



Universidad Autónoma de San Luis Potosí



Facultad de Ciencias

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica

Posgrado en Ciencias Aplicadas

*Modulador Acusto-óptico Pasabanda en Fibra Óptica:
Generación de Pulsos Ultracortos*

Tesis

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias Aplicadas

Presenta:

Ing. Físico Andrés Camarillo Avilés

Director de tesis:

Dr. Miguel Ángel Bello Jiménez

San Luis Potosí, S.L.P., México.

Agosto 2018

TÍTULO:
**MODULADOR ACUSTO-ÓPTICO PASABANDA EN FIBRA ÓPTICA:
GENERACIÓN DE PULSOS ULTRACORTOS**

Nombre del estudiante:
Andrés Camarillo Avilés

Comité que acepta la tesis:

Dr. Miguel Ángel Bello Jiménez (Asesor) _____

Dra. Rosa Elvia López Estopier (Sinodal) _____

Dr. Gustavo Ramírez Flores (Sinodal) _____

Dr. Andrei Yu Gorbachev (Sinodal) _____

Dedicatoria

*A la vida, por
permitirme coincidir con
tres personas extraordinarias:
mi madre, Rosa Camarillo Avilés,
mi abuela, Josefina Avilés Díaz de León
y mi abuelo, Margarito Camarillo Moctezuma*

Agradecimientos

A lo largo de este proyecto de tesis existieron personas que permanecieron, llegaron, se alejaron o partieron a un mejor lugar para nunca volver. Recordar y agradecer a cada una de ellas en este apartado me permite demostrarles mi más sincero aprecio y cariño.

En primer lugar, agradecer enormemente al Dr. Miguel Ángel Bello Jiménez que fungió como mi asesor a lo largo de este proyecto de tesis. Gracias por compartir su experiencia y conocimiento, el cual me permitió mejorar enormemente la calidad y presentación de todas las actividades desarrolladas dentro y fuera del laboratorio.

A mi madre, gracias por estar dispuesta a sacrificar de manera desinteresada un sin número de sueños y aspiraciones, solo por el simple hecho de permitirme construir mi trayecto en cualquiera que fuese mi camino a lo largo de mi existencia. Infinitas gracias.

A mi abuelo y a mi abuela, sin los cuales desconozco cuál hubiese sido el rumbo de mi vida. Hay días en los que su partida es aún difícil de creer, pero todo lo que construí, construyo y construiré fue, es y será fruto de haberme transmitido sus virtudes y enseñanzas, un abrazo inmenso hasta el cielo.

A mis sinodales, la Dra. Rosa Elvia López Estopier, el Dr. Gustavo Ramírez Flores y el Dr. Andrei Yu Gorbachev por sus acertados comentarios en la construcción de este proyecto de tesis.

A los doctores que en algún punto me impartieron un curso o materia, gracias por compartirme su pasión y amor por la ciencia. Especialmente al Dr. Raúl Eduardo Balderas Navarro, gracias por ser desinteresadamente un amigo, una persona en quien confiar y con quien reír de incontables momentos y sucesos.

A mis amigos de posgrado, Daniel, Claudia, María del Rosario, José Emanuel, Luis Enrique y Daniel Cárdenas, gracias por estar conmigo en los mejores momentos, pero sobre todo en los más difíciles.

A mis compañeros y amigos de laboratorio, Erika, Gustavo y Abraham por compartirme sus experiencias y aventuras dentro y fuera del laboratorio abriendo paso a momentos de sosiego y bálsamo que permitieron trabajar de una mejor manera en nuestras actividades.

Finalmente, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por financiar este proyecto de tesis a través de la beca número 602914 (CVU: 775835) y el proyecto Fronteras de la Ciencia 2016 número 2438.

Lista de publicaciones

1. Miguel Ángel Bello-Jiménez, Erika Hernández-Escobar, Andrés Camarillo-Avilés, Olivier Pottiez, Antonio Díez and Miguel V. Andrés Bou. “Actively mode-locked all-fiber laser by 5 MHz transmittance modulation of an acousto-optic tunable bandpass filter”, *Laser Physics Letters* 15(8), 085113 (2018).
DOI: <https://doi.org/10.1088/1612-202X/aac9dB>

Congresos y exposiciones

1. Presentación de cartel con nombre “Modulador acusto-óptico optimizado: Generacion de pulsos ultracortos” en el marco del premio universitario a la investigacion socio-humanistica, científica y tecnológica 2017 en el Concurso de Exhibicion de Carteles de Proyectos de Investigacion en la modalidad de Investigación Científica, San Luis Potosí, S.L.P., México.
2. Resumen en extenso aceptado con el nombre “Mode-locking Pulse Generation Based on In-fiber Acousto-optic Tunable Bandpass Modulator” en el Congreso Frontiers in Optics / Laser Science 2018, Washington D.C., Estados Unidos de América.
3. Artículo aceptado con el nombre “Láser de amarre de modos activo basado en la modulación acusto-óptica de un filtro pasabanda” en el LXI Congreso Nacional de Física 2018, Puebla, Puebla, México.

Índice General

Dedicatoria.	I
Agradecimientos.	II
Lista de publicaciones.	III
Congresos y exposiciones.	IV
Índice de figuras.	VII
Índice de tablas.IX

Capítulo 1: Introducción general

1.1 Introducción.	1
1.2 Objetivos.	4
1.3 Estructura de la tesis.	5
1.4 Referencias.	6

Capítulo 2: Filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda

2.1 Introducción.	8
2.2 Bloqueador del modo fundamental	9
2.3 Filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda.	12
2.4 Análisis de las longitudes de acoplamiento y reacoplamiento del modo LP_{0l} al LP_{1m}	15
2.5 Conclusiones.	16
2.6 Referencias bibliográficas.	18

Capítulo 3: Láser de fibra óptica tipo “Mode Lock” basado en modulación pasabanda por ondas acústicas de flexión

3.1 Introducción.	20
3.2 Modulador sintonizable acusto-óptico pasabanda.	23
3.3 Láser de pulsos ópticos ultracortos tipo Mode Lock.	29
3.4 Conclusiones.	37
3.5 Referencias.	39

Capítulo 4: Operación simultánea de pulsos ópticos Q Switched, Mode Locked (QML)

4.1 Introducción.	41
4.2 Configuración del modulador AO pasabanda para la emisión de pulsos QML.	42
4.3 Emisión simultánea de pulsos Q-Switched y mode locked.	44
4.4 Conclusiones.	47
4.5 Referencias.	49

Capítulo 5: Conclusiones y trabajo a futuro

5.1 Conclusiones.	51
5.2 Trabajo a futuro.	53

Índice de Figuras

Capítulo 2

- 2.1 Bloqueador del modo fundamental utilizando una fibra sin núcleo.
- 2.2 Espectro de emisión del DSL antes y después de pasar a través del BMF.
- 2.3 Arregla experimental del filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda.
- 2.4 Espectro de transmisión del FSAP a la frecuencia acústica de 2.384 MHz.
- 2.5 Característica sintonizable de la FSAP: frecuencia de onda acústica frente a longitudes de onda ópticas resonantes. La línea punteada indica el acoplamiento de modo más fuerte.
- 2.6 Transmisión del filtro como función de la longitud para el acoplamiento del modo LP_{01} a LP_{11} a la longitud de onda óptica resonante de 1527.7 nm. La frecuencia acústica y la tensión aplicada al piezoeléctrico se fijaron a 2.384 MHz y 33 V, respectivamente.
- 2.7 Espectro de transmisión del FSAP a la longitud óptima de $L = 70$ cm y la frecuencia acústica de 2.384 MHz.

Capítulo 3

- 3.1 Arreglo experimental del filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda (FSAP). Arriba se muestra el efecto de acople y reacople del modo fundamental debido a la existencia del BMF.
- 3.2 Respuesta de transmisión del BMF en ausencia de onda acústica.
- 3.3 Máxima transferencia de energía (acoplamiento intermodal LP_{01} - LP_{12}) a una f_a de 2.430 MHz y un V_{DP} de 24 V. La grafica insertada muestra la calibración del dispositivo: longitud de onda resonante contra la frecuencia de la onda acústica.
- 3.4 Traza del osciloscopio de la modulación de amplitud AO registrada en la longitud de onda resonante de 1569 nm. La línea magenta es la señal de RF de 20.4 V aplicada al disco piezoeléctrico.
- 3.5 Profundidad de modulación en función de la longitud de onda óptica a una frecuencia acústica constante (2.43113 MHz) y tensión de RF (20.4 V).
- 3.6 Profundidad de modulación en función de la frecuencia de desintonizado (Δf_a) manteniendo constantes la longitud de onda resonante (1569 nm) y el voltaje de RF (20.4 V). La frecuencia acústica central es 2.43113 MHz.
- 3.7 Profundidad de modulación máxima frente a la longitud de onda resonante.
- 3.8 Arreglo experimental del láser de fibra mode lock en forma de anillo.
- 3.9 Tren de pulsos mode lock generado con una frecuencia de repetición de 4.869 MHz y un bombeo de 616 mW. La señal sinusoidal corresponde al voltaje de RF aplicado al disco piezoeléctrico.
- 3.10 (a) Medición del espectro óptico del tren de pulsos mode lock. (b) Traza de autocorrelación correspondiente a los pulsos de salida de la cavidad láser.

- 3.11 Espectro de RF del tren de pulsos de salida medido con un spam de 8 MHz y un ancho de banda de resolución de 1 kHz.
- 3.12 Ancho del pulso y potencia pico en función de la potencia de bombeo.
- 3.13 Ancho del pulso y potencia pico en función del voltaje RF (V_{DP}).
- 3.14 Ancho del pulso y potencia pico en función del desintonizado en frecuencia.
- 3.15 Estabilidad del pulso ultracorto a lo largo de aproximadamente una hora.
- 3.16 Operación sintonizable del láser mode lock para diferentes frecuencias de modulación.

Capítulo 4

- 4.1 Arreglo experimental del modulador acusto-óptico pasabanda.
- 4.2 Traza del osciloscopio de la onda acústica (línea negra) con frecuencia de 2.435 MHz y 28.4 de V_{DP} . La traza roja es la señal del ciclo de trabajo con un ancho temporal de 800 μ s con una frecuencia de repetición de 1 kHz.
- 4.3 Arreglo experimental del láser de fibra Q switch, mode lock en forma de anillo.
- 4.4 (a) Espectro óptico. (b) Traza de autocorrelación correspondiente a los pulsos mode lock.
- 4.5 (a) Tren de pulsos QML generado con una frecuencia de repetición de 1 kHz y un bombeo de 600 mW. (b) Detalle de un pulso QML empleando los parámetros mostrados en la tabla 4.1.
- 4.6 Pulsos QML obtenidos a 2.435 MHz y 1.0 kHz de frecuencia acústica y ciclo de trabajo, respectivamente, y una potencia de bombeo de 600 mW. Pulsos QML para diferentes tamaños de ciclo de trabajo: 575 μ s (a), 650 μ s (b), 800 μ s (c), 875 (e) y 925 μ s (f). (d) Pulso central mode lock para un ciclo de trabajo de 800 μ s.
- 4.7 Ancho de la envolvente Q switch y potencia pico del pulso QML en función del ciclo de trabajo.

Índice de tablas

Capítulo 3

- 3.1 Parámetros óptimos que permiten generar de pulsos ultracortos.

Capítulo 4

- 4.1 Parámetros óptimos para la emisión de los pulsos QML.

Capítulo 1

Introducción general

El presente capítulo describe la introducción general del trabajo realizado durante el desarrollo de la tesis de maestría, la cual lleva por título “Modulador acusto-óptico pasabanda en fibra óptica: Generación de pulsos ultracortos”, desarrollado en el Laboratorio de Fibras Ópticas en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO), escrita y realizada por Andrés Camarillo Avilés y dirigida por el Dr. Miguel Ángel Bello Jiménez.

1.1 Introducción

La investigación científica basada en la implementación de fibras ópticas se ha incrementado considerablemente con el paso de los años debido a su gran cantidad de aplicaciones tecnológicas. Las ventajas de utilizar fibras ópticas en comparación con los elementos tipo “bulto” (lentes, filtros, objetivos de microscopio, etc.) son la disminución en las pérdidas ópticas, una mayor robustez y una mejor estabilidad. Además, al tratarse de elementos o dispositivos enteramente fabricados de fibra óptica, estos son de tamaño compacto, dando lugar a montajes experimentales de poco volumen y bajo peso.

En la actualidad existen un sin número de aplicaciones que implementan configuraciones en fibra óptica, ejemplos de ello son dispositivos usados en comunicaciones y sensores ópticos, el análisis de materiales, la investigación biomédica, entre otras [1-3]. Una de las ramas de mayor novedad e impacto tecnológico es el uso de fibras ópticas en la construcción de dispositivos emisores de luz en los regímenes de onda continua, pulsado y supercontinuo [4,5]. La emisión de luz en el régimen pulsado es de gran interés por su alto potencial en aplicaciones científicas y prácticas, [6,7], en donde la calidad y estabilidad de los pulsos es

un factor de suma importancia. Actualmente, se han propuesto diferentes configuraciones que permiten generar este tipo de emisiones pulsadas, destacando principalmente dos técnicas: (i) el método pasivo, que puede ser producido por instrumentos como absorbedores saturables, o elementos que exploten algún tipo de efecto no lineal en la fibra óptica, y (ii) el método activo, que permite controlar de manera externa las pérdidas o la fase en la cavidad y de esta forma crear las condiciones necesarias para una operación pulsada. Una característica del método activo es que requiere la inclusión de un modulador en la cavidad, es aquí donde nace el distintivo de ser una técnica “activa”, ya que el modulador otorga la capacidad de controlar a través de una señal eléctrica los parámetros de la cavidad.

Ambos métodos han sido implementados en la generación de diferentes láseres de operación pulsada. Los pulsos ópticos se pueden clasificar de acuerdo a su ancho temporal (FWHM) en dos categorías: pulsos largos y pulsos cortos o ultracortos. La primera refiere a la emisión Q switch, cuyo tamaño temporal es del orden de nanosegundos y sus potencias pico pueden alcanzar las decenas o centenas de kilowatts. En cambio, los pulsos ultracortos, también conocidos como pulsos de amarre de modos (mode lock), llegan a alcanzar anchos temporales del orden de picosegundos e incluso hasta centenas de femtosegundos (1 fs equivale a 1×10^{-15} s). Las principales características de los pulsos mode lock son sus altas frecuencias de repetición del orden de megahertz y gigahertz, y presentan potencias pico considerablemente grandes que llegan hasta las decenas de watts. La obtención de pulsos a través del amarre de modos es uno de los objetivos principales en este trabajo de tesis, no obstante, se mencionan las ventajas principales que brindan los pulsos Q switch. En el capítulo cuatro se hablará acerca de los grandes beneficios que se generan al utilizar de manera simultánea estos dos tipos de emisión pulsada.

Una cavidad convencional de fibra óptica que emplea la técnica de amarre de modos activo comúnmente está compuesta por los siguientes elementos: una fibra amplificadora como medio de ganancia, un modulador, un dispositivo WDM (*Wavelength Division Multiplexer*, por sus siglas en inglés), el cual permite multiplexar el haz de bombeo y la señal que será amplificada, un control de polarización y una línea de retardo. El proceso de generación de pulsos ultracortos de luz inicia al absorber la energía proveniente del bombeo en la fibra amplificadora. Posteriormente, esta energía se libera en las diferentes longitudes de onda que

componen el espectro de ASE (*Amplified Spontaneous Emission*, por sus siglas en inglés), dicha emisión se desplaza en la cavidad por cada uno de los elementos que la conforman, hasta llegar nuevamente a la fibra amplificadora (comúnmente se implementan fibras dopadas con elementos como el erbio, yterbio, tulio, holmio, para la emisión de luz en un rango espectral de 1 a 2 micras), donde nuevamente se vuelve a amplificar e inicia otro recorrido en la cavidad, este proceso es cíclico y se estabiliza al superar la condición de umbral en la cavidad. En el modulador la energía puede ser modulada en fase, amplitud o frecuencia (PM, *Phase Modulation*, AM, *Amplitude Modulation*, FM, *Frequency Modulation*, respectivamente). En este proyecto de investigación, se hace uso de una modulación en amplitud que permite crear las condiciones necesarias para lograr una fase fija “amarrada” (mode lock) entre los modos longitudinales de la luz que viajan en la fibra óptica. Estos modos interfieren constructivamente generando emisiones pulsadas que se trasladan en la cavidad de manera periódica. El periodo de propagación de los pulsos corresponde al tiempo que le toma a la luz dar una vuelta en la cavidad. La línea de retardo es incluida en la cavidad debido a la necesidad de ajustar la longitud de la cavidad con el periodo de modulación. A medida que el pulso realiza más vueltas dentro de la cavidad su anchura temporal se reduce hasta alcanzar anchos temporales increíblemente pequeños (picosegundos o femtosegundos).

