

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**“NUEVOS ESQUEMAS EXPERIMENTALES DE
LÁSERES SINTONIZABLES Y PULSADOS DE FIBRA
ÓPTICA”**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS CON OPCIÓN
TERMINAL EN TECNOLOGÍA ELÉCTRICA**

M.I.C.A. ROMEO EMMANUEL NUÑEZ GOMEZ

DIRECTOR: DR. GILBERTO ANZUETO SÁNCHEZ

DR. DARWIN MAYORGA CRUZ

DR. MIGUEL ANGEL BASURTO PENSADO

DR. HÉCTOR MANUEL CASTRO BELTRAN

DR. JESÚS CASTRELLÓN URIBE

DR. ALEJANDRO MARTÍNEZ RIOS

DR. JORGE LUIS CAMAS ANZUETO

CUERNAVACA, MORELOS

MAYO, 2018

RESUMEN.

Los láseres de fibra óptica son dispositivos que generan luz coherente a través de un proceso óptico de amplificación por emisión estimulada de la radiación y pueden clasificarse, dependiendo su régimen de operación, en láseres continuos (emisión de luz de manera continua) o láseres pulsados (emisión de luz de manera pulsada). Tienen una amplia gama de aplicaciones en comunicaciones ópticas, espectroscopía, sensores de fibra óptica, procesamiento de materiales, entre otros. En ciertas aplicaciones se requiere que la longitud de onda láser tenga la capacidad de ser controlada, es decir, que su emisión sea sintonizable, conmutable o generar múltiple emisión tanto para láseres continuos como pulsados.

En este proyecto de tesis, se proponen nuevos esquemas experimentales de láseres de fibra óptica, para la generación de láseres dopados con erbio sintonizables, conmutables y multi-longitud de onda, así como láseres pulsados de tipo Q-switch. Para lograr esta meta, se emplean dispositivos de fibra óptica dependientes de la longitud de onda, como son las rejillas de período largo y adelgazamientos en fibra óptica.

El control de la emisión se lleva a cabo empleando la sensibilidad de estos dispositivos a perturbaciones físicas (doblamiento, cambio en índice de refracción). Por otra parte, fibras ópticas co-dopadas con tulio y holmio se emplean como absorbedores saturables de luz en la generación de láseres pulsados Q-switch multi-longitud de onda, en conjunto con adelgazamientos de fibra para generar láseres altamente estables en términos longitud de onda emisión y potencia.

ABSTRACT.

Fiber lasers are optical devices that generate coherent light through an optical amplification process by stimulated emission of radiation and can be classified, depending on their operation regime, in continuous-wave lasers (continuous emission of light) or pulsed lasers (pulsed emission light). They have a wide range of applications in optical communications, spectroscopy, fiber optics sensors, optical processing, among others. In certain applications, it is required the laser wavelength has the capability of being controlled, i. e. tunable emission, switchable or multiple wavelength for both continuous-wave and pulsed lasers.

In this thesis project, new experimental schemes of fiber lasers are proposed in order to obtain tunable, switchable and multi-wavelength emission of erbium doped fiber lasers, as well as pulsed Q-switched fiber lasers. To achieve this goal, fiber optic devices with wavelength dependence, as long period fiber gratings and tapered optical fibers are employed.

The control of the emission is carried out employing the sensitivity of the fiber optic devices to various physical perturbations (bending, refractive index change). On the other hand, co-doped thulium and holmium doped fibers are used as light saturable absorbers in the generation of multi-wavelength Q-switched fiber lasers, in conjunction with tapered fibers to achieve highly stable lasers in terms of lasing wavelength and output power.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor, el Dr. Gilberto Anzueto Sánchez por todo el apoyo brindado en consejos, ideas, el conocimiento transmitido y sobre todo, el tiempo invertido en el desarrollo y culminación de este trabajo de tesis.

A mi comité tutorial por la revisión y corrección de la tesis, además de las revisiones semestrales en las que se aportaron ideas, consejos, comentarios y sugerencias.

Al Dr. Alejandro Martínez Ríos del Centro de Investigaciones en Óptica (66CIO), por la colaboración y facilitación de las herramientas tecnológicas y elementos que fueron clave en el proceso de experimentación de este trabajo.

Finalmente a CONACYT por la beca otorgada 378219.

DEDICADO A:

**MI COMPAÑERA:
JULIETA**

**A MIS PADRES:
ROMEO Y ELVIA**

**MI HERMANO:
DAVID**

ÍNDICE

Resumen.	ii
Abstract.	iii
Agradecimientos.	iv
Dedicatoria.	v
Índice.	vi
Índice de figuras.	ix
Índice de tablas.	xii
Nomenclatura.	xiii

Capítulo Uno 1

Introducción	1
1.1 Objetivo general.	2
1.2 Objetivos específicos.	2
1.3 Alcance.	3
1.4 Justificación.	3
1.5 Organización de la tesis.	5

Capítulo Dos. 6

2.1 Láseres de fibra óptica.	6
2.1.1 Láseres pulsados Q-switch.	9
2.2 Láseres de fibra óptica dopados con erbio.	12
2.3 Dispositivos sintonizables de fibra óptica: rejillas de período largo y adelgazamientos de fibra óptica.	17
2.3.1 Rejillas de período.	17
2.3.2 Fabricación y tipos de rejillas de período largo.	20
2.3.3 Adelgazamientos de fibra óptica.	24
2.3.4 Filtros Mach-Zehnder basados en adelgazamientos.	27

Capítulo Tres	30
3.1 Láser de fibra óptica dopado con erbio, multi-longitud de onda y conmutable basado en las características de sensibilidad cruzada de adelgazamientos de fibra.	30
3.2 Introducción.	30
3.3 Arreglo experimental y características de sensibilidad cruzada del filtro MZFI.	32
3.4 Características de emisión múltiple: resultados experimentales.	35
3.5 Conclusiones.	39
Capítulo Cuatro	40
4.1 Ajuste de la longitud de onda en láseres de fibra óptica, mediante la inscripción de LPFGs.	40
4.2 Introducción.	40
4.3 Fabricación Intra-cavidad de las LPFGs.	42
4.4 Resultados experimentales	44
4.5 Discusión.	47
4.6 Conclusiones.	48
Capítulo Cinco	49
5.1 Combinación de filtros basados en adelgazamientos de fibra, para selectividad de operación en láseres de fibra óptica dopados con erbio.	49
5.2 Introducción.	49
5.3 Arreglo experimental.	51
5.4 Sintonización y múltiple emisión: resultados experimentales.	53
5.5 Conclusión.	58

Capítulo Seis	59
6.1 Láser dopado con erbio Q-switch multi-longitud de onda, basado en fibras Tm-Ho como absorbedores saturables y asistido por filtros en adelgazamientos en fibra.	59
6.2 Introducción.	59
6.3 Arreglo experimental.	61
6.4 Operación láser Q-switch multi-longitud de onda.	64
6.5 Discusión de los resultados.	68
6.6 Conclusión.	69
Capítulo Siete	70
7.1 Comparación de resultados obtenidos.	71
Capítulo Ocho	74
7.1 Conclusiones y recomendaciones.	74
Bibliografía	77
Anexo 1	90

