



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

---

---

CAMPUS IRAPUATO - SALAMANCA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS

Láser pulsado de fibra óptica dopado con  
Er/Yb utilizando amarre de modos

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el grado de:  
Maestro en Ingeniería Eléctrica

PRESENTA:

Ing. José David Filoteo Razo

DIRECTORES:

Dr. Juan Carlos Hernández García  
Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala

SALAMANCA, GTO

JUNIO 2017

Salamanca, Gto., a 19 de Junio del 2017.

**DR. DONATO HERNÁNDEZ FUSILIER**  
**COORDINADOR DE ASUNTOS ESCOLARES**  
**PRESENTE.-**

Por medio de la presente, se otorga autorización para proceder a los trámites de impresión, empastado de tesis y titulación al alumno(a) José David Filoteo Razo del **Programa de Maestría en** Ingeniería Eléctrica y cuyo número de **NUA** es: 143682 del cual soy director. El título de la tesis es: "Láser pulsado de fibra óptica dopado con Er/Yb utilizando acople de modos"

Hago constar que he revisado dicho trabajo y he tenido comunicación con los sinodales asignados para la revisión de la tesis, por lo que no hay impedimento alguno para fijar la fecha de examen de titulación.

**ATENTAMENTE**

Juan Carlos Hdez G  
NOMBRE Y FIRMA  
**DIRECTOR DE TESIS**  
**SECRETARIO**

Dr. Juan Carlos Hernández García

ROBERTO ROJAS LAGUNA  
NOMBRE Y FIRMA  
**PRESIDENTE**

Julian Moisés Estudillo Ayala  
NOMBRE Y FIRMA  
**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Edgar Alvarado Méndez  
NOMBRE Y FIRMA  
**VOCAL**

# Agradecimientos

A Dios por darme vida, fuerza y esperanza.

A mis padres Guillermina Razo Mosqueda y José Cruz Filoteo Moreno por su amor y enorme fortaleza. Nunca terminaré de agradecer todo lo que han hecho por mí. A mis hermanos Agustín y Fernando. A mis cuñadas Elizabeth y Sandra Marcela. A mi sobrina María Fernanda y Valeria Cecilia. A mi familia, a tíos, primos, sobrinos y abuela por compartir conmigo este momento y por que son importantes en mi vida.

A todos mis amigos, gracias por su amistad y buenos deseos.

A los directores de tesis, Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala y Dr. Juan Carlos Hernández García, gracias por compartir sus conocimientos, su enorme paciencia y buenos consejos.

Gracias a todas las personas que me ayudaron en la colaboración y paciencia para poder llegar a finalizar este proyecto.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por la beca otorgada mediante el apoyo No. **518100**, al proyecto de ciencia básica No. **166361**, al proyecto No. **257691** y al proyecto de Cátedras No. **3155**.



A la **División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca** de la **Universidad de Guanajuato**, que puso a mi disposición todos los recursos y medios necesarios para desarrollar este trabajo de tesis.



# Resumen

En este trabajo se muestra el desarrollo de dos esquemas láser de fibra óptica: láser de anillo y láser de figura ocho que operan en el régimen continuo y pulsado. Las configuraciones propuestas utilizan una fibra óptica de doble revestimiento dopada con Er/Yb como medio de ganancia. El láser de anillo opera por la técnica de auto-Q switch y tienen una duración de pulso de  $47.1 \mu\text{s}$ , una potencia de salida de 10 W y una eficiencia de 63 %. El láser de figura ocho opera mediante la técnica de amarre de modos pasivo y muestra la generación de un tipo especial de pulsos, denominados pulsos de ruido, los cuales tienen una duración de 10 ns, una energía de más de 300 nJ y un pico de coherencia de 1 ps. Además, en estos esquemas se observa la evolución de armónicos en la cavidad de alto orden y la generación de supercontinuo directamente a la salida del láser. Estos nuevos tipos de láseres cuenta con una excelente estabilidad para que sean capaces de emplearse para aplicaciones similares a las de los láseres convencionales.

# Contenido

Agradecimientos . . . . .	I
Resumen . . . . .	III
Lista de Figuras . . . . .	VI
Lista de Tablas . . . . .	VIII
1. Introducción . . . . .	1
1.1. Antecedentes del trabajo . . . . .	1
1.1.1. Láseres de fibra óptica en régimen continuo . . . . .	2
1.1.2. Láseres de fibra óptica en el régimen pulsado . . . . .	2
1.2. Objetivo . . . . .	5
1.2.1. Objetivos específicos . . . . .	5
1.3. Justificación . . . . .	5
1.3.1. Ventajas de los láseres de fibra óptica . . . . .	6
1.4. Descripción de la tesis . . . . .	7
2. Marco teórico . . . . .	8
2.1. Láser . . . . .	8
2.2. Tipos de láseres de fibra óptica . . . . .	12
2.2.1. Láser de fibra en configuración lineal . . . . .	13
2.2.2. Láser de fibra en configuración de anillo . . . . .	13
2.2.3. Láser de fibra de figura ocho . . . . .	14
2.3. Modo de propagación . . . . .	15
2.4. Interferencia óptica . . . . .	17
2.5. Interferómetro de Sagnac de fibra óptica en régimen lineal (Espejo de lazo óptico) . . . . .	19
2.6. Interferómetro de Sagnac de fibra óptica en régimen no lineal (Espejo de lazo óptico no lineal) . . . . .	22
2.6.1. Efecto Kerr en el NOLM . . . . .	26
2.6.2. Análisis del NOLM asimétrico en polarización . . . . .	29
2.6.3. Funcionamiento del NOLM para una entrada de luz polarizada linealmente . . . . .	29

---

2.6.4.	Funcionamiento del NOLM para una entrada de luz polarizada circularmente . . . . .	32
2.7.	Técnicas para el desarrollo de los láseres pulsados en fibra óptica . . .	35
2.7.1.	Amarre de modos . . . . .	37
3.	Diseño de esquemas de láseres de fibra . . . . .	39
3.1.	Fuente de bombeo . . . . .	39
3.2.	Características de los elementos ópticos utilizados . . . . .	41
3.2.1.	Combinador de fibra óptica . . . . .	41
3.2.2.	Acoplador de fibra óptica . . . . .	42
3.2.3.	Aislador de fibra óptica . . . . .	43
3.2.4.	Controlador de polarización . . . . .	43
3.2.5.	Fibra óptica monomodo . . . . .	45
3.2.6.	Fibra óptica de doble revestimiento . . . . .	46
4.	Resultados experimentales del láser en configuración de anillo . . . . .	50
4.1.	Desarrollo experimental . . . . .	50
4.2.	Resultados obtenidos y discusión . . . . .	52
5.	Resultados experimentales del F8L . . . . .	57
5.1.	Desarrollo experimental . . . . .	57
5.2.	Resultados obtenidos y discusión . . . . .	58
6.	Conclusiones . . . . .	67
6.1.	Conclusiones . . . . .	67
6.2.	Trabajo a futuro . . . . .	68
6.2.1.	Industriales . . . . .	69
6.2.2.	Médicas . . . . .	70
6.2.3.	Sistemas de comunicaciones . . . . .	71
	Artículos publicados . . . . .	72
	Referencias . . . . .	74

# Lista de Figuras

2.1.	Esquema del proceso de emisión estimulada. . . . .	9
2.2.	Representación de dos cavidades resonantes utilizadas en los láseres de fibra óptica. . . . .	10
2.3.	Representación de la cavidad Fabry-Perot utilizando rejillas de Bragg. . . . .	11
2.4.	Esquema de un láser de fibra en configuración lineal. . . . .	13
2.5.	Esquema de un láser de fibra en configuración de anillo. . . . .	14
2.6.	Esquema de un láser de fibra de figura ocho. . . . .	14
2.7.	Funcionamiento de un SA. . . . .	15
2.8.	Interferómetro de Sagnac (Espejo de lazo óptico). . . . .	19
2.9.	Reflectancia y transmitancia del interferómetro de Sagnac con fibra óptica en régimen lineal. . . . .	22
2.10.	Comparación de la transmisión del NOLM para distintos valores del factor de acoplamiento. . . . .	23
2.11.	Gráfica de la evolución de la potencia crítica en función del factor de acoplamiento del NOLM. . . . .	25
2.12.	Gráfica del rango dinámico en función del factor de acoplamiento del NOLM. . . . .	26
2.13.	Esquema del Interferómetro de Sagnac de fibra óptica utilizado para el estudio de los efectos de polarización. . . . .	29
2.14.	Transmisión del NOLM para distintos valores del ángulo de entrada ( $\psi$ ) para una polarización lineal. . . . .	32
2.15.	Transmisión del NOLM para distintos valores del ángulo de entrada ( $\psi$ ) para una polarización circular. . . . .	34
2.16.	Fenómeno de Inestabilidad modulacional (MI) presente en una fibra óptica bombeada en el régimen de nanosegundos [36]. . . . .	36
2.17.	Láser de amarre de modos activo con un modulador de amplitud. . . . .	37
2.18.	Láser de amarre de modos pasivo. . . . .	38
3.1.	Fuente del diodo de bombeo de la marca Focuslight <sup>®</sup> , modelo FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5 [40]. . . . .	40
3.2.	Espectro del diodo láser modelo FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5. . . . .	40

3.3.	Curva característica del diodo láser modelo FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5. . . . .	41
3.4.	Combinador de fibra óptica modelo MMC0211C4057 de la marca ITF Technologies <sup>®</sup> [41]. . . . .	42
3.5.	Acoplador de fibra óptica 2x2 de la marca Thorlabs <sup>®</sup> [42]. . . . .	43
3.6.	Aislador de fibra óptica de la marca AdValue Photonics <sup>®</sup> [43]. . . . .	43
3.7.	PC modelo FPC560 de la marca Thorlabs <sup>®</sup> [44]. . . . .	44
3.8.	Numero de vueltas para una placa de $\frac{\lambda}{2}$ y $\frac{\lambda}{4}$ usando una $\lambda=1550$ nm. . . . .	45
3.9.	Estructura geométrica de la fibra óptica SMF-28 [45]. . . . .	46
3.10.	Longitudes de onda de emisión de algunos elementos dopados en la fibra óptica [46]. . . . .	47
3.11.	Funcionamiento de una DCF [46]. . . . .	48
3.12.	Estructura geométrica de algunas DCF [46]. . . . .	48
3.13.	Perfil de la EYCDF obtenida mediante un microscopio electrónico. . . . .	49
4.1.	Arreglo experimental del láser de fibra en configuración de anillo. . . . .	51
4.2.	Espectro de emisión en el régimen continuo observado en el láser de fibra en configuración de anillo. . . . .	52
4.3.	Tren de pulsos generado con un bombeo de 1.06 W. . . . .	53
4.4.	Generación de armónicos de alto orden. . . . .	54
4.5.	Evolución del espectro óptico al aumentar la potencia de bombeo. . . . .	55
5.1.	Arreglo experimental del láser de fibra en configuración de F8L. . . . .	58
5.2.	Tren de pulsos generado con una corriente de bombeo de 7.17 W. . . . .	59
5.3.	Generación de armónicos de alto orden. . . . .	60
5.4.	Tren de pulsos estables para diferentes niveles de bombeo. . . . .	61
5.5.	Espectro SC observado en la salida del F8L. . . . .	62
5.6.	Estabilidad del espectro SC observado en la salida del F8L. . . . .	63
5.7.	Espectro en el régimen continuo observado en la salida del F8L. . . . .	63
5.8.	Diagrama de un autocorrelador utilizando un cristal de SHG. . . . .	64
5.9.	Autocorrelación de los pulsos del F8L. . . . .	65
6.1.	Clasificación de las aplicaciones utilizadas en la industria [54]. . . . .	69
6.2.	Instrumentos médicos utilizados con un láser de fibra óptica. a) Marcapasos. b) Estent. c) Endoscopio. d) Trazo de vidrio. e) Marcado de un estent [54, 55]. . . . .	70
6.3.	Diseño de un estent [54, 56]. . . . .	71

# Lista de Tablas

2.1.	Tipos de láseres con sus componentes básicos [22]. . . . .	12
2.2.	Tabla descriptiva de las matrices de Jones de los elementos del esquema NOLM de la figura 2.13 con una entrada polarizada linealmente [25].	30
2.3.	Tabla descriptiva de las matrices de Jones de los elementos del esquema NOLM de la figura 2.13 con una entrada polarizada circularmente [25].	33
3.1.	Especificaciones de la fibra óptica SMF-28 [45]. . . . .	46
3.2.	Especificaciones de la fibra óptica MM-EYDF-12/130-HE [47]. . . . .	49

# Capítulo 1

## Introducción

En esta sección se hace mención de los antecedentes sobre el avance que han tenido los láseres de fibra en el régimen continuo y pulsado. Se presentan, además las principales ventajas de los láseres de fibra comparados con los láseres de bulto o de estado sólido. Finalmente, se menciona el objetivo y la justificación del desarrollo de este trabajo de tesis.

### 1.1. Antecedentes del trabajo

Los avances en el diseño de láseres de fibra óptica han presentado puntos importantes para su investigación y su desarrollo, basados en las mejoras existentes sobre nuevas fuentes de bombeo y nuevos tipos de amplificadores de fibra óptica por ejemplo, amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA, *Erbium Doped Fibre Amplifier*), que utiliza elementos de la familia de las tierras raras ( $Nd^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$ ,  $Er^{3+}$  y  $Yb^{3+}$ ) o combinaciones entre ellas. Con esto se ha mejorado la potencia de salida de los láseres de fibra en los últimos 25 años. Con este avance se ha reportado en el año 2010, un láser con pulsos ultracortos de 640 fs y una potencia promedio de 830 W [1]. En el año 2013, se reportó un láser continuo con una potencia promedio de 20 kW que tuvo la desventaja de no presentar una buena estabilidad [1]. Existen diversas configura-

ciones empleadas en el desarrollo de láseres de fibra óptica, tales como los esquemas denominados láser de figura ocho (F8L, *Figure-eight fiber laser*) [20], láseres de anillo [3], y las configuraciones lineales [4]. De acuerdo a la variedad de esquemas para los láseres de fibra óptica, estos pueden clasificarse en modos de operación. Algunas de estos son: modo pulsado, modo continuo y sintonizable.

### 1.1.1. Láseres de fibra óptica en régimen continuo

Los avances de los láseres de fibra óptica en el régimen continuo se han debido a la mejora de las fuentes de bombeo. Esto a partir del mejoramiento de los diodos láser, permitiendo tener grandes arreglos de diodos. Xiao [5], presenta un láser de fibra que utiliza como medio de ganancia una fibra de doble revestimiento dopada con  $Yb^{3+}$ . Además, obtuvo una potencia de salida de 1 kW y una eficiencia de 71 % a una longitud de onda de 1080 nm. Actualmente se ha utilizado un nuevo dispositivo óptico para la amplificación en láseres de fibra óptica, llamado amplificador de potencia de oscilador maestro (MOPA, *Master Oscillator Power-Amplifier*). Wang [6], desarrolló un láser continuo utilizando un medio de ganancia con una fibra dopada con  $Yb^{3+}$  (YDF, *ytterbium-doped fiber*) y un MOPA. En este trabajo se obtuvo una potencia de salida 2,04 kW a 1080 nm con una eficiencia óptica de 78,5 %. La utilización de estos MOPA ha mejorado la eficiencia en los láseres de régimen continuo.

### 1.1.2. Láseres de fibra óptica en el régimen pulsado

Los láseres pulsados generan pulsos ultra-cortos y de alta energía, esto debido al método utilizado, llamado amarre de modos. Las técnicas de amarre de modos existentes se dividen en dos categorías, amarre de modos activo y pasivo. A continuación se presentan algunos de los trabajos utilizando la técnica de amarre de modos. Li [7], presenta un láser de anillo de longitud de onda sintonizable mediante ama-

rre de modos. El esquema propuesto utiliza un solo polarizador de fibra actuando simultáneamente como un polarizador y un filtro sintonizable en la cavidad, estando además compuesto solamente de fibra óptica sin el uso de elementos de distinta naturaleza.

Siguiendo con las configuraciones en anillo, Chong [8], presenta pulsos con duración de 170 fs y una energía de pulso mayor a 3 nJ, en el régimen de la dispersión normal, utilizando la técnica de amarre de modos pasivos. El láser utiliza una fuente de bombea a 980 nm y como medio de ganancia una fibra dopada con iterbio (YDF, *ytterbium-doped fiber*) con secciones de fibra monomodo estándar (SMF, *single-mode optical fiber*). Dvoretzkiy [9], presenta una configuración en anillo que utiliza una YDF con una fibra de silicato de germanio altamente no lineal dentro de la cavidad resonante. El cual genero pulsos con una duración de 84 fs con una frecuencia de repetición de 12 MHz y una longitud de onda centrada en 1560 nm, con una potencia promedio de 30 mW, lo que corresponde a una potencia pico máxima de 29.7 kW con un pulso de energía de 2.5 nJ.

Chestnut [10], reporta pulsos obtenidos basados en la técnica de amarre de modos pasivo, reportando longitudes de onda de operación de 1570 nm, 1330 nm y 1410 nm con duración de pulsos ultra-cortos de 440 fs, 500 fs y 860 fs respectivamente. Estos pulsos se propagan por la fibra óptica y se van transformando en solitones. Los solitones son pulsos de muy corta duración (alrededor de 5 ps) que pueden viajar por la fibra óptica sin deformarse. El esparcimiento Raman es utilizado como mecanismo de ganancia para la construcción de un láser de fibra, la salida del láser se inyecta a una configuración de F8L por medio de un acoplador y la señal circula a través de 2.1 km de fibra óptica de dispersión desplazada (DSF, *Dispersión shifted fiber*) con dispersión cero en 1537 nm, tomando lugar la ganancia Raman. Liu [11], presenta un láser en anillo que entrega pulsos en ns y ps. La duración del pulso es debido a la rotación de la

polarización. Utilizando una fibra altamente no lineal (HNLF, *highly nonlinear fiber*) y placas controladoras de polarización (PCs, *Polarization controllers*). Los valores de potencia media obtenidas son de 53 a 304 mW con duración del pulso de 500 ns a 180 ps, con una tasa de repetición de 275 kHz. La energía del pulso es de 1.1  $\mu$ J a 193 nJ.

A continuación se mencionan algunos trabajos de láseres pulsados de alta potencia utilizando como medio de ganancia una fibra de doble revestimiento dopada con Er/Yb (EYDCF, *Er/Yb codoped double clad fiber*). Gonzalez-Garcia [4], presenta un láser en configuración lineal y un modulador acusto-óptico, utilizando la técnica de amarre de modos activo. El cual logró alcanzar 4 W de potencia promedio. Con duración de pulsos de 34 a 80 ns y una eficiencia óptica del 50 %. Salhi [12], obtuvo una potencia promedio de 8 W, utilizando un arreglo experimental de un láser en régimen continuo y pulsado. Este tipo de láseres de alta potencia pueden ser aplicados en áreas como medicina, procesamiento de materiales (corte y grabado), entre otras.

Un punto importante en los láseres pulsados, es que estos han sido capaces de generar una gran variedad de pulsos ópticos [3,13–16]. Ha surgido un gran interés sobre la generación de un tipo especial de pulsos, denominados pulsos de ruido . Los pulsos de ruido es una nueva clasificación en la salida producida por láseres de fibra óptica, estos tienen la particularidad de ser una amplia y compacta acumulación de miles de pulsos ultra-cortos (en el orden de los ps o sub-ps) dentro de un mismo pulso. Poseen amplitudes y duraciones aleatorias, observándose comúnmente en láseres de fibra de una larga longitud en cualquier régimen de dispersión. Las características únicas que presentan los pulsos de ruido generados por láseres de fibra óptica, permiten contar con un panorama interesante debido a sus potenciales aplicaciones [17–19]. La diversidad de pulsos ópticos producidos por los esquemas experimentales basados en fibra óptica representa el punto de partida para la búsqueda de una implementación

de tecnología, la cual podrá aplicarse desde el sensado, generación de supercontinuo, metrología, aplicaciones industriales, hasta las comunicaciones.

## 1.2. **Objetivo**

Desarrollar dos esquemas láser compuestos completamente de fibra óptica que operen en el régimen continuo y pulsado. Teniendo como finalidad desarrollar un dispositivo que permita el estudio aplicado a la ciencia básica y en las transmisiones ópticas, procesamiento de materiales y caracterización de señales ópticas.

### 1.2.1. **Objetivos específicos**

- Estudiar, proponer y desarrollar de forma experimental un esquema láser compuesto completamente de fibra óptica que opere en el régimen continuo y pulsado.
- Caracterización del láser desarrollado.
- Listado de posibles aplicaciones basadas en los resultados obtenidos.

## 1.3. **Justificación**

Al no existir actualmente en la División de Ingenierías CIS láseres de pulsos ultracortos, ni trabajos relacionados al desarrollo y estudio de láseres pulsados de fibra óptica, se pretende que este estudio vaya dirigido a contar con un esquema funcional pulsado que permita ser utilizado en diversas áreas de estudio. Los láseres de fibra óptica son considerados como fuentes novedosas de bajo costo, de gran eficiencia, y a diferencia de los láseres de estado sólido estas requieren de un mantenimiento casi nulo. La combinación entre diodos láser y fibras ópticas ha dado paso a la construcción de dispositivos ultra rápidos necesarios en el área de las telecomunicaciones, dentro de

los que se pueden destacar los amplificadores, reconstructores de señal, etc. Se puede construir en un solo encapsulado completamente de fibra, con la luz confinada dentro del núcleo de la guía de onda, lo provee de inmunidad con respecto a los cambios de temperatura u otras variaciones ambientales. Por lo que este tipo de configuraciones láser han tomado área de aplicación en campos como la industria, medicina, milicia, etc.

### 1.3.1. Ventajas de los láseres de fibra óptica

A continuación se muestran las principales ventajas de los láseres de fibra óptica con respecto a los láseres de bulto.

- Luz acoplada en la fibra, permite un enfoque más fácil y mejor calidad del haz.
- Alta potencia de salida.
- Altamente estable, debido a que no requiere sistema de enfriamiento.
- Tamaño compacto.
- Bajo costo.
- Altas potencias pico (en el orden de kW, MW o GW) solo para láseres pulsados.

Los láseres de fibra no necesitan de la alineación de sus piezas o dispositivos que lo componen y tampoco necesita de limpieza o cualquier otro tipo de intervención de personal especializado para la puesta en operación en eventos futuros. En este proyecto se propone el estudio y desarrollo de un esquema láser de fibra óptica capaz de trabajar en el régimen continuo y pulsado, buscando obtener aplicaciones científicas y tecnológicas (comunicaciones ópticas, sensores, medicina, metrología, procesamiento de materiales, grabado y corte).