En el marco de los láseres mode lock activos, existen un sin número de investigaciones centradas en diferentes configuraciones para producir pulsos ópticos ultracortos de alta calidad [8-14]. Las configuraciones más comunes de este tipo de láseres de fibra óptica se basan en el uso de moduladores electro-ópticos [15,16], moduladores acusto-ópticos (MAO) todo fibra [17-18], moduladores de super-retícula AO [19,20] y filtros sintonizables convencionales [21], entre otros.

El propósito de este trabajo de tesis es la construcción de un láser de pulsos ópticos ultracortos empleando la técnica modo lock cuyo desarrollo se fundamenta en la implementación de un modulador acusto-óptico que funciona como filtro sintonizable pasabanda. Los resultados experimentales demuestran que el modulador AO presenta las características de tener un ancho de banda relativamente grande (1.38 nm) y una alta profundidad de modulación (73%). Se lograron obtener pulsos mode lock con una frecuencia de repetición de 4.86 MHz, una

potencia pico de 5.83 W y un ancho temporal de 8.93 ps. Estos pulsos fueron ajustados a un perfil de Sech², en donde su producto tiempo ancho de banda fue de 0.312. Actualmente, estos resultados están entre los pulsos más cortos reportados en el marco de los láseres activos mode lock que hacen uso de un modulador acusto-óptico todo-fibra.

1.2 Objetivos

Los objetivos planteados a lo largo de este trabajo de tesis, se muestran a continuación:

- i. Optimizar el funcionamiento del filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda (FSAP), el cual basa su operación en la propagación de ondas acústicas de flexión en una sección de fibra óptica, este efecto permitirá controlar las pérdidas en la cavidad, en donde, al anexar un bloqueador de modo fundamental, propiciará que el FSAP incremente en gran medida la supresión de la luz en un amplio rango espectral de longitudes de onda.
- ii. Formar una onda estacionaria dentro del FSAP. Este nuevo efecto forjará una modulación en amplitud de la luz transmitida, dando lugar a la creación de un modulador acusto-óptico, el cual conservará la propiedad de filtro sintonizable pasabanda. Este nuevo dispositivo se implementará en la generación de pulsos ópticos ultracortos en el régimen de amarre de modos (mode lock) activo en una cavidad de anillo todo-fibra.
- iii. Caracterizar los pulsos ópticos ultracortos obtenidos, en función de los parámetros de operación del sistema, los cuales son el voltaje aplicado al piezoeléctrico, la frecuencia acústica aplicada al modulador y la potencia de bombeo inyectada en la cavidad. Además, examinar la estabilidad y la habilidad de sintonización de los pulsos para diferentes longitudes de onda.
- iv. Construir un láser de emisión simultánea de pulsos Q switch y mode lock. Obtener los parámetros óptimos para la operación de este nuevo tipo de emisión láser pulsada.

1.3 Estructura de la tesis

La tesis está conformada de la siguiente forma. En el capítulo 2 se describe el funcionamiento del filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda (FSAP), cuya operación se debe a la existencia del bloqueador del modo fundamental. Se mostrará la respuesta del FSAP y se examinará el comportamiento en función de la longitud de interacción, en donde se dará a conocer su valor óptimo de operación. De esta manera, en el capítulo 3 se hará la implementación del FSAP como un modulador acusto-óptico en amplitud para la generación de pulsos ópticos ultracortos, los cuales son caracterizados para encontrar el mejor desempeño del sistema láser. En el capítulo 4, una vez obtenidas las mejores condiciones para la emisión en el régimen mode lock, se describe el proceso de modular la onda acústica a través de una señal rectangular, con un ciclo de trabajo y frecuencia de repetición variable, en donde se busca obtener la emisión simultanea Q switched, mode locked. Esta tesis finaliza con el capítulo 5 donde se presentan las conclusiones generales de este trabajo y se muestra un panorama del trabajo a futuro de este proyecto.

1.4 Referencias

1. J. Li, F. Albri, J. N. Sun, M. M. Miliar, R. R. J. Maier, D. P. Hand and W. N. MacPherson, “Fabricating optical fibre-top cantilevers for temperature sensing”, *Measurement Science and Technology* **25**, (2014).
2. O. O. Ovseychook, V. I. Ivanov, A. V. Myagotin and G. D. Ivanova, “Fiber optics method for nanomaterials diagnostics”, *Materials Science and Engineering* **286**, (2017).
3. N. Ziebarth, F. Manns and J. M. Parel, “Fibre-optic focus-detection system for non-contact, high-resolution thickness measurement of transparent tissues”, *Journal of Physics D: Applied Physics* **38** (15), 2708-2715, (2005).
4. G. Ramírez Meléndez, M. Bello Jiménez, O. Pottiez, L. Escalante Zarate, R. López Estopier, B. Ibarra Escamilla, M. Durán Sanchez, E. A. Kuzin and M. V. Andrés “Q-switching of an all-fiber ring laser based on in-fiber acousto-optic bandpass modulator”, *Applied Physics B* **123** (249), (2017).
5. H. Hassan, M. M. Ariannejad, R. Safaei, I. S. Amiri, H. Ahmad, “Mode-locked Erbium-doped fiber laser generation using hybrid ZnO/GO saturable absorber”, *Materials Science and Engineering* **210**, (2017).
6. J. C. Diels and Rudolph, “Ultrashort Laser Pulse Phenomena: Fundamentals, Techniques, and Applications on a Femtosecond Time Scale”, Academic press, (2006).
7. S. Nolte, F. Schrempel and F. Dausinger, “Ultrashort Pulse Laser Technology: Laser Sources and Applications”, Springer international publishing, (2016).
8. M. Malmstrom, W. Margulis, O. Tarasenko, V. Pasiskevicius and F. Laurell, “Soliton generation from an actively mode-locked fiber laser incorporating an electro-optic fiber modulator”, *Opt. Express* **20** 2905–2910, (2012).
9. D. T. Nguyen, J. Abou and A. Morimoto, “Ultrashort pulse generation using fiber FM laser”, *Opt. Rev.* **19** 337–340, (2012).
10. C. Cuadrado Laborde, M. Bello Jiménez, A. Díez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, “Long-cavity all-fiber ring laser actively mode locked with an in-fiber bandpass acousto-optic modulator” *Opt. Lett.* **39** 68–71, (2012).

11. J. Kim, J. Koo and J. H. Lee, “All-fiber acousto-optic modulator based on a cladding-etched optical fiber for active mode-locking”, *Photon. Res.* **5** 391–395, (2017).
12. N. Myren and W. Margulis, “All-Fiber Electrooptical Mode-Locking and Tuning”, *IEEE Phot. Tech. L.* **17**, 2047–2049, (2005).
13. K. Yin, B. Zhang, W. Yang, H. Chen, S. Chen and J. Hou, “Flexible picosecond thulium-doped fiber laser using the active mode-locking technique”, *Opt. Lett.* **39** 4259–4262, (2014).
14. M. Bello Jiménez, C. Cuadrado Laborde, A. Díez, J. L. Cruz, M. V. Andrés and A. Rodríguez Cobos, “Mode-locked all-fiber ring laser based on broad bandwidth in-fiber acousto-optic modulator”, *Appl. Phys. B* **110**, 73–80, (2013).
15. N. Myren and W. Margulis, “All-Fiber Electrooptical Mode-Locking and Tuning”, *IEEE Phot. Tech. L.* **17**, 2047–2049, (2005).
16. K. Yin, B. Zhang, W. Yang, H. Chen, S. Chen and J. Hou, “Flexible picosecond thulium-doped fiber laser using the active mode-locking technique”, *Opt. Lett.* **39** 4259–4262, (2014).
17. M. Bello Jiménez, C. Cuadrado Laborde, D. Sáez Rodríguez, A. Díez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, “Actively mode-locked fiber ring laser by intermodal acousto-optic modulation”, *Opt. Lett.* **35** 3781–3783, (2010).
18. M. Bello Jiménez, C. Cuadrado Laborde, A. Díez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, “Experimental study of an actively mode-locked fiber ring laser based on in-fiber amplitude modulation”, *Appl. Phys. B* **105**, 269–276, (2011).
19. C. Cuadrado Laborde, A. Díez, M. Delgado Pinar, J. L. Cruz and M. V. Andrés, “Mode locking of an all-fiber laser by acousto-optic superlattice modulation”, *Opt. Lett.* **34**, 1111–1113, (2009).
20. C. Cuadrado Laborde, A. Díez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, “Experimental study of an all-fiber laser actively mode-locked by standing-wave acousto-optic modulation” *Appl. Phys. B* **99**, 95–99, (2010).
21. M. Jeon, H. K. Lee, K. H. Kim, E. Lee, W. Oh, B. Y. Kim, H. Lee and Y. W. Koh, “Harmonically mode-locked fiber laser with an acousto-optic modulator in a Sagnac loop and Faraday rotating mirror cavity”, *Opt. Commun.* **149**, 312–6, (1998).

Capítulo 2

Filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda

Este capítulo presenta el análisis experimental de un filtro sintonizable acústico-óptico pasabanda (FSAP) diseñado totalmente de fibra óptica. El filtro basa su operación en el uso de un bloqueador del modo fundamental (BMF), el cual consiste de una pequeña sección de fibra óptica sin núcleo de 1.185 mm de longitud. Los resultados experimentales demuestran bajas pérdidas por inserción, 1.2 dB en la longitud de onda óptica resonante (1527.7 nm), y un ancho de banda óptico de 0.83 nm medido a mitad de altura. Tomando en cuenta la atenuación de la onda acústica, se demuestra que es posible optimizar la respuesta del dispositivo ajustando las longitudes de interacción para las secciones de acoplamiento y reacoplamiento en el filtro.

2.1 Introducción

La interacción acusto-óptica (AO) basada en ondas acústicas de flexión ha sido objeto de diversos estudios con el propósito de desarrollar nuevos dispositivos AO de fibra óptica, entre estos dispositivos podemos mencionar a los desplazadores de frecuencia, atenuadores de luz y filtros sintonizables [1-3]. Muy recientemente, nuevas posibilidades han sido propuestas y demostradas basándose en el uso de ondas estacionarias [4, 5] y paquetes cortos de ondas acústicas [6]. Todos estos esquemas ofrecen las ventajas de ser dispositivos dinámicos, con una respuesta sintonizable que depende intrínsecamente de la amplitud y frecuencia de la onda acústica.

El efecto AO por ondas de flexión en fibras ópticas proporciona un mecanismo útil para eludir alguna imperfección en el núcleo de la fibra vía la propagación de luz en el modo del revestimiento [5, 7]. Cuando la onda de flexión se propaga en la fibra, ésta produce una perturbación periódica en el índice de refracción que puede conducir a un acoplamiento

resonante entre el modo fundamental del núcleo LP_{01} y algunos modos de revestimiento de la familia LP_{lm} [1, 3]. Por lo tanto, el modo LP_{01} se puede acoplar a un modo de revestimiento para evitar un obstáculo localizado en el núcleo de la fibra, posteriormente el modo del revestimiento puede reacoplarse nuevamente al modo núcleo. Bajo esta configuración, el dispositivo funcionará como filtro pasabanda, y la luz cuya longitud de onda no cumple la condición de resonancia será fuertemente atenuada. Basados en este mecanismo, varios esquemas de filtros sintonizables AO pasabanda (FSAP) han sido propuestos y demostrados. Una característica en estos esquemas es que el obstáculo en el núcleo está compuesto por un bloqueador del modo fundamental (BMF) [5, 8-11]. Los BMF se fabrican ocasionando daños en el núcleo [8, 9], implementando fibras de cristal fotónico huecas [10] y mediante efectos inducidos por los rayos ultravioleta (UV) [11]. Entre estos esquemas, la máxima supresión para los modos no resonantes (-35 dB) se obtiene con un BMF fabricado por un daño local en el núcleo [8], mientras que las menores pérdidas por inserción (1 dB) se reportan en una configuración que emplea un BMF inducido por rayos UV [11].

En este trabajo proponemos un FSAP que combina las propiedades dinámicas de la interacción AO con un BMF compuesto de una pequeña sección de fibra óptica uniforme sin núcleo. En comparación con los FSAP previamente reportados, nuestra propuesta tiene la ventaja de evitar procedimientos complicados para la fabricación del BMF. Además, la inclusión de una fibra óptica sin núcleo evita la reflexión de la onda acústica y no perturba la propagación de los modos de revestimiento. Con el esquema propuesto, se obtiene una eficiencia máxima de rechazo de -31 dB a la longitud de onda óptica de 1545 nm. Además, teniendo en cuenta la atenuación de la onda acústica, que generalmente no se toma en cuenta en estos dispositivos, demostramos que es posible optimizar la respuesta del filtro ajustando las secciones de fibra donde ocurre el acoplamiento y reacoplamiento de la luz en el filtro.

2.2 Bloqueador del modo fundamental

El bloqueador del modo fundamental permite atenuar significativamente la luz que se propaga en el núcleo de una fibra óptica, y a su vez permite propagar los modos que viajan en el revestimiento [12]. Existen diversas técnicas que permiten lograr el bloqueo del modo fundamental, una de ellas es a través de dañar el núcleo de la fibra, lo que da como resultado

una alta atenuación para el modo fundamental; cabe destacar que el daño se centra únicamente en el núcleo de la fibra para que afecte mínimamente la propagación de los modos del revestimiento. Uno de los procesos que permite generar este tipo de daño en el núcleo se basa en la inyección de láseres de iones de argón de alta potencia en un extremo de una fibra óptica, lo que producirá una destrucción interna localizada en el núcleo del extremo opuesto de la fibra [8,9]. También se utilizan descargas de arco e inducción ultravioleta en una fibra previamente inmersa en un ambiente de hidrógeno [5,11]. De estos métodos, los mejores resultados han producido una atenuación de los modos no resonantes de hasta 35 dB [8] y pérdidas mínimas por inserción de 1 dB [11]. Una gran desventaja de estas técnicas es la difracción de la luz que se induce por el daño generado al núcleo de la fibra, y, además, que cuentan con una baja reproducibilidad, lo que vuelve al método poco práctico para su producción en masa [13].

Un método para fabricar un BMF que no involucra el daño a la fibra óptica es mediante el uso de un pequeño segmento de fibra sin núcleo [10], el cual es fusionado entre dos fibras monomodo estándar. La fibra óptica utilizada en nuestros experimentos corresponde al modelo FG125LA de la marca Thorlabs, cuyo índice de refracción para 1550 nm es 1.444. Esta fibra sin núcleo, del tipo “coreless”, fue fusionada entre dos fibras monomodo estándar SMF-28. La longitud d , correspondiente al tramo de fibra sin núcleo, fue calculado para permitir que la luz proveniente de la primera fibra SMF-28 se expandiese hasta llegar a la cara frontal de la segunda fibra SMF-28, para ello se utilizó la expresión de la apertura numérica, definida como $\text{sen } \theta_{\text{max}} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} / n_0$, donde θ_{max} es el ángulo máximo de los rayos de salida de la primera fibra SMF-28, n_0 es el índice de refracción de la fibra sin núcleo, n_1 es el índice de refracción del núcleo y n_2 es el índice de refracción del revestimiento. Para poder lograr un bloqueo de la luz óptimo en la región cercana a 1550 nm, se utilizó como índice de refracción del núcleo el índice efectivo, es decir $n_1 = 1.446$ y para el revestimiento $n_2 = 1.444$, ambos índices para la fibra SMF-28. Una vez obtenido θ_{max} , es posible calcular la longitud d ($d = a / (2 \tan \theta_{\text{max}})$, donde a es el diámetro de la fibra). La figura 2.1 permite observar de manera esquemática los parámetros principales del BMF.