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Esquema básico de un láser de fibra óptica [1].	7
Figura 2. Rangos de longitudes de onda demostrada para diferentes fibras dopadas con tierras raras [1].	9
Figura 3. Principio de operación de un láser Q-switch.	10
Figura 4. Niveles de energía de absorción y emisión del erbio [11].	12
Figura 5. Espectro de emisión de fluorescencia de una fibra dopada con erbio .	14
Figura 6. Evolución de fluorescencia de un láser dopado con erbio en configuración de anillo.	15
Figura 7. Esquema de una rejilla de período largo y su principio de operación.	18
Figura 8 (a) Rejilla de período largo fabricada por UV, b) rejilla fabricada por desbaste químico [21].	20
Figura 9. (a) Rejillas generadas por láser de CO ₂ , (b) rejillas por arco eléctrico [21].	21
Figura 10. (a) Rejillas producidas por ondas de flexión, (b) rejillas fabricadas por presión.	21
Figura 11. Adelgazamiento en fibra óptica monomodal.	24
Figura 12. Filtro Mach-Zehnder basado en adelgazamientos concatenados.	27
Figura 13. Espectro de transmisión de un par de adelgazamientos concatenados [31].	28
Figura 14. (a) Arreglo experimental del láser en configuración de anillo, (b) mecanismo para inducir doblamiento e índice de refracción.	32
Fig. 15. Espectro de referencia y espectro modificado de fluorescencia, para una curvatura de 1.146 m ⁻¹ y cambio en índice de refracción externo.	34
Figura 16. Variación de la visibilidad de franjas en función de la curvatura para diferentes índices de refracción.	35

Figura 17. (a) Emisión láser para índice de refracción en aire ($n=1$) y cambio en curvatura (de 0 m^{-1} a 3.169 m^{-1}), (b) emisión láser para aceite de olivo ($n=1.4692$) y curvatura para los rangos de curvatura anteriores.	36
Figura 18. (a) Emisión láser para glicerol ($n=1.4709$) y variación de curvatura(b) emisión láser para tritón ($n=1.4913$) y cambio en nivel de curvatura.	37
Figura 19. Evolución espectral en la fabricación de una rejilla de período largo.	42
Figura 20. Arreglo experimental del láser de fibra óptica y arreglo para el grabado de rejillas de período largo	43
Figura 21. Ajuste de la emisión láser en función de el período de descarga eléctrica.	44
Figura 22. Espectro de emisión para tres y seis períodos de la LPFG	45
Figura 23. Profundidad de la banda de atenuación y longitud de onda láser como función del número de períodos	46
Figura 24. (a) Arreglo experimental del láser en anillo, (b) mecanismo para inducir curvatura, (c) filtro basado en adelgazamientos concatenados	51
Figura 25. Espectro de transmisión de los filtros concatenados	52
Figura 26. Sintonización de la emisión láser en función de la curvatura aplicada	54
Figura 27. Múltiple emisión y conmutación de la emisión láser en función de la curvatura aplicada	55
Figura 28. (a) Estabilidad de la distribución de doble emisión en el tiempo, (b) desviación de potencia en función del tiempo.	56
Figura 29. (a) Estabilidad de la distribución de triple emisión en el tiempo, (b) variación en potencia de la triple emisión en intervalo de 60 minutos	57
Figura 30. a) Arreglo experimental del láser Q-switch multi-longitud de	

onda, b) filtro peine formado por dos adelgazamientos con separación de 23 cm.	62
Figura 31. a) Emisión a 1533.44 nm antes del régimen Q-switch, b) tasa de repetición del pulso y duración como función de la potencia de bombeo, c) espectro del láser ensanchado y escaneado 30 min, d) recuadro de la figura 31 (c) .	63
Figura 32. Transmisión espectral del filtro en adelgazamientos (línea punteada) caracterizada empleando la fluorescencia de la fibra de Er (línea sólida). Triple emisión láser (línea punteada roja)	64
Figura 33. Repetición del pulso Q-switch y duración en función de la potencia de bombeo.	65
Figura 34. Cuatro diferentes trenes de pulsos, mostrando diferentes tasas de repetición.	66
Figura 35. El comportamiento de la potencia de emisión laser y la energía de pulsos en función del bombeo,	67
Figura 36. a) Distribución espectral de la triple emisión, tomadas cada 5 minutos en un intervalo de una hora, b) desviación máxima de 0.03 nm, c)desviación de potencia para las respectivas líneas láser.	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de los diferentes tipos de rejillas de periodo largo [21].	22
Tabla 2. Comparación de resultados obtenidos del capítulo 3 con resultados demostrados en la literatura.	70
Tabla 3. Comparación de resultados obtenidos del capítulo 4 con resultados demostrados en la literatura.	71
Tabla 4. Comparación de resultados obtenidos del capítulo 5 con resultados demostrados en la literatura.	72
Tabla 5. Comparación de resultados obtenidos del capítulo 6 con resultados demostrados en la literatura.	73

NOMENCLATURA

ω	Frecuencia angular	$rad \cdot seg^{-1}$
g_0	Ganancia del medio activo	dB
ϕ	Diferencia de fase entre modos acoplados y del núcleo	
λ	Longitud de onda óptica	m
Λ	Rango espectral libre	m
Δn	Diferencia de índices de refracción del núcleo y revestimiento	
z	Posición longitudinal	m
Q	Factor de calidad	
N	Nivel de población de los iones	m^3
L	Longitud de separación	m
l	Valor de perdidas de la cavidad	dB
Λ	Periodo espacial de la rejilla de periodo largo	m
σ_e	Emisión por sección transversal	m^2
σ_a	Absorción por sección transversal	m^2
λ_{res}	Longitud de onda de resonancia	m
T_{co}	Transmisión	
n_{effco}	Índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra	
n_{effcla}	Índice de refracción efectivo del revestimiento de la fibra	
C_{co-m}	Campo eléctrico normalizado	$kg \cdot m \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$

CAPÍTULO UNO

INTRODUCCIÓN.

Los láseres de fibra óptica dopados con tierras raras, tanto continuos como pulsados, son sistemas que emiten radiación láser en una amplia gama de longitudes de onda, utilizando diferentes dopantes como: erbio (1.5-1.6 μm), iterbio (0.97-1.2 μm), neodimio (1-1.15 μm), tulio (1.7-2.1 μm), holmio (2.04-2.1 μm), praseodimio (1.06-1.11 μm). Poseen una amplia gama de áreas de aplicación, entre las que destacan sistemas de comunicaciones ópticas, sensores de fibra, sistemas de multiplexión WDM, instrumentos ópticos de prueba, espectroscopía, ablación láser, corte y soldadura.

Una característica importante de los láseres de fibra óptica es su capacidad de manipulación espectral. La longitud de onda de emisión láser puede ser sintonizada, puede conmutar o en su caso generar múltiples oscilaciones (características requeridas en las aplicaciones anteriormente descritas), en un rango de longitudes de onda disponibles dentro del ancho de banda de ganancia, asociada a cada uno los diferentes dopantes. Llevar acabo éste control espectral requiere la implementación intracavidad de dispositivos de filtrado óptico sintonizables. En muchos casos se emplean elementos de bulto (rejillas de difracción, espejos dicroicos) o dispositivos fabricados totalmente de fibra óptica (rejillas de Bragg, fibras polarizadas, fibras fotónicas, interferómetros de fibra). Estos últimos tienen una ventaja importante sobre los de bulto, debido a que se pueden implementar sistemas láser con todos sus componentes de fibra óptica (*all-fiber lasers*), generando sistemas robustos y compactos, con una alta estabilidad en cuanto a longitud de onda y potencia de emisión.

Dos tipos de filtros sintonizables de fibra óptica alternativos a los anteriormente descritos, populares y ampliamente estudiados son las rejillas

de período largo y los adelgazamientos de fibra; elementos de relativo bajo costo de fabricación (generalmente fabricados en fibras monomodales SMF-28) y tamaño compacto. Sus características espectrales pueden ser manipulables mediante perturbaciones externas (índice de refracción, curvatura, temperatura, tensión, etc.) e insertados en una cavidad láser de fibra pueden generar emisión sintonizable, conmutable o emisión múltiple.