## 1.4. Descripción de la tesis

En el capítulo 2, se expone a detalle el principio de operación de un láser de bulto, así como sus principales componentes. Se explica el funcionamiento y las técnicas de operación de láseres de fibra óptica, mostrando los diferentes tipos de esquemas existentes. Finalmente, se describen los principios de operación de un láser de fibra en el régimen pulsado, los cuales representan una novedad en las posibles aplicaciones tecnológicas actuales (biología, procesamiento de materiales, comunicaciones, etc).

En el capítulo 3, se muestra algunas características principales de los elementos ópticos utilizados en los arreglos experimentales. A su vez, también se presenta la caracterización del diodo de bombeo y de la fibra óptica de doble revestimiento dopada con Er/Yb.

En el capítulo 4, se presenta una descripción del desarrollo experimental para la construcción del láser pulsado de fibra en configuración de anillo. Finalmente, se muestran los resultados experimentales del láser en los dos modos de operación: continuo y pulsado.

En el capítulo 5, se muestra la descripción de otra configuración de láser de fibra óptica por medio del esquema de F8L. Este arreglo utiliza la técnica de amarre de modos pasivos por medio del NOLM como absorbedor saturable para obtener un láser pulsado. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en la salida del láser en el régimen pulsado y continuo.

En el capítulo 6, se expone las conclusiones y trabajos futuros de los láseres de fibra óptica.

## Capítulo 2

# Marco teórico

En este capítulo se expone a detalle el principio de operación de un láser de bulto, así como sus principales componentes. Se explica el funcionamiento y las técnicas de operación de láseres de fibra óptica, mostrando los diferentes tipos de esquemas existentes. Finalmente, se describen los principios de operación de un láser de fibra en el régimen pulsado, los cuales representan una novedad en las posibles aplicaciones tecnológicas actuales (biología, procesamiento de materiales, comunicaciones, etc).

### 2.1. Láser

El láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) se puede definir como un dispositivo que utiliza la emisión estimulada de radiación en un medio, llamado medio activo, para generar un haz de luz caracterizado principalmente por su coherencia espacial y temporal. La coherencia temporal se refiere a la invariabilidad de la longitud de onda, la frecuencia y velocidad de fase del haz que se propaga y esta propiedad se llama cuasi-monocromaticidad. Mientras que la coherencia espacial es la capacidad que presentan las ondas emitidas por el láser de conservar la diferencia de fase constante entre dos puntos separados espacialmente y está relacionado con la direccionalidad y la igualdad de fase de los frentes de onda.

El principio de funcionamiento por emisión estimulada surgió por las investigaciones realizadas en el campo de la física cuántica en 1916, por Albert Einstein [21, 22]. Estos procesos son:

- **Absorción:** Consiste en la interacción entre un fotón y un átomo que inicialmente se encuentra en su estado base. El resultado de esta interacción es que el átomo absorbe al fotón y usa su energía para pasar a su estado excitado [22].
- **Emisión espontánea:** En este proceso el electrón ya se encuentra en el nivel excitado, en el cual permanece un tiempo breve ( $10^{-8}$  s), y después pasa a su estado base emitiendo en el proceso un fotón con una energía equivalente a la diferencia de energía entre los de estados. El fotón se emite en una dirección aleatoria [22].
- **Emisión estimulada:** Consiste en la interacción entre el fotón y un electrón que inicialmente se encuentra en su estado excitado. Como resultado de esta interacción el electrón pasa a su estado base, emitiendo en el proceso un fotón que tiene las mismas características las cuales son: dirección y fase del fotón inicial [22].

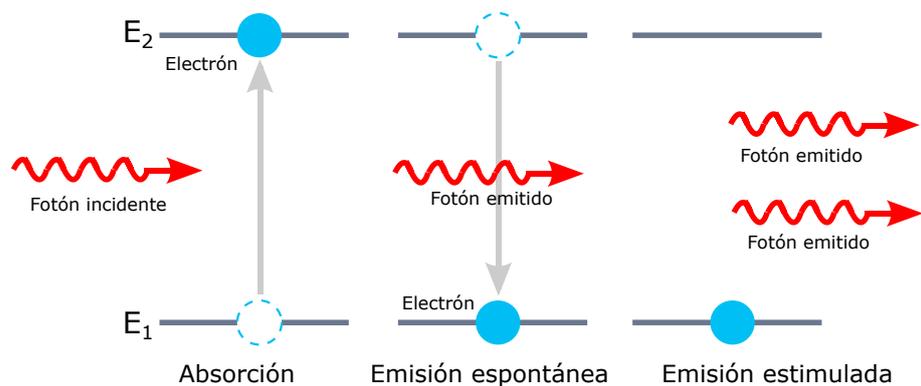


Figura 2.1: Esquema del proceso de emisión estimulada.

De estos procesos mostrados en la figura 2.1 se deduce que para generar luz láser, se requiere de un fuente de bombeo, un medio activo y una cavidad resonante, que está formada por dos espejos (espejo 100 % reflejante y 99 % reflejante) dentro se encuentra el medio activo, como se observa en la figura 2.2. El funcionamiento consiste en que los átomos del medio activo aumenten a un estado de energía superior mediante la aplicación de un bombeo, del cual descienden liberando fotones que rebotan en la cavidad resonante. Con esto se consigue que la emisión estimulada se amplifique y genere un haz láser en el eje óptico de la cavidad resonante.

Una dificultad para el desarrollo de los láseres es la formación de la cavidad óptica. El cual consiste en la configuración de un interferómetro de Fabry-Perot en él se colocan dos espejos frente a frente y separados por una distancia  $L$ . A pesar de su simplicidad, esta configuración no se puede usar en cavidades tan grandes debido a su dificultad en la alineación para que el haz de luz quede confinado entre los espejos. Este problema se puede resolver en utilizar cavidades pequeñas por ejemplo, microcavidades o cavidades de fibra óptica. La figura 2.2 muestra dos cavidades resonantes usadas para los láseres de fibra óptica y son: a) la cavidad Fabry-Perot y b) la cavidad de anillo. Una ventaja de la cavidad de anillo es que no requiere espejos.

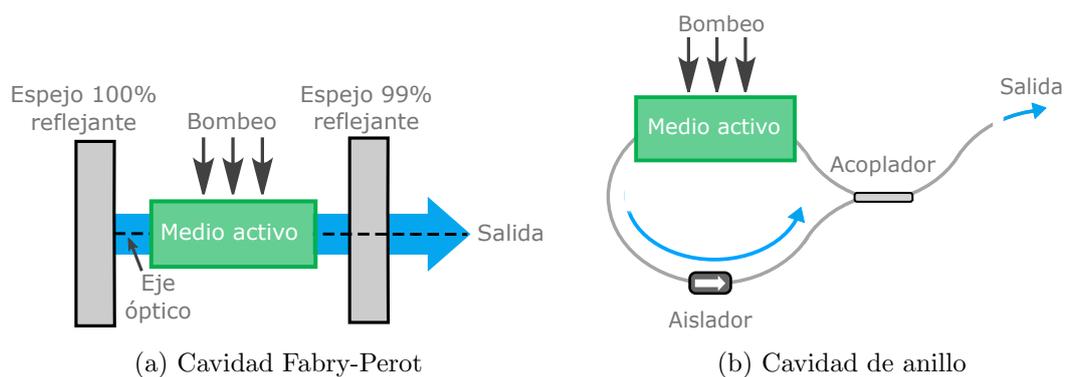


Figura 2.2: Representación de dos cavidades resonantes utilizadas en los láseres de fibra óptica.

Otra alternativa de la cavidad Fabry-Perot es la utilización de elementos completamente de fibra óptica como las rejillas de Bragg, las cuales sustituyen a los espejos. Estas rejillas son seleccionadas para reflejar la luz láser y transmitir el bombeo, como se observa en la figura 2.3. Una ventaja de las rejillas de Bragg en la cavidad son las bajas pérdidas por acoplamiento que incrementa la estabilidad mecánica y térmica de la cavidad resonante, obteniendo una mayor estabilidad en la potencia de salida.

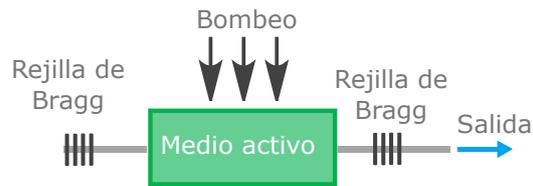


Figura 2.3: Representación de la cavidad Fabry-Perot utilizando rejillas de Bragg.

La clasificación de los láseres se basa en ciertas características fundamentales como son:

- El medio activo que se utiliza.
- La longitud de onda que produce.
- El modo de operación.
- La potencia.

En la tabla 2.1, se muestran los componentes básicos de los láseres más comunes.

Tabla 2.1: Tipos de láseres con sus componentes básicos [22].

Tipo de láser	Fuente de bombeo	Medio activo	Cavidad resonante	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Potencia
Láser de estado solido	Lámpara de Hg ó Xe	Cristal de iones (Ruby ó $\text{Nd}^{3+}$ )	Espejos esféricos	0.65-2.5	0.1 a 10 W
Láser de gas	Fuente de AC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gas atómico</li> <li>• Gas molecular</li> <li>• Gas ionizado</li> </ul>	Espejos esféricos	0.65-5 0.23-10 0.23-0.63	Hasta 0.1 W 1 a 100 kW 20 W a ~kW
Láser semiconductor	Fuente de DC	Unión de semiconductores	Terminales semiconductoras	0.39-1	~W
Láser de fibra óptica	Láser semiconductor	Fibra óptica dopada con elementos de las tierras raras	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Configuración lineal (Fabry-Perot)</li> <li>• Configuración de anillo</li> <li>• Configuración F8L</li> </ul>	0.9-1.5	>kW

Para comprobar la coherencia de la luz que se genera en un láser se puede implementar un interferómetro de Michelson para medir su coherencia temporal. Mediante la medida de la máxima diferencia de camino recorrido entre los dos haces al mostrar el patrón de interferencia. Al visualizar el patrón de interferencia se puede tener la condición de cuasi-monocromaticidad de los haces ópticos, la igualación de frecuencia y la coherencia para que los haces interfieran.

## 2.2. Tipos de láseres de fibra óptica

Los láseres de fibra óptica han sido extensamente estudiados los últimos años, debido a sus diversas aplicaciones como son: en los sistemas de comunicaciones (amplificadores, reconstructores de señales, ruteadores), aplicaciones industriales (procesamiento de materiales), metrología (peine de frecuencias ópticas) y sensores. Las configuraciones usadas para estas aplicaciones se clasifican en: láseres de fibra en configuración lineal, de anillo y de figura ocho (*F8L*).

### 2.2.1. Láser de fibra en configuración lineal

El arreglo de configuración lineal está compuesto de un acoplador de fibra y de un absorbedor saturable (AS, *saturable absorber* ó SBR, *Saturable Bragg Reflector*), los cuales sirven como espejos dentro de la cavidad láser. El SBR también es conocido como semiconductor de espejo absorbente saturable (SESAM o SAM, *Semiconductor Saturable Absorber Mirror*). Este reflector de Bragg, contiene una capa de GaAs como absorbedor saturable y una estructura periódica de AlAs y AlGaAs [20]. Estos dispositivos se utilizan para la generación de pulsos ultracortos por la técnica de amarre de modos pasivos. En la figura 2.4, se muestra el esquema de un láser de fibra en configuración lineal.

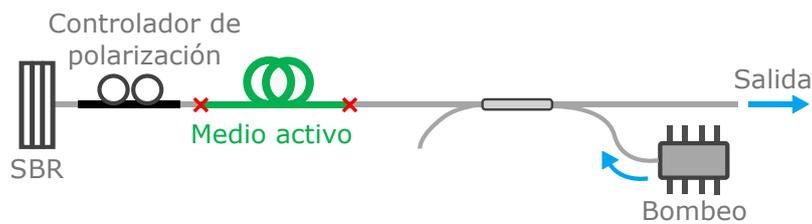


Figura 2.4: Esquema de un láser de fibra en configuración lineal.

### 2.2.2. Láser de fibra en configuración de anillo

El esquema del láser de fibra en configuración de anillo se muestra en la figura 2.5, la cavidad que usa es totalmente de fibra óptica. El diseño más simple cuenta con un acoplador de fibra óptica, al cual se conectan dos puertos en forma de anillo, que contiene el amplificador de fibra óptica. Este amplificador, compensa las pérdidas inevitables que ocurren en la cavidad. Un controlador de polarización que sirve para ajustar manualmente la polarización. Posteriormente, se encuentra un aislador óptico que es colocado habitualmente en este arreglo láser y que opera unidireccionalmente e impide que se desarrollen reflexiones en sentido contrario al sentido de operación del láser [25].

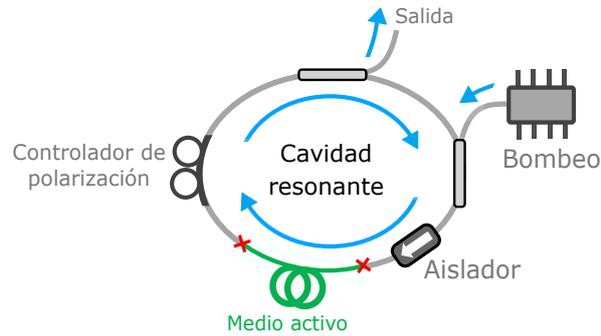
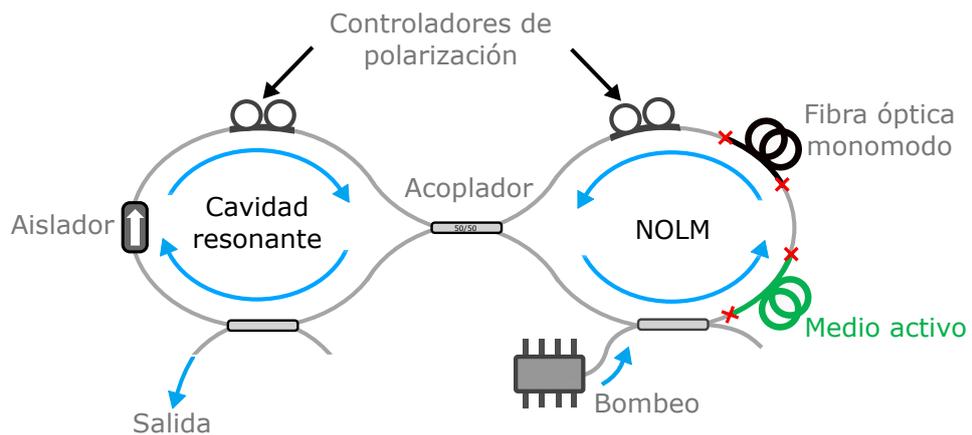


Figura 2.5: Esquema de un láser de fibra en configuración de anillo.

### 2.2.3. Láser de fibra de figura ocho

EL láser de fibra de figura ocho está compuesto principalmente de un láser de fibra en anillo en el que se inserta un interferómetro de Sagnac no lineal o Espejo de lazo óptico no lineal (NOLM, *Nonlinear Optical Loop Mirror*). Al observar la unión del láser de anillo y cualquiera de estos dos elementos (NOLM) se puede apreciar su característica en forma de un ocho acostado, como se muestra en la figura 2.6.

Figura 2.6: Esquema de un láser de fibra de figura ocho.



En esta configuración de F8L, el NOLM funciona como un absorbente saturable (SA, *Saturable Absorber*). Su funcionamiento consiste en que las altas intensidades son transmitidas y amplificadas, mientras que bajas intensidades son reflejadas y

rechazadas por el aislador óptico que compone el láser de anillo. El AS presenta una respuesta a una señal óptica de entrada que es dependiente de su intensidad, es decir, que después de que el pulso pasa por este elemento no lineal es más estrecho que el pulso de entrada, lo que permite la operación del láser pulsado en regímenes que alcanzan pulsos de duración ultra-corta (sub-ps). En la figura 2.7, se muestra el funcionamiento del SA con relación al incremento de la intensidad [25].

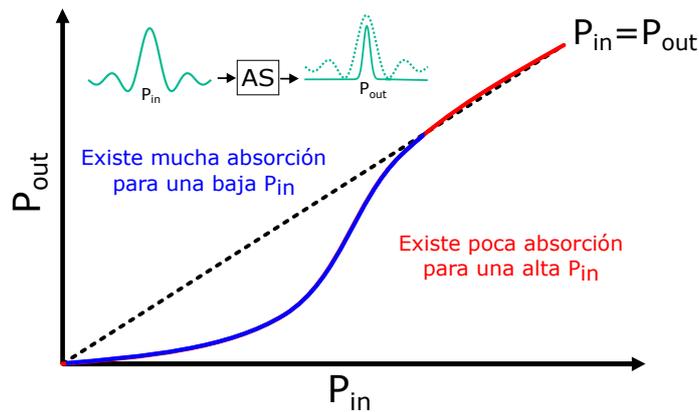


Figura 2.7: Funcionamiento de un SA.

### 2.3. Modo de propagación

Un modo es un camino donde se propaga una onda electromagnética en una guía de onda. La propagación de una onda en una fibra óptica es solucionada por la ecuación de onda para las condiciones de frontera de la guía de onda. Al resolver esta ecuación se obtienen los modos de propagación y de radiación que definen el comportamiento de las ondas electromagnéticas en la fibra óptica.

Las ecuaciones de Maxwell proporcionan la base de la ecuación de onda para las fibras ópticas. Debido a la geometría de la fibra óptica (hilo cilíndrico), el análisis de la ecuación de onda se expresa en coordenadas cilíndricas  $(\phi, r, z)$ , como se muestra en la ecuación 2.2.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vec{E}_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \vec{E}_z}{\partial \phi^2} + (k^2 n_{1,2}^2 - \beta^2) \vec{E}_z = 0 \quad (2.1)$$

Donde  $k$  es el número de onda y está dado por  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $n_{1,2}$  es el índice de refracción de la fibra óptica ( $n_1$  del núcleo y  $n_2$  del revestimiento) y  $\beta$  es la constante de propagación. Las soluciones de la ecuación 1 resulta los distintos modos que pueden propagar dentro de la fibra, estos se pueden clasificar como monomodo o multimodo. La frecuencia normalizada  $V$  determina si una fibra óptica es monomodo o multimodo y está dada por  $V = \sqrt{u^2 + v^2} = ak\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ , donde  $a$  es el radio del núcleo de la fibra óptica. La condición que debe cumplir es la siguiente:

$$\begin{aligned} V < 2.405 & \quad \text{monomodo} \\ V > 2.405 & \quad \text{multimodo} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Los modos trasversales definen el perfil de radiación que se produce al transportar la onda electromagnética a través de la guía de onda y están clasificados de la siguiente manera:

- **Modo TE** (*Transverse Electric*) la componente del campo eléctrico en la dirección de propagación es nula.
- **Modo TM** (*Transverse Magnetic*) la componente del campo magnético en la dirección de propagación es nula.
- **Modo TEM** (*Transverse ElectroMagnetic*) la componente tanto del campo eléctrico como del magnético en la dirección de propagación es nula.
- **Modo Híbrido** son los que sí tienen componente en la dirección de propagación tanto en el campo eléctrico como en el magnético. propagación es nula.

Los modos de una fibra son usualmente referidos como modos de polarización lineal (LP, Linear polarization), se refiere a una aproximación escalar para el campo,

suponiendo que el campo solo tiene una componente transversal.

Básicamente la manera de definir las propiedades de los modos se basa en representarlos a través de sus siglas junto a dos subíndices; como por ejemplo  $TE_{mn}$ . Como se puede notar  $TE$  denota el tipo de modo transversal mientras que los subíndices  $m$  y  $n$ , son números enteros que indican los órdenes radial y angular del polinomio de Laguerre para cada modo [23].

## 2.4. Interferencia óptica

Un interferómetro es aquel instrumento capaz de producir un patrón de interferencia a partir de una señal luminosa para un uso específico. Esta interferencia óptica está definida como la suma algebraica de dos señales del mismo medio, es decir que provienen de la misma fuente [24]. Matemáticamente esto se puede describir a partir del siguiente proceso:

1. Establecemos las dos señales a superponerse:

$$E_1 = A_1 e^{i(\omega t + \phi_1)} \quad (2.3)$$

$$E_2 = A_2 e^{i(\omega t + \phi_2)} \quad (2.4)$$

donde al provenir de la misma fuente  $\omega$ ,  $t$  son iguales y  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $E_1$  y  $E_2$  pueden ser diferentes.

2. El resultado simplemente será la suma de ambas señales:

$$E_T = E_1 + E_2 \quad (2.5)$$

Sin embargo, la medida observable es la intensidad:

$$\begin{aligned}
 I &= |E_T|^2 \\
 &= E_T \cdot E_T^* \\
 &= (E_1 + E_2) \cdot (E_1^* + E_2^*)
 \end{aligned} \tag{2.6}$$

$$\begin{aligned}
 &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\phi_1 - \phi_2) \\
 I &= I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2}\cos(\Delta\phi)
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

La diferencia en la fase ( $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$ ) es debida a que ambas señales se propagan de manera independiente desde su origen, donde fueron divididas, hasta el punto en que ambas se recombinaron. Existen dos casos de interferencia:

- **Interferencia constructiva:** Suma de señales en fase (cresta + cresta ó valle + valle). Se produce cuando la diferencia de camino óptico es múltiplo par de la longitud de onda, y por tanto a su salida se obtiene el máximo de intensidad.
- **Interferencia destructiva:** Suma de señales en desfase (cresta + valle) resultando en una atenuación en la señal de salida. En otras palabras, la interferencia destructiva se obtiene cuando la diferencia en el camino óptico es múltiplo impar de media longitud de onda.

Para implementar un interferómetro, en general, se utiliza un haz de luz que es dividido para recorrer dos distintas trayectorias y que finalmente convergen para formar un patrón de interferencia. Estos sistemas pueden realizarse generalmente a base de espejos y divisores de haz, o bien a base de fibra óptica. De éste modo, los interferómetros pueden clasificarse en dos grupos principalmente:

- **Interferómetros de división de frente de onda:** El interferómetro de Young, el doble espejo y el prisma doble de Fresnell y el espejo de Lloyd.
- **Interferómetros de división de amplitud:** El Mach-Zehnder, el Machelson, el Fabry-Perot, el Sagnac y el interferómetro de Pohl .