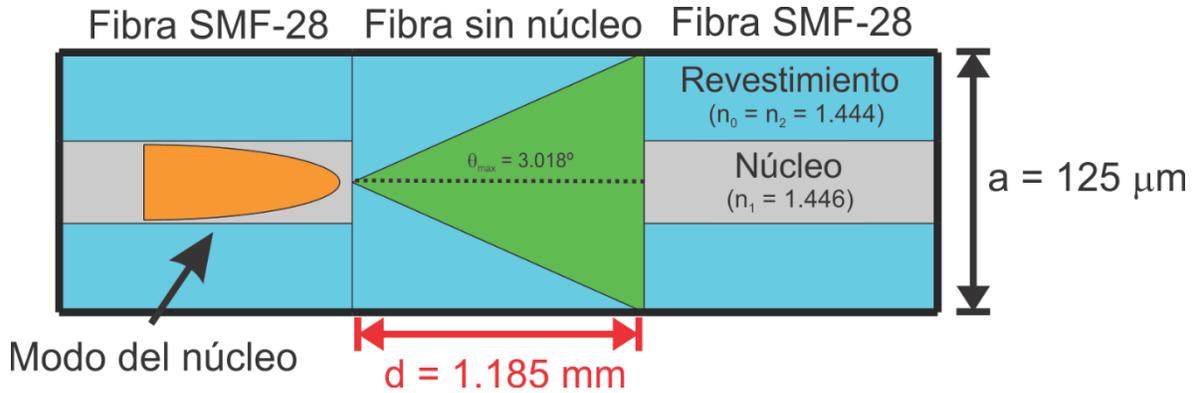


Figura 2.1 Bloqueador del modo fundamental utilizando una fibra sin núcleo.

Los empalmes para fabricar el BMF fueron realizados a través de una empalmadora de la marca Fujikura modelo FSM-100P, utilizando un modo de operación que alinea los revestimientos de las fibras al empalmar. La atenuación del BMF se midió utilizando un diodo superluminiscente (DSL), Q-Pothonics QSMD-1550-2B, el cual tiene una emisión que va de 1500 a 1600 nm. La figura 2.2 muestra la emisión del DSL con y sin el BMF.

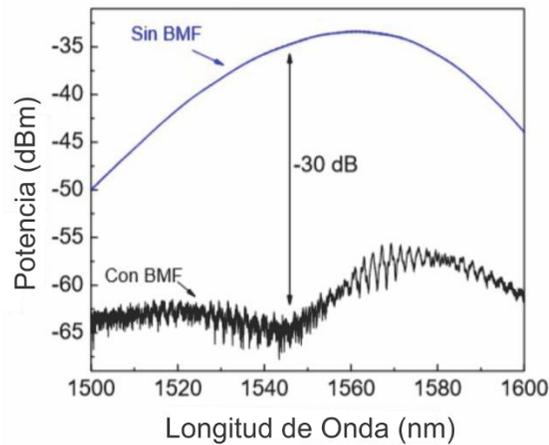


Figura 2.2 Espectro de emisión del DSL antes y después de pasar a través del BMF.

De la figura anterior, se puede concluir que existe una atenuación eficiente para la luz que viaja en el núcleo de la fibra, produciéndose un bloqueo para modo fundamental de hasta 30 dB en la longitud de onda de 1546 nm.

2.3 Filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda

El esquema del FSAP se representa en la figura 2.3, en él se muestra el bloqueador del modo fundamental (previamente descrito en la sección anterior) empalmado entre dos secciones de fibra óptica SMF-28 con longitudes L_1 y L_2 , respectivamente. Con esta configuración, el modo fundamental es atenuado en un ancho espectral que se extiende desde 1520 a 1570 nm, con una atenuación máxima de -31 dB a 1545 nm. El FSAP se completa con la fuente de radiofrecuencia (RF), un disco piezoeléctrico y un cono de aluminio. El cono está unido al disco piezoeléctrico, y su función es enfocar las vibraciones acústicas en la fibra. Con el propósito de evitar la atenuación de la onda acústica, la fibra es desprovista de su polímero protector en la región de interacción. Finalmente, la onda acústica se amortigua en ambos extremos del filtro para evitar una reflexión acústica.

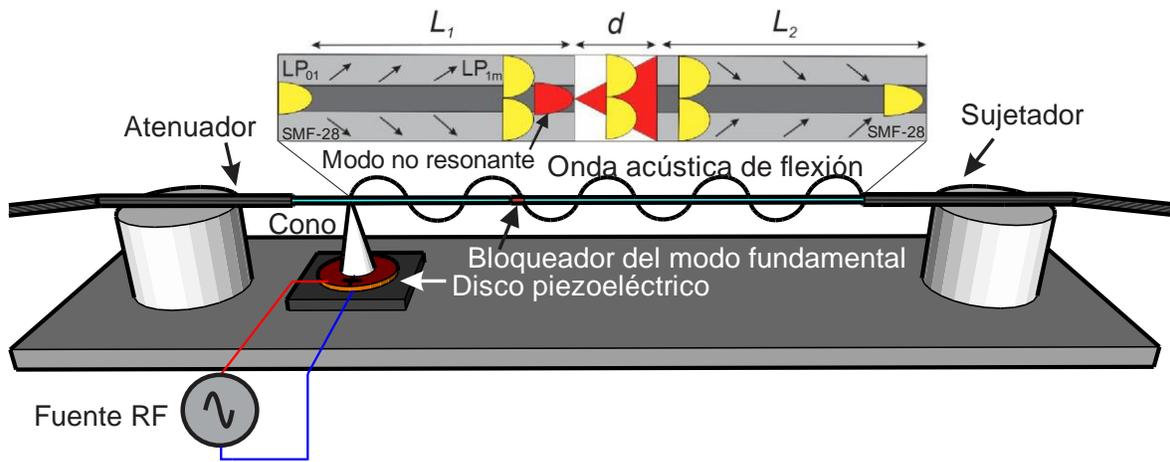


Figura 2.3 Arregla experimental del filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda.

Cuando la onda acústica se propaga a lo largo de la fibra óptica sin polímero protector, el campo acústico produce una perturbación periódica del índice de refracción, lo que conduce a un acoplamiento resonante intermodal entre el modo fundamental y alguno de los modos del revestimiento [9,11]. Esta interacción AO puede verse como la contraparte dinámica de una rejilla de período largo convencional (LPG, por sus en inglés), cuyas propiedades de transmisión pueden controlarse dinámicamente por la amplitud y la frecuencia de la onda acústica. En nuestro esquema, la sección de fibra L_1 se ajustó a 24 cm de longitud, lo que permite un acoplamiento máximo entre el modo LP_{01} y un de los modos de revestimiento

antes del BMF, mientras que la sección L_2 se usa para reacoplar la luz que viaja en el modo del revestimiento al modo del núcleo. Esta reinserción de energía da como resultado la aparición de un pico de transmisión en el espectro, con una amplitud que permanece fija cada vez que se excita con la onda acústica. Bajo esta configuración, el dispositivo funciona como un filtro pasabanda, y las longitudes de onda que no cumplen la condición de resonancia son fuertemente atenuadas. La longitud de la sección L_2 se seleccionó para que sea igual a L_1 (24 cm), dando una longitud total de ~ 48 cm para el dispositivo AO.

Las propiedades de transmisión del FSAP se investigaron al iluminar el dispositivo con un diodo led superluminiscente (que proporciona un espectro óptico de 1500 a 1600 nm). La luz transmitida fue detectada con un analizador de espectro óptico. El modo de acoplamiento más fuerte se encontró en la frecuencia acústica (f_a) de 2.384 MHz para una tensión aplicada al disco piezoeléctrico (V_{DP}) de 33 V (de aquí en adelante al referirnos al voltaje, se trata de una medición pico a pico). La Figura 2.4 muestra el espectro de transmisión, en el cual se observaron acoplamientos intermodales LP_{01} a LP_{11} y LP_{01} a LP_{12} con una separación de longitud de onda de ~ 50 nm. La máxima transferencia de energía corresponde al acoplamiento LP_{01} a LP_{11} ubicado a la longitud de onda óptica resonante (λ_R) de 1527.7 nm, con un ancho de banda óptico a -3 dB medido en 1.2 nm y una pérdida de inserción de -2.78 dB. El período acústico de la rejilla acústica inducida se estima en $487 \mu\text{m}$, este valor es obtenido de la relación de dispersión para una onda acústica de flexión en una barra cilíndrica a través de la siguiente expresión: $\Lambda = \sqrt{(\pi R C_{\text{ext}}/2f_a)}$, donde Λ es la longitud de onda acústica, R es el radio de la fibra y C_{ext} es la velocidad de la onda extensional (5760 ms^{-1} para sílice fundida).

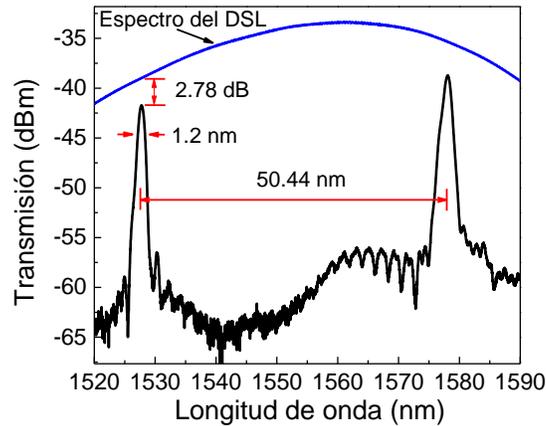


Fig. 2.4 Espectro de transmisión del FSAP a la frecuencia acústica de 2.384 MHz.

La caracterización experimental de las resonancias AO se muestra en la figura 2.5 para un rango de longitudes de onda ópticas resonantes entre 1520 y 1600 nm y un rango de frecuencia acústicas de 2 a 2.8 MHz. Como se aprecia en la figura, existen tres acoplamientos intermodales que corresponden a los modos $LP_{01} - LP_{11}$, $LP_{01} - LP_{12}$ y $LP_{01} - LP_{13}$. Entre estos resultados, el acoplamiento intermodal más fuerte se encontró en la frecuencia acústica de 2.384 MHz (línea punteada).

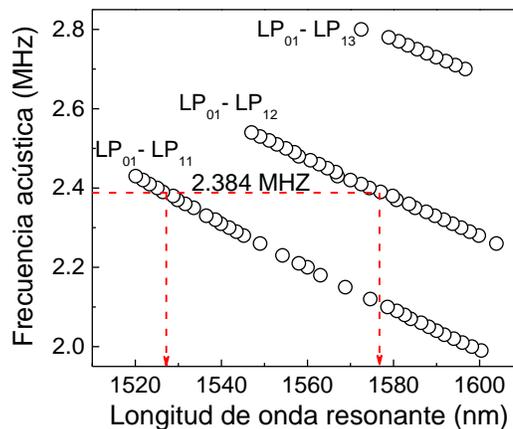


Figura 2.5 Característica sintonizable de la FSAP: frecuencia de onda acústica frente a longitudes de onda ópticas resonantes. La línea punteada indica el acoplamiento de modo más fuerte.

2.4 Análisis de las longitudes de acoplamiento y reacoplamiento del modo LP_{01} al LP_{1m}

Una característica importante del esquema propuesto es su longitud de interacción, la cual puede considerarse relativamente larga (varias decenas de centímetros). Por lo tanto, es importante tomar en cuenta el efecto de la atenuación acústica en la fibra si se desea mejorar el desempeño del filtro. La atenuación acústica conduce a una reducción del coeficiente de acoplamiento κ , que es proporcional a la amplitud de la onda acústica. En la longitud de onda resonante (λ_R), la transmisión de luz en el modo LP_{01} en función de la longitud L puede expresarse por la siguiente ecuación: $T_{\lambda_R} = 1 - \sin^2(\kappa_0 e^{-\alpha L} L)$, donde κ_0 es el coeficiente de acoplamiento a una distancia $L = 0$ y α es el coeficiente de atenuación de la onda acústica en la fibra. A partir de esta ecuación, está claro que una transferencia total de energía entre el modo fundamental a uno de los modos de revestimiento ocurre cuando el argumento $\kappa_0 e^{-\alpha L} L$ es igual a $\pi/2$, y por el contrario, un reacoplamiento al modo del núcleo ocurre cuando se alcanza el valor de π . Con el fin de lograr un reacoplamiento total de energía, la longitud total (L) del FSAP se varió de 25 a 90 cm. Estas mediciones se realizaron manteniendo la distancia inicial L_I fija, igual a 24 cm, asegurando un máximo acoplamiento entre el modo de núcleo y el modo del revestimiento previo al BMF. La figura 2.6 muestra la transmisión del filtro en función de la longitud para el acoplamiento entre modo LP_{01} a LP_{11} a la longitud de onda resonante de 1527.7 nm. Para esta medición la frecuencia acústica y el voltaje aplicado al piezoeléctrico se mantuvieron fijas en 2.384 MHz y 33 V, respectivamente.

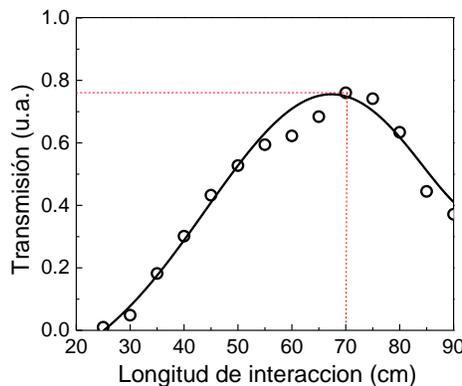


Figura 2.6 Transmisión del filtro en función de la longitud para el acoplamiento intermodal entre los modos LP_{01} y LP_{11} a la longitud de onda óptica resonante de 1527.7 nm.

La transmisión muestra una máxima reinserción de energía a la longitud de 70 cm, a esta longitud existe una reinserción de energía del 76% al modo del núcleo. Por otra parte, tomando como referencia los valores máximos ($L_2 = 70$ cm) y mínimos ($L_1 = 24$ cm) de la transmisión, se puede obtener una estimación del coeficiente de atenuación acústica α mediante la siguiente relación: $\alpha = \{\text{Ln } 2 - \text{Ln}(L_2 / L_1)\} / (L_1 - L_2)$, obteniendo una medida de $\alpha = 0.82 \text{ m}^{-1}$. Este valor es consistente con el valor reportado de 0.66 m^{-1} en [11] para una fibra SMF-28.

La figura 2.7 muestra el espectro de transmisión obtenido con L igual a 70 cm y una configuración asimétrica: $L_1 = 24$ cm y $L_2 = 46$ cm. Las pérdidas por inserción a la longitud de onda resonante (1527.2 nm) se midió en -1.2 dB, con un ancho espectral a mitad de altura (-3 dB) de 0.83 nm. A partir de este resultado podemos destacar las bajas pérdidas de inserción de ~ 1 dB, y la fácil implementación del BMF. Si comparamos estos resultados con esquemas similares reportados en [2-5], nuestro esquema presenta mejoras considerables en la fabricación del BFM y desempeño del filtro pasabanda.

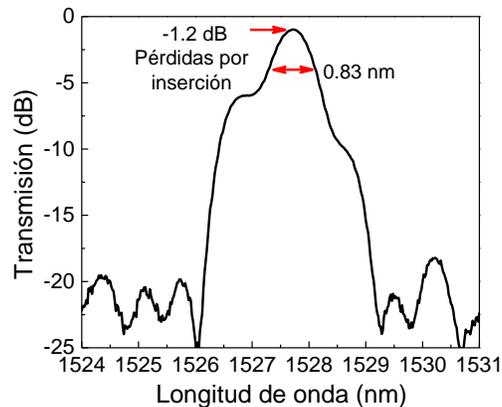


Figura 2.7 Espectro de transmisión del FSAP a la longitud óptima de $L = 70$ cm y la frecuencia acústica de 2.384 MHz.