Con base en lo anterior, en este trabajo se propone aplicar nuevos esquemas y propuestas de control de láseres de fibra óptica para la generación de láseres dopados con erbio sintonizables, conmutables, multi longitud de onda y pulsados tipo Q-switch, empleando dos tipos de filtros sintonizables: rejillas de periodo largo y adelgazamientos en fibra óptica. En caso de la producción de láseres pulsados, se considera la implementación de absorbedores saturables de fibra óptica (fibras co-dopadas con tulio y holmio) como elemento modulador y generador de pulsos ópticos.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Implementar y caracterizar la respuesta de esquemas de láseres sintonizables y pulsados basados en fibra óptica, empleando filtros todo fibra como dispositivos moduladores, para potenciales aplicaciones en ingeniería.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer y estudiar diferentes esquemas de láseres de fibra, para obtener, sintonización, conmutación, multi-emisión láser o la generación de láseres pulsados Q-switch
- Implementar rejillas de período largo y adelgazamientos de fibra óptica como dispositivos para la modulación de la emisión láseres dopados con erbio.

- Emplear perturbaciones externas a los elementos de fibra sintonizables, como doblamiento, cambio en índice de refracción, tensión, o una combinación entre estos.
- Generar láseres de fibra óptica pulsados tipo Q-switch pasivos, utilizando absorbentes saturables de fibra óptica (Tm-Ho).
- Abarcar el rango de emisiones de longitudes de onda láser de las fibras dopadas con erbio en la banda óptica C, rango entre 1530 nm a 1565 nm.

1.3 ALCANCE

El alcance está centrado en generar emisión láser continua y pulsada, sintonizable en el infrarrojo cercano (1550 nm), empleando láseres de fibra óptica dopados con erbio en configuraciones de anillo, desarrollando sistemas versátiles, estables y adecuados para diversas aplicaciones en ingeniería.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El control de la longitud de onda de emisión es una característica crucial en el desarrollo de láseres de fibra óptica dopados con tierras raras, ya que una gran cantidad de aplicaciones tecnológicas (comunicaciones ópticas, sistemas WDM, espectroscopía, sensores, etc.) requieren el uso de fuentes de luz láser en un rango determinado de longitudes de onda. Un ejemplo se da en los sistemas de multiplexión por longitud de onda, en los cuales se requiere la transmisión de una determinada cantidad de información en múltiples canales o longitudes de onda. En espectroscopía surge la necesidad de caracterizar materiales irradiándolos con luz coherente en un rango diferente de longitudes de onda. En este sentido, es más factible

implementar un solo láser con capacidad de seleccionar ciertas longitudes de onda, que implementar diferentes láseres para solucionar una misma condición de aplicación. No obstante, un láser de fibra óptica puede operar en un régimen continuo o pulsado, éste puede sintonizar y conmutar en longitud de onda, o en su caso operar en múltiples longitudes de onda. Generar cualquiera de estos modos de operación requiere la implementación intracavidad de dispositivos adicionales y adecuados de filtrado óptico. Muchos de estos filtros suelen presentar un alto costo además de tener procesos de fabricación complejos. Estos elementos pueden ser dispositivos como rejillas de Bragg, fibras fotónicas, fibras polarizadas absorbentes saturables, moduladores electro ópticos y electro acústicos entre otros. En otros casos, pueden requerir alineamiento óptico dentro de la cavidad (rejillas de difracción, prismas, lentes) creando sistemas voluminosos y complejos.

En razón de lo expuesto, surge la necesidad de generar nuevas alternativas en la generación de láseres de fibra óptica dopados con erbio sintonizables y conmutables, así como multi emisión y pulsados Q-switch, empleando filtros ópticos de bajo costo como rejillas de periodo largo, adelgazamientos de fibra óptica y absorbentes saturables (basados en fibra óptica). De esta manera, se busca generar láseres en el infrarrojo cercano, novedosos, con filtros de relativo bajo costo de fabricación e implementación directa, satisfaciendo efectivamente los requerimientos propios de un sistema de láser de fibra óptica.

1.5 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En capítulo 2 se presentan la teoría fundamental para la realización de esta tesis, en la cual se describen los conceptos de láseres de fibra óptica, láseres pulsados y el principio de funcionamiento de las rejillas de periodo largo y adelgazamientos en fibra.

Los resultados experimentales se reportan desde el capítulo 3 hasta el capítulo 6 con la siguiente organización: cada capítulo presenta un pequeño resumen e introducción a la problemática de láseres de fibra y los métodos que se emplean para contrarrestarla. Un subcapítulo que describe los arreglos experimentales de láseres de fibra óptica implementados y sus componentes ópticos, además de presentar los métodos de fabricación de los filtros de fibra empleados y sus características espectrales. Un subcapítulo en el que se presentan a detalle los resultados experimentales además de una amplia discusión. Al final de cada capítulo se incluyen las conclusiones más relevantes de los resultados obtenidos. En el capítulo 7 se presentan tablas comparativas de los resultados obtenidos con algunos publicados en la literatura. Por ultimo, en el capítulo 8, se hacen las conclusiones finales y se exponen los puntos alcanzados con la realización de ésta tesis, remarcando también las recomendaciones para el desarrollo de un trabajo a futuro, el cual enriquecerá de manera sustancial los resultados contenidos en este tema de tesis.

CAPÍTULO DOS

2.1 LÁSERES DE FIBRA ÓPTICA

Los láseres de fibra óptica son dispositivos fotónicos, que generan emisión láser empleando como medio de ganancia una fibra óptica dopada con tierras raras [1]. Su desarrollo se da en 1961, a la par con el primer láser de rubí, en el cual Snitzer *et. al.* propuso el uso de guías de onda dieléctricas en forma de pequeñas fibras como un selector de modos [2]. Posteriormente, ese mismo año demostró oscilación láser empleando vidrio crown de bario dopado con neodimio [3] y para 1964 junto con Koester *et. al.* demostraron oscilación láser empleando una fibra dopada con neodimio [4]. En las décadas posteriores se demostraron láseres de fibra en matriz de sílice por Stone *et. al.* [5,6]. Para la década de los años 80, los láseres de fibra tuvieron un segundo auge gracias al desarrollo, avance y disponibilidad de tecnología para la fabricación de fibras ópticas dopadas, así como de diodos láser de mayor potencia, en el cual se desarrollaron fibras láser dopadas con neodimio y erbio [7] y la operación del primer láser de neodimio en régimen continuo, bombeado con un diodo láser GaAlAs [8].

Un láser de fibra óptica está constituido, al igual que otro tipo de láseres, de un sistema de bombeo o excitación, un medio de ganancia y una cavidad óptica resonante, como muestra la figura 1:

- El medio de ganancia: en este tipo de láseres se obtiene mediante el dopaje de fibras ópticas con diferentes tierras raras, como el erbio (Er^{+3}), iterbio (Yb^{+3}), tulio (Tm^{+3}), holmio (Ho^{+3}), neodimio (Nd^{+3}), praseodimio (Pr^{+3}) y samario (Sm^{+3}). Otro tipo de láseres de fibra óptica operados mediante efectos no lineales, permiten al igual proporcionar un incremento de ganancia, tales como el esparcimiento Raman y el esparcimiento Brillouin.

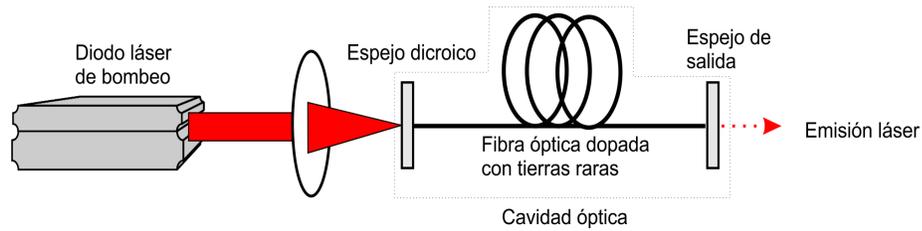


Figura 1. Esquema básico de un láser de fibra óptica[1].