De éstos últimos los más utilizados son el de Michelson, Mach-Zehnder y Sagnac [24].

## 2.5. Interferómetro de Sagnac de fibra óptica en régimen lineal (Espejo de lazo óptico)

El interferómetro de Sagnac de fibra óptica es un dispositivo óptico que funciona en base a dos haces que recorren el mismo camino óptico pero que se propagan en dirección contraria entre ellos para finalmente volver a unirse y producir una interferencia [25]. El interferómetro de Sagnac de fibra óptica está formado por un acoplador de cuatro puertos y una sección de fibra. Como se muestra en la figura 2.8, dos de los puertos del acoplador (en este caso  $P_3$  y  $P_4$ ) se unen a través del lazo de fibra óptica, de tal forma que si se introduce un haz de luz  $E_{in}$  por el puerto  $P_1$  del acoplador, el haz se dividirá en dos haces que viajan dentro del lazo de fibra en direcciones contrarias, uno se propaga en dirección a las manecillas de reloj (por lo que se le conoce como  $E_{cw}$ ), mientras que el otro haz se propaga en sentido contrario (llamado entonces  $E_{ccw}$ ).

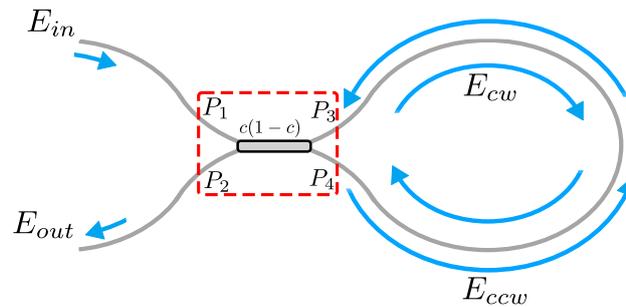


Figura 2.8: Interferómetro de Sagnac (Espejo de lazo óptico).

Los haces  $E_{cw}$  y  $E_{ccw}$  viajan a lo largo del lazo de fibra hasta recombinarse nuevamente en el acoplador y producir un haz de salida denominado  $E_{out}$  y el cual es conocido como señal transmitida. El interferómetro de Sagnac de fibra óptica es capaz

de operar también como un espejo si el camino óptico es idéntico en cada sentido en el lazo (fibra ideal no birrefringente), por lo cual es conocido también como Espejo de lazo Óptico.

Si se incide con un haz de luz por  $P_1$  la suma de las intensidades de salida en  $P_3$  y  $P_4$  será igual a la intensidad de entrada si se desprecian las pérdidas del acoplador, la razón de acoplamiento en potencia ( $C$ ) solamente influye en las amplitudes de los campos y no en su fase. Si la constante de acoplamiento es igual a 0.5, las amplitudes de  $P_3$  y  $P_4$  serán iguales y se tendrá el comportamiento de espejo.

El análisis del interferómetro de Sagnac de fibra óptica a baja potencia (régimen lineal de operación), se basa en el caso ideal de operación (considerando fibra sin birrefringencia), se tiene que los caminos ópticos de ambos haces contra-propagándose son iguales, dando como resultado una reflexión máxima y una transmisión mínima, es decir, el dispositivo tiene el comportamiento semejante a un espejo. El estudio del dispositivo bajo estas condiciones se realiza considerando la configuración del esquema de la figura 2.8 y se considera que las pérdidas son despreciables. Por lo tanto, primeramente se tiene que la transmisión del dispositivo está dada por la ecuación 2.8.

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{|E_{out}|^2}{[E_{in}]^2} \quad (2.8)$$

donde  $P_{out}$  es la potencia de salida del interferómetro de Sagnac de fibra,  $P_{in}$  la potencia de entrada,  $E_{out}$  el campo eléctrico para el haz de salida y  $E_{in}$  el campo eléctrico para el haz de entrada. Además se conoce que el campo en la salida del dispositivo está definido por la ecuación 2.9.

$$E_{out} = E_{cw} + E_{ccw} \quad (2.9)$$

donde  $E_{cw}$  y  $E_{ccw}$  representan los campos de los haces contra-propagándose por el

lazo de fibra óptica, los cuales son descritos a través de las ecuaciones 2.10 y 2.11.

$$E_{cw} = \sqrt{C} E_{in} e^{i(KL + \gamma LC)P_{in}} \quad (2.10)$$

$$E_{ccw} = j\sqrt{(1-C)} E_{in} e^{i(KL + \gamma L(1-C)P_{in})} \quad (2.11)$$

donde  $L$  es la longitud de la fibra,  $\gamma$  es coeficiente que indica que tan grande son los efectos no lineales en el sistema,  $K$  es el número de onda. El factor  $j$  que se aprecia en la ecuación ?? se debe a que los haces  $E_{cw}$  y  $E_{ccw}$  están posicionados con una diferencia de fase de  $90^\circ$  ó entre ellos. El haz  $cw$  no sufre cambio de fase por estos dos pases por el acoplador, mientras que el haz  $ccw$  sufre dos cambios de  $\frac{\pi}{2}$ , o  $\pi$  en total. La expresión resultante está dada por la ecuación 2.12.

$$E_{out} = C E_{in} e^{i(KL + \gamma LC P_{in})} - (1-C) E_{in} e^{i(KL + \gamma L(1-C)P_{in})} \quad (2.12)$$

Analizando la ecuación 2.12 para bajas potencias,  $P_{in} = 0$ , indica que se está tratando del régimen lineal, donde la potencia se supone muy baja comparado con los niveles requeridos para que aparezcan efectos no lineales y se tiene como resultado la ecuación 2.13.

$$E_{out} = (2C - 1) E_{in} e^{i(KL)} \quad (2.13)$$

A partir de la transmisión del interferómetro de Sagnac de fibra óptica para potencias bajas expresada por la Ecuación 3.1 se puede obtener la ecuación en función de  $C$  ( $T(C)$ ). La  $T(C)$  se puede encontrar el porcentaje de transmisión o reflexión del dispositivo bajo las condiciones de trabajo con un acoplador determinado. En la ecuación 2.14 se muestra el porcentaje de transmisión.

$$T(C) = 1 - 4C(1 - C) \quad (2.14)$$

Considerando que la potencia se conserva en ausencia de pérdidas, como  $R + T = 1$  se obtiene que la reflexión en potencia  $R$  para el interferómetro de Sagnac está dada por la ecuación 2.15.

$$R(C) = 4C(1 - C) = 1 - T(C) \quad (2.15)$$

La figura 2.9, presenta el comportamiento de la reflectancia ( $R$ ) y la transmitancia ( $T$ ) a medida que se varía  $C$  sobre un intervalo de 0 a 1. Se observa, que cuando se tiene que  $C = 0.5$  se alcanza la condición de mínima  $T = 0$  y una máxima  $R = 1$ .

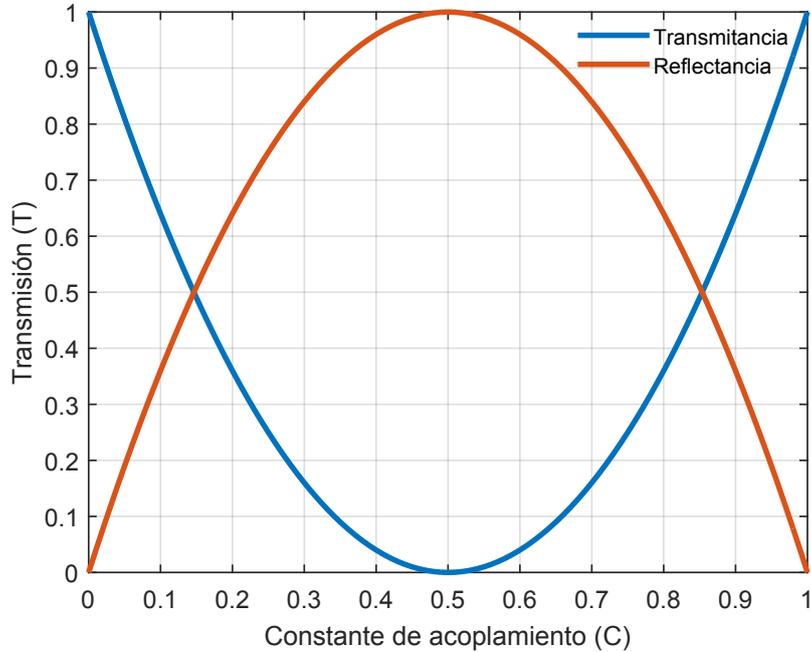


Figura 2.9: Reflectancia y transmitancia del interferómetro de Sagnac con fibra óptica en régimen lineal.

## 2.6. Interferómetro de Sagnac de fibra óptica en régimen no lineal (Espejo de lazo óptico no lineal)

Un caso de análisis interesante ocurre al estudiar el comportamiento del interferómetro de Sagnac de fibra óptica para altas potencias, en este caso el dispositivo estudiado utiliza el efecto Kerr para su funcionamiento recibiendo el nombre de espejo de lazo óptico no lineal (NOLM, *Nonlinear Optical Loop Mirror*). Partiendo de la ecuación 2.12. Se desarrolla para obtener  $P_{out} = |E_{out}|^2 = |E_3 + E_4|^2$ . Con este resultado se puede calcular la transmisión del dispositivo, mostrado en la ecuación

2.16.

$$T = 1 - 2C(1 - C) [1 + \cos(\gamma L(1 - 2C)P_{in})] \quad (2.16)$$

Como se aprecia en la ecuación 2.16 la transmisión del NOLM depende del factor de acoplamiento  $C$ , del coeficiente gamma  $\gamma$ , de la longitud del lazo  $L$  y la potencia de entrada  $P_{in}$ . Para ejemplificar el comportamiento del dispositivo bajo determinadas condiciones de funcionamiento se muestra la figura 2.10. Esta figura fue obtenida simulando la transmisión del NOLM, utilizando los siguientes valores como parámetros del funcionamiento: un coeficiente no lineal de  $\gamma = 1W^{-1}km^{-1}$  (valor típico para una fibra estándar (SMF-28)) y una longitud determinada del NOLM de  $L = 1km$ .

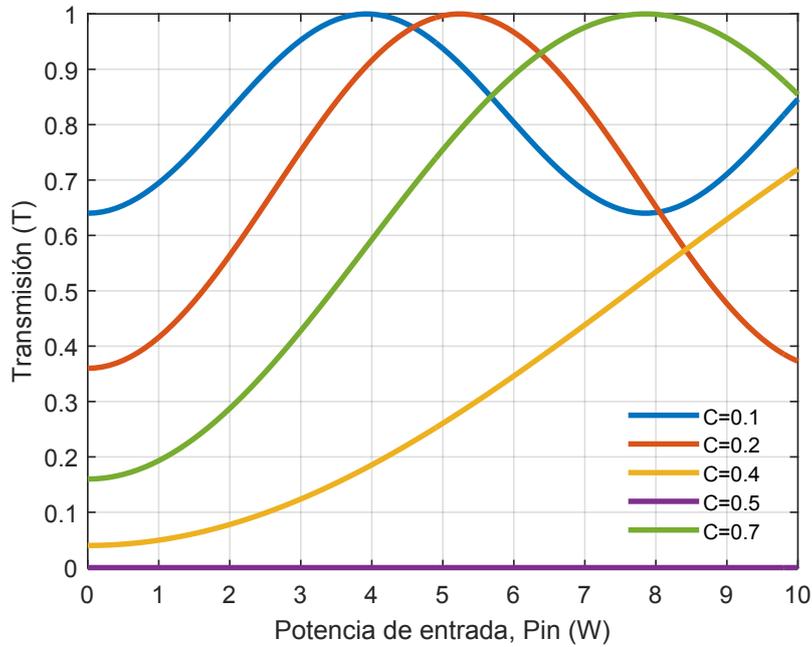


Figura 2.10: Comparación de la transmisión del NOLM para distintos valores del factor de acoplamiento.

Un parámetro importante para este caso de estudio es la potencia de *switch*, llamada también potencia crítica o de conmutación, la cual es expresada mediante la simbología  $P_{\pi}$ . La variable  $P_{\pi}$  está definida entonces como el valor de la potencia del NOLM que hace que el cambio de fase no lineal alcance un valor de  $\pi$ , para este caso

de estudio la expresión de la potencia crítica se obtiene a partir del argumento del coseno en la ecuación 2.16, de tal forma que por definición es la potencia en la que la diferencia de fase no lineal alcanza un valor de  $\pi$ , es decir la ecuación 2.17.

$$\gamma L (1 - 2C) P_{\pi} = \pi \quad (2.17)$$

Por lo tanto, a partir de la ecuación 2.17 se obtendría una transmisión máxima (debido a que  $\cos(\pi) = -1$ , lo que daría como resultado  $T = 1$  para la ecuación 2.16), de esta forma la potencia de switcheo sería igual a la ecuación 2.18.

$$P_{\pi} = \frac{\pi}{\gamma L |1 - 2C|} \quad (2.18)$$

La figura 2.11, muestra una representación gráfica para el estudio de  $P_{\pi}$ , para los mismos valores de parámetros  $L$  y  $\gamma$  utilizados en la Figura 2.10. En la figura se aprecia como el coeficiente  $C$  tiene una fuerte influencia sobre la potencia crítica del NOLM, pudiendo seleccionar (en base a la gráfica obtenida) el punto de operación más conveniente de acuerdo a la aplicación que se desea dar al NOLM. Se aprecia que  $P_{\pi}$  tiende al infinito en  $C = 0.5$  debido a que en este punto las potencias de los haces contra propagándose en el lazo son iguales, de forma que la transmisión del NOLM es nula cualquier sea el valor de la potencia.

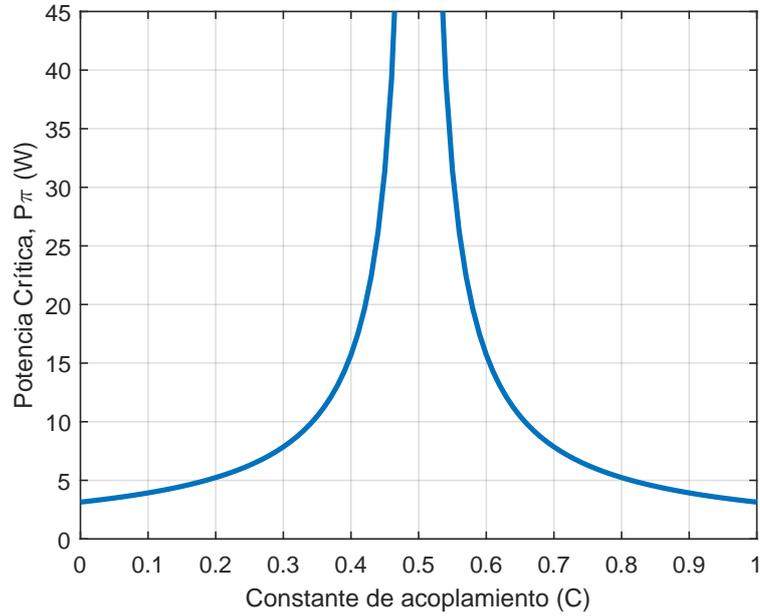


Figura 2.11: Gráfica de la evolución de la potencia crítica en función del factor de acoplamiento del NOLM.

Otro parámetro importante en el estudio del comportamiento del NOLM es el denominado rango dinámico o contraste ( $RD$ ), el cual se define como la relación de la transmisión máxima del dispositivo entre la transmisión mínima, mostrada en la ecuación 2.19.

$$RD = \frac{T_{max}}{T_{min}} = \frac{1}{1 - 4C(1 - C)} \quad (2.19)$$

La figura 2.12, muestra el rango dinámico aumenta conforme el coeficiente de acoplamiento crece desde 0 ó decrece desde 1, hasta llegar a un valor infinito para el punto donde se inserta un acoplador simétrico (es decir,  $C = 0.5$ ), valor que corresponde al caso de la transmisión vale cero para cualquier potencia y el NOLM se comporta como un espejo.

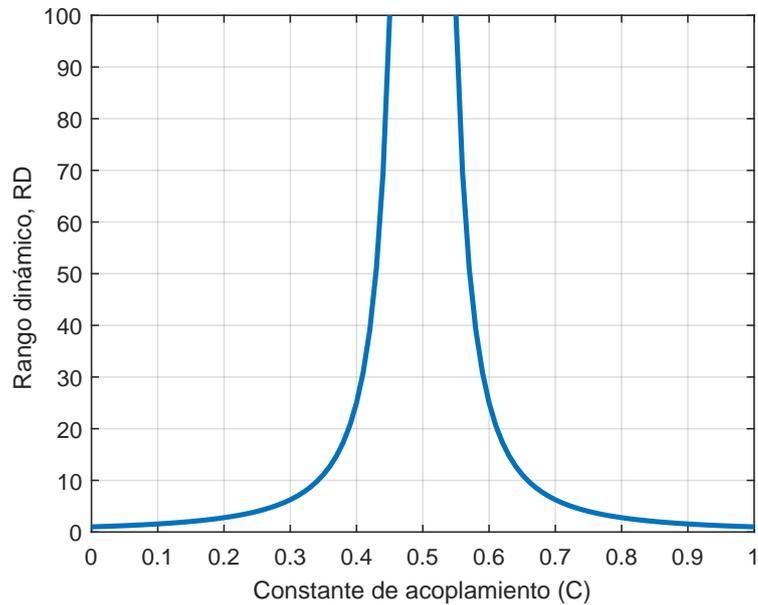


Figura 2.12: Gráfica del rango dinámico en función del factor de acoplamiento del NOLM.

### 2.6.1. Efecto Kerr en el NOLM

El NOLM ha tenido una amplia aceptación en distintos campos de estudio. Se debe a que es una útil herramienta para una gran cantidad de aplicaciones, como lo son: tratamiento de señales ultra-rápidas, multiplexado, compresión de pulsos, compuertas digitales por medio de efectos ópticos, SA, supresión de pedestal, láseres sintonizables, entre otras. El SA opera en el régimen no lineal, sin embargo, su operación no está en función de algún control externo del dispositivo, sino que está controlada por la misma potencia óptica circulando en la cavidad láser. Para obtener pulsos ultra-cortos es necesario contar con un SA rápido, el dispositivo funciona por medio del efecto Kerr.

En las fibras ópticas se pueden presentar efectos no lineales que dependen de la intensidad de la señal. Estos son causados principalmente por el índice de refracción

(efecto Kerr), por los altos niveles de potencia (dispersión) y por el material simétrico. El efecto Kerr es un efecto no lineal de tercer orden que se produce debido a un cambio de índice de refracción en la fibra óptica dependiente de la intensidad de acuerdo a la ecuación 2.20 [26].

$$n = n_0 + n_2 \left( \frac{P}{A_{efec}} \right) \quad (2.20)$$

donde  $n_0$  es el índice de refracción lineal,  $n_2$  es el índice de refracción no lineal, el cual se estima en  $n_2 = 3.2 \times 10^{-16} \frac{cm^2}{W}$  para fibras de silicio,  $P$  es la potencia del haz y  $A_{efec}$  es el área efectiva de la fibra ( $\sim 50 \mu m^2$ ). En el NOLM están presentes estos efectos no lineales en los haces que se propagan dentro del lazo de fibra provocando un cambio de fase  $\phi$ , que se muestra en la ecuación 2.21.

$$\phi = knL = \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \quad (2.21)$$

Donde  $k$  es el número de onda y está dado por  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $n$  es el índice de refracción,  $L$  la longitud de la fibra óptica y  $\lambda$  la longitud de onda en el vacío. Entonces el cambio de fase posee una distribución no lineal  $\phi_{No\ lineal}$  que se suma al cambio de fase lineal  $\phi_{Lineal}$  en ambos haces propagándose dentro del lazo de fibra del NOLM. Mediante la ecuación 2.22 .

$$\phi_{Total} = \phi_{Lineal} + \phi_{No\ lineal} \quad (2.22)$$

sustituyendo la ecuación 2.21 en la ecuación 2.22, se tiene que

$$\begin{aligned} \phi_{Total} &= \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \left( n_0 + n_2 \left( \frac{P}{A_{eff}} \right) \right) L \\ &= n_0 L \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) + n_2 L \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right) \left( \frac{P}{A_{eff}} \right) \end{aligned} \quad (2.23)$$

En este caso se estudia la auto-modulación de fase (SPM, *Self-Phase Modulation*) y la modulación cruzada de fase (CPM, *Cross Phase Modulation*), estos fenómenos ayudan a explicar el funcionamiento del dispositivo en régimen no lineal.

- **Automodulación de fase.** El fenómeno de SPM temporal en el NOLM se presenta cuando el índice de refracción es aumentado por la potencia y como

consecuencia la luz experimenta un cambio de fase no lineal. Mediante este fenómeno se tiene un cambio de fase proporcional a la potencia, siendo el cambio de fase descrito por la ecuación 2.24.

$$\frac{dE}{dz} = i\gamma |E|^2 E \quad (2.24)$$

donde se tiene que  $E$  es el campo eléctrico,  $|E|^2$  es la potencia óptica y  $\gamma$  es el coeficiente no lineal (el cual indica que tan grande es el efecto no lineal actuando sobre el esquema de estudio). El coeficiente Gamma es descrito por la relación  $\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{efec}}$ , donde  $n_2$  es el coeficiente no lineal expresado en  $\left[\frac{cm^2}{W}\right]$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda y  $A_{efec}$  es el área efectiva de la fibra óptica. Es importante mencionar que el valor típico del coeficiente  $\gamma$  para fibras estándar es de aproximadamente  $1.5 km^{-1}W^{-1}$ .

- **Modulación cruzada de fase.** El fenómeno de XPM es debido a que el índice de refracción efectivo experimentado por un haz óptico en un medio no lineal no depende solamente de la intensidad del haz sino también de los otros haces contra-propagándose o co-propagándose (entre 2 longitudes de onda distintas, o 2 polarizaciones ortogonales). Esto se presenta en el NOLM al utilizar un acoplador direccional de cuatro puertos que tiene una característica de cambio de fase de  $\frac{\pi}{2}$  entre los puertos uno-cuatro y dos-tres. Por lo que provoca un cambio de fase no lineal descrito por la ecuación 2.25.

$$\phi_{No\ lineal} = k (|E_{cw}|^2 + 2|E_{ccw}|^2) nL \quad (2.25)$$

donde el primer término es responsable de la SPM ( $E_{cw}$ ) y el segundo de la XPM ( $E_{ccw}$ ). Se puede concluir que, para dos haces con la misma intensidad de campo eléctrico, el desplazamiento de fase producido por XPM es dos veces mayor al producido por SPM.