2.5 Conclusiones

En este capítulo se presentó una caracterización detallada de un filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda de fibra óptica basado en un bloqueador del modo fundamental compuesto

por fibra tipo “coreless”. La respuesta del filtro se optimizó con una configuración asimétrica que tiene en cuenta la atenuación de la onda acústica. Los resultados experimentales demuestran bajas pérdida de inserción de -1.2 dB en la longitud de onda de resonancia óptica (1527.7 nm) y un ancho de banda óptico de 0.83 nm cuando el dispositivo funciona como un filtro pasabanda. Estos resultados demuestran el potencial del dispositivo para su futura aplicación como modulador pasabanda. El siguiente capítulo describirá a detalle las condiciones específicas para producir una modulación en amplitud a través del FSAP.

2.6 Referencias bibliográficas

1. S. D. Lim, J. G. Kim, K. Lee, S. B. Lee and B. Y. Kim, "All-fiber acousto-optic frequency shifter", *Opt. Lett.* **11** (6), 389-391, (1986).
2. D. Östling and, H. Engan, "Narrow-band acousto-optic tunable filtering in a two-mode fiber," *Opt. Lett.* **20** (11), 1247-1249, (1995).
3. T. A. Birks, P. St. J. Russel and D. O. Culverhouse, "The acousto-optic effect in single-mode fiber tapers and couplers", *J. Lightwave Technol.*, **14** (11), 2519-2529, (1996).
4. M. Bello Jiménez, C. Cuadrado Laborde, D. Sáez Rodríguez, A. Díez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, "Actively mode-locked fiber ring laser by intermodal acousto-optic modulation", *Opt. Lett.*, **35** (22), 3781-3783, (2010).
5. C. Cuadrado Laborde, M. Bello Jiménez, A. Díez, J. L. Cruz, and M. V. Andrés., "Long-cavity all-fiber ring laser actively mode locked with bandpass acousto-optic modulator", *Opt. Lett.*, **39** (1), 68-71, (2014).
6. E. P. Alcusa Sáes, A. Díez, M. González Herráez, and M. V. Andrés, "Time-resolved acousto-optic interaction in single-mode optical fibers: characterization of axial nonuniformities at the nanometer scale", *Opt. Lett.*, **39** (6), 1437-1440, (2014).
7. A. Díez, M. DelgadoPinar, J. Mora, J. L. Cruz, and M. V. Andrés, "Dynamic fiber-optic add-drop multiplexer using bragg gratings and acousto-optic-induced coupling," *IEEE Photon.Technol. Lett.*, **15** (1), 84-86, (2003).
8. T. Dimmick, D. A. Satorius, and G. L. Burdge, "All-fiber acousto-optic tunable bandpass filter," *Optical Fiber Communication Conference and International Conference on Quantum Information, 2001 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 2001)*, paper WJ3.
9. D. A. Satorius, T. E. Dimmick, and G. L. Burdge, "Double-pass acoustooptic tunable bandpass filter with zero frequency shift and reduced polarization sensitivity," *IEEE Photonics Technology Letters*, **14** (9), 1324-1326.
10. Y. Jung, S. Choi, Y. S. Jeong, S. B. Lee, J. W. Yu, and K. Oh, "Hollow optical fiber core mode blocker for acousto-optic bandpass filter" in *CLEO*, paper CThMM6, (2004).
11. K. J. Lee, D. II Yeom, and B. Y. Kim, "Narrowband, polarization insensitive all-fiber acousto-optic tunable bandpass filter," *Opt. Express*, **15** (6), (2007).

12. S. D. Lim, J. G. Kim, K. Lee, S. B. Lee, and B. Y. Kim, "Fabrication of a highly efficient core-mode blocker using a femtosecond laser ablation", *Opt. Express* **19** (21), 18449 (2009).
13. S. Choi, T. J. Eom, J.W. Yu, B. H. Lee, and K. Oh, "Novel all-fiber bandpass filter based on hollow optical fiber", *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** (12), 1701 (2002).

Capítulo 3

Láser de fibra óptica tipo “Mode Lock” basado en modulación pasabanda por ondas acústicas de flexión

Este capítulo presenta el estudio experimental de un láser de anillo de fibra óptica tipo mode-lock activo basado en un modulador acusto-óptico pasabanda sintonizable. La modulación de las pérdidas en la cavidad se logra mediante un ciclo completo de re-acoplamiento del modo fundamental a través del efecto acusto-óptico inducido por una onda acústica de flexión estacionaria. Entre las características del modulador destacamos su alta eficiencia en supresión de la luz, hasta 28 dB para la luz no resonante, un ancho de banda razonablemente grande (1.4 nm), una alta profundidad de modulación (73%) y pérdidas relativamente bajas de inserción (4.11 dB). La eficiencia del modulador se demuestra en un láser tipo mode lock todo-fibra, obteniéndose pulsos ultracortos de 8.93 ps de duración temporal, una potencia pico de 5.83 W y una frecuencia de repetición de 4.87 MHz.

3.1 Introducción

Este capítulo describe la aplicación de un filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda (FSAP) como elemento activo en un láser de anillo tipo “mode lock” de fibra óptica. El filtro tiene la función de operar como filtro pasa-banda y simultáneamente producir una modulación en amplitud de la señal transmitida, lo que permite regular las pérdidas en la cavidad y generar una emisión pulsada en el régimen de amarre de modos (mode lock). Este tipo de pulsos tienen la característica de ser pulsos ópticos de muy corta duración (ultracortos), con anchos temporales de decenas de picosegundos a unidades de femtosegundos. Actualmente, este tipo de emisión se ha vuelto esencial para una gran variedad de aplicaciones. Ejemplos de ello se pueden encontrar en comunicaciones ópticas, aplicaciones biomédicas, espectroscopia y procesamiento de materiales, entre otras [1-2]. En muchas de estas aplicaciones la calidad

del pulso es un factor importante, y la generación de pulsos ultracortos de alta calidad ha atraído la atención de los investigadores durante un tiempo relativamente largo. Típicamente, para aplicaciones en el régimen de pulsos ultracortos, el amarre de modos pasivo es la técnica preferible, sin embargo, la generación de pedestales o componentes de baja intensidad se convierte en su principal defecto. Por el contrario, el amarre de modos activo permite un control estricto sobre los parámetros en la cavidad, lo que permite un mejor control sobre los parámetros del pulso de salida. Por lo tanto, el amarre de modos activo es la técnica preferida en muchas aplicaciones prácticas. No obstante, un factor limitante de esta técnica es la generación de pulsos relativamente largos como resultado del limitado ancho de banda del modulador.

Una de las configuraciones más comunes para los láseres de amarre de modos activo se basa en el uso de filtros espectrales, tales como rejillas de Bragg, que nos permiten controlar la longitud de onda de emisión en el medio de ganancia. Ejemplos de estos esquemas se pueden encontrar en [3-10], donde el amarre de modos activo se realiza a través del uso de moduladores electro-ópticos [3,4], moduladores acústico-ópticos (AO) en amplitud [5-7], moduladores AO de super-red [8,9] y a través filtros sintonizables AO convencionales [10]. Una característica en estos esquemas es que la emisión de la luz está restringida por la operación del filtro, limitando así su longitud de onda y el ancho espectral. Esta condición ha motivado el diseño de nuevos esquemas que eliminen la inclusión de sistemas de filtrado fijos en la cavidad del láser. En este aspecto, los dispositivos AO en fibra pueden diseñarse para realizar una operación de filtro pasabanda con una respuesta espectral razonablemente amplia y sintonizable [11-14].

En el capítulo anterior se describió el funcionamiento de un filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda que combina las propiedades dinámicas de las ondas acústicas de flexión con un bloqueador del modo fundamental (BMF) compuesto por una pequeña sección de fibra óptica sin núcleo [13,14]. Ahora, con el objetivo de ampliar la aplicación del FSAP y realizar el amarre de modos activo, se induce intencionalmente la reflexión acústica dentro del filtro. De esta forma, se genera una onda acústica de flexión estacionaria y la transmisión del FSAP puede modularse en amplitud, a la vez que se preservan las características pasabanda del filtro. Bajo esta configuración el dispositivo exhibe una modulación de amplitud a una

frecuencia dos veces mayor a la frecuencia acústica utilizada, una alta profundidad de modulación, moderadas pérdidas por inserción y un ancho de banda de modulación razonablemente grande.

En este capítulo nuestro propósito es mostrar el desempeño de una fuente tipo mode lock activo mediante la implementación de este nuevo tipo de modulador AO. El esquema propuesto presenta las siguientes ventajas: (i) alta eficiencia de supresión de la luz no resonante (28 dB), este valor es al menos 10 dB de profundidad mayor que los atenuadores AO de fibra óptica convencionales [15-17], (ii) filtrado espectral intrínseco (ancho de banda ~ 1 nm), que previene la emisión láser a longitudes de onda no deseadas y puede sintonizarse en un amplio rango de longitudes de onda, (iii) simplicidad en su fabricación, el método de fabricación del BMF no requiere procedimientos complicados y evita la inclusión de fibras ópticas especiales, (iv) al ser un dispositivo totalmente de fibra, puede manejar altas potencias. Sin embargo, la principal desventaja que podría asociarse con el presente esquema es una longitud de interacción relativamente larga (~ 70 cm), aunque esto abre la posibilidad de reinventar el dispositivo mejorando algunas características modulador, tales como la longitud de interacción y el ancho de banda de modulación.

En las siguientes secciones se dará a conocer la respuesta espectral del filtro acusto-óptico pasabanda en función de una señal de radiofrecuencia (RF) modulada en amplitud, lo que permitirá conocer la longitud de onda a la cual el modulador AO presenta su mejor desempeño. Posteriormente, se presentará el esquema y configuración del láser todo-fibra diseñado para producir pulsos ópticos ultracortos. Se mostrará la caracterización de los pulsos ópticos obtenidos, la anchura a mitad de altura (T_{FWHM}) y la potencia pico (P_{pico}), en función de la frecuencia acústica (f_a), la potencia de bombeo y el voltaje aplicado al piezoeléctrico V_{PD} . También se dará a conocer la estabilidad del láser en un tiempo de aproximadamente una hora y finalmente se mostrará la habilidad de sintonización en longitud de onda en la emisión del láser pulsado.

3.2 Modulador sintonizable acusto-óptico pasa-banda

La figura 3.1 muestra el diseño experimental del modulador AO pasabanda y el efecto que generan las ondas de flexión en la propagación de los modos transversales. La operación del dispositivo AO se basa en un bloqueador de modo fundamental (BMF) compuesto por una sección de fibra óptica sin núcleo de 1.185 mm de largo (Thorlabs FG125LA) empalmada entre dos secciones de fibras óptica monomodo (SMF-28) con longitudes L_1 y L_2 , respectivamente. El filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda (FSAP) consiste en una fuente de radiofrecuencia (RF), un disco piezoeléctrico (DP) y un cono de aluminio. El cono enfoca las vibraciones acústicas en la fibra a través de su punta, y la fibra es desprovista de su polímero protector para evitar la atenuación de la onda acústica. Con el objetivo de inducir una onda acústica de flexión estacionaria, el extremo opuesto al cono de aluminio es inmerso en soldadura, produciendo la reflexión de la onda acústica y la formación de una onda estacionaria. Este fenómeno produce que la luz transmitida experimente una modulación de amplitud a la longitud de onda resonante, con una frecuencia de modulación que es el doble de la frecuencia de la señal acústica ($f_m = 2 \times f_a$).

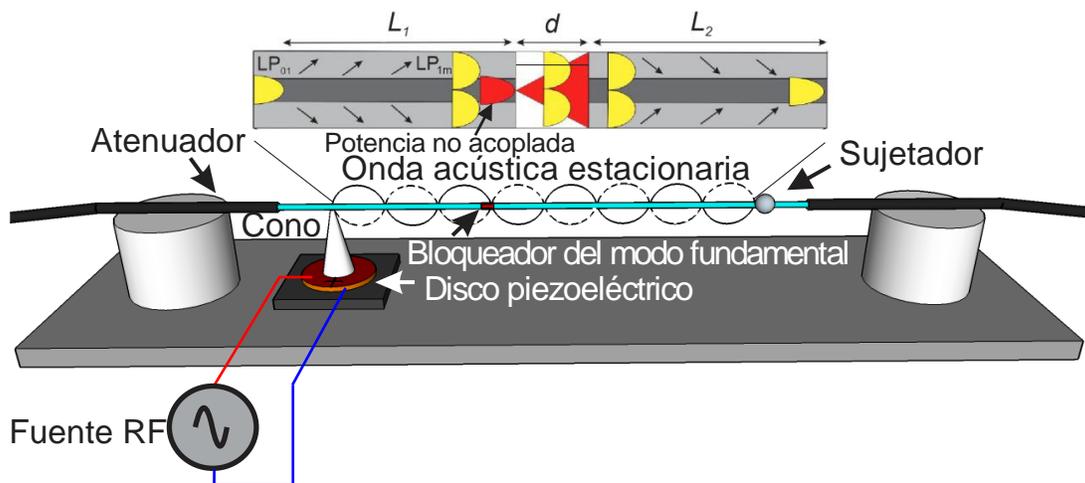


Figura 3.1 Arreglo experimental del filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda (FSAP). Arriba se muestra el efecto de acople y reacople del modo fundamental debido a la existencia del BMF.

La longitud d del BMF se calcula para que los rayos de luz, provenientes de la entrada del filtro (parte izquierda de la figura 3.1), se expanda sobre la superficie de la segunda fibra

MHz y 20.4 V al disco piezoeléctrico. La amplitud máxima de modulación se produce a la longitud de onda óptica resonante de 1569 nm. Como se aprecia en la figura, la modulación ocurre a una frecuencia de 4.86226 MHz, la cual es dos veces la frecuencia del voltaje aplicado al piezoeléctrico. Las mediciones expuestas en la figura 3.4 se realizaron iluminando el modulador con un diodo láser sintonizable en la longitud de onda óptica resonante, y detectando la luz transmitida con un fotodiodo y un osciloscopio estándar. Debido a que el coeficiente de reflexión es inferior a 1 para la onda acústica, además de las pérdidas derivadas de la atenuación acústica, la transmisión máxima está por debajo del nivel de referencia, es decir, la transmisión de la fibra cuando no hay onda acústica y BMF. La transmisión máxima del dispositivo determina la pérdida de inserción del modulador y la diferencia entre la transmisión máxima y mínima determina la profundidad de la modulación.

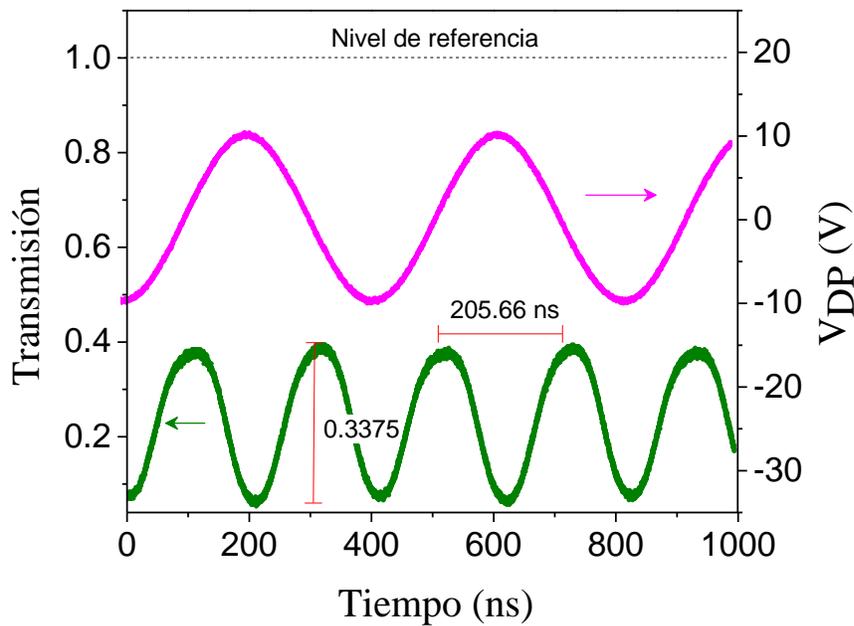


Figura 3.4 Traza del osciloscopio de la modulación de amplitud AO registrada en la longitud de onda resonante de 1569 nm. La línea magenta es la señal de RF de 20.4 V aplicada al disco piezoeléctrico.

A partir de los resultados presentados en la figura 3.4, la profundidad de modulación medida, definida como $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$, es del 73%, junto con una pérdida de inserción de 4.11 dB.