- **Proceso de bombeo:** el bombeo excita a los iones de las tierras raras a niveles de energía superiores, los cuales crean una inversión de población generando amplificación y emisión láser [10]. Generalmente, el bombeo proviene de otra fuente láser y comúnmente se emplean diodos láser, disponibles en una amplia gama de longitudes de onda, que van desde el espectro visible (600 nm) hasta el infrarrojo cercano en 2200 nm. Por lo regular están acoplados a fibras ópticas monomodales o multimodales, lo cual facilita el acoplamiento (de fibra a fibra) en la cavidad láser [11].
- **Resonador:** el resonador o cavidad óptica se forma colocando dos espejos (en su forma mas básica mostrada en la figura1) en los extremos de la fibra óptica, en la cual, la luz viaja de un extremo a otro (reflejada en un extremo y parcialmente reflejada en el otro) sobre el medio de ganancia, generando un proceso retroalimentación y amplificación de la luz. Se han desarrollado distintos tipos de cavidades, como las lineales, también conocidas como Fabry-Perot (figura 1) empleando espejos [12]. En otros casos, configuraciones todo-fibra insertando en la cavidad rejillas de Bragg [13], cavidades que forman un anillo [14] y otras menos empleadas como las Fox-Smith [15].

Las ventajas de emplear elementos todo-fibra en el diseño de las cavidades, hace a los láseres de fibra sistemas robustos, compactos, y de fácil implementación (eliminando elementos de bulto como espejos, colimadores, rejillas de difracción y elementos de alineación ópticos) y bajas pérdidas por inserción. En comparación con láseres de semiconductor o láseres de estado sólido, los láseres de fibra ofrecen buena calidad de haz, una buena estabilidad de la longitud de onda con la temperatura y un relativo bajo costo. Algunas otras ventajas son la inmunidad en ambientes difíciles y alta fiabilidad; pueden operar por décadas. Por otra parte, sus desventajas son la generación de efectos no lineales en la generación de láseres de alta energía, como la modulación de auto-fase o el esparcimiento Raman.

Debido a las características de transición láser de las diferentes tierras raras empleadas en el dopaje de fibras láser, se tiene una gama amplia de longitudes de emisión disponibles, las cuales abarcan desde el ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo medio, con amplios rangos de sintonización. Estos rangos de emisión se muestran en la figura 2, para láseres de fibra en matriz de vidrio. De esta figura se observa que, para el samario, se han obtenido las emisiones láser más cortas (650 nm) y las más largas para el holmio (2260 nm) [1].

En términos de régimen de operación temporal, los láseres de fibra al igual que cualquier otro tipo de láser, se clasifican en dos; los que operan en onda continua (CW) y los láseres pulsados. Los continuos emiten un haz de forma continua en el tiempo, mientras que los pulsados emiten trenes de pulsos ópticos, con características de alta energía, potencias de emisión altas y tasas de repetición de sus pulsos en escala desde algunos micro segundos hasta femto segundos. Estos últimos tienen aplicaciones directas en micro-maquinado, ablación de materiales, entre otras.

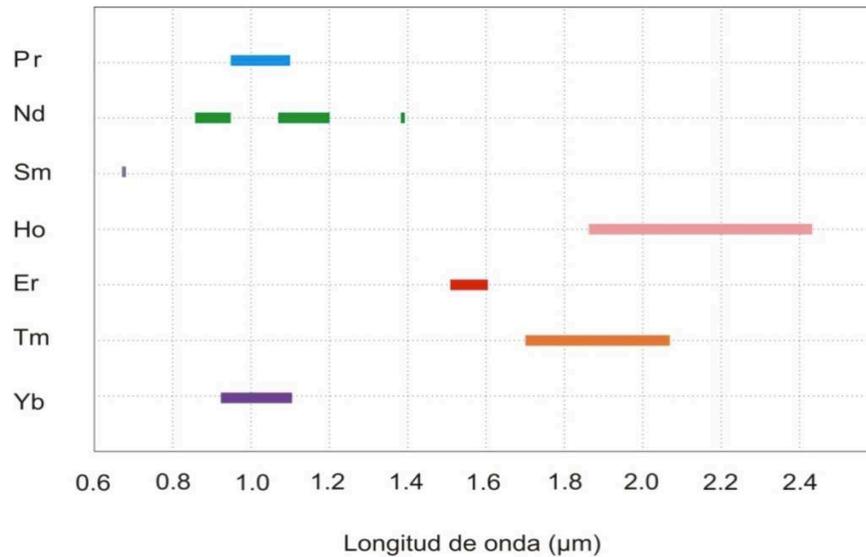


Figura 2. Rangos de longitudes de onda demostrada para diferentes fibras dopadas con tierras raras [1].

De acuerdo a su emisión espectral, los láseres de fibra pueden emitir desde una sola longitud de onda hasta múltiples longitudes de onda, con la posibilidad de sintonización o conmutación, en amplios rangos dinámicos espectrales. Generalmente para ello se emplean dispositivos de filtrado óptico o elementos de fibra dependientes de la longitud de onda, los cuales modifican el perfil de ganancia generado por los diferentes dopantes de las fibras láser. Estos elementos son rejillas de Bragg, polarizadores ópticos, rejillas de período largo (LPFG), adelgazamientos en fibra, interferómetros, entre otros. Desde una perspectiva general, los láseres de fibra óptica tienen aplicaciones en sistemas de comunicaciones ópticas, sensado óptico remoto, espectroscopía, aplicaciones médicas, procesamiento de materiales, sistemas WDM.

2.1.1 LÁSERES PULSADOS Q-SWITCH

Un láser pulsado es un dispositivo que emite luz en forma de trenes de pulsos. Existen tres principales regímenes temporales en la operación de

láseres de fibra óptica así como láseres de estado sólido: los de onda continua, Q-switch y Mode-Locking [11].

En particular, un láser de fibra óptica Q-switch es un láser que genera pulsos empleando la técnica de conmutación del factor Q en la que se modulan las pérdidas dentro de la cavidad láser, ya sea de forma pasiva o activa para producir pulsos de alta energía y potencia en la escala de nanosegundos [16]. Su principio de operación es la rápida variación del factor Q de un nivel alto a un nivel más bajo, el cual está ejemplificado en la figura 3. El factor Q es una medida del valor de amortiguamiento de los modos en una cavidad resonante, que se da como [17] :

$$Q = \omega \frac{\text{Energía Almacenada}}{\text{Energía Disipada}}, \quad (1)$$

Inicialmente en la condición en la que el factor Q se encuentra en un nivel muy bajo (las pérdidas en la cavidad son altas), el bombeo constante en la cavidad láser de fibra produce una inversión de población y al instante en que las pérdidas son moduladas a un nivel mínimo (factor Q alto) la radiación comienza a formarse en el resonador desde emisión estimulada.

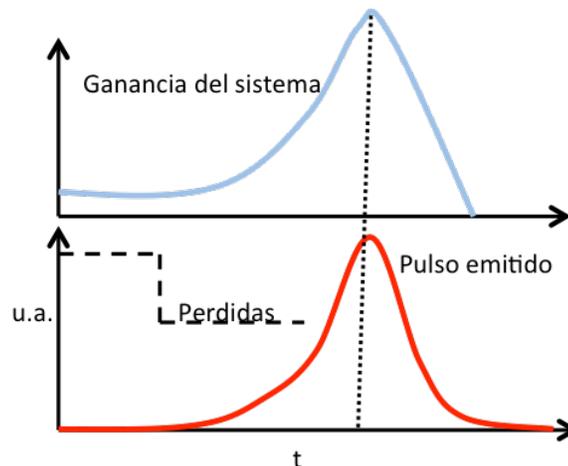


Figura 3. Principio de operación de un láser Q-switch.