### 2.6.2. Análisis del NOLM asimétrico en polarización

Este esquema del NOLM es utilizado en el desarrollo del F8L, el cual modifica el esquema del NOLM convencional presentado previamente (con acoplador asimétrico) se centra en los inconvenientes del arreglo, como son la falta de control de la polarización para ajustar diferentes corrimientos de fase entre los haces contra-propagándose y así controlar la transmisión del NOLM pudiendo corregir estas desventajas mediante el esquema presentado en la figura 2.13.

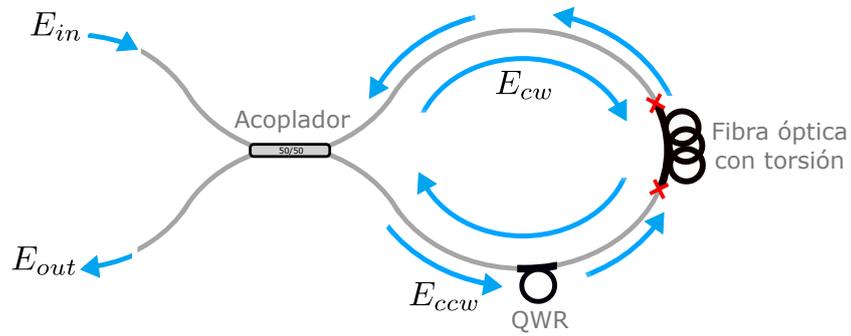


Figura 2.13: Esquema del Interferómetro de Sagnac de fibra óptica utilizado para el estudio de los efectos de polarización.

Resulta importante mencionar que cuando se tuerce una fibra óptica se genera un doble efecto: el primero es un efecto estrictamente geométrico que es debido a la precisión de los ejes principales en la fibra, el segundo es el de birrefringencia circular inducida al torcer la fibra. Una razón de torsión de fibra de radianes por unidad de longitud resulta en una birrefringencia circular  $B_{cir} = 2g'q$  donde  $2g'$  tiene un valor entre 0.13 y 0.16 para fibras de silicio [25].

### 2.6.3. Funcionamiento del NOLM para una entrada de luz polarizada linealmente

El análisis numérico del esquema de la figura 2.13 describe las matrices de Jones de cada uno de los elementos que conforman esta configuración del NOLM. Para esto

se proporciona la tabla 3.2, que describe cada uno de los elementos ópticos mediante matrices de Jones, así como la nomenclatura usada para identificarlos, siendo estos basados en una entrada con polarización lineal.

Tabla 2.2: Tabla descriptiva de las matrices de Jones de los elementos del esquema NOLM de la figura 2.13 con una entrada polarizada linealmente [25].

Elemento óptico	Nomenclatura	Matriz de Jones
Placa retardadora de $\frac{\lambda}{4}$ analizada con dirección a favor de las manecillas del reloj	$QWR_{cw}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$
Placa retardadora de $\frac{\lambda}{4}$ analizada con dirección contraria de las manecillas del reloj	$QWR_{ccw}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ -i & 1 \end{bmatrix}$
Fibra óptica torcida analizada con dirección a favor de las manecillas del reloj	$F_{cw}$	$\begin{bmatrix} e^{\frac{i3\beta LPin}{4}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i3\beta LPin}{4}} \end{bmatrix}$
Fibra óptica torcida analizada con dirección contraria de las manecillas del reloj	$F_{ccw}$	$\begin{bmatrix} e^{\frac{i\beta(3+\text{sen}(2\psi))LPin}{4}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{i\beta(3-\text{sen}(2\psi))LPin}{4}} \end{bmatrix}$

En base a la configuración de la figura 2.13 las expresiones del campo eléctrico para una entrada polarizada linealmente  $\begin{bmatrix} e^{i\psi} \\ e^{-i\psi} \end{bmatrix}$  están dadas por las ecuaciones 2.26 y 2.27.

$$Eout_{cw} = 0.5\sqrt{P_{in}}QWR_{cw}F_{cw} \begin{bmatrix} e^{i\psi} \\ e^{-i\psi} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$Eout_{ccw} = -0.5\sqrt{P_{in}}F_{ccw}QWR_{ccw} \begin{bmatrix} e^{i\psi} \\ e^{-i\psi} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Desarrollando la ecuación 2.26 se obtendría que

$$Eout_{cw} = \frac{1}{2}\sqrt{P_{in}}e^{i(3/2\beta LP_{in}/2-\pi/4)} \begin{bmatrix} \cos(\psi + \pi/4) \\ \text{sen}(\psi + \pi/4) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Para el desarrollo de la ecuación 2.27 se tiene que

$$E_{out_{cw}} = -\frac{1}{2}\sqrt{P_{in}}e^{-\pi/4}e^{i(3/2\beta LP_{in})} \begin{bmatrix} \cos(\psi + \pi/4) e^{-i\beta/4A_{c,ccw}LP_{in}} \\ \sin(\psi + \pi/4) e^{-i\beta/4A_{c,ccw}LP_{in}} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Donde  $A_{c,ccw} = -\sin(2\psi)$ , se tiene que  $E_{out} = E_{cw} + E_{ccw}$  y  $T = \frac{|E_{out}|^2}{[E_{in}]^2}$ , por lo que mediante el desarrollo matemático se obtendría que

$$T = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos\left(\frac{1}{4}A_{c,ccw}\beta LP_{in}\right)$$

$$T = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos\left(\frac{1}{4}\sin(2\psi)\beta LP_{in}\right) \quad (2.30)$$

La configuración del NOLM se realiza considerando el parámetro de la placa retardadora de cuarto de onda (QWR, *Quarter Wave retarder*), para un ángulo de la placa QWR de  $\alpha = 0$ , asegurando un  $RD$  infinito, esta consideración se realiza debido a que lo interesante del estudio es analizar el efecto de variar la orientación entre el ángulo de la QWR y de la entrada de polarización lineal. La Ecuación 2.30, se obtiene el comportamiento numérico de la transmisión del esquema del NOLM para una entrada polarizada linealmente, donde se observa la variación del ángulo de entrada de la polarización lineal ( $\psi$ ) [25]. Esta variación es mostrada en la Figura 2.14, para este caso  $\beta = 1W^{-1}km^{-1}$  y una longitud de la fibra de  $L = 0.5km$ .

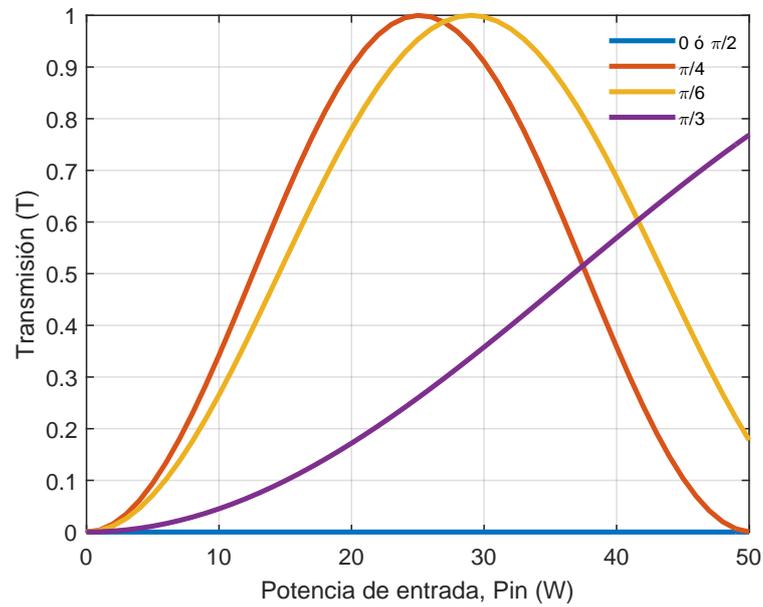


Figura 2.14: Transmisión del NOLM para distintos valores del ángulo de entrada ( $\psi$ ) para una polarización lineal.

#### 2.6.4. Funcionamiento del NOLM para una entrada de luz polarizada circularmente

Otro caso de interés para el esquema de la Figura 2.13, es tener una entrada con polarización circular. La tabla 2.3, se describen cada uno de los elementos ópticos mediante matrices de Jones.

Tabla 2.3: Tabla descriptiva de las matrices de Jones de los elementos del esquema NOLM de la figura 2.13 con una entrada polarizada circularmente [25].

Elemento óptico	Nomenclatura	Matriz de Jones
Placa retardadora de $\frac{\lambda}{4}$ analizada con dirección a favor de las manecillas del reloj	$QWR_{cw}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -ie^{2j\alpha} \\ -ie^{-2j\alpha} & 1 \end{bmatrix}$
Placa retardadora de $\frac{\lambda}{4}$ analizada con dirección contraria de las manecillas del reloj	$QWR_{ccw}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -ie^{-2j\alpha} \\ -ie^{2j\alpha} & 1 \end{bmatrix}$
Fibra óptica torcida analizada con dirección a favor de las manecillas del reloj. Notar que los cambios de fase lineales $e^{ikL}$ no se toman en cuenta ya que se considera que se cancelan	$F_{cw}$	$\begin{bmatrix} e^{\frac{i\beta LP_{in}}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\beta LP_{in}} \end{bmatrix}$
Fibra óptica torcida analizada con dirección contraria de las manecillas del reloj	$F_{ccw}$	$\begin{bmatrix} e^{\frac{3i\beta LP_{in}}{4}} & 0 \\ 0 & e^{\frac{3i\beta LP_{in}}{4}} \end{bmatrix}$

Mediante la configuración de la figura 2.13 las expresiones del campo eléctrico para una entrada polarizada circularmente  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  están dadas por las ecuaciones 2.31 y 2.32.

$$E_{out_{cw}} = 0.5\sqrt{P_{in}}QWR_{cw}F_{cw} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$E_{out_{ccw}} = -0.5\sqrt{P_{in}}F_{ccw}QWR_{ccw} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Por lo tanto, para el cálculo de  $E_{out}$  se tiene que  $E_{out} = E_{cw} + E_{ccw}$  por lo que se obtendría la ecuación 2.33.

$$E_{out} = \frac{0.5\sqrt{P_{in}}}{\sqrt{2}} e^{\frac{5i\beta LP_{in}}{8}} \begin{bmatrix} e^{-\frac{i\beta LP_{in}}{8}} - e^{\frac{i\beta LP_{in}}{8}} \\ -i \left( e^{-i\left(\frac{\beta LP_{in}}{8} + 2\alpha\right)} - e^{i\left(\frac{\beta LP_{in}}{8} + 2\alpha\right)} \right) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Finalmente, mediante la expresión definida en la ecuación 2.33 y con la relación de la transmisión del NOLM definida por  $T = \frac{|E_{out}|^2}{|E_{in}|^2}$  se obtiene la ecuación 2.34.

$$T = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\alpha) \cos\left(\frac{1}{4}\beta L P_{in} + 2\alpha\right) \quad (2.34)$$

La figura 2.15 muestra el comportamiento de la transmisión de la ecuación 2.34 para distintos valores del ángulo de la placa QWR ( $\alpha$ ). Una vez elegidos los valores se hace variar la transmisión en función de la potencia de entrada al NOLM con lo cual se obtienen las gráficas presentadas en la figura 2.15. Se tiene que para este caso  $\beta = 1W^{-1}km^{-1}$  y  $L = 0.5km$ .

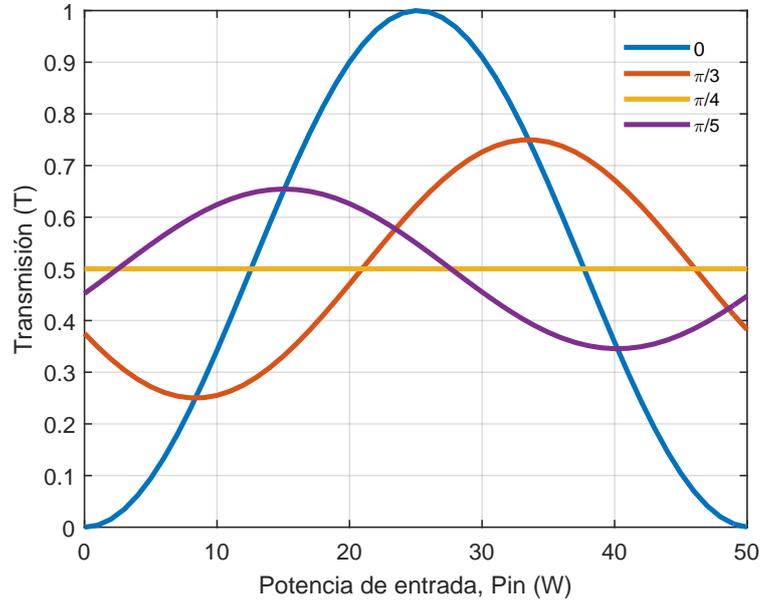


Figura 2.15: Transmisión del NOLM para distintos valores del ángulo de entrada ( $\psi$ ) para una polarización circular.

Los resultados de las simulaciones mostradas en las figuras 2.14 y 2.15, permite un control sobre la potencia de *switcheo* en el funcionamiento del NOLM. El cual se puede aplicar en el desarrollo de un láser de fibra óptica de amarre de modos pasivo.

## 2.7. Técnicas para el desarrollo de los láseres pulsados en fibra óptica

El incremento de la potencia pico y la intensidad ha sido uno de los problemas más importantes para la tecnología de los láseres pulsados. Se han desarrollado métodos para la generación de pulsos ultra-cortos. Las técnicas Q-switch y amarre de modos, han obtenido potencias pico de salida del orden de  $MW$  y  $GW$ . Para obtener el calculo de la potencia pico se utiliza la ecuación 2.35. Donde  $E_p$  es la energía pico por pulso y  $t$  es la duración del pulso. Se ha demostrado trabajos donde se han obtenido potencias pico en el orden de  $MW$  utilizando la técnica de amarre de modos [28] y Q-switch [29]. En la ecuación 2.35, se muestra la obtención de la potencia pico del trabajo [28].

$$P_p = \frac{E_p}{t} = \frac{200 \text{ nJ}}{400 \text{ fs}} = 0.5 \text{ MW} \quad (2.35)$$

Además, se han utilizado etapas de amplificación para obtener potencias pico en el orden de  $MW$  y  $GW$  por medio de láseres de fibra óptica [30] y [31]. Con estas potencias de salida ha sido posible generar algunos efectos no lineales. Por ejemplo, el fenómeno de generación de supercontinuo (SG, *supercontinuum generation*), que se basa en un ensanchamiento espectral debido a las propiedades no lineales presentes en el medio de propagación (fibra estándar, fibra de alta no linealidad, fibra de cristal fotónico (PCF, *photonic crystal fiber*)), pudiendo obtener fuentes de luz blanca [25].

Estudios numéricos presentados en diversos trabajos [32–34], mencionan que al utilizar pulsos en el régimen de ns, ps es el mecanismo inicial que genera el ensanchamiento espectral del pulso es la inestabilidad modulacional, como se observa en la figura 2.16. Al incrementar la potencia a la entrada de una fibra óptica aparece la inestabilidad modulacional, esto se puede comprobar con los lóbulos laterales que aparecen alrededor del bombeo. La dispersión cromática del modo fundamental juega un importante rol en la SG porque esta determina la extensión a la cual diferentes

componentes espectrales de un pulso se propagan a diferentes velocidades de fase en la fibra óptica [35].

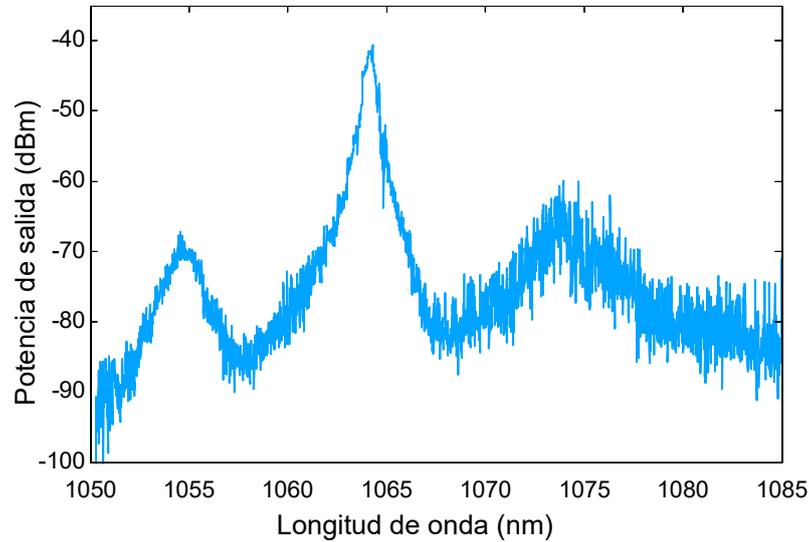


Figura 2.16: Fenómeno de Inestabilidad modulacional (MI) presente en una fibra óptica bombeadas en el régimen de nanosegundos [36].

Los factores que determinan los efectos lineales que intervienen en la SG involucran parámetros como  $\beta_2$ , que es el parámetro de la dispersión de la velocidad de grupo (*GVD, Group Velocity Dispersion*) y es el que gobierna la dispersión. La *GVD* puede ser dispersión normal, si  $\beta_2 > 0$ , o bien anormal, si  $\beta_2 < 0$ , la cual depende directamente de la longitud de onda del haz de bombeo, otro factor lineal recae sobre las pérdidas propias de la fibra óptica y el índice de refracción lineal. Los factores del bombeo que determinan las no linealidades de los pulsos en la fibra son el ancho del pulso de entrada, la potencia pico del pulso de entrada, la no linealidad de la fibra óptica, generando fenómenos no lineales, tales como: la dispersión estimulada Raman, mezcla de cuatro ondas, auto-modulación y modulación cruzada de fase, formación de solitones de alto orden, inestabilidad modulacional y mezcla paramétrica [37].

### 2.7.1. Amarre de modos

El método de amarre de modos consiste en igualar las fases de los modos longitudinales en la cavidad para generar pulsos ultra-cortos. Estos dispositivos pueden ser AS, modulador electro-óptico o acusto-óptico que se añade a la cavidad para sincronizar las fases de los modos para que el láser genere pulsos ultra-cortos. Los pulsos ultra-cortos obtenidos tienen una sucesión periódica con duraciones del pulso en los fs y frecuencias de repetición del orden de los MHz. Las técnicas de amarre de modos existentes se dividen en dos categorías:

- *Amarre de modos activo*: se obtiene del resultado de la inserción en el esquema de un modulador de amplitud o fase controlado por un generador de radio frecuencias (RF, *radio frequency*) externo de señal generalmente senoidal, el cual induce una modulación de las pérdidas en la cavidad o la ganancia en el medio de amplificación [39]. Este amarre de modos hace uso por lo regular de dispositivos electro-ópticos y acusto-ópticos, siendo el electro-óptico el más usado para altas tasas de repetición del orden de los GHz, mientras que la duración de los pulsos es del orden de los pico-segundos. Un ejemplo de un láser de amarre de modos activo es presentado en la figura 2.17, en este caso la modulación se realiza por amplitud (AM, *Amplitude Modulation*) [25].

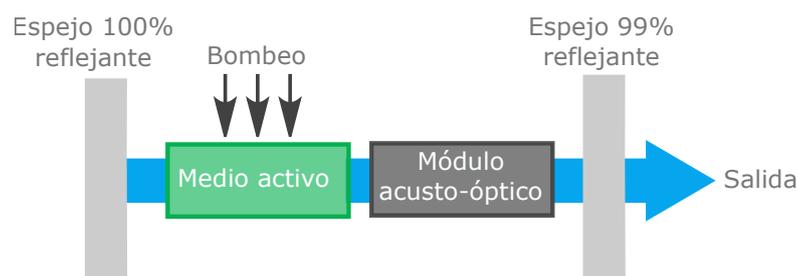


Figura 2.17: Láser de amarre de modos activo con un modulador de amplitud.

- *Amarre de modos pasivo*: es el resultado de la inserción de un SA, (la sección 2.2.3 se presenta su descripción) dentro de la cavidad, con objeto de favorecer

el modo pulsado. Esta otra técnica de amarre de modos hace uso de un SA que opera en el régimen no lineal. La tasa de repetición para este tipo de amarre de modos está en el orden de los  $MHz$ , mientras que se pueden obtener pulsos con duraciones del orden de las decenas de femto-segundos. El SA utilizado en este tipo de amarre de modos es un elemento que funciona en base a fenómenos no lineales presentes en el esquema, SPM, CPM y la rotación no lineal de polarización (NPR, *Nonlinear Polarization Rotation*). En la figura 2.18, se muestra un ejemplo de un láser de amarre de modos pasivo [25].

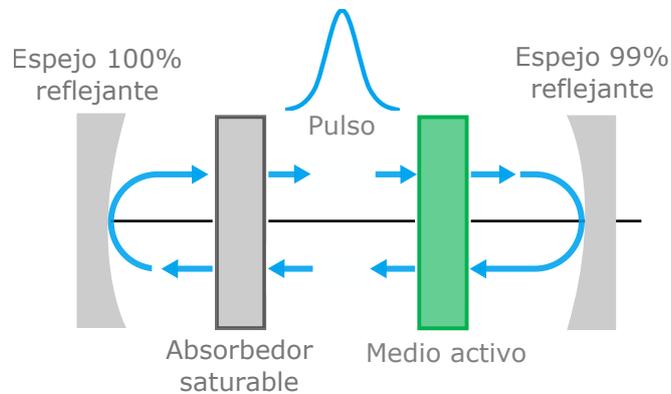


Figura 2.18: Láser de amarre de modos pasivo.

El amarre de modos pasivo abre nuevas posibilidades de operación para la fabricación de láseres pulsados, debido a que el SA puede comprimir pulsos atenuando señales de pedestal, entre otras posibilidades. Una de estas opciones es el uso del NOLM como SA. Una vez explicado el funcionamiento y las técnicas de operación de los láser de fibra óptica, empezaremos en el siguiente capítulo una descripción de las características de los elementos utilizados en los arreglos experimentales.

## Capítulo 3

# Diseño de esquemas de láseres de fibra

En este capítulo se presentan algunas características principales de los elementos ópticos utilizados en los arreglos experimentales. A su vez, también se presenta la caracterización del diodo de bombeo y de la fibra óptica de doble revestimiento dopada con Er/Yb.

