que el valor de C tiene una fuerte influencia en la distribución de la energía de los puertos de salida del acoplador. Si se eligiera una longitud de fusión de 2mm y una $C=0.4$, la distribución de la energía sería en la misma proporción para ambos puertos de salida, sin embargo, si se eligiera una $C=0.8$ y la misma longitud de fusión, la energía del puerto de entrada se acoplaría en su totalidad en el puerto de salida 2.

Proceso de Fabricación

En el proceso de la fabricación de los acopladores se utilizó un arreglo experimental, el cuál consistió en el uso de un OSA (Analizador de espectros Ópticos) YOKOGAWA AQ6370B conectado a unas de las salidas del acoplador, y el puerto-1 a un tramo de fibra dopada con erbio excitada con un diodo láser de 980 nm y una corriente de bombeo de 200mA. En el proceso de barrido, y durante el mismo se analiza el espectro de salida, esperando ver una disminución de potencia en el puerto principal (puerto-3) y un desfase en el otro puerto(puerto-4) como se muestra en la Figura 6.

La línea más alta en potencia, visualizada en color morada en el OSA, es la referencia utilizando una corriente de bombeo de 200mA; la línea color rosa es el puerto principal después del proceso de barrido de la flama. Por otro lado, la línea color naranja es la luz que se acopla en el segundo puerto. Como se observa en la figura, para algunas longitudes de onda, los puertos de salida tienen su pico a la misma potencia, lo que nos permite concluir que es un acoplador tipo 50/50.



Figura 6. Espectro de salida de un acoplador 50/50

Siguiendo la metodología presentada, se fabricaron 5 prototipos con las siguientes características:

Tabla 1. Características de estrechado de cada acoplador

Parámetro para cada acoplador	1	2	3	4	5
Diámetro de cuello	15 μ m	15 μ m	12 μ m	13 μ m	14 μ m
Longitud de cuello	2mm	2mm	2mm	2mm	2mm
Longitud de sin recubrimiento	4cm	3.5cm	3cm	3cm	3.5cm
Número de vueltas	6	5	5	6	5
Porcentaje de proceso	70%	62%	69%	64%	66%

El variar los parámetros presentados en la tabla 1, permite establecer las condiciones para obtener acopladores con distintos porcentajes de acoplamiento. Los porcentajes de división de las señales en un acoplador de fibra óptica están determinados por el diseño y la relación de los componentes ópticos en el dispositivo. Un acoplador de fibra óptica puede dividir una señal de entrada en dos o más señales de salida, y los porcentajes de división especifican cómo se distribuye la potencia de la señal de entrada entre estas salidas.

La relación de división de un acoplador de fibra óptica se define por el número de puertos de entrada y el número de puertos de salida. Por ejemplo, un acoplador 1x2 tendrá un solo puerto de entrada (una señal de entrada) y dos puertos de salida (dos señales de salida). Un acoplador 2x2 tendrá dos puertos de entrada y dos puertos de salida, como este último es nuestro diseño para estos 5 dispositivos.

Referente a la relación de potencia está es la distribución de la potencia de la señal entre las salidas del acoplador. Por ejemplo, en un acoplador 1x2 con una relación de potencia de 50:50, aproximadamente el 50% de la potencia de la señal se dirige a cada uno de los dos puertos de salida. En un acoplador 2x2 con una relación de potencia de 70:30, aproximadamente el 70% de la potencia de la señal se envía a un puerto de salida y el 30% restante a otro puerto de salida. La relación de división y la relación de potencia están relacionadas entre sí y determinan los porcentajes de división de señales.

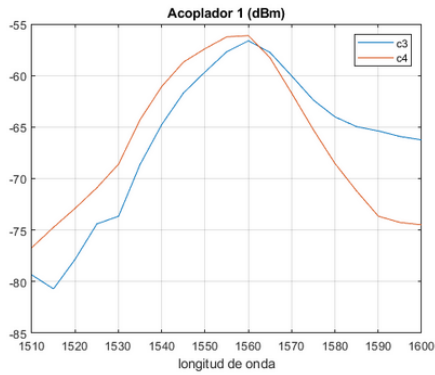


Figura 7. Acoplamiento del dispositivo 1, relación 50/50 a una longitud de onda de 1562nm