Después de un período de tiempo debido al alto nivel de inversión de población, la dinámica del láser (a través emisión estimulada) genera un pulso de alta intensidad dentro de un período corto de tiempo llamado pulso Q-switch o pulso gigante [11].

Existen dos métodos para la modulación de las pérdidas en la cavidad de láseres Q-switch: activos y pasivos. Los moduladores activos principalmente son dispositivos electro-ópticos o electro-acústicos, operados por señales eléctricas. La variación de la señal eléctrica modifica, en el caso de los electro-acústicos una onda de presión de aire que difracta el haz que circula sobre el elemento. En el caso del electro-óptico se utiliza una celda Pockel, la cual modifica el índice de refracción.

Para los moduladores pasivos, se emplean absorbedores saturables, elementos que presentan cierto grado de absorción de la luz, la cual se reduce a intensidades ópticas altas. Estos absorbedores saturables son elementos como SESAM (*semiconductor saturable absorber mirror*), cristales como el Cr: Yag o materiales como nanotubos de carbón.

En el caso de los moduladores pasivos, el control de las características de la emisión del pulso tales como el ancho del pulso y su frecuencia se modulan mediante la variación en la potencia de bombeo. La energía de los pulsos y potencia depende en gran medida de las características intrínsecas del láser de fibra, así como también las del absorbedor saturable.

Existen diversas aplicaciones de este tipo de láseres pulsados, entre los que están el corte de materiales, perforación y marcado, sensado remoto, aplicaciones médicas en la piel, entre otras.

En el trabajo de experimentación de la presente tesis, se emplea como modulador pasivo en la generación de un láser pulsado Q-switch dopado con erbio, una sección de fibra co-dopada con diferentes tierras raras, como lo es el tulio y holmio. Esta sección de fibra tiene características de absorción en la zona de emisión del erbio y su dinámica temporal permite la oscilación láser de forma pulsada.

2.2 LÁSERES DE FIBRA ÓPTICA DOPADOS CON ERBIO.

El primer láser de fibra óptica fue desarrollado en la universidad de Southampton en año de 1986 [18]. Los láseres de fibra óptica dopados con erbio (EDFL) son sistemas operan en una amplia banda de emisión situada entre 1.5 μm y 1.62 μm , de gran importancia en comunicaciones ópticas ya que en este rango de longitudes de onda se tienen las menores pérdidas de transmisión en una fibra óptica.

Los principales niveles de absorción y emisión de energía del erbio en matriz de sílice se muestran en la figura 4, siendo la transición energética de alta ganancia y de mayor interés entre los niveles $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, la cual genera emisión láser centrada alrededor de 1550 nm.

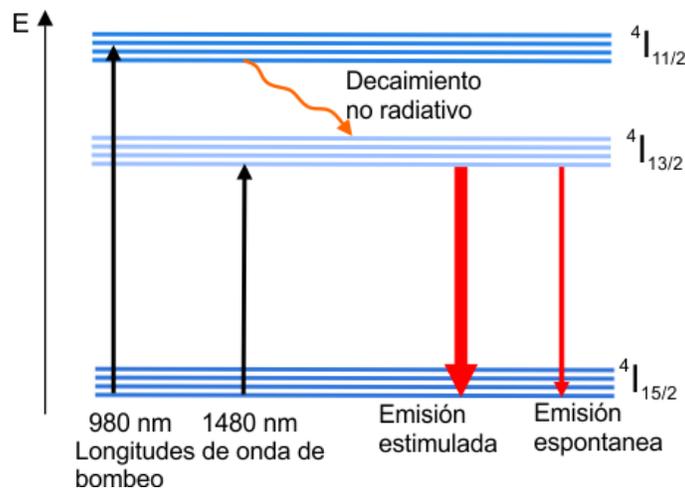


Figura 4. Niveles de energía de absorción y emisión del erbio [11].

Al bombear la fibra dopada con erbio con alguna de las bandas disponibles de bombeo (ver figura 4), los iones de erbio que se encuentran en el estado fundamental $^4I_{15/2}$ absorben la señal y son excitados a niveles de energía superiores, como ejemplo, para el bombeo a una longitud de onda de 980 nm, estos se excitan y pueblan el nivel $^4I_{11/2}$. Posteriormente, los iones decaen rápidamente de una forma no radiativa (en forma de vibración generando

energía térmica) hasta el nivel metaestable $^4I_{13/2}$. El corto tiempo de vida de los niveles de bombeo en relación con el tiempo de vida del estado metaestable (8-10 ms para erbio en sílice), permite la acumulación de iones en el nivel metaestable y la formación de inversión de población entre el nivel láser menor (fundamental) y el superior (metaestable), generando emisión estimulada. Por lo tanto, es esencialmente una transición de tres niveles. Para las longitudes de onda de emisión cercanas a 1600 nm, las transiciones de decaimiento finalizan en niveles superiores menos poblados, por lo tanto son transiciones de cuasi-cuatro niveles.

Las longitudes de onda de bombeo mayormente empleadas en láseres de fibra dopados con erbio son 980 nm y 1480 nm, ya que estas bandas esencialmente están libres de absorción de estado excitado (ESA), fenómeno que causa una pérdida indeseable de fotones de bombeo reduciendo la eficiencia del sistema láser [19]. También estas bandas se encuentran parcialmente libres de conversión hacia arriba (*up conversion*), que es la excitación de iones de erbio a niveles de energía mucho más altos, los cuales decaen generando emisión de fotones en color verde. Bombear con 1480 nm presenta la ventaja de proximidad entre las longitudes de onda de bombeo y emisión láser, lo que implica la mayor pendiente de eficiencia láser, mucho mayor en comparación con el bombeo de 980 nm por un factor de 1.5 [1]. Por otra parte, la eficiencia en ganancia es generalmente menor para el bombeo a 1480 nm que para 980 nm. La selección entre estas dos bandas de bombeo en el diseño de EDFL depende de sus características propias, es decir, de acuerdo a las necesidades de generar láseres con las mejores características de emisión (longitud de onda, potencia de emisión, eficiencia de óptica).

Otras bandas de bombeo disponibles pero menos empleadas, incluyen las bandas de 514 nm, 532 nm y 810 nm (no incluidas en la figura 4), sin embargo 514 nm y 810 nm sufren una alta absorción del estado excitado.

La ganancia depende de los niveles de población entre los niveles ${}^4I_{13/2}$ y ${}^4I_{15/2}$ y generalmente esta dada como:

$$g_0 = \sigma_e(\lambda)N_{13/2} - \sigma_a(\lambda)N_{15/2}, \quad (1)$$

de la cual, g_0 es el valor de la ganancia del medio activo, $N_{13/2}$ y $N_{15/2}$ es la densidad de población de los iones de erbio en los respectivos niveles, σ_e y σ_a son la emisión y absorción por sección transversal dependientes de la longitud de onda. En la figura 5, se muestra el espectro de emisión de fluorescencia de una fibra óptica dopada con erbio (LIEKKI Er16-8/125) de 3 m de longitud, la cual es bombeada con un diodo láser a 980 nm.

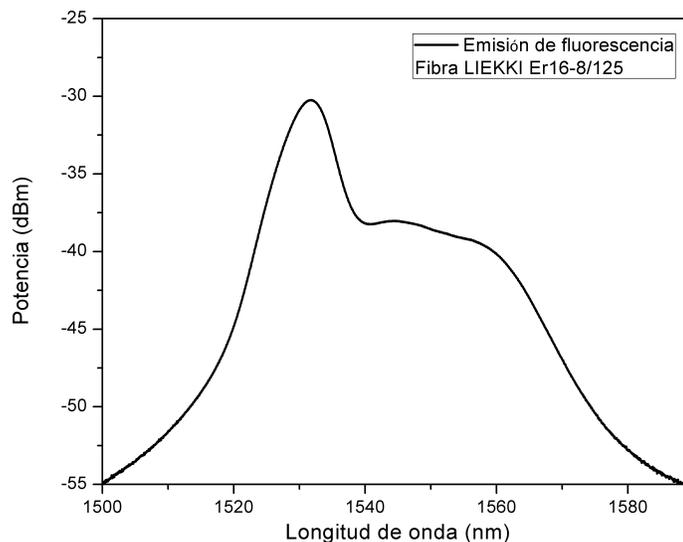


Figura 5. Espectro de emisión de fluorescencia de una fibra dopada con erbio .