La Figura 3.5 muestra la variación de la profundidad de modulación en función de la longitud de onda óptica, manteniendo constantes la frecuencia acústica en 2.43113 MHz y el voltaje de RF en 20.4 V. Como se puede observar, la profundidad de modulación disminuye a la mitad de su valor máximo en un ancho de banda óptico de 1.4 nm.

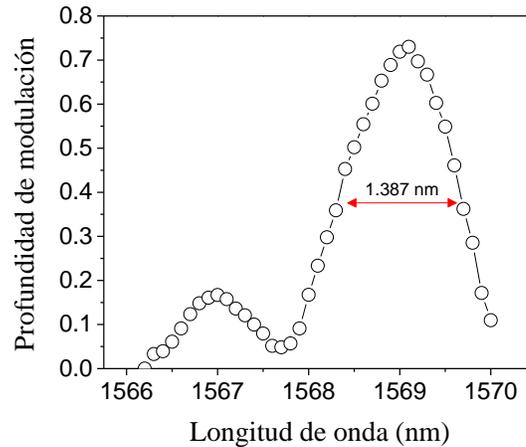


Figura 3.5 Profundidad de modulación en función de la longitud de onda óptica a una frecuencia acústica constante (2.43113 MHz) y tensión de RF (20.4 V).

La profundidad de modulación en función de la frecuencia de RF también fue analizada. La Figura 3.6 muestra la profundidad de modulación frente a la desintonización de frecuencia (Δf_a) cuando λ_R y V_{DP} se fijan a 1569 nm y 20.4 V, respectivamente. La frecuencia central en la figura 3.6 corresponde a 2.43113 MHz, a esta frecuencia la profundidad de modulación es máxima y cae gradualmente a valores cercanos a 0.4 para una desintonización en frecuencia de $\sim \pm 1.5$ kHz, y alcanza un segundo máximo alrededor de ± 2 kHz. Para frecuencias más grandes y más pequeñas, la transmisión decae gradualmente a cero. A partir de este resultado, es importante considerar una adecuada selección de la frecuencia acústica, ajustando el dispositivo para obtener la máxima profundidad de modulación a la longitud de onda óptica resonante.

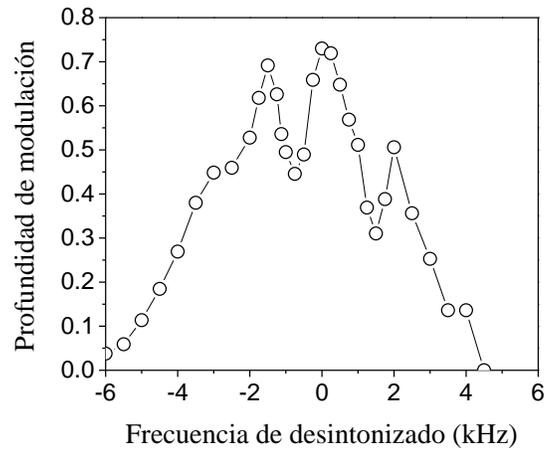


Figura 3.6 Profundidad de modulación en función de la frecuencia de desintonizado (Δf_a) manteniendo constantes la longitud de onda resonante (1569 nm) y el voltaje de RF (20.4 V). La frecuencia acústica central es 2.43113 MHz.

La Figura 3.7 muestra la variación de la profundidad de modulación máxima frente a la longitud de onda óptica resonante. Esta última caracterización se llevó a cabo cambiando la frecuencia acústica y el voltaje del disco piezoeléctrico para lograr la mayor profundidad de modulación en cada longitud de onda resonante. De este resultado se observa que la máxima profundidad de modulación se obtiene a la frecuencia acústica de 2.4313 MHz.

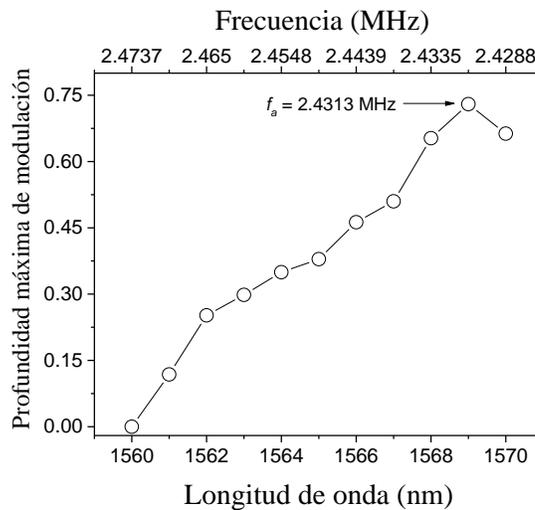


Figura 3.7 Profundidad de modulación máxima frente a la longitud de onda resonante.

En la siguiente sección se demuestra el desempeño del modulador en un láser de anillo del tipo mode lock de fibra óptica. Para este propósito el modulador opera con una profundidad de modulación superior al 70% en un rango de longitudes de onda óptica de 1568 a 1570 nm, las cuales corresponden a un rango de frecuencias acústicas de 2.43669 a 2.42557 MHz. Con un voltaje de RF de ~ 20 V, el modulador presentará una pérdida de inserción de 4.1 dB y un ancho de banda de modulación de 1.4 nm. Además, con un ajuste fino en la frecuencia acústica, es posible compensar pequeños errores en la cavidad permitiendo ajustar el período de modulación con el tiempo que toma a la luz dar una vuelta en la cavidad.

3.3 Láser de pulsos ópticos ultracortos tipo Mode Lock

La configuración del sistema láser se muestra en la figura 3.8. La cavidad láser está constituida por 0.8 m de fibra óptica co-dopada de Erblio/Yterbio de doble revestimiento (CorActive, DFC-EY-10/128), la cual funciona como medio de ganancia y es bombeada por un diodo láser de InGaAs (Q-Photonics, QSP-975-10) que emite a 976 nm. Siguiendo el sentido de las manillas del reloj, se encuentra un control de polarización (CP), el cual permite controlar el estado de polarización de la luz justo antes de entrar al modulador AO. El modulador AO es conectado después del CP, y este es seguido por un acoplador 50/50, donde uno de sus puertos es utilizado como salida láser. El puerto restante es conectado a la línea de retardo, esta línea de retardo es requerida para ajustar que el tiempo que toma a la luz dar una vuelta en la cavidad coincida con el con el período de la modulación. Posterior a la línea de retardo se encuentra el aislador óptico, cuya operación permite mantener una operación unidireccional en la cavidad. Finalmente, la cavidad se cierra empalmado el puerto de salida del aislador con el puerto de señal del combinador. Para efectos de caracterización, la emisión láser es detectada a través de un detector de InGaAs (ThorLabs DET01CFC) de 1.2 GHz y visualizada en un osciloscopio de 2.5 GHz de ancho de banda.

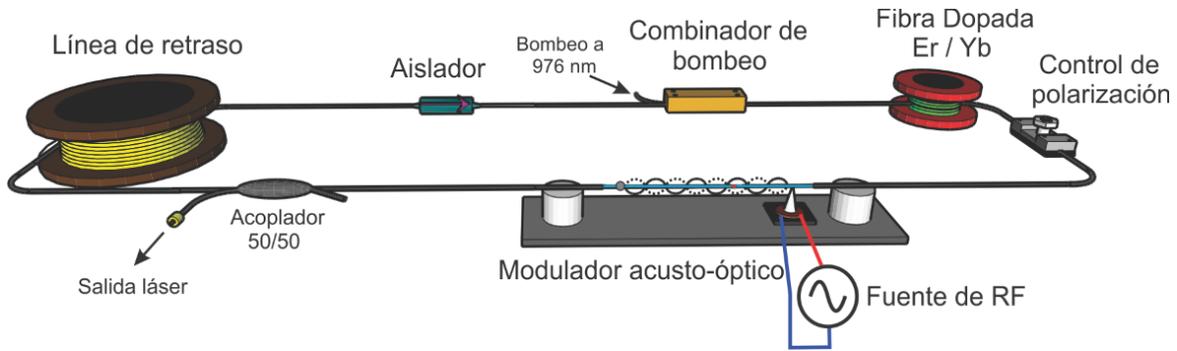


Figura 3.8 Arreglo experimental del láser de fibra mode-lock en forma de anillo.

El proceso de emisión láser inicia con la fuente de bombeo, que emite fotones a una longitud de onda de 976 nm y excita los iones de Erblio/Yterbio en la fibra dopada. Los iones excitados vuelven al nivel base liberando energía en forma de fotones en el rango de 1520 a 1570 nm. La emisión proveniente del medio activo ingresa a un control de polarización, que permite orientar el campo eléctrico de la luz con el plano de vibración de las ondas acústicas de flexión. Al ingresar la luz dentro del modulador, las longitudes de onda que conforman el espectro del erbio son filtradas a través del bloqueador del modo fundamental, hasta generar un espectro suave que permita generar pequeñas perturbaciones, que conforme den múltiples viajes dentro de la cavidad se transformaran en pulsos ópticos mode lock. A continuación, la luz se divide a través del acoplador 50/50 para dar paso, por un lado, a la salida de los pulsos láser hacia un analizador de espectro óptico, y por el otro, para continuar con la estructura de la cavidad de anillo hacia la línea de retraso. La línea de retraso permite hacer coincidir el tiempo de ida y vuelta del pulso dentro de la cavidad con la frecuencia de modulación. La línea de retraso es conectada con un aislador, que controla la dirección de propagación de los pulsos ópticos. Este último se enlaza al combinador de bombeo y de esta forma se cierra la cavidad de anillo.

En relación al ajuste experimental del sistema, se elige la frecuencia acústica que permita alcanzar la máxima profundidad de modulación, es decir, 2.43113 MHz (ver figura 3.7). Por lo tanto, la frecuencia de modulación es 4.86226 MHz ($f_m = 2 \times f_a$). Considerando un índice efectivo (n_{eff}) de 1.446, la longitud de cavidad es 42.67 m, $L_{\text{cavidad}} = c / (2f_a n_{\text{eff}})$. Sin embargo, se esperan pequeños errores en la longitud de la cavidad que se compensan ajustando la

frecuencia acústica a una razón de cambio de $-1.76 \text{ cm} / \text{kHz}$ ($\partial L_{\text{cavidad}} / \partial f_a = -L_{\text{cavidad}} / f_a$). Con respecto a la dispersión (D) de la cavidad, todos los componentes del láser, con excepción de la fibra activa, están compuestos de fibra Corning SMF-28. Por lo tanto, la dispersión de la cavidad es anómala, $D = 18 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ a 1550 nm . Los parámetros que permiten configurar el sistema de manera óptima se muestran en la tabla 3.1.

Parámetro	Valor correspondiente
Voltaje pico a pico en el piezoeléctrico	30.4 V
Frecuencia de la señal de radiofrecuencia	2.434 MHz
Potencia de bombeo	616 mW

Tabla 3.1 Parámetros óptimos que permiten generar de pulsos ultracortos.

El tren de pulsos mode lock generado a partir de estos parámetros (tabla 3.1) se muestran en la figura 3.9, en donde se puede observar que la frecuencia del tren de pulsos ópticos es dos veces la frecuencia de la señal RF (2.434 MHz).

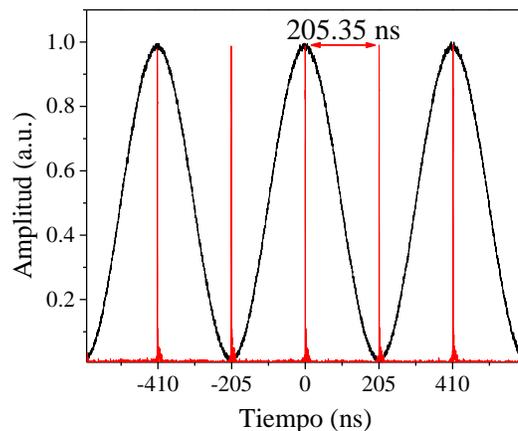


Figura 3.9 Tren de pulsos mode lock generado con una frecuencia de repetición de 4.869 MHz y un bombeo de 616 mW. La señal sinusoidal corresponde al voltaje de RF aplicado al disco piezoeléctrico.

La medición del espectro óptico de los pulsos de salida se muestra en la figura 3.10(a), donde el ancho a mitad de altura ($\Delta\lambda$) es medido en 0.2868 nm con una longitud de onda central (λ_c) de 1568.50 nm y una potencia promedio (P_{Promedio}) de 288.56 μW . La figura 3.10(b) muestra la función de autocorrelación medida a través de un autocorrelador de la marca Femtochrome, modelo FR-103XL. La duración del pulso (T_{FWHM}) es de 8.93 ps, esta cantidad se calcula a partir del ancho a mitad de altura de la función de autocorrelación ($T_{\text{ac}} = 13.6$ ps), cuyo factor de escalamiento para conocer el valor real de la duración del pulso a mitad de altura es de 0.648, esto es $T_{\text{FWHM}} = 0.648 T_{\text{ac}}$. La potencia pico correspondiente a este pulso es 5.839 W, la cual es estimada a través de la siguiente expresión $P_{\text{pico}} = 0.88 \times P_{\text{Promedio}} \times (f_{\text{rep}} \times T_{\text{FWHM}})^{-1}$, donde f_{rep} es la frecuencia de repetición del pulso.

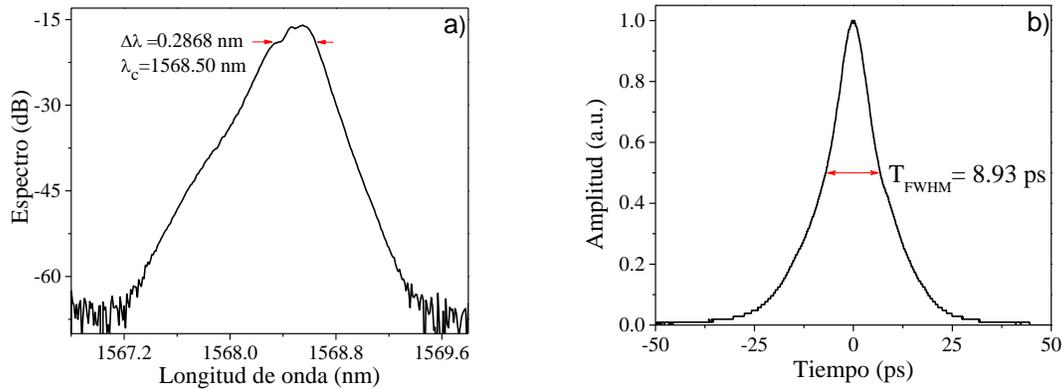


Figura 3.10 (a) Medición del espectro óptico del tren de pulsos mode lock. (b) Traza de autocorrelación correspondiente a los pulsos de salida de la cavidad láser.

Se estima el valor del producto tiempo ancho de banda (TBP, por sus siglas en inglés) a través de la siguiente expresión, $TBP = (\Delta\lambda c T_{\text{FWHM}}) / \lambda_c^2$ (donde c es la velocidad de la luz). El valor ideal del TBP puede variar según sea el ajuste que se aplique a la autocorrelación del pulso, en donde pueden presentarse dos casos, una forma gaussiana cuyo valor ideal es de 0.44, o una forma de sech^2 , en donde el valor ideal es de 0.315. El perfil del pulso obtenido se ajusta a una sech^2 . El TBP para el pulso ultracorto obtenido es de 0.312.

La figura 3.11 muestra el espectro de RF de los pulsos de salida, medido con un analizador de espectro de 3.2 GHz a la frecuencia de repetición fundamental, utilizando un spam de 8 MHz y una resolución de 1 kHz. Se observa claramente un pico máximo de frecuencia a 4.865 MHz, que corresponde a los pulsos mode lock, junto con dos componentes de frecuencia lateral a ± 2.435 MHz, lo que indica una modulación de amplitud pequeña debido a la frecuencia de la onda acústica. La relación señal/ruido (SNR) del pico de frecuencia fundamental se midió en 62 dB.