### 3.1. Fuente de bombeo

En la implementación de los arreglos experimentales se utilizó un diodo láser acoplado a una fibra óptica monomodo de la marca Focuslight<sup>®</sup>, modelo FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5. Cuenta con una fuente de voltaje que opera de 0 a 6 V a una corriente máxima de 10 A. Además, está integrada con un sistema de enfriamiento termoeléctrico (TEC, *Thermo-Electric Cooler*) que permite al dispositivo un funcionamiento estable en diversas condiciones ambientales. Tiene una emisión del espectro óptico centrado en 979.69 nm con una anchura de banda espectral (FWHM, *full width at half maximum*) de 3.94 nm y una potencia máxima de 25 W. La figura 3.1, presenta la fuente de bombeo que cuenta con un indicador para monitorear la corriente que



Parte frontal



Parte trasera

Figura 3.1: Fuente del diodo de bombeo de la marca Focuslight<sup>®</sup>, modelo FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5 [40].

circula por el diodo.

La figura 3.2, muestra el espectro de emisión del diodo láser, se aprecia que la longitud de onda ( $\lambda$ ) está centrada en 979.69 nm a una intensidad del 100 %. La curva característica del diodo láser es observada en la figura 3.3. Se establece un comportamiento de la potencia de salida en función de la corriente de operación. Se observa que la corriente de umbral del diodo láser se encuentra arriba de los 700 mA.

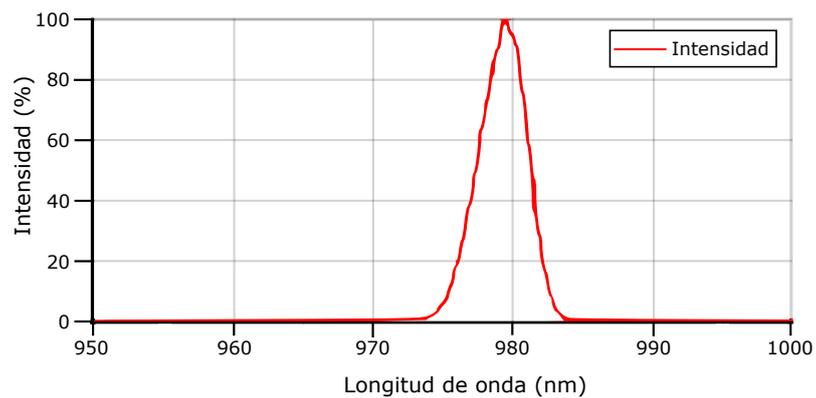


Figura 3.2: Espectro del diodo láser modelo FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5.

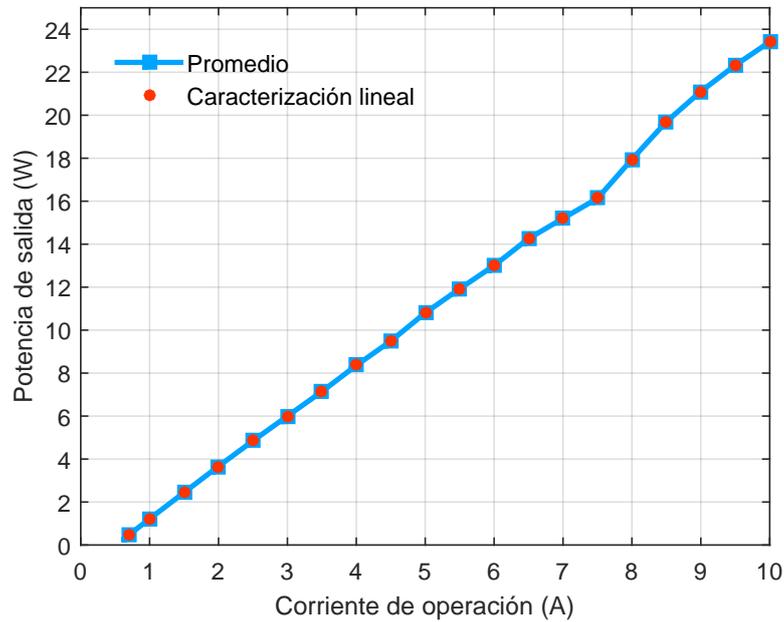


Figura 3.3: Curva característica del diodo láser modelo FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5.

## 3.2. Características de los elementos ópticos utilizados

Los arreglos experimentales propuestos tienen como finalidad obtener un láser completamente de fibra óptica. Los elementos ópticos que se utilizan son totalmente de fibra óptica, permitiendo tener un fácil acoplamiento entre los elementos ópticos. La descripción y algunas características importantes de estos componentes ópticos son mencionados a continuación.

### 3.2.1. Combinador de fibra óptica

Este dispositivo permite mezclar o combinar las señales ópticas con distintas longitudes de onda en una forma que permita a todas de ellas pasar a través de una sola

fibra óptica sin interferirse entre sí. El combinador que se empleó para este trabajo es el modelo MMC0211C4057 de la marca ITF Technologies<sup>®</sup> como se muestra en la figura 3.4. Tiene 3 puertos de entrada, dos puertos multimodo para bombear una señal con una longitud de onda de 900 a 1000 nm y un puerto monomodo para una señal con una longitud de onda de 1530 a 1560 nm. Los diámetros de los dos puertos de bombeo son de 105 / 125  $\mu\text{m}$  y una apertura numérica (NA, *Numerical Aperture*) igual a 0.22. La máxima potencia de inyección para cada puerto de bombeo es de 50 W, teniendo una potencia total de 100 W. La señal de salida tiene baja pérdida de inserción con una pérdida de retorno de 35 dB. El puerto de salida es una fibra monomodo 10 / 125  $\mu\text{m}$ .

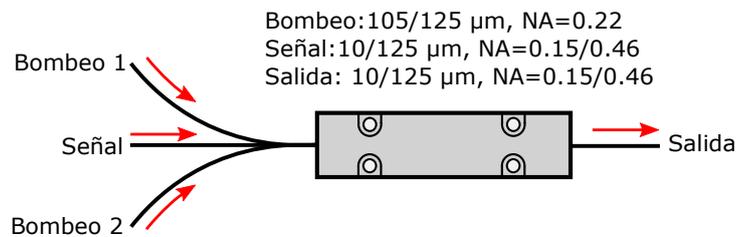


Figura 3.4: Combinador de fibra óptica modelo MMC0211C4057 de la marca ITF Technologies<sup>®</sup> [41].

### 3.2.2. Acoplador de fibra óptica

El acoplador de fibra óptica es un dispositivo que puede distribuir la señal óptica entre dos o más fibras ópticas. Está formado por dos fibras ópticas unidas por los núcleos paralelamente por medio de una interacción superficial. Son usados ampliamente en las comunicaciones ópticas, por ejemplo, en detección, como interferómetros o láseres de fibra para dividir la señal óptica entre dos fibras. En los arreglos experimentales se utilizaron tres acopladores de la marca Thorlabs<sup>®</sup> (50/50, 80/20 y 90/10 a 1550 nm) para extraer una fracción de la potencia del láser para monitorear las señales obtenidas. En la figura 3.5 se muestra el acoplador de fibra óptica 2x2.



Figura 3.5: Acoplador de fibra óptica 2x2 de la marca Thorlabs® [42].

### 3.2.3. Aislador de fibra óptica

Un aislador (ISO, *Isolator*) permite transmitir la luz en una única dirección e impide que se desarrollen reflexiones en sentido contrario como se muestra en la figura 3.6. Para este trabajo se utilizó un aislador insensible a la polarización modelo AP-ISO-1550PI de la marca AdValue Photonics®. Los aisladores insensibles a la polarización, permiten el paso del estado de polarización de la luz que viaja en la fibra óptica. La máxima potencia que soporta el aislador es de 10 W. Tiene una baja pérdida de inserción con una pérdida de retorno de 50 dB.



Figura 3.6: Aislador de fibra óptica de la marca AdValue Photonics® [43].

### 3.2.4. Controlador de polarización

El controlador de polarización (PC, *Polarization Controller*), permite controlar el estado de polarización de la luz que viaja por la fibra óptica utilizando placas retardadoras de onda que presentan cambios de fase. Para los arreglos experimentales se empleó una PC de la marca Thorlabs®, modelo FPC560, que se muestra en la figura 3.7. El dispositivo consiste de tres placas independientes para enrollar la fibra óptica, cada placa constituye una lámina de retardo de fase. Cada placa es móvil y

puede modificar su ángulo de inclinación, de tal forma que cambia su eje de la fibra óptica en cada una de las tres placas. La configuración habitual de la PC consiste en dos placas de  $\frac{\lambda}{4}$  (QWP, *Quarter Wavelength Plate*) y una placa de  $\frac{\lambda}{2}$  (HWP, *Half Wavelength Plate*).

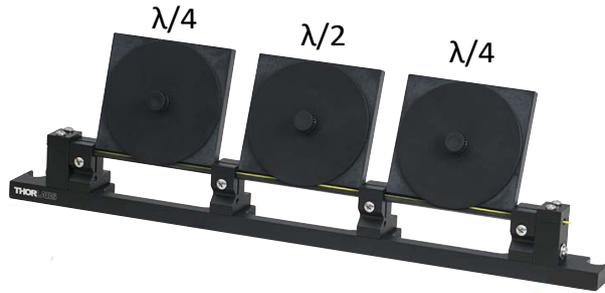


Figura 3.7: PC modelo FPC560 de la marca Thorlabs<sup>®</sup> [44].

La PC utiliza la birrefringencia inducida aplicada al esfuerzo de enrollar la fibra óptica en cada una de las placas, permitiendo cambiar el estado de polarización de la luz que se transmite por la fibra óptica. Esta birrefringencia está en función del diámetro de la placa, el número de vueltas, el diámetro de la fibra óptica utilizada y la longitud de onda de operación. El retardo ( $\varphi$ ) generado en cada placa se calcula usando las siguientes ecuaciones 3.1 y 3.2:

$$\varphi(\text{radianes}) = \frac{2\pi^2 a N d^2}{\lambda D} \quad (3.1)$$

$$\varphi(\text{numero de onda}) = \frac{\pi a N d^2}{\lambda D} \quad (3.2)$$

Donde  $a$  es una constante (0.133 para fibras de silicio),  $N$  es el número de vueltas en cada placa,  $d$  es el diámetro del revestimiento del núcleo,  $\lambda$  es la longitud de onda de operación, y  $D$  es el diámetro de cada placa (para el modelo FPC560 se utiliza un diámetro de 56 mm). Para este trabajo de tesis se utilizó esta misma configuración, se calculó que el número de vueltas para  $\frac{\lambda}{2}$  fueron de 6 vueltas y  $\frac{\lambda}{4}$  de 3 vueltas. En

la figura 3.8, se muestra la gráfica de retardo para la PC en valores en radianes de  $\frac{\lambda}{2}$  ( $\pi$ ) y  $\frac{\lambda}{4}$  ( $\frac{\pi}{2}$ ) para una longitud de onda de 1550 nm.

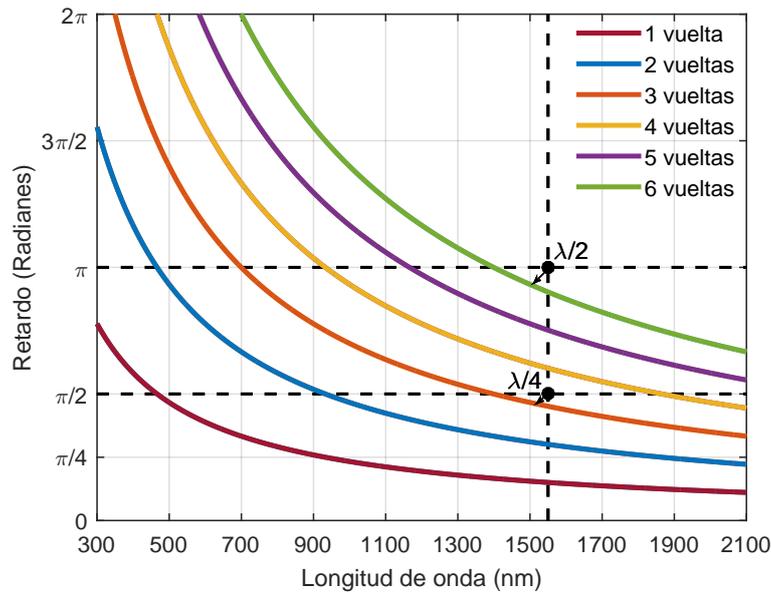


Figura 3.8: Numero de vueltas para una placa de  $\frac{\lambda}{2}$  y  $\frac{\lambda}{4}$  usando una  $\lambda=1550$  nm.

### 3.2.5. Fibra óptica monomodo

Las fibras ópticas son filamentos de un espesor entre  $125 \mu\text{m}$  a  $1 \text{ mm}$ . Puede transmitir mensajes en forma de haces de luz de un extremo a otro sin interrupción. La fibra estándar SMF-28 (SMF, *Single-Mode Fiber*), es una fibra óptica monomodo que cuenta con un núcleo pequeño aproximadamente entre  $8\text{-}10 \mu\text{m}$ . Y solo permite viajar un solo modo dentro de su núcleo. En la figura 3.9, se muestra la estructura geométrica de una fibra óptica que está constituida por las siguientes capas concéntricas: núcleo, revestimiento y recubrimiento plástico. Los valores de los parámetros de las características de la SMF-28 son listadas en la tabla 3.1.

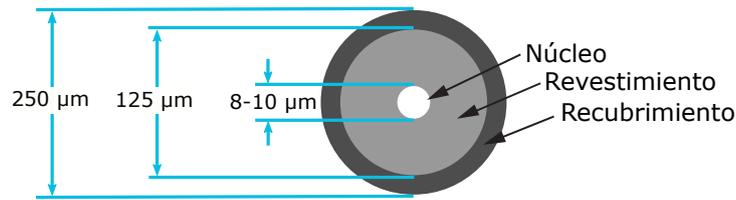


Figura 3.9: Estructura geométrica de la fibra óptica SMF-28 [45].

Tabla 3.1: Especificaciones de la fibra óptica SMF-28 [45].

Fibra óptica SMF-28	
Parámetro	Valor
Diámetro del núcleo	8.2 μm
Diámetro del revestimiento	125 μm
Apertura numérica	0.14
Índice de refracción de grupo efectivo ( $N_{\text{eff}}$ )	1.4677 a 1310 nm 1.4682 a 1550 nm
Atenuación ( $\lambda=1550$ nm)	0.2 dB/km
Dispersión cromática ( $\lambda=1550$ nm)	16 ps/km·nm

### 3.2.6. Fibra óptica de doble revestimiento

La fibra óptica de doble revestimiento (DCF, *Double-Clad Fiber*) tiene el núcleo cubierto por un doble revestimiento. En este tipo de fibra el núcleo se encuentra dopado con algún elemento de la tierra rara ( $Nd^{3+}$ ,  $Tm^{3+}$ ,  $Er^{3+}$  y  $Yb^{3+}$ , etc). En la figura 3.10, se muestra la comparación de algunos elementos dopados en la fibra óptica con la atenuación que presenta una fibra óptica estándar. Sin embargo, la DCF conumente usado es el fibra dopada con erbio de doble revestimiento (EDCF, *Erbium-Doped Double-Clad Fiber*) como amplificador óptico y medio de ganancia en los láseres de fibra óptica. Por su capacidad de amplificar señales cerca de los 1550 nm que es la longitud de onda donde menos pérdidas presenta la fibra óptica utilizada en comunicaciones.

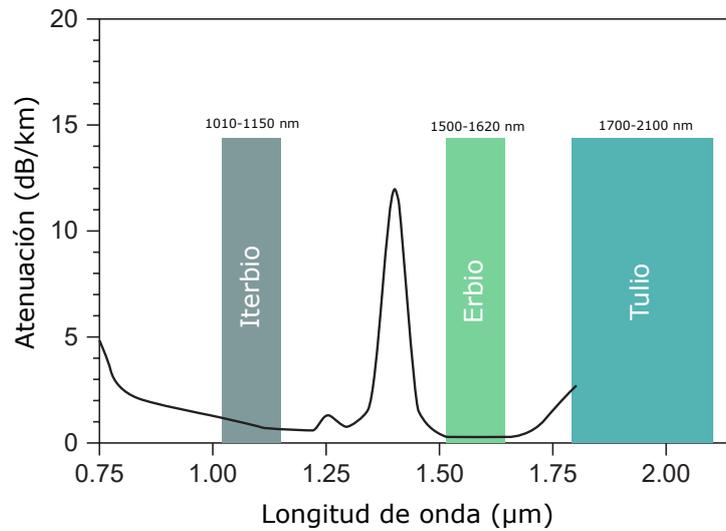


Figura 3.10: Longitudes de onda de emisión de algunos elementos dopados en la fibra óptica [46].

Los láseres de fibra óptica, la DCF tiene una característica importante de conducir la señal láser de la fuente de bombeo por el revestimiento interno ( $n_{revestimiento\ externo} < n_{revestimiento\ interno}$ ) y la señal láser generada por los iones activos es propagada por el núcleo ( $n_{núcleo} > n_{revestimiento\ interno}$ ). El revestimiento interno tiene un área significativamente más grande (comparada con el núcleo) y una apertura numérica mucho más alta, de modo que pueden viajar un gran número de modos en la fibra óptica (fibra óptica multimodo). En la figura 3.11, se observa el funcionamiento de una DCF y sus capas concéntricas como: núcleo, revestimiento interno, revestimiento externo y recubrimiento plástico.

Para mejorar la eficiencia de bombeo en la DCF, es necesario introducir alguna asimetría, por ejemplo, formas geométricas no circulares para el revestimiento, por ejemplo, rectángulos, tipo D, hexagonal, etc. En la figura 3.12, se muestran algunas estructuras típicas de DCF para aplicaciones de láseres de fibra óptica.

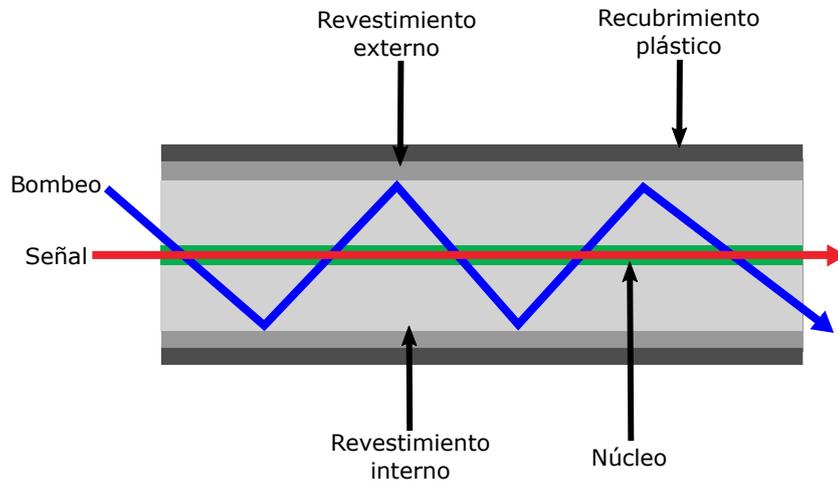


Figura 3.11: Funcionamiento de una DCF [46].

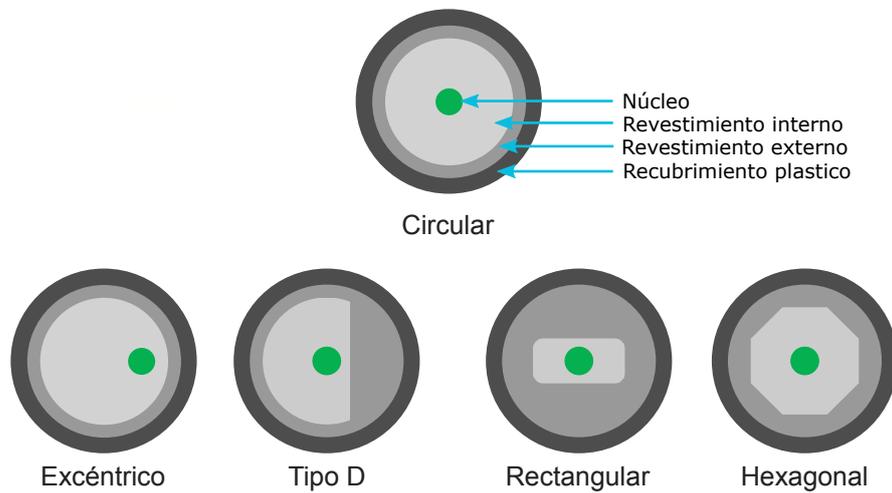


Figura 3.12: Estructura geométrica de algunas DCF [46].

Para los arreglos experimentales se empleó una fibra óptica de doble revestimiento dopada con  $Er^{3+}$  e  $Yb^{3+}$  (EYCDF, *Er/Yb Co-Doped Double-Cladding Fiber*) de la marca nufern<sup>®</sup>, modelo MM-EYDF-12/130-HE. En la figura 3.13, se muestra el perfil de la EYCDF obtenida mediante un microscopio electrónico. En la imagen se puede apreciar la distancia del núcleo, revestimiento interno y externo. La tabla 3.2, muestra los valores de los parámetros de las características de la fibra óptica MM-EYDF-12/130-HE.

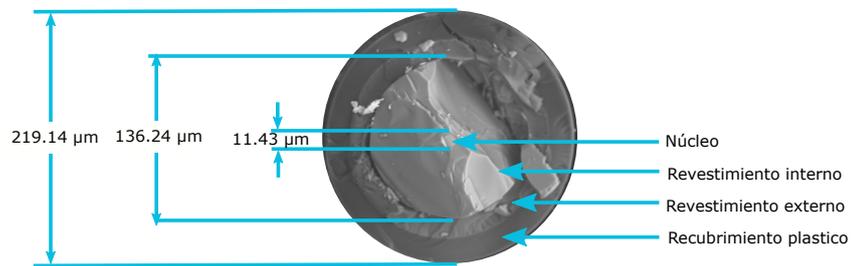


Figura 3.13: Perfil de la EYCDF obtenida mediante un microscopio electrónico.

Tabla 3.2: Especificaciones de la fibra óptica MM-EYDF-12/130-HE [47].

Fibra óptica MM-EYDF-12/130-HE	
Parámetro	Valor
Diámetro del núcleo	12.0 ± 1.5 μm
Diámetro del revestimiento interno	130.0 ± 3.0 μm
Diámetro del recubrimiento plástico	215.0 ± 5.0 μm
Apertura numérica (núcleo)	0.20
Longitud de onda de operación	1530 – 1625 nm
Absorción del núcleo	70.0 ± 15.0 dB/m a 1530 nm
Absorción del revestimiento interno	3.10 ± 0.50 dB/m a 915 nm

## Capítulo 4

# Resultados experimentales del láser en configuración de anillo

En este capítulo se muestra una descripción del desarrollo experimental para la construcción del láser pulsado de fibra en configuración de anillo. Finalmente, se presentan los resultados experimentales del láser en los dos modos de operación: continuo y pulsado.