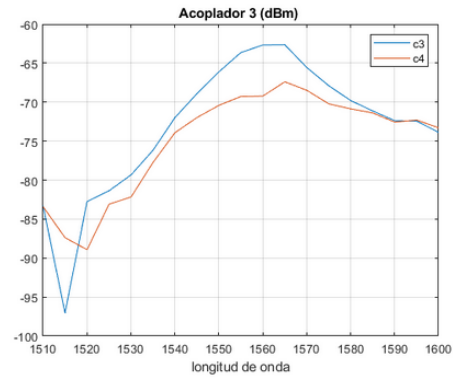


Figura 8. Dispositivo 3, el cual a una longitud de onda de 1590nm se comporta como un acoplador 50/50, en un rango de 1585-1595nm

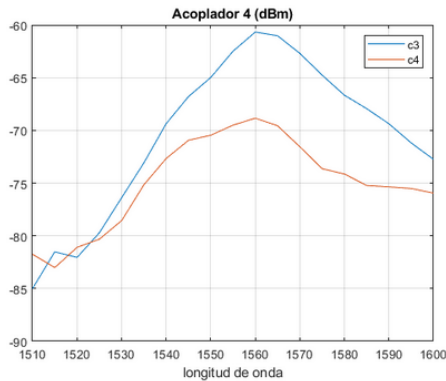


Figura 9. Dispositivo 4, con relación 58/62 en 1560nm

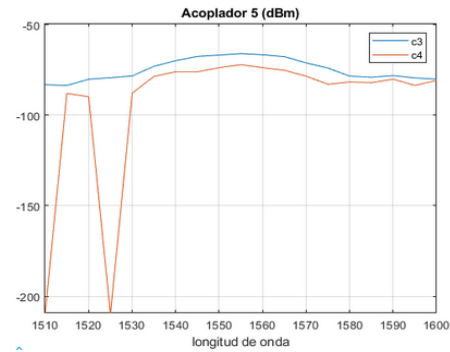


Figura 2. Dispositivo 5, se observa que tuvo pérdidas de potencia más significativas, se deduce que es debido a los parámetros de estrechamiento

Finalmente, con relación a la evolución del estado de polarización de un haz de luz en un tramo de fibra birrefringente, se resolvió el sistema de ecuaciones diferenciales representadas en la Ecuación 5. La distancia de propagación fue de 10m y un haz de luz con una diferencia de fase de $\pi/4$ entre sus componentes. Se propusieron 2 potencias de entrada, una baja potencia y una potencia alta, de tal forma que se pudiera observar la influencia que tiene un haz de luz de alta potencia en la propagación de este en un tramo de fibra.

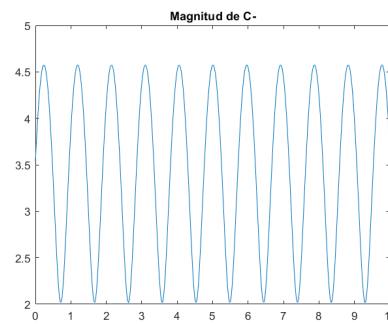
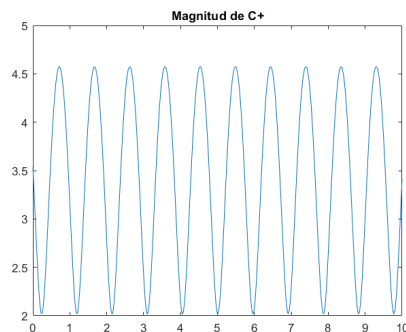


Figura 7. Campos de salida para bajas potencias

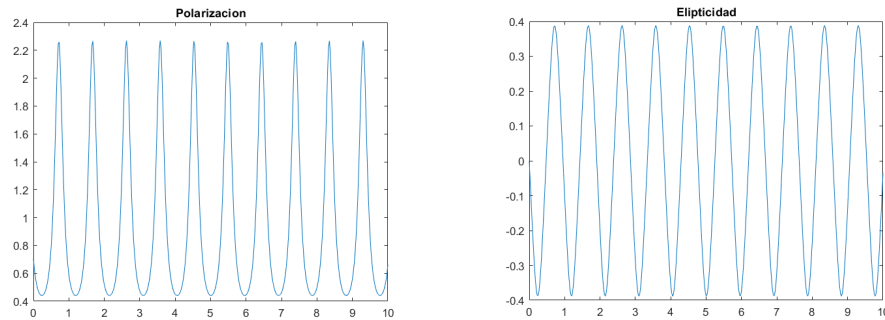


Figura 8. Evolución de la polarización y Elipticidad para un haz de entrada con potencia baja