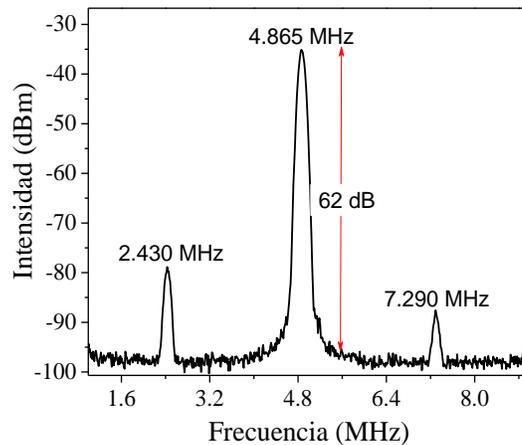


Figura 3.11 Espectro de RF del tren de pulsos de salida medido con un spam de 8 MHz y un ancho de banda de resolución de 1 kHz.

El comportamiento de la potencia pico (P_{pico}) y la duración del pulso (T_{FWHM}) en función de la potencia de bombeo, el voltaje aplicado en el piezoeléctrico (V_{DP}) y la frecuencia acústica (desintonizado en frecuencia) se muestran a continuación. El primer punto a examinar es la dependencia de los parámetros del pulso en función de la potencia de bombeo, como se muestra en la figura 3.12.

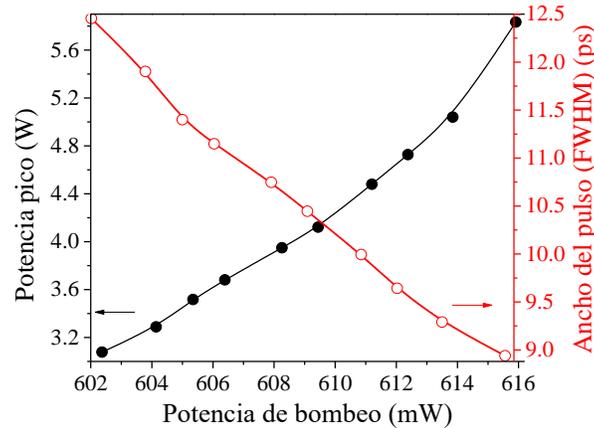


Figura 3.12 Ancho del pulso y potencia pico en función de la potencia de bombeo.

Conforme la potencia de bombeo aumenta, el ancho del pulso se ve disminuido, mientras que la potencia pico del pulso incrementa su valor acorde al aumento de la potencia de bombeo. El pulso más corto (8.93 ps) se obtiene a una potencia bombeo de 616 mW, para el cual se estima una potencia pico de 5.83 W.

La figura 3.13 muestra el comportamiento en función del voltaje aplicado en el piezoeléctrico (V_{DP}). Para realizar esta medición, el ajuste del control de polarización y la frecuencia acústica ($f_a = 2.434$ MHz) se mantuvieron constantes en su valor óptimo. El rango de voltajes que permitió mantener una operación mode lock se encontró entre 29.6 y 30.4 V.

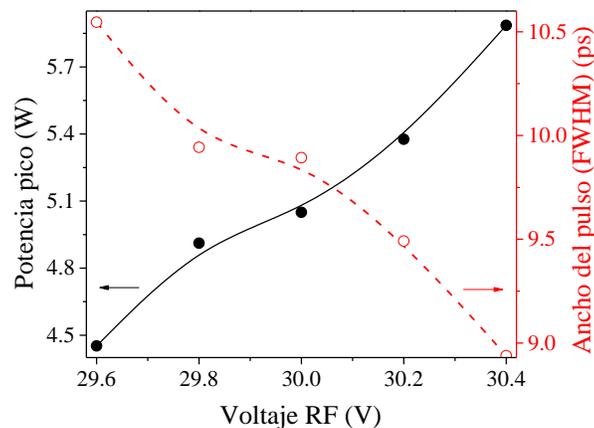


Figura 3.13 Ancho del pulso y potencia pico en función del voltaje RF (V_{DP}).

Se puede observar que el ancho temporal del pulso disminuye conforme el voltaje se incrementa, pasando de un pulso de 10.5 ps con 29.6 V a uno de 8.93 ps con 30.4 V. Por otro lado, la potencia pico presenta un comportamiento contrario, es decir; conforme el voltaje se incrementa la potencia pico de igual manera se ve acrecentada. En este aspecto, se pasa a tener un pulso con una potencia pico de 4.45 W a 29.6 V a uno de 5.83 W a 30.4 V. De este modo, se logra confirmar que el estado óptimo, en relación al voltaje RF, se encuentra con un voltaje de 30.4 V generando el pulso más corto de 8.93 ps.

Otra de las mediciones realizadas en este trabajo fue la cuantificación del desintonizado en frecuencia (Δf_a) el cual determina el cambio de frecuencia máxima permitida con respecto a la frecuencia fundamental de la cavidad, la cual es de 2.434 MHz. La figura 3.14 muestra la variación de los parámetros del pulso según varía la frecuencia acústica aplicada al sistema, similar al caso anterior, el ajuste de la polarización, el voltaje RF (30.4 V) y la potencia de bombeo (616 mW) se mantuvieron constantes.

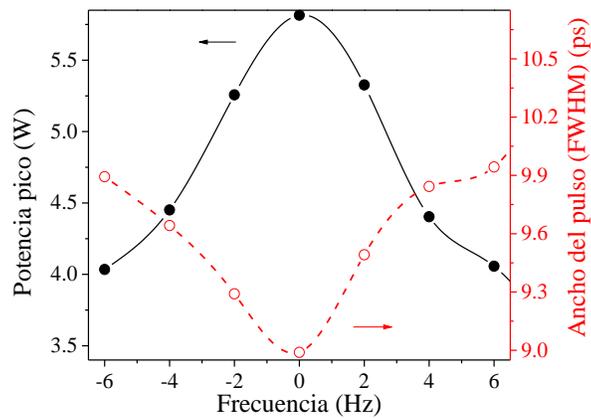


Figura 3.14 Ancho del pulso y potencia pico en función del desintonizado en frecuencia.

De acuerdo a la figura anterior, el sistema láser permite un desintonizado máximo de alrededor de ± 6 Hz. Este resultado implica que el cambio máximo permitido en la longitud de la cavidad ΔL no puede ser más grande de $\pm 106 \mu\text{m}$ ($\partial L_{\text{cavidad}} / \partial f_a = -17.6 \mu\text{m/Hz}$), por lo que la alta precisión en el ajuste del desintonizado en frecuencia y el tamaño de la cavidad es altamente requerido en este tipo de sistemas.

La figura 3.15 muestra la estabilidad temporal del pulso óptico más corto, el cual fue monitoreado a lo largo de aproximadamente 1 hora a través del autocorrelador. Durante este tiempo el ancho del pulso oscila entre 8.93 y 11.97 ps, a los cuales les corresponde las potencias pico de 5.83 y 3.18 W, respectivamente.

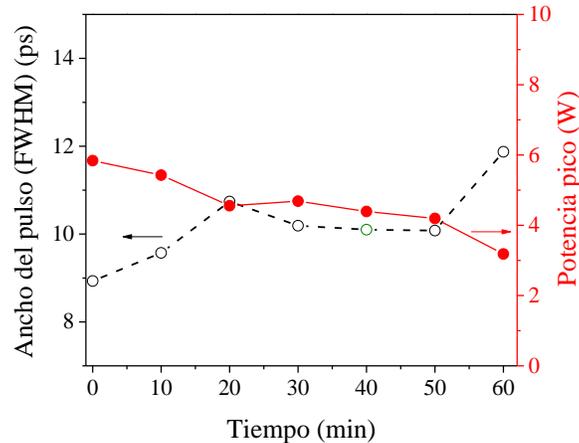


Figura 3.15 Estabilidad del pulso ultracorto a lo largo de aproximadamente una hora.

Este último resultado demuestra una estabilidad razonablemente buena para este tipo de dispositivos AO. Sin embargo, una operación más estable podría ser posible mediante la reducción en la longitud del modulador, que es la principal fuente de inestabilidad.

Un último punto a analizar es la respuesta sintonizable del sistema láser. Al considerar que la longitud de onda de la emisión láser está relacionada con la frecuencia acústica de la onda de flexión, se puede seleccionar una longitud de onda diferente al modificar la frecuencia acústica. Aunque esto generaría un desbalance entre la frecuencia de modulación y el tiempo de viaje del pulso dentro del sistema ($L_{\text{cavidad}} = c / 2 f_a n_{\text{eff}}$); cambiar la frecuencia acústica implica una modificación en la longitud de la cavidad. En el caso ideal del pulso más corto, donde la frecuencia acústica es 2.434 MHz ($f_m = 2 \times f_a = 4.86$ MHz), la emisión de luz está centrada en 1568.5 nm, como se muestra en el espectro color azul en la figura 3.16.

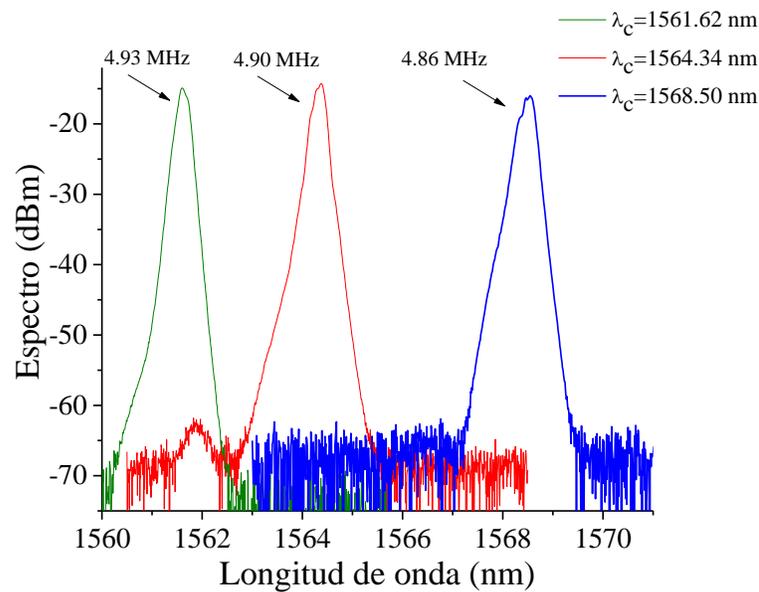


Figura 3.16 Operación sintonizable del láser mode lock para diferentes frecuencias de modulación.

En el caso de la emisión centrada en 1564.34 nm (espectro rojo) los parámetros utilizados fueron los siguientes: f_a igual a 2.453 MHz ($f_m = 4.90$ MHz), un voltaje de RF de 33.6 V y una potencia de bombeo de 622 mW. La longitud de la cavidad correspondiente a esta emisión es de 42.36 m. Para la emisión centrada en 1561.62 nm son los siguientes: la f_a igual a 2.468 MHz ($f_m = 4.93$ MHz), voltaje de RF de 28.4 V y potencia de bombeo de 485.48 mW. La longitud de la cavidad correspondiente a esta emisión es de 42.14 m. Este experimento permite observar la versatilidad que presentan los sistemas AO al ser usados en la generación de pulsos ultracortos de alta calidad, sintonizabilidad y de altas potencias pico.

3.4 Conclusiones

Se llevó a cabo una caracterización experimental de un láser de anillo tipo mode lock activo todo-fibra mediante el uso de un modulador AO acondicionado como filtro sintonizable pasabanda (FSAP). El modulador basa su operación en un BMF compuesto de una pequeña sección de fibra óptica sin núcleo (1.185 mm) empalmada entre dos secciones de fibra estándar monomodo SMF-28. Primeramente, presentamos una caracterización detallada del modulador. El FSAP permite la implementación de un ancho de banda de modulación

relativamente amplio (1,4 nm), una profundidad de modulación alta (73%) y una baja pérdida óptica (4.11 dB) en una configuración de 72.5 cm de longitud. La eficacia del modulador se demuestra implementándolo en la operación de un láser mode lock activo. El modulador proporciona un filtrado espectral eficiente para permitir la generación de pulsos ultracortos. Se obtuvieron pulsos ópticos de 8.93 ps de ancho temporal y 5.83 W de potencia pico a una frecuencia de repetición de 4.869 MHz. Estos resultados experimentales se pueden considerar dentro de los mejores resultados en el marco del desarrollo de láseres de fibra mode lock activos basados en moduladores de AO todo-fibra. Si comparamos el pulso óptico más corto obtenido con el esquema actual (8.93 ps y 5.83 W de potencia pico) con los resultados mostrados en [5], donde los pulsos ópticos son de 24 ps y de 2.7 W de potencia pico que se generaron utilizando un modulador AO similar, pero operando bajo una configuración diferente, hay una mejora de casi un factor de 3 para el ancho del pulso y de 221% para la potencia pico. Sin embargo, el principal progreso es producido por el modulador AO que permite eliminar la necesidad incluir dispositivos de filtrado adicionales en la cavidad, lo que conduce a una operación más sencilla en el uso de la técnica mode lock.

3.5 Referencias

1. J. C. Diels and Rudolph, "Ultrashort Laser Pulse Phenomena: Fundamentals, Techniques, and Applications on a Femtosecond Time Scale", Academic press, (2006).
2. S. Nolte, F. Schrepel and F. Dausinger, "Ultrashort Pulse Laser Technology: Laser Sources and Applications", Springer international publishing, (2016).
3. N. Myren and W. Margulis, "All-Fiber Electrooptical Mode-Locking and Tuning", IEEE Phot. Tech. L. **17**, 2047–2049, (2005).
4. K. Yin, B. Zhang, W. Yang, H. Chen, S. Chen and J. Hou, "Flexible picosecond thulium-doped fiber laser using the active mode-locking technique", Opt. Lett. **39**, 4259–62, (2014).
5. M. Bello Jiménez, C. Cuadrado Laborde, A. Díez, J. L. Cruz, M. V. Andrés and A. Rodríguez Cobos, "Mode-locked all-fiber ring laser based on broad bandwidth in-fiber acousto-optic modulator", Appl. Phys. B **110**, 73–80, (2013).
6. M. Bello Jiménez, C. Cuadrado Laborde, D. Sáez Rodríguez, A. Díez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, "Actively mode-locked fiber ring laser by intermodal acousto-optic modulation", Opt. Lett. **35**, 3781–3783, (2010).
7. M. Bello Jiménez, C. Cuadrado Laborde, A. Díez, J.L. Cruz and M. V. Andrés, "Experimental study of an actively mode-locked fiber ring laser based on in-fiber amplitude modulation", Appl. Phys. B **105**, 269–76, (2011).
8. C. Cuadrado Laborde, A. Díez, M. Delgado Pinar, J. L. Cruz and M. V. Andrés, "Mode locking of an all-fiber laser by acousto-optic superlattice modulation", Opt. Lett. **34**, 1111–1113, (2009).
9. C. Cuadrado Laborde, A. Díez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, "Experimental study of an all-fiber laser actively mode-locked by standing-wave acousto-optic modulation" Appl. Phys. B **99**, 95–9, (2010).
10. M. Jeon, H. K. Lee, K. H. Kim, E. Lee, W. Oh, B. Y. Kim, H. Lee and Y. W. Koh, "Harmonically mode-locked fiber laser with an acousto-optic modulator in a Sagnac loop and Faraday rotating mirror cavity", Opt. Commun. **149**, 312–316, (1998).

11. C. Cuadrado Laborde, M. Bello Jiménez, A. Díez, J. L. Cruz and M. V. Andrés, “Long-cavity all-fiber ring laser actively mode locked with an in-fiber bandpass acousto-optic modulator”, *Opt. Lett.* **39**, 68–71, (2012).
12. D. O. Culverhouse, D. J. Richardson, T. A. Birks and P. S. J. Russell, “All-fiber sliding-frequency Er³⁺/Yb³⁺ soliton laser”, *Opt. Lett.* **20**, 2381–2383, (1995).
13. G. Ramírez Meléndez, M. Bello Jiménez, O. Pottiez and M. V. Andrés, “Improved all-fiber acousto-optic tunable bandpass filter”, *IEEE Phot. Tech. L.* **29**, 1015–1018, (2017).
14. G. Ramírez Meléndez, M. Bello Jiménez, O. Pottiez, L. Escalante Zarate, R. López Estopier, B. Ibarra Escamilla, M. Durán Sanchez, E. A. Kuzin and M. V. Andrés, “Q-switching of an all-fiber ring laser based on in-fiber acousto-optic bandpass modulator”, *Appl. Phys. B* **123**, 249, (2017).
15. E. P. Alcusa Sáez, A. Díez, E. Rivera Pérez, W. Margulis, L. Norin and M. V. Andrés, “Acousto-optic interaction in polyimide coated optical fibers with flexural waves”, *Opt. Express* **25**, 17167–17173, (2017).
16. D. I. Yeom, H. S. Kim, M. S. Kang, H. S. Park and B. Y. Kim, “Narrow-bandwidth all-fiber acoustooptic tunable filter with low polarization sensitivity” *IEEE Photon. Technol. L.* **17** 2646–2648, (2005).
17. H. S. Kim, S. H. Yun, I. K. Kwang and B. Y. Kim, “All-fiber acousto-optic tunable notch filter with electronically controlable spectral profile” *Opt. Lett.* **22**, 1476–1478, (1997).
18. E. Hernández Escobar, M. Bello Jiménez, “Flat supercontinuum generation pumped by amplified noise-like pulses from a figure-eight erbium-doped fiber laser”, *Lasers Physics Letters* **14** (10), (2017).