### 4.1. Desarrollo experimental

En la figura 4.1, se presenta el arreglo experimental del láser de fibra en configuración de anillo. Como medio de ganancia se utilizó 1.60 m de fibra EYDF (MM-EYDF-12/130-HE), que emite en la longitud de onda de 1530 a 1625 nm. Este medio activo fue bombeado por un diodo láser de alta potencia con una longitud de onda centrada en 979.69 nm y una potencia máxima de 25 W (FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5). El haz de luz es acoplado dentro de la cavidad de anillo por medio de un puerto de bombeo del combinador (MMC0211C4057). Para asegurar una única dirección de propagación y evitar reflexiones internas se coloca un aislador óptico (AP-ISO-1550PI).

La salida del aislador óptico se conecta un acoplador de fibra óptica con una razón de acoplamiento de 80/20. Donde el puerto de 20 % es usado como salida 1 del láser, mientras que el puerto de 80 % es acoplado a una PC 1 (FPC560) para ajustar los estados de polarización por medio de placas retardadoras con una configuración de  $\frac{\lambda}{4}$ ,  $\frac{\lambda}{2}$  y  $\frac{\lambda}{4}$ . La salida de la PC 1 es conecta a un carrete de fibra SMF-28 de 200 m, y a su vez se conecta a otra PC 2, con la misma configuración de la PC 1. La salida del láser fue extraída de la cavidad de anillo por un acoplador de fibra óptica con una razón de acoplamiento de 90/10. Donde, el puerto de 90 % fue utilizado para la retroalimentación de la cavidad resonante conectada al puerto de la señal del combinador, mientras que el puerto del 10 % fue usado para la salida 2 del láser.

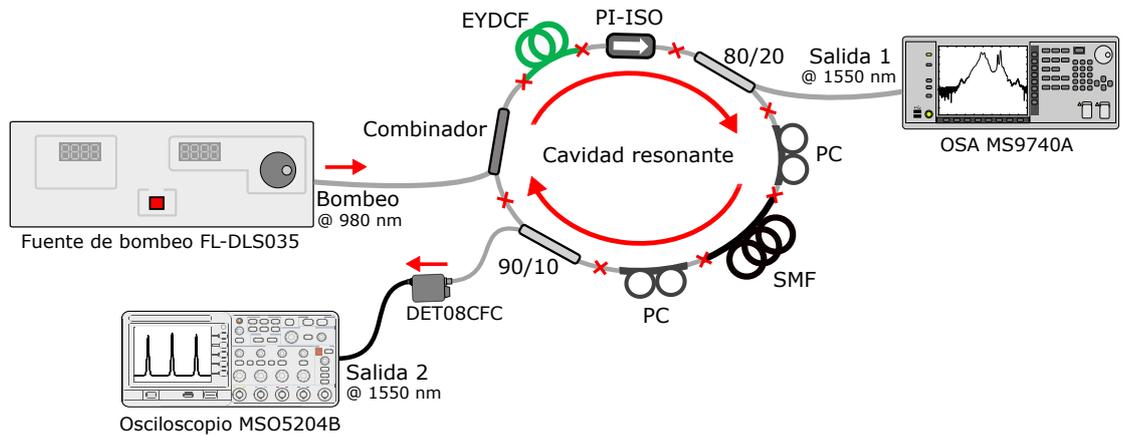


Figura 4.1: Arreglo experimental del láser de fibra en configuración de anillo.

Las salidas fueron medidas con un OSA (MS9740A) para observar el espectro de emisión y un fotodetector (DET08CFC) conectado al osciloscopio (MSO5204B) para observar el comportamiento temporal de los pulsos.

## 4.2. Resultados obtenidos y discusión

A continuación, se describe los resultados obtenidos del arreglo experimental del láser de fibra en configuración de anillo, mostrado en la figura 4.1. El primer resultado obtenido fue la operación de un láser en el régimen de onda continua, utilizando una potencia de bombeo  $\leq 1$  W. La figura 4.2 muestra el espectro óptico medido por un OSA. Se logró obtener un pulso centrado el pico máximo aproximadamente en  $\lambda = 1568$  nm, con una potencia de salida de  $-3.852$  dBm ( $0.4119$  mW). Además, no se observa el pico de bombeo de  $979.69$  nm.

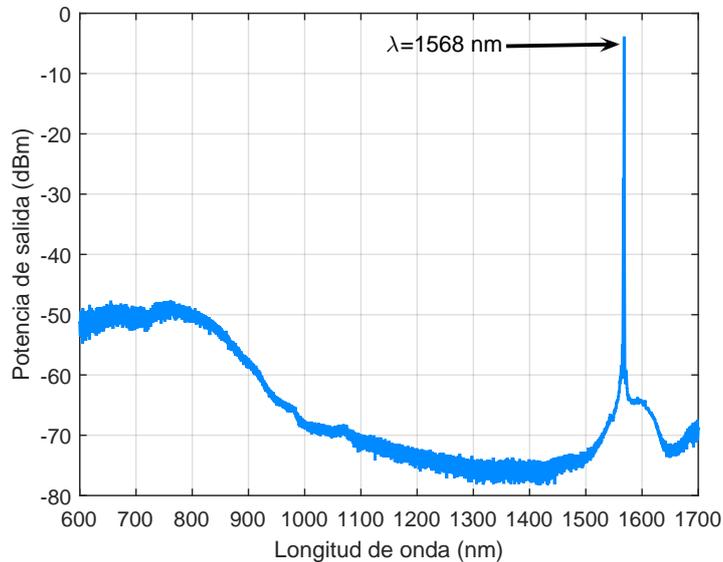
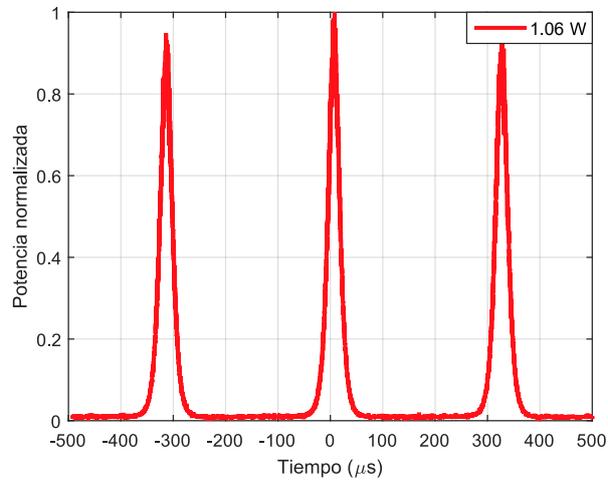


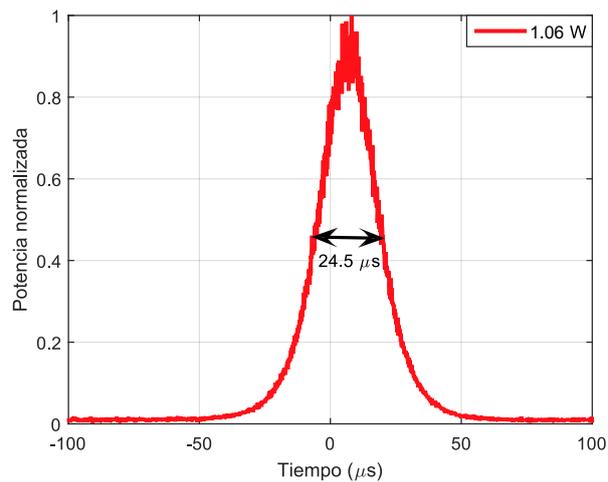
Figura 4.2: Espectro de emisión en el régimen continuo observado en el láser de fibra en configuración de anillo.

La figura 4.3, muestra el resultado de la señal óptica detectada mediante un fotodetector rápido (DET08CFC) y monitoreado por un osciloscopio de muestreo rápido de 2 GHz (MSO5204B). Se observa un tren de pulsos estables con un ancho de pulso de  $24.5 \mu\text{s}$ , un periodo de  $320.6 \mu\text{s}$  y una razón de repetición (RR, *Repetition Rate*) de  $3.11$  kHz, este valor indica la frecuencia fundamental para la cavidad de  $200$  m.

La potencia de bombeo para esta medición fue de 1.06 W.



(a) Armónico fundamental.



(b) Anchura del pulso de  $24.5 \mu\text{s}$ .

Figura 4.3: Tren de pulsos generado con un bombeo de 1.06 W.

Al aumentar la potencia de bombeo a 1.3 W, se observa que el ancho del pulso de  $24.5 \mu\text{s}$  se divide en múltiples pulsos idénticos, pero con una amplitud menor que el pulso fundamental. Los pulsos generados dentro de la cavidad se llaman armónicos. La figura 4.4, muestra la generación de armónicos dentro de la cavidad; armónico de 1er orden o fundamental con un periodo de  $321.54 \mu\text{s}$  (RR=3.11 kHz), armónico de

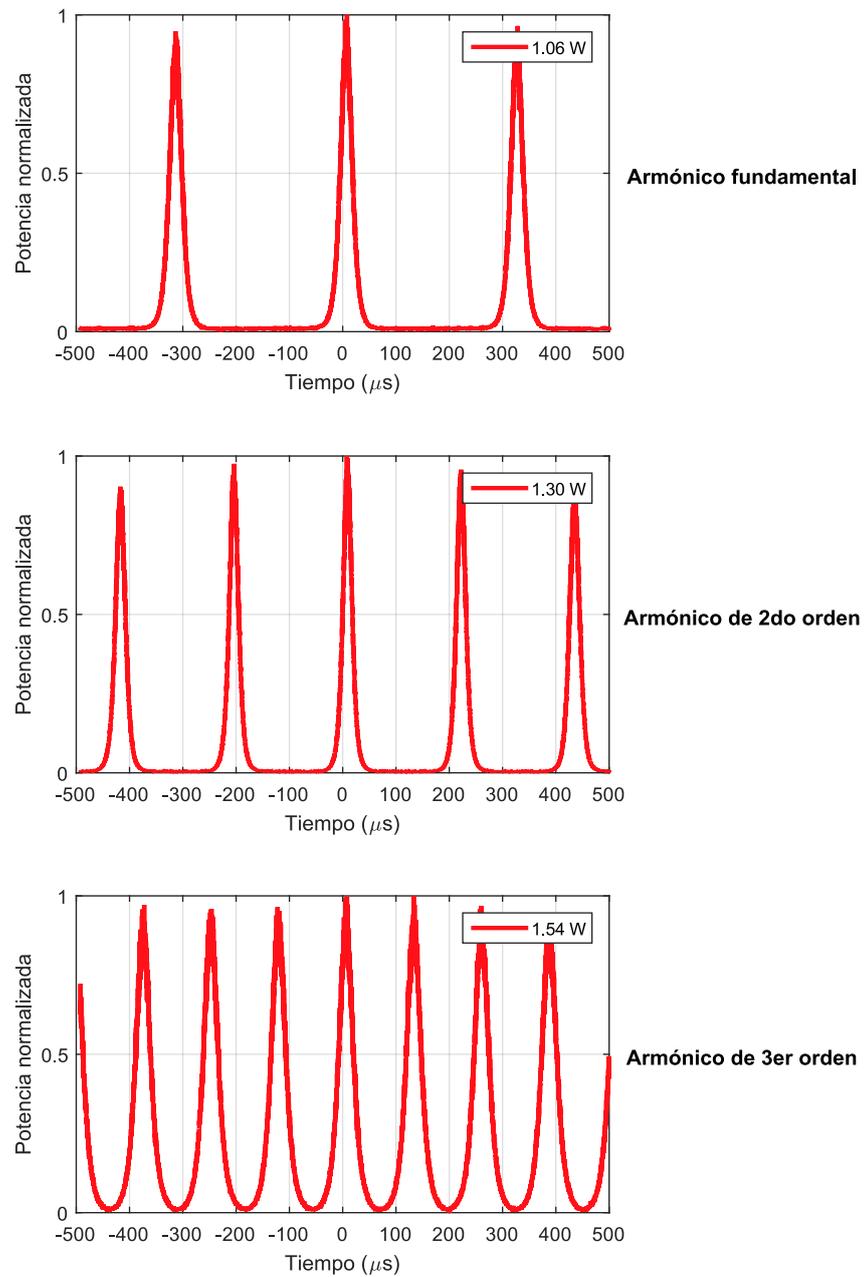


Figura 4.4: Generación de armónicos de alto orden.

2do orden con un periodo de 213.3  $\mu\text{s}$  (RR= 4.688 kHz) y armónico de 3er orden con un periodo de 145  $\mu\text{s}$  (RR=6.896 kHz). El orden de los armónicos crece a medida que la potencia de bombeo aumenta.

La figura 4.5, muestra la evolución del espectro óptico al aumentar la potencia de bombeo hasta 13.28 W (corriente de operación 6 A). Se observa una generación de un espectro amplio de 8 nm para una potencia de bombeo de 13.28 W. La potencia de bombeo se limitó a 13.28 W para proteger los elementos ópticos del arreglo experimental.

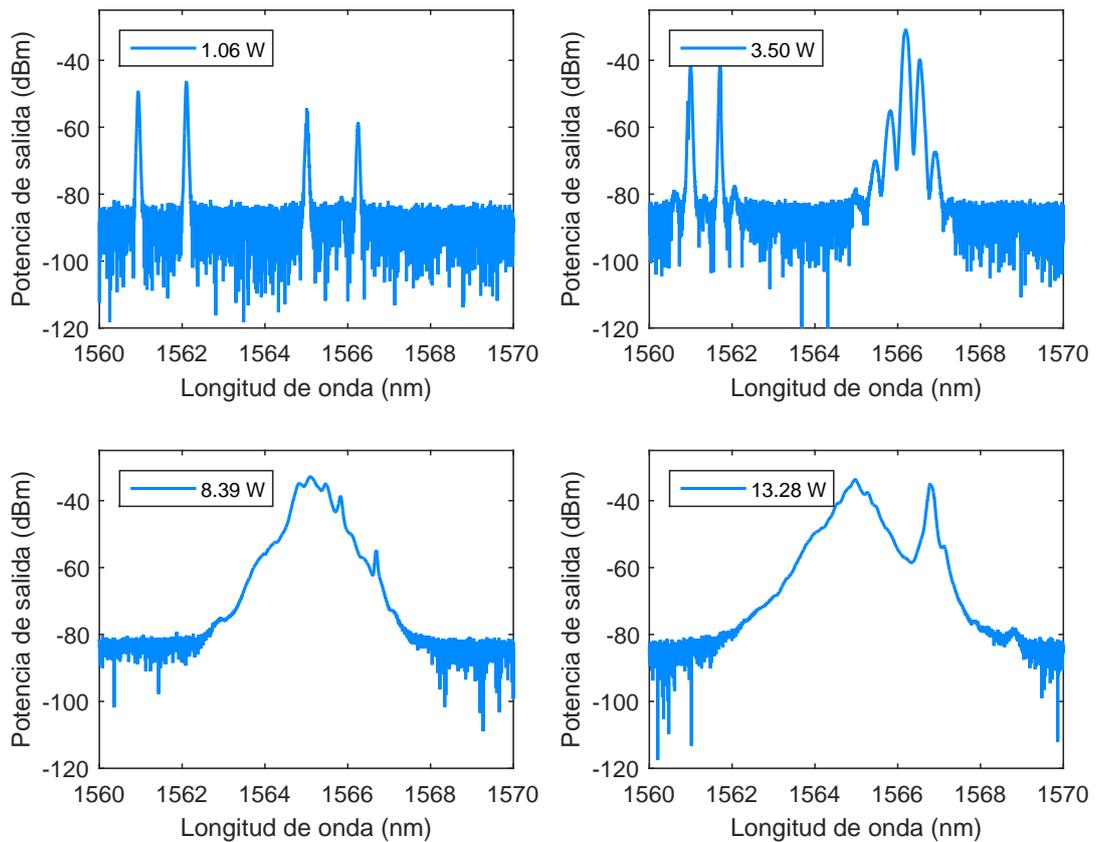


Figura 4.5: Evolución del espectro óptico al aumentar la potencia de bombeo.

Los resultados muestran un láser de fibra óptica en configuración de anillo en régimen de onda continua y pulsado que muestra potencia de salida de 10 W, con una eficiencia del 62 %. Los pulsos obtenidos son del tipo auto-Q-switch con una duración de 47.1  $\mu\text{s}$  y trenes de pulsos con una razón de repetición desde 3.11 kHz a 6.896 kHz

(armónicos de 1er hasta 3er orden). Este proceso de auto-Q-switch es generado por las grandes concentraciones de iones que presenta la fibra de EYDF para formar la automodulación y al aumentar la potencia de salida se presenta el proceso de Q-switch.

Este método de auto-Q-switch no ha sido ampliamente estudiado su funcionamiento para generar los pulsos en un láser de fibra óptica. Se han presentado trabajos donde muestran que el principal causante del auto-Q-switch se debe a los efectos térmicos que presenta la fibra dopada por las grandes concentraciones de iones. El cual provoca un calentamiento del núcleo por los efectos de absorción en estado excitado (ESA, *Excited State Absorption*) [48] y la interacción entre iones [49].

Otros trabajos presentan que el problema de estos pulsos del tipo auto-Q-switch son producidos por la interferencia multimodal (MMI, *Multimode Interference*) provocada por el fenómeno de auto-imagen [50] entre los empalmes del combinador y la fibra de EYDF que presentan diferentes diámetros.

## Capítulo 5

# Resultados experimentales del F8L

En este capítulo se muestra la descripción de otra configuración de láser de fibra óptica por medio del esquema de F8L. Este arreglo utiliza la técnica de amarre de modos pasivos por medio del NOLM como absorbedor saturable para obtener un láser pulsado. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en la salida del láser en el régimen pulsado y continuo.

### 5.1. Desarrollo experimental

En la figura 5.1, se presenta el arreglo experimental del F8L. Consiste de la cavidad de anillo mostrada en la figura 4.1, que se le inserta un NOLM que funciona como absorbedor saturable, para conseguir el amarre de modos pasivo. El NOLM (asimétrico en polarización) está compuesto por un acoplador 50/50, 10 m de fibra estándar SMF-28 de baja birrefringencia ( $D=18$  ps/km·nm) y altamente torcida (a una razón de torsión de 5 vueltas/m) y una QWR para transformar la polarización de la luz de lineal a elíptica.

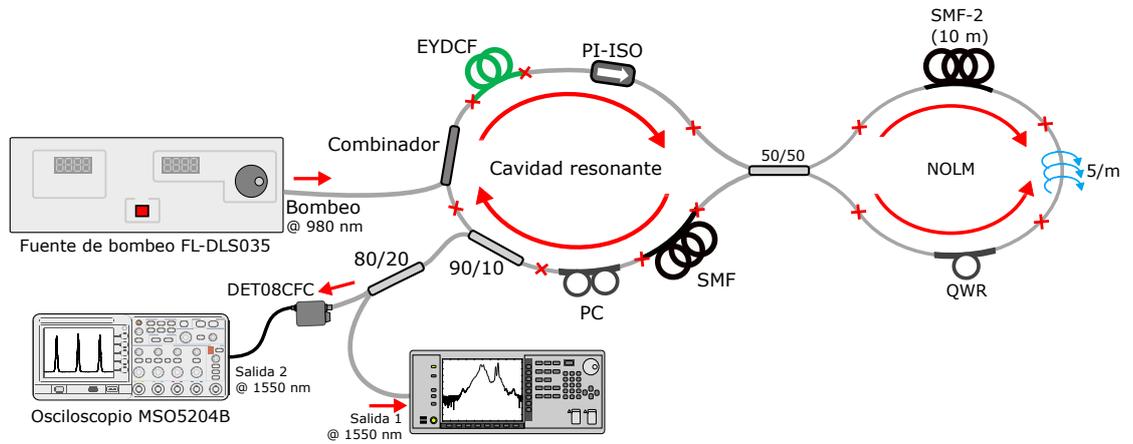
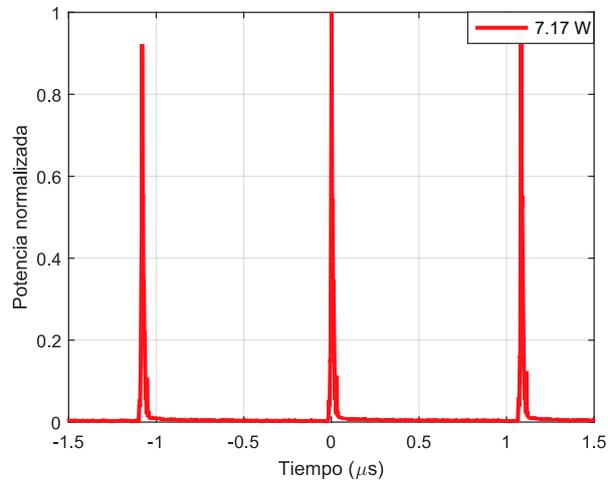


Figura 5.1: Arreglo experimental del láser de fibra en configuración de F8L.

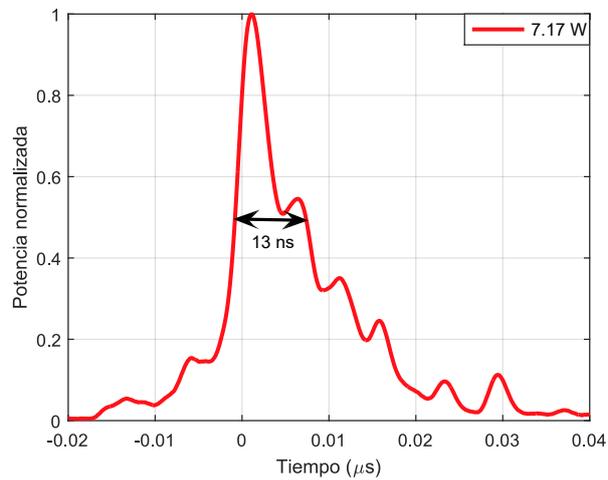
La salida del láser fue extraída de la cavidad de anillo por un acoplador de fibra óptica. Donde, el puerto de 90 % fue utilizado para la retroalimentación de la cavidad resonante conectada al puerto de la señal del combinador, mientras que el puerto del 10 % fue usado para la salida del láser. Para no dañar los equipos de medición se empalmo otro acoplador 80/20 en la salida del láser. El puerto de 80 % fue usado para observar el espectro de emisión por medio de un OSA y el puerto de 20 % para monitorear el comportamiento temporal de los pulsos en un osciloscopio (MSO5204B) por medio de un fotodetector (DET08CFC).