El espectro de fluorescencia mostrado en la figura 5 es típico de una fibra dopada con erbio en matriz de sílice y pertenece a la caracterización óptica realizada en este trabajo. Como en otros láseres, para generar emisión estimulada, el nivel de ganancia del sistema láser debe igualar las pérdidas

en la cavidad, al ocurrir esta condición; el sistema láser se encuentra operando en el nivel de umbral, es decir $g_0 = l$, donde l es el valor de las pérdidas. Al ser $g_0 > l$, se establece la oscilación láser. Este comportamiento se observa en la figura 6, para un EDFL en configuración de anillo en la cual se observa la evolución de fluorescencia para distintos niveles de bombeo en la cavidad, siendo el valor de 99 mA de corriente de bombeo el nivel de umbral. Posteriormente, se establece la oscilación láser a 100 mA de corriente de bombeo, en una longitud de onda ~ 1563 nm.

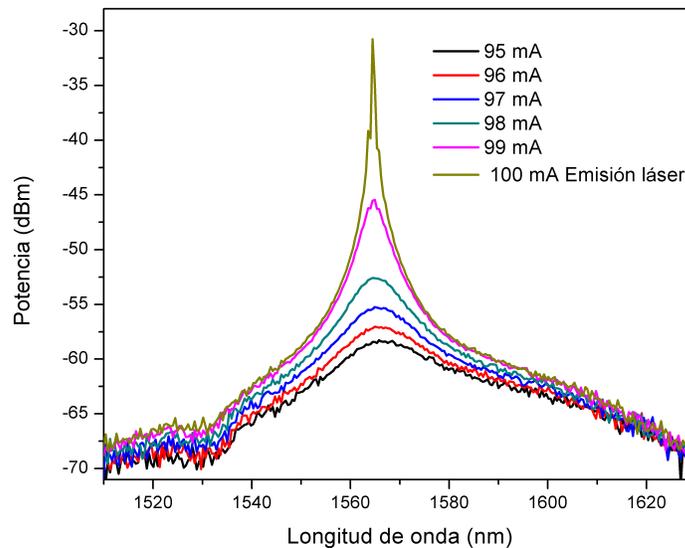


Figura 6. Evolución de fluorescencia de un láser dopado con erbio en configuración de anillo.

Un parámetro importante en el diseño de un EDFL es la longitud de fibra dopada con Er^{+3} , ya que esencialmente es un sistema de tres niveles, ésta afecta el umbral, la eficiencia de conversión y la longitud de onda de emisión [1]. Cualquier longitud de fibra óptica que no es bombeada, actúa como un absorbedor de la longitud de onda láser, incrementando el nivel de umbral. La selección óptima entre el bombeo y longitud de fibra minimiza este parámetro. Por otro lado, una longitud larga de fibra absorbe totalmente el bombeo, produciendo un incremento en la potencia de salida. Existe una

compensación o equilibrio entre estos dos efectos, los cuales dependen de la potencia de bombeo disponible.

En cuanto a la longitud de onda, a medida que se incrementa la sección de fibra dopada, la longitud de onda tiende a desplazarse hacia longitudes de onda más largas. Esto se debe a que el final de la fibra se encuentra lejos de la fuente de bombeo, ocasionando una absorción de la señal preferentemente hacia longitudes de onda cortas del perfil de ganancia, en donde la absorción del estado fundamental o base es mas fuerte. Este comportamiento se entiende como un sistema cuasi-cuatro niveles, en la que las longitudes de onda largas se favorecen por la longitud de fibra [1]. Esta dependencia es afectada por la concentración del dopante y puede manifestarse de una forma abrupta o suave [1]. Éste parámetro es de suma importancia en EDFL sintonizables, ya que resulta impráctico acortar o alargar la longitud de fibra dopada para obtener emisión láser en longitudes de onda específicas, dependiendo de la aplicación requerida. Es muy factible seleccionar cierta longitud de fibra dopada y posteriormente implementar dispositivos sintonizables en la cavidad láser, tema que se aborda en subsecuentes secciones de esta tesis.

Una de las aplicaciones mas importantes de los EDFL son las comunicaciones ópticas a grandes distancias. Como se mencionó previamente, las pérdidas por transmisión a esta longitud de onda son de ~ 0.2 dB/km. Entre otras se encuentran aplicaciones en espectroscopía, sensado óptico, sistemas WDM. Incluso sirven como fuentes de bombeo para otros láseres de fibra óptica, como los láseres dopados con Tm^{+3} .

2.3 DISPOSITIVOS SINTONIZABLES DE FIBRA ÓPTICA: REJILLAS DE PERÍODO LARGO Y ADELGAZAMIENTOS DE FIBRA ÓPTICA.

En esta sección, se hace una introducción a las características y principio de funcionamiento de dos tipos de dispositivos de fibra óptica empleados como filtros espectrales para la manipulación de láseres de fibra óptica: rejillas de período largo y los adelgazamientos en fibra.

2.3.1 REJILLAS DE PERÍODO LARGO.

Las rejillas de período largo (LPFG) son estructuras de fibra óptica las cuales presentan una modulación periódica en el índice de refracción del núcleo, acoplando el modo fundamental guiado (en una fibra óptica monomodal) en modos guiados que se propagan a lo largo del revestimiento [20]. Son esencialmente estructuras que generan pérdidas dependientes de la longitud de onda, tal como un filtro óptico de rechazo de banda.

El principio de funcionamiento se basa en que el modo guiado por el núcleo de la fibra óptica (LP_{01}) impacta la zona de modulación de índice de refracción y es acoplado a modos de orden mayor (LP_{0n}), los cuales se propagan por el revestimiento a longitudes de onda que satisfacen una condición de correspondencia de fase. Estos modos acoplados son soportados en la interfaz revestimiento-aire y posteriormente atenuados debido a las grandes pérdidas por dispersión, generando bandas de atenuación, es decir, cierta porción del espectro óptico que se propaga en el núcleo es rechazado, sin afectar la amplitud y fase de las longitudes de onda adyacentes [21]. En la figura 7 se muestra el esquema general y funcionamiento de una rejilla de período largo, en la que se puede apreciar la modulación del índice de refracción y el acoplamiento de modos, así como el espectro óptico de entrada y el espectro de transmisión modificado.

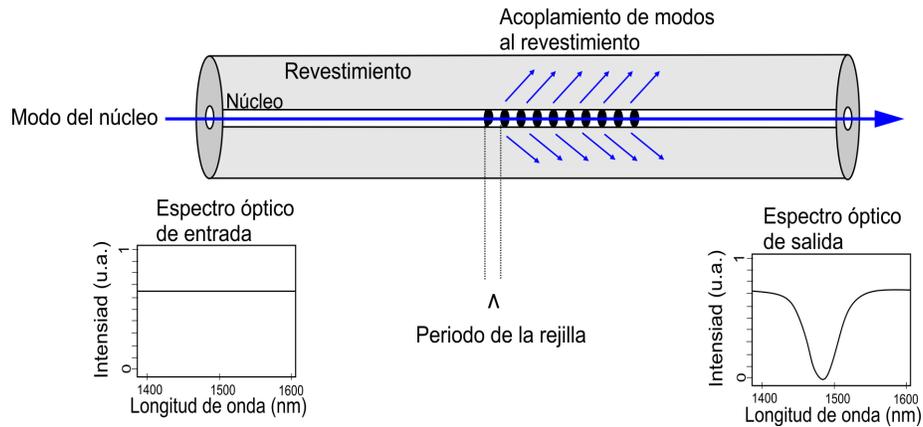


Figura 7. Esquema de una rejilla de período largo y su principio de operación.