Capítulo 4

Operación simultánea de pulsos ópticos “Q Switched, Mode Locked” (QML)

Este capítulo presenta el desarrollo experimental de un láser activo de fibra óptica con una emisión simultánea del tipo Q-switch y mode lock. El láser basa su operación en el modulador previamente descrito en el capítulo anterior, y cuyo funcionamiento es optimizado para controlar las pérdidas en la cavidad y permitir la emisión simultánea de pulsos Q-switch y mode lock. Este tipo de emisión, mejor conocida como Q-switched, mode-locked (QML), se caracteriza por la emisión de una envolvente del tipo Q-switch compuesta por un tren de pulsos periódicos de mode lock. Con el propósito de obtener este tipo de emisión, la onda acústica que interactúa en el modulador es modulada por un pulso rectangular de frecuencia y ciclo de trabajo variable. Los resultados experimentales demuestran la generación de pulsos QML de 4.50 μ s de duración temporal, una potencia pico de 2.42 W y una frecuencia de repetición de 1 kHz.

4.1 Introducción

En forma muy general, y tomando como base la técnica implementada en el proceso de emisión de la luz, los láseres pulsados pueden clasificarse en dos categorías, láseres del tipo Q-Switch y de amarre de modos. Los láseres de Q-Switch se caracterizan por almacenar la energía del bombeo en el medio amplificador, una vez que la energía es suficientemente alta, ésta se libera en forma de un pulso intenso de luz de larga duración, típicamente los pulsos Q-Switch tienen anchos temporales de cientos de nanosegundos [1,2] y potencias pico del orden de Watts. Aplicaciones para este tipo de láser las podemos encontrar en las áreas relacionadas con ingeniería médica, procesamiento de materiales, espectroscopia, entre otras [3,4]. Por otra parte, los láseres de amarre de modos se caracterizan por la emisión de pulsos cortos y ultracortos de luz, típicamente de picosegundos, con altas tasas de repetición. Este tipo de láser es utilizado con frecuencia en la generación de efectos no lineales, el desarrollo

de fuentes de supercontinuo, y aplicaciones en comunicaciones ópticas [5-8]. Como se describió en el capítulo anterior, los láseres de mode lock requieren amarrar una fase fija entre los modos longitudinales de la cavidad, produciendo una superposición de frecuencias que conllevan a la formación de un pulso ultracorto de luz.

Los láseres llamados “Q-switched mode lock” (QML), implican la generación simultánea de pulsos del tipo Q-switch y mode lock dentro de la misma cavidad. Ésta técnica favorece la emisión de pulsos altamente energéticos, la cual está constituida por una envolvente temporal del tipo Q-switch y cuyo interior se compone por un tren de pulsos ultracortos derivados del amarre de modos [9-15].

Con la finalidad de explotar las ventajas de la técnica QML, a continuación, se presenta la implementación del modulador acusto-óptico pasa-banda (descrito en el capítulo anterior) como elemento activo para la emisión simultánea de pulsos Q-switch y mode lock. Para llevar a cabo este tipo de emisión, la onda acústica es modulada mediante de un pulso rectangular de frecuencia y ciclo de trabajo variable, permitiendo generar una envolvente del tipo Q-switch. Así mismo, la frecuencia acústica es seleccionada para cumplir las condiciones que requiere el amarre de modos. La emisión QML se caracterizará en función del ancho temporal de la envolvente Q switch y la máxima potencia pico generada. Estos resultados presentan un primer estudio para el desarrollo de este tipo de esquemas en el IICO y la UASLP.

4.2 Configuración del modulador sintonizable acusto-óptico pasa-banda para la emisión de pulsos QML

La figura 4.1 muestra el esquema del modulador sintonizable AO pasabanda, donde se esquematiza la modulación de la onda acústica a través un pulso rectangular. La generación de pulsos QML estará en función de la señal que modula la frecuencia acústica a través del ciclo de trabajo. Como se describirá más adelante, el ciclo de trabajo nos permite controlar el estado encendido/apagado en la cavidad, permitiéndonos encontrar las mejores condiciones para generar la envolvente Q-switch. Así mismo, y con el objetivo de mantener una operación simultánea Q-switch y mode lock, la frecuencia de la onda acústica se selecciona alrededor de 2.434 MHz, como hemos demostramos en el capítulo anterior, a esta frecuencia acústica se genera el amarre de modos en el modulador acusto-óptico.

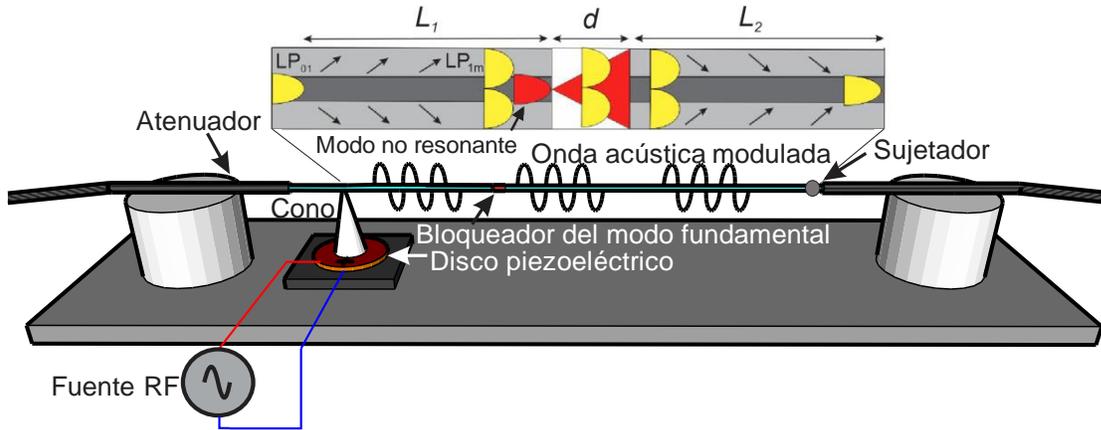


Figura 4.1 Arreglo experimental del modulador acusto-óptico pasabanda para la emisión de pulsos Q switch, mode lock.

La figura 4.2 muestra la modulación de la onda acústica (traza color negro) mediante un pulso rectangular de 1 kHz y un ciclo de trabajo de 800 μs (traza color rojo). Este tipo de señal se obtiene utilizando las funciones de modulación en el generador de funciones. La generación de pulsos QML se obtuvo con una frecuencia acústica (f_a) de 2.435 MHz, y un voltaje aplicado al disco piezoeléctrico (V_{DP}) de 28.4 V. Como veremos en la siguiente sección, las características de emisión QML se controlarán mediante un ajuste en la frecuencia y el ciclo de trabajo de la señal rectangular.

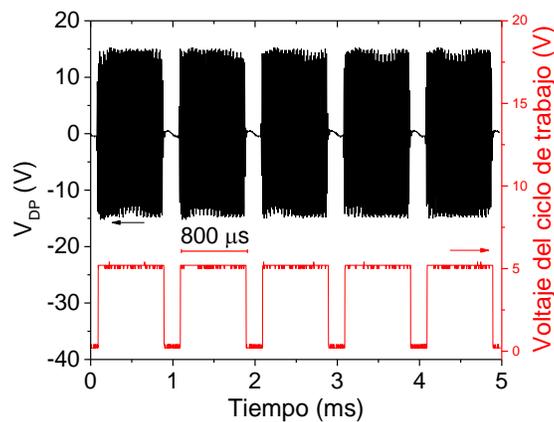


Figura 4.2 Traza del osciloscopio de la onda acústica (línea negra) con frecuencia de 2.435 MHz y 28.4 de V_{DP} . La traza roja es la señal del ciclo de trabajo con un ancho temporal de 800 μs con una frecuencia de repetición de 1 kHz.

4.3 Emisión simultánea de pulsos Q-Switched y mode locked

La configuración del láser de pulsos QML se muestra en la figura 4.3, cuyo esquema es similar al mostrado en el capítulo 3 (Fig. 3.8) para la generación de pulsos mode lock. El único cambio presentado en este esquema se presenta en el modulador AO, en el cual se aplica una modulación de la onda acústica a través de una señal rectangular.

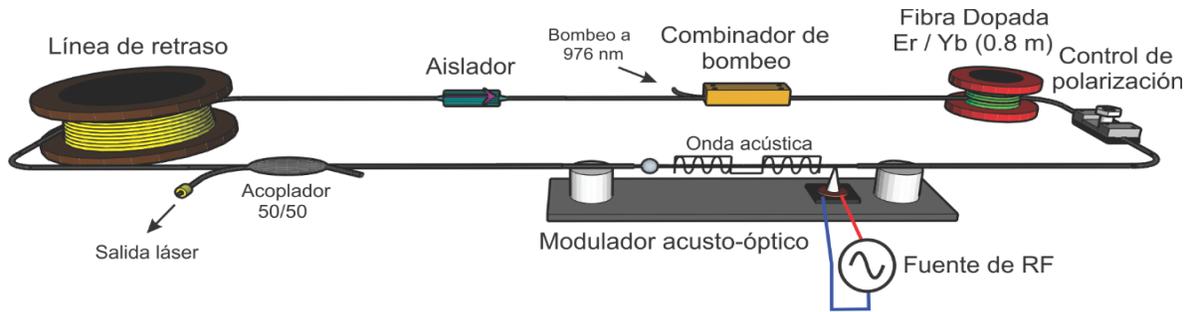


Figura 4.3 Arreglo experimental del láser de fibra Q switch, mode lock en forma de anillo.

La figura 4.4(a) muestra el espectro de los pulsos mode lock generados previo a la emisión QML. El ancho a mitad de altura ($\Delta\lambda$) fue medido en 0.2840 nm, con una longitud de onda central (λ_c) de 1568.10 nm y una potencia promedio ($P_{Promedio}$) de 280.80 μ W. La figura 4.4(b) muestra la función de autocorrelación del pulso mode lock. La duración del pulso (T_{FWHM}) es medida en 8.93 ps. La potencia pico correspondiente a este pulso es 5.69 W, la cual se estimó a través de la siguiente expresión: $P_{pico} = (0.88 P_{Promedio})(f_{rep} T_{FWHM})$, donde f_{rep} es la frecuencia de repetición del pulso (2×2.435 MHz). El perfil del pulso obtenido se ajusta a una secante hiperbólica cuadrada ($Sech^2$), con un producto tiempo ancho de banda de 0.309, este valor, es ligeramente menor al valor ideal de un perfil de intensidad de $Sech^2$ de 0.315.

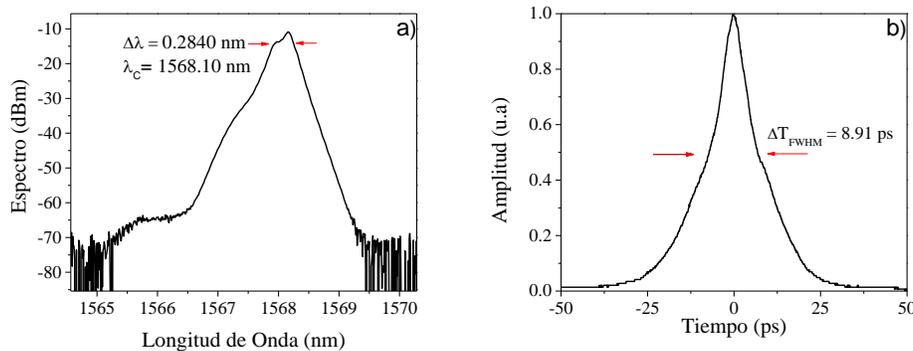


Figura 4.4 (a) Espectro óptico. (b) Traza de autocorrelación correspondiente a los pulsos mode lock.

La emisión de pulsos QML se obtuvo al modular la señal acústica con los parámetros mostrados en la tabla 4.1.

Parámetro	Valor correspondiente
Voltaje pico a pico en el piezoeléctrico	28.4 V
Frecuencia de la señal de radiofrecuencia	2.435 MHz
Potencia de bombeo	600 mW
Tamaño del ciclo de trabajo	800 μs
Frecuencia de ciclo de trabajo	1 kHz

Tabla 4.1 Parámetros óptimos para la emisión de los pulsos QML.

El tren de pulsos QML se muestra en la figura 4.5(a). La frecuencia de repetición de los pulsos es 1 ms (1 kHz^{-1}). El detalle de la envolvente QML se muestra en la figura 4.5(b), donde se aprecia la envolvente del tipo Q-switch compuesta en su interior por un tren de pulsos mode lock, los cuales están espaciados un periodo igual a 204.77 ns, Este tiempo es correspondiente al tiempo que le toma a la luz dar una vuelta completa en la cavidad.

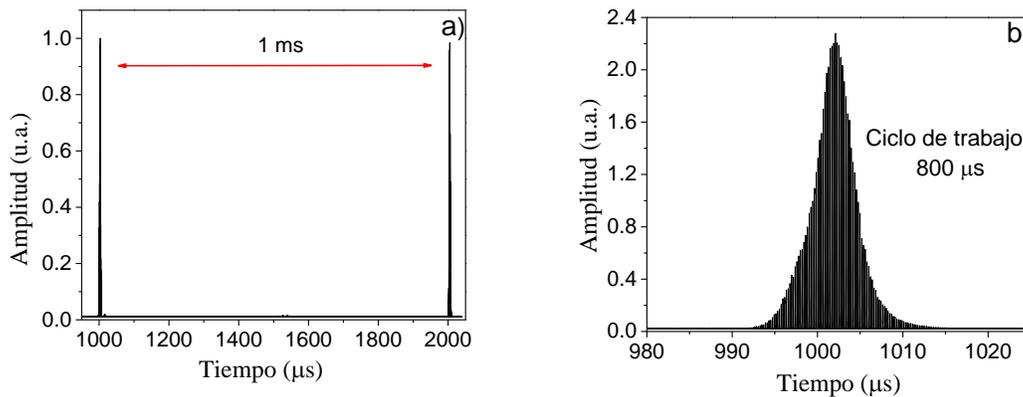


Figura 4.5 (a) Tren de pulsos QML generado con una frecuencia de repetición de 1 kHz y un bombeo de 600 mW. (b) Detalle de un pulso QML empleando los parámetros mostrados en la tabla 4.1.

La evolución del pulso QML en función del ciclo de trabajo se muestra en la figura 4.6. En esta medición la frecuencia del pulso rectangular se mantiene en 1 kHz y el ciclo de trabajo se varía en un rango de 575 a 925 μs , tal como se muestra en las figuras 4.6(a)–(f). La gráfica

4.6(d) muestra el pulso central para el ciclo de trabajo que produce el pulso más intenso (800 μs), el pulso central exhibe un ancho temporal a mitad de altura de 22.35 ns.