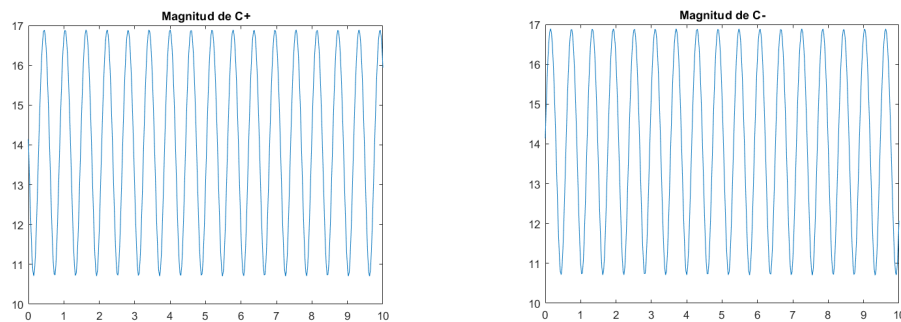


Figura 9. Campos de salida para potencias altas en la entrada de la Fibra óptica

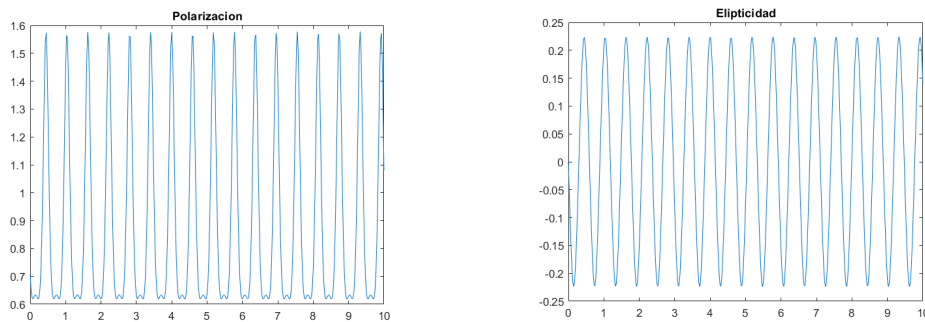


Figura 10. Evolución de la polarización y Elipticidad para un haz de entrada con potencia alta

Conclusiones

El análisis realizado de las ecuaciones que describen el comportamiento de un haz de luz en un acoplador de cuatro puertos y el de un tramo de fibra óptica, permite establecer las condiciones del láser que se utiliza como fuente de bombeo para estimular efectos no-lineales. Los efectos no-lineales que se pueden generar en una fibra birrefringente, pueden permitir el diseño y mejorara de sistemas de comunicación óptica, lo que lleva a una transmisión más rápida y eficiente de datos.

Por otra parte, los acopladores de fibra óptica vienen en diferentes tipos y configuraciones, y se fabrican para adaptarse a diversas necesidades y aplicaciones en el ámbito de las comunicaciones ópticas y en área de sensores. Su versatilidad y rendimiento hacen que sean una parte esencial de las redes y sistemas que hacen uso de la tecnología de fibra óptica. A lo largo de esta investigación, se pudo observar, cómo es que dicho comportamiento de la luz es muy fácil modificarlo con tan solo un mínimo cambio en la fabricación, como lo

es el tiempo de exposición a la flama en el que se encuentra la fibra, o la longitud y diámetro de adelgazamiento de esta, lo cual lo podemos adaptar a ciertas necesidades específicas. Estos dispositivos, se pueden encontrar en redes de sensores como lo es en sistemas de monitoreo o seguridad, creando redes de sensores distribuidos a lo largo de una fibra óptica. Cada sensor en el extremo de la fibra se comunica a través del acoplador para transmitir sus datos hacia una ubicación centralizada. También se pueden encontrar en aplicaciones de interferometría, cambios en índices de refracción y otras mediciones precisas basadas en interferencia óptica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente apoyado por la Universidad de Guanajuato, a través de la Convocatoria Institucional de Investigación Científica (CIIC) 2023, proyecto **260/2023**.

Referencias

- Agrawal, G. P. (1989). *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, Boston.
- Akhmanov, S. A. and Khokhlov, R. V. (1972). *Problems of Nonlinear Optics*, Gordon and Breach, New York.
- Bloembergen, N. (1964), *Nonlinear Optics*, Benjamin, New York.
- Butcher, P. N. and Cotter, D. (1990). *The Elements of Nonlinear Optics*. Cambridge University Press.
- Maker, P.D. Maker, Terhune, R. W. and Savage, C. M. (1964). *Phys. Rev. Lett.* 12, pp. 507.
- Shen, Y. R. (1984). *The Principles of Nonlinear Optics*. Wiley, New York.
- Yariv, A. (1989). *Quantum Electronics*, 2nd Edition. Wiley, New York.
- Boyd, R. W. (1992). *Nonlinear Optics*. Academic Press, Boston.
- Winful, H. G. (1985), *Appl. Phys. Lett.* 47, pp. 213.