La longitud de onda la cual presenta el máximo nivel de atenuación en una LPFG se le conoce como longitud de onda de resonancia (λ_{res}), y ésta dada como [21]:

$$\lambda_{res} = \Lambda(n_{effco} - n_{effcla}), \quad (2)$$

la longitud de resonancia depende de la diferencia entre los índices de refracción efectivos del núcleo n_{effco} y revestimiento n_{effcla} para un modo dado, así como del período Λ o la distancia de separación entre las modulaciones del índice de refracción del núcleo.

De acuerdo con Martínez-Ríos [21], el parámetro importante en el diseño de las LPFG son los índices de refracción efectivos del núcleo y revestimiento, y para su calcularlo se considera que el modo del núcleo no está afectado por el índice de refracción que rodea el revestimiento. Este se considera como un medio infinito, con lo cual la transmitancia óptica del núcleo está dada por la expresión (3).

Donde Δ está expresada en términos de diferencia de índice de refracción efectiva de los modos del núcleo y revestimiento, C_{co-m} es el campo eléctrico normalizado. Esta ecuación es solo válida para LPFG de índice escalonado. Para una LPFG real, el cambio en índice es mucho más complicado. Usualmente, las LPFG presentan períodos de modulación mayores a 100 μm , que son dos ordenes de magnitud mayor en comparación con las rejillas de Bragg, las cuales tienen períodos menores a 500 nm [21]. La dependencia de la longitud de onda de resonancia en la ecuación 2, indica que si existe alguna variación en su geometría por alguna perturbación inducida, (por ejemplo alguna perturbación mecánica), se modificará la posición de la longitud de onda de resonancia. Esta propiedad hace de las LPFG sean dispositivos prácticos y de gran interés en una gama extensa de campos de aplicación. Por mencionar algunas, se encuentran en sensores ópticos, en ecualizadores de ganancia en amplificadores de fibra óptica y particularmente en este tema de tesis como elemento de seleccionador de la longitud de onda en láseres de fibra óptica.

$$T_{co}(z) = \cos^2 \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 + |C_{co-m}|^2} z \right) + \frac{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2}{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 + |C_{co-m}|^2} \sin^2 \left(\sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 + |C_{co-m}|^2} z \right), \quad (3)$$

2.3.2 FABRICACIÓN Y TIPOS DE REJILLAS DE PERÍODO LARGO

De acuerdo con Vengsarkar [20], la modulación periódica del índice de refracción en el proceso de inscripción de las LPFG, puede ser exclusivamente en el núcleo, en revestimiento o en ambos. Requiere una longitud entre 3-5 cm a lo largo de la fibra y una amplitud en el índice de refracción en el rango de 10^{-4} a 10^{-5} similar a las rejillas de Bragg [21].

Existen diferentes tipos de LPFG, así como diferentes métodos de manufactura. Su fabricación está basada en la alteración de las propiedades de la fibra óptica de una forma periódica. El índice de refracción del núcleo puede ser modificado mediante la irradiación de fibras ópticas con foto sensibilidad a fuentes de luz UV [22, 23], empleando láseres de CO_2 [24], descargas con arco eléctrico [25], o la modulación geométrica del revestimiento [26].

En caso de la sensibilidad a la luz UV, esta se emplea para la modulación del índice de refracción en el núcleo de fibras ópticas dopadas con germanio (Ge), usando una máscara de amplitud [22]. Éste esquema de fabricación esta representado en la figura 8 (a).

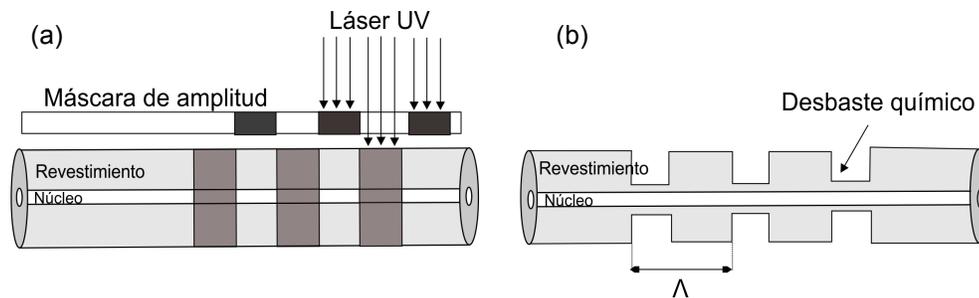


Figura 8 (a) Rejilla de período largo fabricada por UV, b) rejilla fabricada por desbaste químico [21].

En el método de inscripción por modulación geométrica del revestimiento, la modulación se realiza mediante grabado químico [26], en el cual la fibra es sumergida en una solución de ácido fluorhídrico un intervalo de tiempo,

colocando una máscara similar a la máscara de amplitud, mostrado en la figura 8 (b).

Por otra parte, fuentes ópticas en longitudes de onda cercanas a los 3 μm como el láser de CO_2 , que generan tensión térmica residual debido una gran cantidad de calor que se absorbe sobre la fibra que se irradia [24], o en su caso el sistema de arco eléctrico [25], en el cual se realiza una descarga eléctrica periódica, modulando del índice de refracción en el núcleo y revestimiento. Estos métodos de fabricación están representados las figuras 9 (a) y 9 (b).

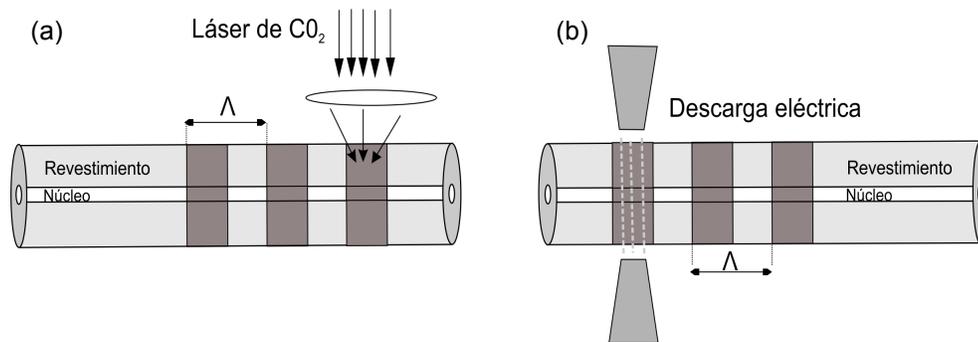


Figura 9. (a) Rejillas generadas por láser de CO_2 , (b) rejillas por arco eléctrico [21]

De manera similar como muestra la figura 10, sistemas mecánicos de presión producen temporalmente modulaciones del índice de refracción del núcleo y revestimiento debido el efecto foto-elástico [27,28].

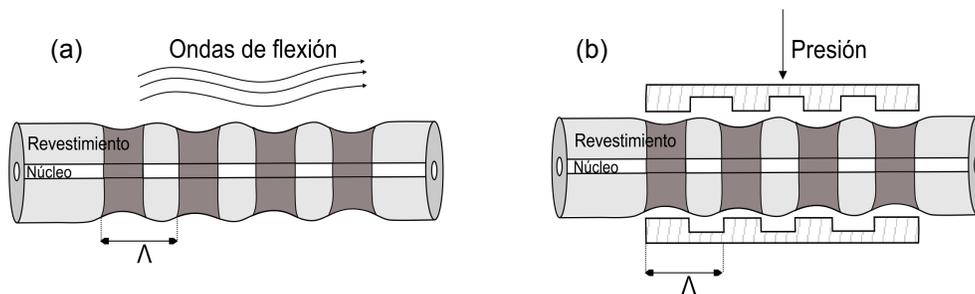


Figura 10. (a) Rejillas producidas por ondas de flexión, (b) rejillas fabricadas por presión [21].