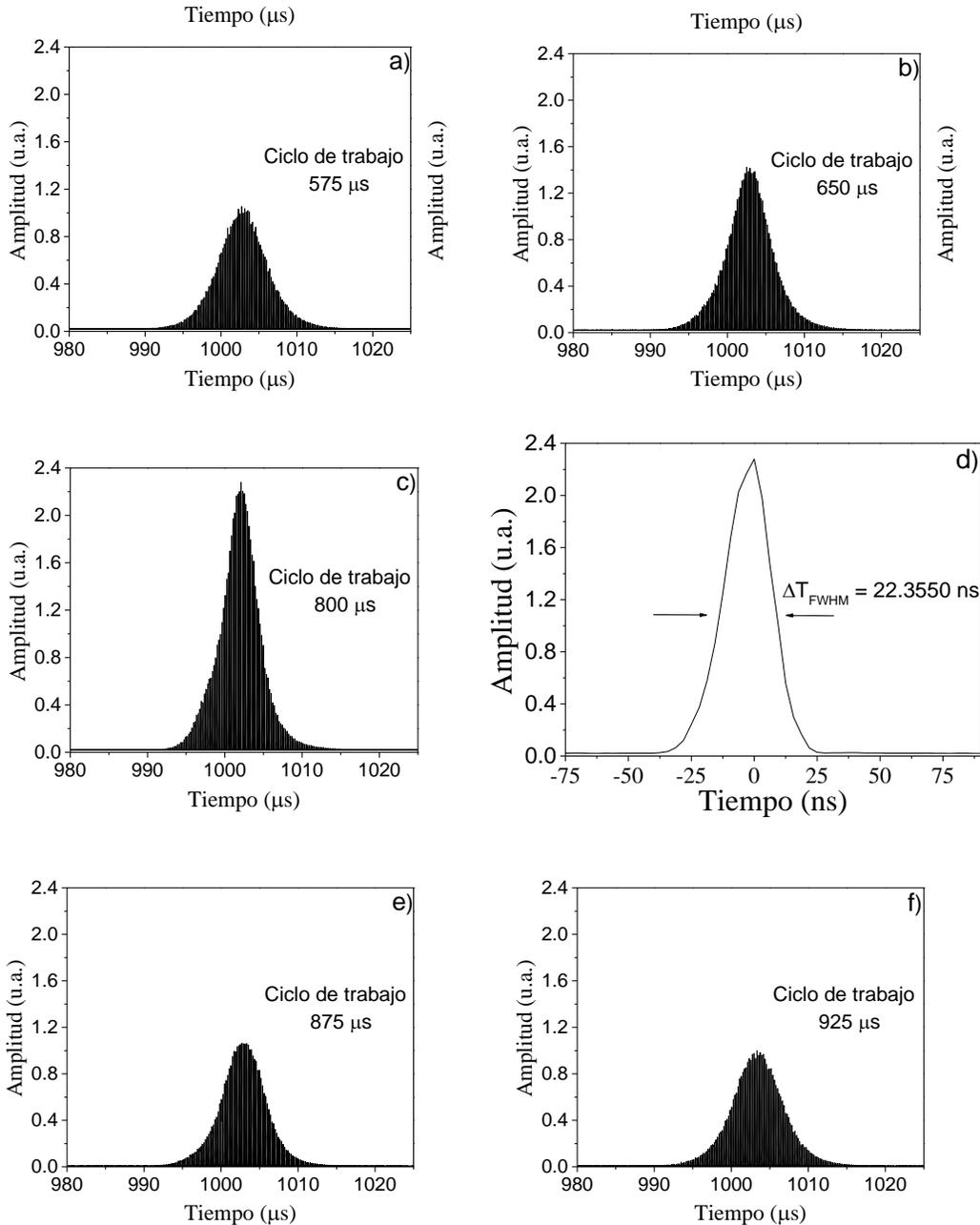


Figura 4.6 Pulsos QML obtenidos a 2.435 MHz y 1.0 kHz de frecuencia acústica y ciclo de trabajo, respectivamente, y una potencia de bombeo de 600 mW. Pulsos QML para diferentes tamaños de ciclo de trabajo: 575 μs (a), 650 μs (b), 800 μs (c), 875 (e) y 925 μs (f). (d) Pulso central mode lock para un ciclo de trabajo de 800 μs .

Estos resultados permiten observar que la potencia pico del pulso QML aumenta conforme el ciclo de trabajo se incrementa, pasando de un pulso de 1.08 W con 575 μs de ciclo de trabajo hasta llegar a un pulso de 2.424 W con 800 μs . Al seguir aumentando el tamaño del ciclo de trabajo, la potencia pico decae hasta obtener un pulso de 1.06 W con 925 μs .

El comportamiento de la potencia pico del pulso QML y el ancho temporal de la envolvente Q switch en función del ciclo de trabajo se muestra en la figura 4.7. Se puede observar que para diferentes ciclos de trabajo existe un ancho mínimo para la envolvente Q-switch, cuando esto ocurre, la potencia pico es máxima. El mejor resultado se obtiene para un ciclo de trabajo entre los 825 μs , donde la envolvente Q-switch alcanza su valor mínimo cercano a 4.55 μs y un máximo valor en la potencia pico de 2.5 W.

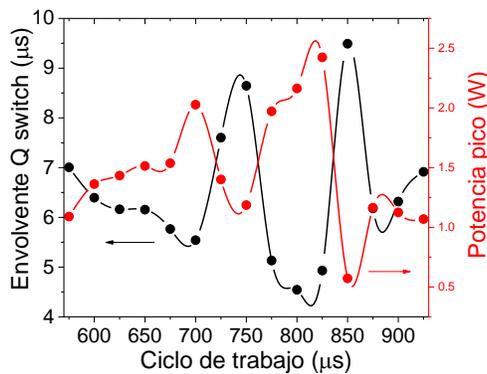


Figura 4.7 Ancho de la envolvente Q switch y potencia pico del pulso QML en función del ciclo de trabajo.

4.4 Conclusiones

En el capítulo 3 se demostró que el MAO explota las ventajas del acoplamiento intermodal inducido por ondas acústicas de flexión, en donde al encender la señal de radiofrecuencia se da paso a la emisión de pulsos ultracortos el régimen de amarre de modos. En este capítulo se amplía el funcionamiento del MAO al realizar una modulación de la onda acústica, esto a través de un pulso rectangular de frecuencia y tamaño variable, lo que permite generar un almacenamiento de una gran cantidad de energía que es liberada en la emisión de pulsos Q switch que son constituidos en su interior por pulsos mode lock, abriendo paso a una nueva emisión láser conocida como Q switch, mode lock. Este nuevo tipo de emisión pulsada fue

caracterizada al variar el tamaño y frecuencia del ciclo de trabajo, lo que permitió conocer los parámetros óptimos de operación del sistema en relación a la potencia pico y el ancho temporal de los pulsos QML, todo esto fue realizado en una configuración de anillo todo-fibra.

4.5 Referencias

1. E. M. Sholokhov, A. V. Marakulin, A. S. Kurkov and V. B. Tsvetkov, "All-fiber Q-switched holmium laser", *Laser Phys. Lett.* **8**, 382, (2011).
2. M. Delgado Pinar, A. Díez, J.L. Cruz, M. V. Andrés, "Enhanced Q-switched distributed feedback fiber laser based on acoustic pulses", *Laser Phys. Lett.* **6**, 139, (2009).
3. S. Gräf, G. Staupendahl, A. Krämer, F. A. Müller, "High precision materials processing using a novel Q-switched CO₂ laser", *Opt. Laser Eng* **66**, 152, (2015).
4. I. Rohde, J.-M. Masch, D. Theisen-Kunde, M. Marczyński-Bühlow, R. Bombien Quaden, G. Lutter, "Resection of Calcified Aortic Heart Leaflets In Vitro by Q-Switched 2 μ m Microsecond Laser Radiation", *J. Card. Surg.*, **30**, 157, (2015).
5. J. C. Diels and Rudolph, "Ultrashort Laser Pulse Phenomena: Fundamentals, Techniques, and Applications on a Femtosecond Time Scale", Academic Press, (2006).
6. S. Nolte, F. Schrempel and F. Dausinger, "Ultrashort Pulse Laser Technology: Laser Sources and Applications", Springer international publishing, (2016).
7. H.A Haus, "Mode-locking of lasers", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, **6**, 1173, (2000).
8. E. Hernández Escobar, M. Bello Jiménez, O. Pottiez, B. Ibarra-Escamilla, R. López-Estopier, M. Durán-Sánchez, E. A. Kuzin and M. V. Andrés, "Flat supercontinuum generation pumped by amplified noise-like pulses from a figure-eight erbium-doped fiber laser", *Laser Phys. Lett.* **14** (10), 2017.
9. C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, J. L. Cruz y M. V. Andrés, "Q-switched and modelocked all-fiber lasers based on advanced acousto-optic devices", *Laser & Photonics Reviews* **53**, (2011).
10. P. Kumar Datta, S. Mukhopadhyay, S. Kumar Das, L. Tartara, A. Agnesi, and V. Degiorgio, "Enhancement of stability and efficiency of a nonlinear mirror mode-locked Nd:YVO₄ oscillator by an active Q-switch", *Opt. Express* **12**, 4041, (2004).
11. Y. M. Chang, J. L. and J. H. Lee, "A Q-switched, mode-locked fiber laser employing subharmonic cavity modulation", *Optics Express* **19**, (2011).
12. C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, J.L. Cruz and M.V. Andrés, "Q-switched and modelocked all-fiber lasers", *Laser Phys. Lett.* **7**, 870-875, (2010).

13. C. Cuadrado-Laborde, A. Diez, J. L. Cruz and M.V. Andrés, “Doubly active Q switching and mode locking of an all-fiber laser”, *Opt. Lett.* **34**, 2709-2711, (2009).
14. J. K. Jabczynski, W. Zendzian, and J Kwiatkowski, “Q-switched mode locking with acousto-optic modulator in a diode-pumped Nd:YVO₄ laser”, *Opt. Express* **14**, 2184-2190, (2006).
15. C. Theobald, M. Weitz, R. Knappe, R. Wallenstein, and J. A. L’Huillier, “Stable Q-switch mode-locking of Nd:YVO₄ lasers with a semiconductor saturable absorber”, *Appl. Phys. B* **92**, 1-3, (2008).

Capítulo 5

Conclusiones y trabajo a futuro

El presente capítulo describe los resultados de mayor relevancia de este trabajo de tesis. Se exponen los enfoques en los que puede ser orientado la configuración del láser para la emisión en el régimen mode lock y Q switch, mode lock en una cavidad de anillo todo-fibra. Además, se discute el trabajo a futuro que puede ser desarrollado con esta configuración láser.

5.1 Conclusiones

A lo largo de este proyecto de tesis se han dado a conocer las características y funcionalidades que presenta el filtro sintonizable acusto-óptico pasabanda (FSAP), el cual además de ser altamente eficiente, presenta un diseño innovador y ampliamente reproducible. Como primer punto, en el segundo capítulo, se describe el funcionamiento del filtro sintonizable como un filtro pasabanda, en donde a través del uso de las ondas acústicas de flexión, se genera el efecto de acoplamiento entre el modo que viaja dentro del núcleo, LP_{10} , a uno de los modos del revestimiento de la familia LP_{1m} , permitiendo que la luz resonante viaje a través de un obstáculo colocado dentro del FSAP, para después permitir ser reacoplada dentro del núcleo. Esto se genera a lo largo de las longitudes de acople L_1 (24 cm) y de reacople L_2 (24 cm) dando una longitud total de FSAP de 48 cm. El obstáculo utilizado fue un bloqueador del modo fundamental compuesto por 1.185 mm de fibra sin núcleo. Este experimento demostró que el bloqueador permite el filtrado de un amplio rango de longitudes de onda no resonantes en hasta 30 dB en la región de 1550 nm. Además, se realizó el análisis experimental de la longitud de interacción L_2 con el objetivo de conocer su valor ideal. Este experimento arrojo

que L_2 debe tomar el valor de 48 cm, permitiendo así, generar un mejor reacoplamiento de luz a la longitud de onda resonante del sistema.

En el capítulo 3, se examinó el efecto de producir dentro del FSAP una reflexión de la onda acústica, lo que permitió transformar el dispositivo en un modulador acusto-óptico (MAO) pasabanda. Este nuevo sistema otorgó la capacidad de obtener el control de las pérdidas dentro de la cavidad a través de la modulación en amplitud de la luz transmitida, además de mantener la propiedad de filtro sintonizable pasabanda. El modulador AO, presenta las características de tener un ancho de banda relativamente grande (1.38 nm) y una alta profundidad de modulación (73%). Este nuevo elemento se añadió a una cavidad de anillo todo-fibra para la emisión de pulsos ópticos en el régimen del amarre de modos (mode lock), los cuales mostraron tener una frecuencia de repetición del doble de la frecuencia de modulación (4.86 MHz), una potencia pico de 5.83 W y un ancho temporal de 8.93 ps. Estos pulsos fueron ajustados a un perfil de Sech², en donde su producto tiempo ancho de banda fue de 0.312, el cual es muy cercano al valor ideal de 0.315 para este tipo de ajuste. Los pulsos fueron caracterizados en función a los parámetros de operación del sistema (frecuencia de la onda acústica, voltaje aplicado al piezoeléctrico y la potencia de bombeo) lo que permitió conocer su valor óptimo para generar una mayor funcionalidad. Además, se examinó la habilidad del sistema de ser sintonizado para diferentes longitudes de onda y, también, se observó la estabilidad de la emisión pulsada a lo largo de aproximadamente una hora.

Finalmente, en el capítulo 4, se realizó la modulación de la onda acústica que se propaga dentro del modulador a través de un pulso rectangular de frecuencia y ciclo de trabajo variables, esto con el objetivo de la generación de pulsos ópticos Q switched, mode locked (QML). La estructura de un pulso QML está dada por una envolvente Q switch en cuyo interior existen múltiples pulsos modo lock. Este tipo de emisiones QML se caracterizan por ser altamente estables, debido a los pulsos de amarre de modos, y por tener altas potencias pico, gracias a la envolvente Q switch. Los mejores resultados para este tipo de pulsos fueron obtenidos a través de un ciclo de trabajo de 800 μ s de tamaño y una frecuencia de repetición de 1 kHz. Estos pulsos QML presentaron las características de tener un periodo de repetición de 1 ms, una potencia pico de 2.42 W y ancho a mitad de altura de 4.50 μ s. Los pulsos fueron

caracterizados para conocer los valores óptimos de la potencia pico y el ancho de la envolvente Q switch en función del tamaño del ciclo de trabajo, en donde se encontraron múltiples casos en los que se cumple que el ancho de la envolvente es menor, para dar paso a una mayor potencia pico (Figura 4.7).

5.2 Trabajo a futuro

El trabajo realizado en este proyecto de tesis es propenso a recibir una amplia variedad de mejoras en cada una de las secciones planteadas capítulo a capítulo. En relación al modulador acusto-óptico, se espera la reducción de su tamaño a través de la implementación de dos fibras estrechadas, ambas colocadas a ambos costados del bloqueador del modo fundamental, lo que permitirá generar un mayor acople intermodal en una menor longitud de interacción, esto significaría poder lograr reducir la extensión actual del modulador (~ 72.5 cm) hasta cinco veces su tamaño (~ 14.5 cm), lo que permitirá una mayor compactibilidad y una amplia mejora en el tamaño de los dispositivos acusto-ópticos activos reportados en la actualidad.

Al realizar la mejora antes mencionada al MAO, se esperan lograr emisiones en el régimen del amarre de modos que pueden llegar a tener anchos temporales de 1 picosegundo, o incluso lograr alcanzar las centenas de femtosegundos. Solo quedaría por experimentar y observar el comportamiento que se obtendría al utilizar esta nueva configuración del MAO en la generación de pulsos Q switched, mode locked, los cuales se espera sean ampliamente mejorados en relación a su potencia pico y su anchura temporal.

Finalmente, resulta de altísimo interés científico el utilizar este tipo de dispositivos láseres de pulsos largos (Q switch) y ultracortos (amarre de modos) en la región espectral de 2 micras. Este hecho implicaría rediseñar por completo el MAO, ya que se necesitará realizar el análisis teórico que arroje el valor adecuado del tamaño del bloqueador del modo fundamental que permitiría el filtrado espectral pasabanda para longitudes de onda cercanas a 2 micras. Sumado a esto, se necesitará todo un conjunto de dispositivos tales como acopladores, aisladores, circuladores, etc., que trabajen para este nuevo régimen de emisión. Además, se necesita de nuevas fuentes de bombeo en donde se podrían utilizar fibras dopadas con elementos de las tierras raras como Tulio (emisión en ~ 1.8 micras), Lutécio (~2.06 micras) y Holmio (~ 2.1 micras) que permitirán ampliar la gama de aplicaciones de los

métodos activos para la producción de pulsos largos y ultracortos en la región espectral de 2 micras.