## 5.2. Resultados obtenidos y discusión

La formación de los pulsos en la cavidad de 215 m de longitud, se consiguió al modificar el ángulo de inclinación de las placas de la PC en la cavidad de anillo y la placa retardadora QWR dentro del NOLM. La figura 5.2, muestra el primer pulso estable generado con una potencia de bombeo de 7.17 W, obteniendo así un ancho de pulso positivo de 8.1 ns y un periodo de 1.1  $\mu$ s (RR=909.09 MHz).



(a) Armónico fundamental.



(b) Anchura del pulso de 13 ns.

Figura 5.2: Tren de pulsos generado con una corriente de bombeo de 7.17 W.

La figura 5.3, muestra la generación de armónicos dentro de la cavidad; armónico de 1er orden o fundamental con un periodo de  $1.1 \mu\text{s}$  (RR=909.09 kHz), armónico de 3er orden con un periodo de  $0.389 \mu\text{s}$  (RR= 2.570 MHz), armónico de 4to orden con un periodo de  $0.272 \mu\text{s}$  (RR=3.676 MHz) y armónico de 6to orden con un periodo de  $0.1926 \mu\text{s}$  (RR=5.192 MHz). El orden de los armónicos aumenta al ajustar la PC de la cavidad de anillo y la placa retardadora QWR del NOLM.

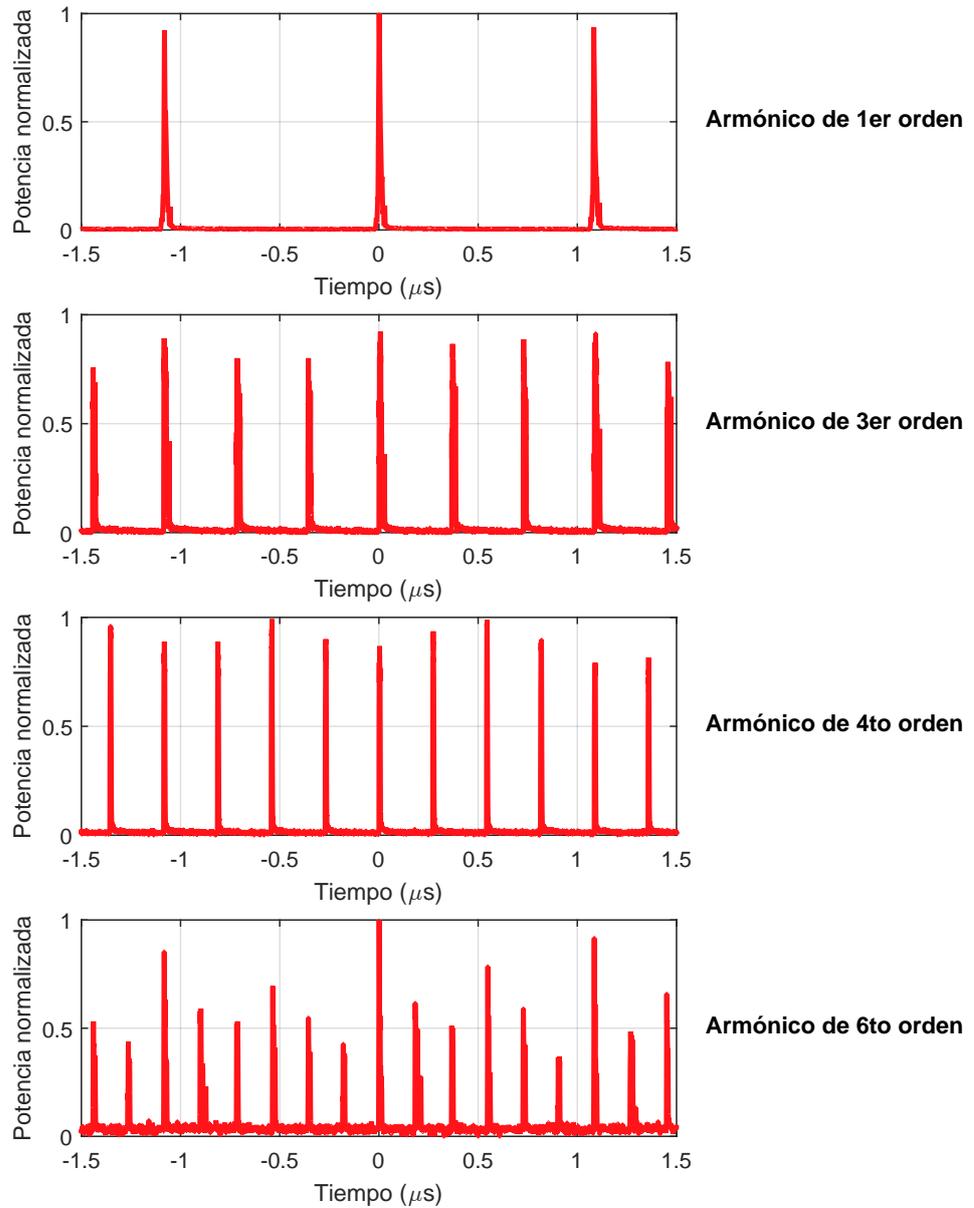


Figura 5.3: Generación de armónicos de alto orden.

Los pulsos obtenidos se mantienen estables en el tiempo para diferentes niveles bombeo (7.17 W a 13.28 W), como se muestra en la figura 5.4. Si la potencia de bombeo disminuye de 7.17 W los pulsos desaparecen.

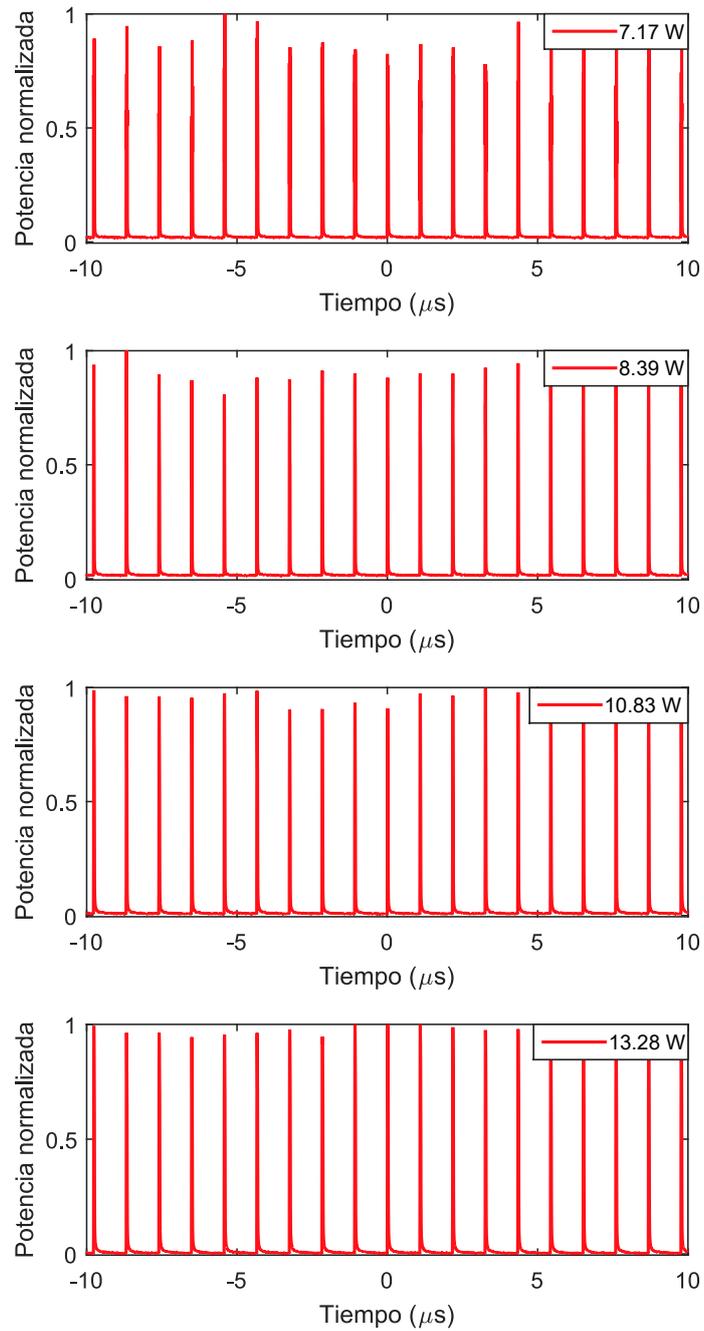


Figura 5.4: Tren de pulsos estables para diferentes niveles de bombeo.

En la figura 5.5, se muestra el espectro óptico de la salida del láser de fibra detectado mediante un OSA. Se aprecia en la salida un espectro SC (sin necesidad

de ningún medio no lineal adicional) muy amplio y se extiende a más de 200 nm en longitud de onda (hacia el lado derecho). Esta medición está limitada a la longitud de onda de operación del OSA (600 nm a 1750 nm). El máximo espectro aparece en la región de emisión del Er con una longitud de onda de 1567 nm con una potencia de salida de -23.98 dBm (3.99 mW). Además, aparecen dos picos de emisión en 1536 nm y 1543 nm con una potencia de salida de -35.05 dBm (312.6  $\mu$ W) y -37.39 dBm (182.3  $\mu$ W) respectivamente. Estos picos de emisión son debidos a la emisión residual del CW [51].

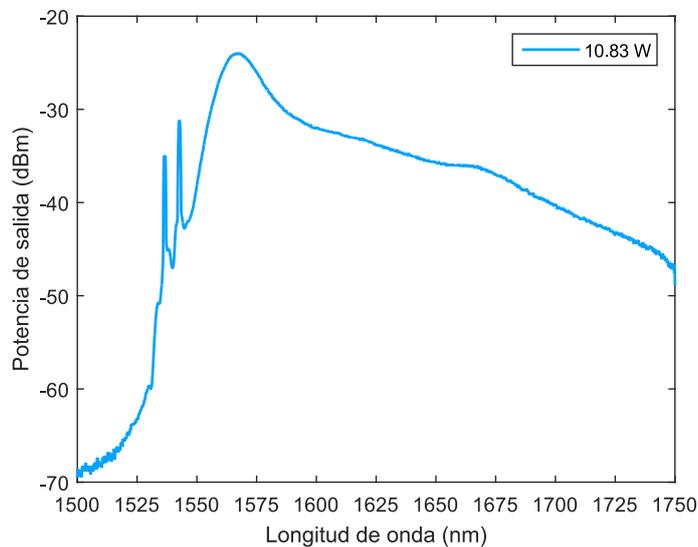


Figura 5.5: Espectro SC observado en la salida del F8L.

Para validar la operación de estabilidad del láser de F8L se trabajó durante largos periodos de tiempo como se muestra en la figura 5.6. Se muestra que el láser tiene una excelente estabilidad durante 5 hr en intervalos de 1 hr y no presenta fluctuaciones en el espectro SC.

Al no existir amarre de modos pasivo en la cavidad el espectro óptico en la salida del láser es mucho más estrecho y solamente se extiende a 43 nm de longitud de onda,

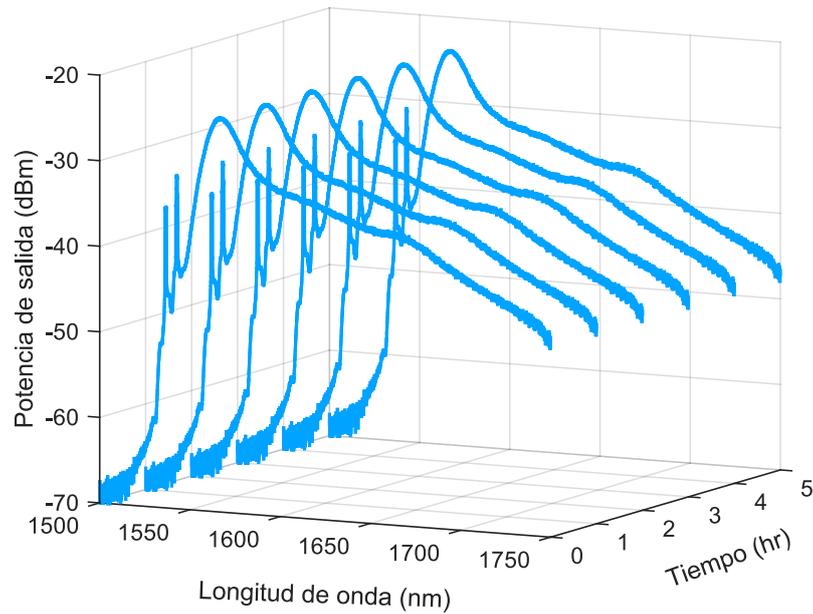


Figura 5.6: Estabilidad del espectro SC observado en la salida del F8L.

como se observa en la figura 5.7. Solamente se presentan los picos de emisión residual del CW en las longitudes de onda de 1536 nm y 1543 nm. Las potencias de salida de estos picos fueron de -34.33 dBm (368.9 uW) y -24.36 dBm (3.664 mW).

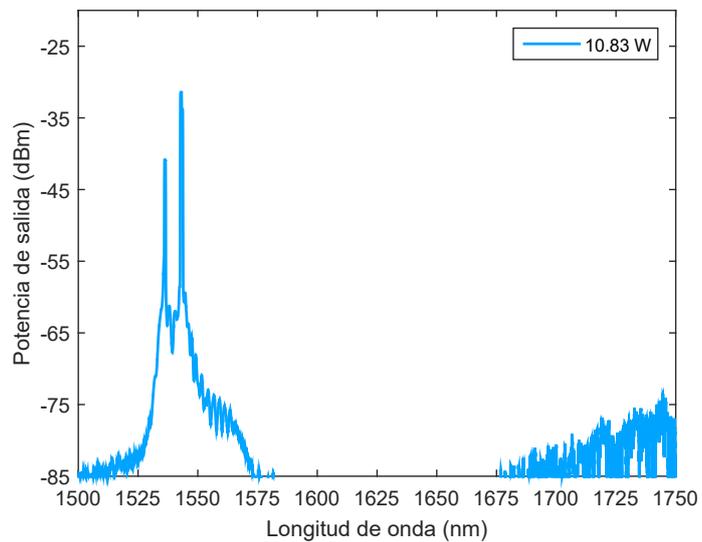


Figura 5.7: Espectro en el régimen continuo observado en la salida del F8L.

Actualmente se han utilizado nuevos dispositivos ópticos para medir la duración de pulsos ultra-cortos por medio de la técnica de autocorrelación (AC). Esta técnica de autocorrelación a remplazado el uso del fotodetector y un osciloscopio, debido a que se necesita un tiempo de respuesta del fotodetector muy corto y una alta sensibilidad en la longitud de onda para detectar los pulsos ultracortos.

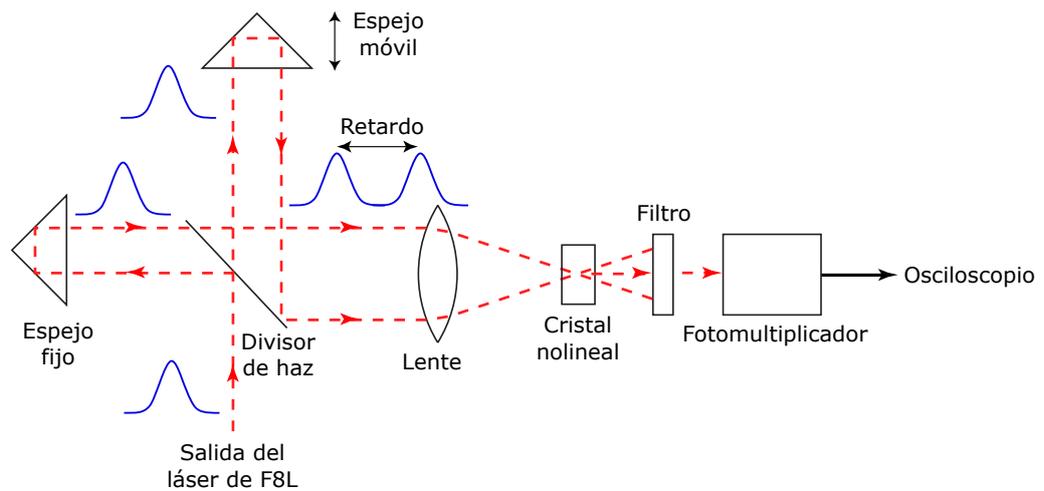


Figura 5.8: Diagrama de un autocorrelador utilizando un cristal de SHG.

El funcionamiento consiste en que el haz de entrada se separe en dos réplicas del mismo pulso mediante un divisor de haz que inciden sobre dos espejos (móvil y fijo). El espejo móvil realiza un retraso temporal en uno de los caminos ópticos (cambio de longitud). Los dos haces se hacen incidir en el mismo punto sobre un cristal no lineal (donde se superponen los dos haces). El cristal emplea el fenómeno de generación de segundo armónico (SHG, *Second harmonic generation*). La señal generada en el SHG corresponde a la interacción entre los dos haces, que finalmente es filtrada y detectada por un fotomultiplicador conectado a un osciloscopio. La rapidez de la variación de la señal detectada depende de qué tan rápido sea el barrido del retraso temporal y no depende del tiempo de respuesta del fotodetector y el osciloscopio [52]. La figura 5.8 muestra el diagrama del funcionamiento de un autocorrelador utilizando un cristal de

SHG.

El dispositivo utilizado para medir la autocorrelación fue el FR-103XL de la marca Femtochrome<sup>®</sup>. Tiene un rango de longitud de onda de 410 a 2100 nm y una resolución de 1 fs [53]. La figura 5.9 se observa la autocorrelación de los pulsos del F8L para una longitud de onda de 1550 nm. Se obtuvo un pico de coherencia (duración de sub-pulsos) de 1.02 ps y un pedestal que se extiende a más de 200 ps, que el osciloscopio no lo podía mostrar por completo. La duración del FWHM del pico central fue de 1ps aproximadamente. La energía pico por pulso fue de más de 300 nJ. El análisis de estos resultados es interesante debido a que hasta este momento este esquema cuenta con la energía más alta reportada para este tipo de pulsos [51].

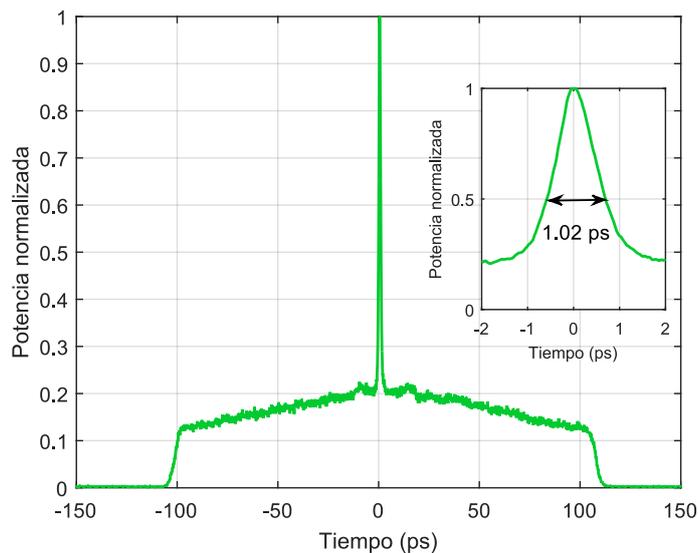


Figura 5.9: Autocorrelación de los pulsos del F8L.

Los pulsos obtenidos en este arreglo experimental del F8L cuentan con un periodo ( $T$ ) de  $1.1\mu s$ , una potencia promedio ( $P_m$ ) de 275.25 mW, una duración de los pulsos ( $\tau$ ) de 13 ns, un pico de coherencia ( $t$ ) de 1.02 ps y una eficiencia del 1.1 %. La energía pico por pulso se calcula por la ecuación 5.1:

$$\begin{aligned} E_p &= P_m \cdot T \\ &= (275.25 \text{ mW}) \cdot (1.1 \text{ } \mu\text{s}) \\ &= 302.8 \text{ nJ} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Se puede concluir que se tienen pulsos de ruido formados en la cavidad del esquema de F8L. Aunque estos resultados no son tan interesantes en potencia, como se reportó con el láser en configuración de anillo. Sin embargo, este esquema permite un mayor número de pulsos dentro de la cavidad, así como la generación de SC directamente a la salida del láser.

## Capítulo 6

# Conclusiones

### 6.1. Conclusiones

El objetivo general de la tesis fue desarrollar un esquema láser compuesto completamente de fibra óptica que presentan ventajas de diseño compacto y económico. Se construyeron dos configuraciones: un láser de anillo y de F8L que operan en el régimen continuo y pulsado. Para la fabricación de los láseres se utilizó un nuevo tipo de medio de ganancia de fibra de doble revestimiento dopada con  $\text{Er}^{3+}$  e  $\text{Yb}^{3+}$  (EYDF), como medio activo.

El láser de configuración de anillo presentó pulsos con una duración de  $47.1 \mu\text{s}$  y una razón de repetición de 3.11 kHz indicando una frecuencia fundamental para la cavidad de 120 m de longitud. Con una potencia de salida de 10 W y una eficiencia de 63 %. Los pulsos se generaron por medio de la técnica de auto-Q switch. El proceso de auto-Q-switch no ha sido muy clara la explicación de este fenómeno en los láseres de fibra óptica. Algunos trabajos publicados indican que este fenómeno se debe a los efectos térmicos que presenta la fibra de EYDF, debido a la gran cantidad de iones que presenta la fibra dopada y a la interferencia multimodal al utilizar diferentes diámetros de fibra óptica en el arreglo (combinador y EYDF).

El F8L presentó pulsos con una duración de 13 ns, una razón de repetición de 909.09 kHz para la frecuencia fundamental en la cavidad de 215 m de longitud y sub-pulsos del orden de 1 ps. La energía del pulso detectada en la salida fue de 302.8 nJ. La potencia de salida del láser fue de 275. 25 mW y una eficiencia de 1.1 %. Aunque estos resultados no son tan interesantes en potencia, como se reportó con el láser en configuración de anillo. Sin embargo, este esquema permite un mayor número de pulsos dentro de la cavidad (armónicos). Además, se aprecia en la salida un espectro SC que se extiende a más de 200 nm. Los resultados muestran que se generaron pulsos de ruido por medio de la técnica de amarre de modos pasivo que presentan características de alta energía y un amplio ancho espectral.

Los esquemas realizados pueden alcanzar potencias de salida altas para procesos que requieran altas energía, ya que es posible generar altas potencias sin tener un sobre calentamiento en el dispositivo. Además de presentar una mejor calidad de haz y longitud de onda con respecto a los láseres de bulto.

Con estos resultados obtenidos se puede enfocar para el estudio de fenómenos no lineales, espectros supercontinuos, procesamiento de materiales, comunicaciones ópticas, sensado, entre otras.

## 6.2. Trabajo a futuro

Se puede realizar un empaquetamiento de los arreglos implementados para que pueda ser un dispositivo de uso práctico en el laboratorio. Además los láseres de fibra óptica han optimizado una gran cantidad de aplicaciones, debido a sus altas potencias y pulsos ultra-cortos (ps y fs). Esto ha generado un nuevo interés para aplicarlo como elemento fundamental en diversos campos de operación, por ejemplo;

en la industria, en la medicina, en las comunicaciones ópticas y en la investigación científica. A continuación, se describen las principales aplicaciones que han tenido los láseres de fibra óptica.

### 6.2.1. Industriales

Los láseres de fibra óptica con potencias de decenas de watts, pulsos ultra-cortos y altamente estable son enfocados en la industria mediante procesos de alta velocidad para materiales metálicos (hierro, cobre, aluminio, níquel), cerámicos, plásticos, papel, vidrio y piedra, por ejemplo; los sistemas de corte (corte por fusión), micromaquinado, soldadura y tratamiento de materiales, por mencionar algunos. Los sistemas de corte y micromaquinado por láser están diseñando una amplia variedad de componentes, por ejemplo, en el corte de hipotubos y estent en dispositivos médicos, perforación, ablación y marcado en componentes electrónicos y partes automotrices. En la figura 6.1, se aprecian las aplicaciones en la industria por medio de la duración de los pulsos y la profundidad de procesamiento en los materiales.



Figura 6.1: Clasificación de las aplicaciones utilizadas en la industria [54].

### 6.2.2. Médicas

En la medicina el láser de fibra óptica tiene numerosas aplicaciones como el uso de instrumentos quirúrgicos (bisturí, cortadores de tejido, taladros, dermatomas y sondas) de gran precisión, tratamiento de problemas epidérmicos. En la figura 6.2, se observan algunos instrumentos médicos utilizando un láser de fibra óptica. Se usa como corte y cauterización de tejidos, el láser de fibra óptica puede producir un corte muy fino de rango de 0.2 a 1 mm de espesor [54]. Para la fabricación de prótesis intravascular llamados estent, que se utiliza para abrir venas que han sido previamente tapadas u obstruidas. En la figura 2, se observa el corte de un estent utilizando un láser de la marca RUFIN<sup>®</sup> [54].

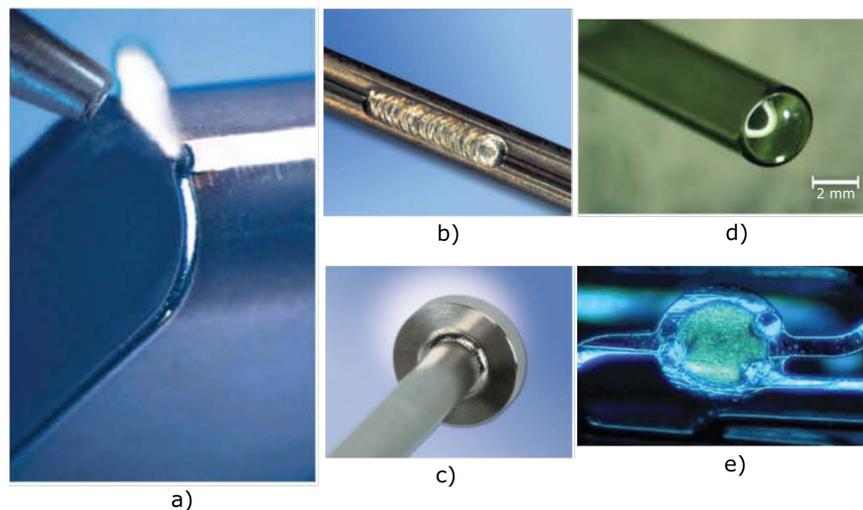
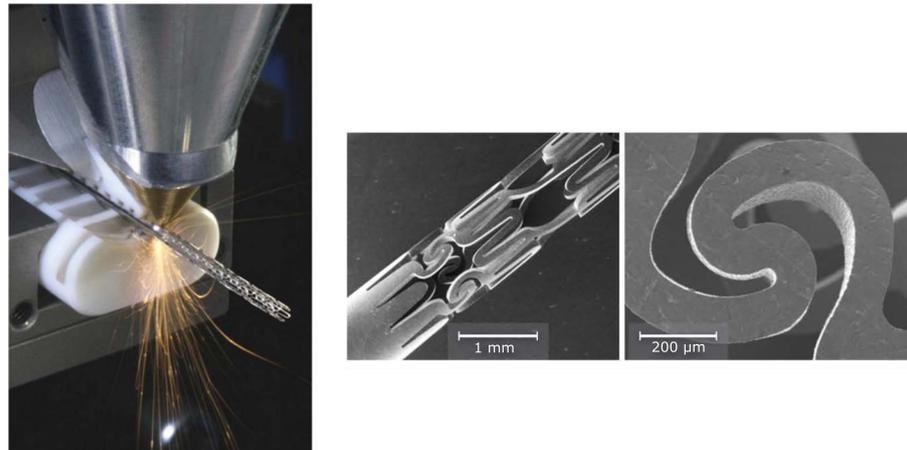


Figura 6.2: Instrumentos médicos utilizados con un láser de fibra óptica. a) Marca-pasos. b) Estent. c) Endoscopio. d) Trazo de vidrio. e) Marcado de un estent [54, 55].



(a) Láser de femtosegundos cortando un estent. (b) Muestra de corte del estent con diámetros pequeños de  $200 \mu\text{m}$

Figura 6.3: Diseño de un estent [54, 56].

### 6.2.3. Sistemas de comunicaciones

En el área de comunicaciones el láser de fibra óptica presenta una ventaja de alta transmisión de datos por medio de la modulación de la luz con la información a enviar. Otra ventaja de la fibra óptica es que permite transmitir una gran cantidad de información con un amplio ancho de banda. Actualmente se han investigado fenómenos ópticos no lineales asociados a los láseres de fibra óptica para el desarrollo de transmisiones ultrarrápidas.

# Artículos publicados

## Trabajos dependientes

### Artículo en memoria in extenso (Internacionales)

L. F. Samano-Aguilar, J. C. Hernandez-Garcia, J. M. Estudillo-Ayala, R. Rojas-Laguna, O. Pottiez, J. D. Filoteo-Razo, J. P. Lauterio-Cruz and D. Jauregui-Vazquez, “*Highly Efficient Self-Q-Switched Erbium-Ytterbium Fiber Laser Operating at High Output Powers*” in Frontiers in Optics 2016, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper JTh2A.32.

## Trabajos independientes

### Artículo en memoria in extenso (Internacionales)

F. J. Valle-Atilano, J. M. Estudillo-Ayala, J. D. Filoteo-Razo, J. C. Hernández-García, J. P. Lauterio-Cruz, D. Jáuregui-Vázquez, B. Ibarra-Escamilla, R. Rojas-Laguna, O. Pottiez, E. A. Kuzin, “*Polarization study of a supercontinuum light source for different wavelengths through a photonic crystal fiber*”, Proc. SPIE 9731, Nonlinear Frequency Generation and Conversion: Materials, Devices, and Applications XV, 973115 (March 4, 2016).

J. P. Lauterio-Cruz, J. C. Hernández-García, J. M. Estudillo-Ayala, O. Pottiez, R. Rojas-Laguna, J. D. Filoteo-Razo, L. F. Samano-Aguilar, D. Jauregui-Vazquez, “*Nu-*

*merical analysis of the supercontinuum spectrum generation in a couple of photonic crystal fibers with different structure by using the RK4IP method*”, Proc. SPIE 9743, Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices V, 97431I (March 14, 2016)

F. J. Valle Atilano, J. M. Estudillo-Ayala, J. D. Filoteo-Razo, J. C. Hernandez-Garcia, D. Jáuregui-Vázquez, J. M. Sierra-Hernandez, R. Rojas-Laguna, R. I. Mata-Chávez, L. F. Sámano-Aguilar, “*Generation of supercontinuum light in micro-structured fiber and polarization study at different wavelengths*”, Proc. SPIE 9958, Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications X, 995817 (October 7, 2016).

J. M. Estudillo-Ayala, J. D. Filoteo-Razo, F. J. Valle-Atilano, J. C. Hernandez-Garcia, D. Jauregui-Vazquez, J. M. Sierra-Herandez, R. Rojas-Laguna, R. Mata-Chavez, and R. Selvas-Aguilar, “*Analysis of Polarization of a broadband visible light source by inducing of twist in photonic crystal fiber*” in Latin America Optics and Photonics Conference, (Optical Society of America, 2016), paper LTu4A.40.

### **Artículo en memoria in extenso (Nacionales)**

J. D. Filoteo-Razo, J. M. Estudillo-Ayala, J.C. Hernández-García, D. Jáuregui-Vázquez, R. Rojas-Laguna, F. J. Valle-Atilano, L. F. Sámano-Aguilar, “*Sensor de color implementado con LEDs RGB*”, en número especial de Acta Universitaria Multidisciplinary Scientific Journal, vol. 26, núm. 1, febrero, 2016, pp. 24-29.

# Referencias

- [1] C. Jauregui, J. Limpert and A. Tünnermann, “*High-power fibre lasers*”, Nature Photonics 7, 861–867, (2013).
- [2] I. N. Duling , “*All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror*”, Opt. Lett. 16, 539-541, (1991).
- [3] K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus, L. E. Nelson, “*77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser*”, Opt. Lett. 18, 1080-1082, (1993).
- [4] A. Gonzalez-Garcia, B. Ibarra-Escamilla, O. Pottiez, E. A. Kuzin, F. Maya-Ordoñez, M. Durán-Sánchez, C. Deng, J. W. Haus and P. E. Powers, “*High efficiency, actively Q-switched Er/Yb fiber laser*”, Opt. Laser Technol. 48, 182-186, (2013).
- [5] Y. Xiao, F. Brunet, M. Kanskar, M. Faucher, A. Wetter and N. Holehouse, “*1-kilowatt CW all-fiber laser oscillator pumped with wavelength-beam-combined diode stacks*”, Opt. Express 20, 3296-3301, (2012).
- [6] W. Wang, L. Huang, J. Leng, L. Kong, S. Guo and Z. Jiang, “*2 kW CW near single mode all-fiber Ytterbium-doped fiber laser*”, Optik - International Journal for Light and Electron Optics 126, 1712-1715, (2015).
- [7] S. Li, X. Chen, D. V. Kuksenkov, J. Koh, M. J. Li, L. A. Zenteno and D. A. Nolan,

- “*Wavelength tunable stretched-pulse mode-locked all fiber erbium ring laser with single polarization fiber*”, Opt. Express 14, 6098-6102, (2006).
- [8] A. Chong, J. Buckley, W. Renninger, and F. Wise, “*All-normal-dispersion femtosecond fiber laser*”, Opt. Express 14, 10095-10100, (2006).
- [9] D. A. Dvoretzkiy, V. A. Lazarev, V. S. Voropaev, Z. N. Rodnova, S. G. Sazonkin, Stanislav O. Leonov, A. B. Pnev, V. E. Karasik, and A. A. Krylov, “*High-energy, sub-100 fs, all-fiber stretched-pulse mode-locked Er-doped ring laser with a highly-nonlinear resonator*”, Opt. Express 23, 33295-33300, (2015).
- [10] D. A. Chesnut and J. R. Taylor, “*Wavelength-versatile subpicosecond pulsed lasers using Raman gain in figure of eight fiber geometries*”, Opt. Lett. 30, 2982-2984, (2005).
- [11] J. Liu, Y. Chen; P. Tang, L. Miao, C. Zhao, S. Wen and D. Fan, “*Duration Switchable High-Energy Passively Mode-Locked Raman Fiber Laser Based on Non-linear Polarization Evolution*”, Photonics Journal, IEEE , vol.7, no.5, pp.1-7, (2015).
- [12] M. Salhi, A. Niang, F. Amrani, H. Leblond and F. Sanchez, “*High power continuous wave and pulsed single mode Er:Yb doped double-clad fiber laser*”, Transparent Optical Networks, 15th International Conference on , pp.1-4, 23-27, (2013).
- [13] S. M. Kobtsev, S. V. Kukarin, S. V. Smirnov, Y. S. Dedotov, “*High-energy mode-locked all-fiber laser with ultralong resonator*”, Laser Phys. 20, 351-356, (2010).
- [14] A. Komarov, F. Amrani, A. Dmitriev, K. Komarov, F. Sanchez, “*Competition and coexistence of ultrashort pulses in passive mode-locked lasers under dissipative-soliton-resonance conditions*”, Phys. Rev. A 87, 23838, (2013).
- [15] C. Lecaplain, P. Grelu, “*Multi-gigahertz repetition-rate-selectable passive harmonic mode locking of a fiber laser*”, Opt. Express 21, 10897-10902, (2013).

- [16] F. Ö. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark and F. W. Wise “*Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser*”, Phys. Rev. Lett. 92, (2004).
- [17] O. Pottiez, R. Grajales-Coutiño, B. Ibarra-Escamilla, E. Kuzin and J. C. Hernandez-Garcia, “*Adjustable noiselike pulses from a figure-eight fiber laser*”, Applied Opt. 50, E24, (2011).
- [18] M. Horowitz and Y. Silberberg, “*Control of Noiselike Pulse Generation in Erbium-doped fiber lasers*”, IEEE Photon. Technol. Lett. 10, 1389-1391, (1998).
- [19] L. M. Zhao, D. Y. Tang and J. Wu, “*Noise-like pulse in a gain-guided soliton fiber laser*”, Opt. Express 15, 2145-2150, (2007).
- [20] Vicente Aboites, “*Polarization locking in an isotropic, modelocked soliton Er/Yb fiber laser*”, Opt. Express 1, 12, (1997).
- [21] J. Hecht, “*Laser Pioneers*”, Academic Press,(1992).
- [22] S. T. Cundiff, B. C. Collings, W. H. Knox, “*El laser*”, Academic Press,(2001).
- [23] Francisco Javier Valle Atilano, “*Investigación de la polarización de una fuente de luz supercontinua en fibras de cristal fotónico*”, Tesis en Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica, ,Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca División de Ingenierías, (2016).
- [24] Ing. Marlen Alexis González-Reyna, “*Sensor de Temperatura basado en un interferómetro modal del tipo Mach-Zehnder de fibra óptica*”, Tesis de Maestría, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca División de Ingenierías, (2015).
- [25] M.I. J. C. Hernández-García, “*Estudio teórico-experimental de un láser de fibra de figura ocho y su aplicación en la generación de supercontinuo en fibras ópticas; estudio de la generación de supercontinuo en fibras micro-estructuradas a partir*

- de pulsos de nanosegundos*”, Tesis de Doctorado, Centro de Investigaciones en óptica CIO, (2012).
- [26] F. Gutiérrez Z. , “*Investigación del espejo de lazo óptico no lineal para aplicaciones en láseres sintonizables de fibra*”, Tesis de doctorado, INAOE (2005).
- [27] G. P. Agrawal, “*Nonlinear Fiber Optics*”, 3rd ed. (Academic Press, San Diego, (2001).
- [28] B. Ortaç, O. Schmidt, T. Schreiber, J. Limpert, A. Hideur, and A. Tünnermann, “*Approaching the Megawatt Peak Power from Mode-Locked Femtosecond Fiber Oscillator*”, in *Advanced Solid-State Photonics*, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America,(2008).
- [29] O. Schmidt, J. Rothhardt, F. Röser, S. Linke, T. Schreiber, K. Rademaker, J. Limpert, S. Ermeneux, P. Yvernault, F. Salin, and A. Tünnermann, “*Millijoule pulse energy Q-switched short-length fiber laser*”, *Opt. Lett.* 32, 1551-1553 (2007).
- [30] F. Stutzki, C. Gaida, M. Gebhardt, F. Jansen, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, “*Tm based fiber laser system with more than 200 MW peak power*”, *Opt. Lett.* 40, 9-12 (2015).
- [31] C. Gaida, M. Gebhardt, F. Stutzki, C. Jauregui, J. Limpert, and A. Tünnermann, “*Thulium-doped fiber chirped-pulse amplification system with 2 GW of peak power*”, *Opt. Lett.* 41, 4130-4133 (2016).
- [32] A. Demircan, U. Bandelow, “*Supercontinuum generation by the modulation instability*”, *Opt. Commun.* 244, 181- 185, (2005).
- [33] A.K. Abeeluck y C. Headley, “*Continuous-wave pumping in the anomalous- and normal-dispersion regimes of nonlinear fibers for supercontinuum generation*”, *Opt. Lett.* 30, 61-63, (2005).

- [34] M. Gonzalez-Herraez, S. Martin-Lopez, P. Corredera, M.L. Hernanz, P.R. Horche, “*Supercontinuum generation using a continuous-wave Raman fiber laser*”, Opt. Commun. 226, 323-328, (2003).
- [35] J. M. Dudley, G. Genty, y S. Coen, “*Study of an ultrahigh-numerical-aperture fiber continuum generation source for optical coherence tomography*”, Rev. Mod. Phys. 78, 1135-1184, (2006).
- [36] J.C. Hernández-García, J.M. Estudillo-Ayala, R. Rojas-Laguna, O. Pottiez, R.I. Mata-Chavez, J.M. Delgado-Negrete, E. Vargas-Rodríguez y J.A. Andrade-Lucio, “*Estudio experimental sobre la evolución de los efectos no lineales que generan un espectro supercontinuo en fibras de cristal fotónico usando pulsos con duracion de ns*”, Revista Mexicana de Física, Vol.57, Pag.528-534, (2011).
- [37] J. G. Gutierrez, M. Vargas-Treviño, C. Romero-Salazar y O. A. Hernández Flores, “*Influencia de la inestabilidad modulacional en la generacion de un espectro continuo en fibras opticas con pulsos de nanosegundos*”, Rev. Mex. Fis. 55, 359-366, (2009).
- [38] Claude Rulliere, “*Femtosecond Laser Pulses*”, Editorial Springer (2003).
- [39] M. Fabert, V. Kermène, A. Desfarges-Berthelemot, P. Blondy, A. Crunteanu, “*Actively mode-locked fiber laser using a deformable micromirror*”, Opt. Lett. 36, 2191, (2011).
- [40] Focuslight<sup>®</sup> hoja de datos del diodo laser modelo FL-DLS03-FCMSE55-I-25-976-5.
- [41] ITF Technologies<sup>®</sup> datasheet combinador de fibra óptica modelo MMC0211C4057.
- [42] Thorlabs<sup>®</sup> hoja de datos del acoplador de fibra optica 50/50, 80/20 y 90/10 @ 1550 nm (<https://www.thorlabs.com>). Último acceso: 18 de julio de 2016.

- [43] AdValue Photonics<sup>®</sup> hoja de datos del aislador modelo AP-ISO-1550PI (<http://www.advaluephotonics.com>). Último acceso: 18 de julio de 2016.
- [44] Thorlabs<sup>®</sup> hoja de datos del controlador de polarización modelo FPC560 (<https://www.thorlabs.com>). Último acceso: 18 de julio de 2016.
- [45] Corning<sup>®</sup> hoja de datos de la fibra óptica modelo SMF-28 (<http://ece466.groups.et.byu.net>). Último acceso: 18 de julio de 2016.
- [46] H. Injeyan and G. Goodno, “*High Power Laser Handbook*”, capítulo 15 Introduction to Optical Fiber Lasers, McGraw-Hill Education, United States, (2011).
- [47] Nufern<sup>®</sup> hoja de datos de la fibra óptica 12/130 Erbium/Ytterbium-Doped Multimode Double Clad Fibers, modelo MM-EYDF-12/130-HE (<http://www.nufern.com>). Último acceso: 18 de julio de 2016.
- [48] A. V. Kir’yanov, N. N. Il’ichev and Y. O. Barmenkov, “*Excited-state absorption as a source of nonlinear thermo-induced lensing and self Q-Switching in an all-fiber Erbium laser*”, Laser. Phys.1, No 4, pg 194-198, (2004).
- [49] S.G. Cruz Vicente, M.A. Martinez Gamez, A. V. Kir’yanov, Y. O. Barmenkov and M. V. Andrés, “*Diode-pumped self Q-switched erbium-doped all-fiber laser*”, Quantum electronics 34(4), pg 310-314, (2004).
- [50] S. Fu, Q. Sheng, X. Zhu, W. Shi, J. Yao, G. Shi, R. A. Norwood, and N. Peyghambarian, “*Passive Q-switching of an all-fiber laser induced by the Kerr effect of multimode interference*”, Opt. Express 23, 17255-17262, (2015).
- [51] J. P. Lauterio-Cruz, J. C. Hernandez-Garcia, O. Pottiez, J. M. Estudillo-Ayala, E. A. Kuzin, R. Rojas-Laguna, H. Santiago-Hernandez, and D. Jauregui-Vazquez, “*High energy noise-like pulsing in a double-clad Er/Yb figure-of-eight fiber laser*”, Opt. Express 24, 13778-13787, (2016).

- [52] R. Rangel Rojo, M. A. García Arthur, N. Jamasbi and M. Mohebi, “*Diseño de construcción de un autocorrelador de pulsos de femtosegundos usando absorción de dos fotones en un diodo luminiscente*”, Revista Mexicana de Física Vol. 49, (2003).
- [53] Femtochrome<sup>®</sup> hoja de datos del autocorrelador modelo FR-103XL (<http://www.femtochrome.com/Datasheets/FR-103XL%20Datasheet.pdf>).  
Último acceso: 06 de diciembre de 2016.
- [54] R. Mayerhofer, D. Mairhoermann, M. Müller, M. Röhner, M. Geiger, S. Holtz, C. Rüttimann, “*From CW to FS: Fiber Lasers for Medical Device Manufacturing*”, Proc. ICALEO, (2012).
- [55] L. Lucas and J. Zhang, “*Femtosecond laser micromachining: a back-to-basic primer*”, Industrial laser solutions, (2012).
- [56] M. Mielke, “*High Energy Ultra Fast Fiber Laser Systems at 1552 nm for Industrial Applications*”, FISC Workshop, (2010).