Los diferentes métodos de fabricación además del tipo de fibra óptica empleado, generan diferentes perfiles particulares de índice de refracción transversal y longitudinal, los cuales se reflejan de manera directa en las propiedades físicas, las características de transmisión y las bandas de atenuación de las LPFG. El perfil de índice transversal determina el acoplamiento entre el modo fundamental y los modos discretos del revestimiento de orden mayor involucrados [29]. Mientras que el perfil de índice de refracción en la dirección longitudinal determina la posición y la forma de las bandas de atenuación [21]. La siguiente tabla de Martínez-Ríos hace un análisis y comparación de las propiedades y características de los diferentes tipos y métodos de fabricación de LPFG.

Tabla 1. Propiedades de los diferentes tipos de rejillas de periodo largo [21].

Propiedades	UV	Tensión térmica	Tensión mecánica	Modulación geométrica
Longitud [cm]	2-4	2-5	3-5	2-3
Profundidad de banda [dB]	10-30	10-25	10-20	10-15
$\Delta\lambda$ [nm]	> 10	> 10	> 15	> 10
Pérdidas [dB]	0.1 – 0.2	0.1 – 1	0.1 – 0.5	0.1 – 0.3
Birrefringencia	$2(10)^{-7}$	$1.7(10)^{-6}$	$7(10)^{-6}$	-----
Λ [μm]	>100	>300	>250	>500
σ_T [nm/°C]	-(0.04-0.347)	$\pm(0.05-0.0204)$	0.18-200	-----
σ_T [nm/(rad/cm)]	15-	$\pm(6.7-25)$	6-12	-(70-100)
σ_σ [pm/ $\mu\epsilon$]	0.204-1.34	0.1-0.4	0.2-0.4	1.5-2
σ_b [nm/m]	2.5-14	-(1.6-12)	--	-(18-25)
$\sigma_{\text{ind.ref.}}$ [nm/ 10^{-3}]	-(0.003-0.019)	-(0.017-0.54)	0.22-0.5	----
Rango Temp.	< 250	< 1100	< 60	< 1200

Una de las características principales de las LPFG es el variación de la posición banda de atenuación, tanto en longitud de onda como en profundidad, debido a perturbaciones externas que modifican el índice de refracción efectivo de los modos núcleo-revestimiento en la sección de la rejilla. Es decir, presentan sensibilidad a perturbaciones físicas tales como temperatura, tensión, estrés, índice de refracción, torsión, curvatura (como se muestra en la tabla 1). Esta sensibilidad de las LPFG puede ser empleada para modificar el perfil de ganancia dentro de una cavidad láser de fibra óptica de una manera controlada, generando la posibilidad de sintonizar la longitud de onda de emisión láser, incluso desarrollar aplicaciones de sensores basados en láseres de fibra.

En esta tesis, las rejillas de período largo empleadas en el proceso de experimentación de láseres sintonizables son manufacturadas con el método de arco eléctrico, un proceso de bajo costo grabadas en fibras estándar SMF-28. Algunas de las ventajas que ofrecen este tipo de LPFG es que pueden resistir bajo altas temperaturas (1000 °C) sin cambios significativos en su funcionamiento, contrario a las rejillas fabricadas por UV, las cuales tienden a degradarse al ser expuestas a cambios de temperatura [30]. Por otra parte, cuenta con un sistema de grabado simple si es comparado con el de radiación láser de CO₂ o UV, incluso, este sistema de arco eléctrico se puede emplear para grabar LPFGs en distintos tipos de fibra óptica [31].

2.3.3 ADELGAZAMIENTOS DE FIBRA ÓPTICA.

Los adelgazamientos en fibra son segmentos de fibra óptica que han sido estrechados o adelgazados, los cuales se fabrican calentando y estirando una fibra monomodal. Esta estructura esta formada por una sección que comprende un filamento estrecho y estirado (cintura), unida en ambos extremos por dos secciones cónicas (zona de transición) [32], mostrado en la figura 11.

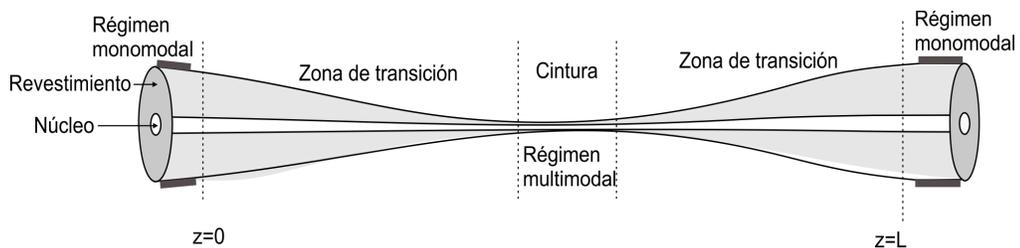


Figura 11. Adelgazamiento en fibra óptica monomodal.

El principio de funcionamiento de los adelgazamientos de fibra se basa en el acoplamiento del modo que se propaga por el núcleo en modos de orden mayor, expuestos al medio externo en la zona de cintura. Este fenómeno se explica de la siguiente manera: en la zona en donde $z = 0$, la fibra mantiene su geometría normal, es decir, no ha sido adelgazada y por consecuencia únicamente se propaga el modo fundamental por el núcleo de la fibra.

En la zona de transición, la fibra ha perdido su cubierta plástica y se presenta una pendiente significativa, entonces esta zona se convierte en una guía de onda multimodal de tres capas (núcleo-revestimiento-medio externo) y debido a la simetría circular, el modo fundamental LP_{01} puede excitar modos de orden mayor de la forma LP_{0n} [33].

En la zona de cintura, el diámetro de la fibra está reducido en gran medida y su geometría se vuelve invariante, por lo que no ocurre ningún otro

acoplamiento de modos. Esta zona es altamente multimodal y la amplitud de los modos permanece pero su fase continua acumulándose. La cintura es conocida también como zona de bateo de modos, debido a la diferencia en velocidad de fases. El campo total resulta de la superposición de todas las amplitudes de estos modos y su evolución a lo largo de z depende del bateo entre modos [33].

En la segunda zona de transición, existe nuevamente un acoplamiento de modos, hasta alcanzar la posición $z = L$. Finalmente, sobrepasando esta zona, la fibra óptica regresa a su geometría original, propagándose únicamente el modo fundamental en el núcleo. Los modos que fueron excitados o acoplados en las transiciones del adelgazamiento de fibra se convierten en modos radiados, es decir, son eliminados por la cubierta plástica externa.

Los adelgazamientos de fibra óptica solo transmiten el modo fundamental y su potencia de salida depende de la forma del adelgazamiento, especialmente en la diferencia de fases entre cada modo que se propaga a lo largo de la guía de onda. La situación es comparable a un interferómetro clásico, en donde la diferencia de fases se obtiene por una diferencia en longitud en un brazo del interferómetro. En este caso, los brazos son reemplazados por los modos; el camino geométrico es el mismo para todos los modos, pero sus velocidades de fase son diferentes, entonces los caminos ópticos son diferentes resultando en una diferencia de fases que son equivalentes a los brazos con diferente longitud [33].

Dependiendo de las características geométricas y el criterio de adiabaticidad de los adelgazamientos de fibra (explicado en la siguiente sección), estos dispositivos generan espectros de transmisión modulados periódicamente, variando su amplitud, rango espectral libre y la visibilidad de franjas.

De acuerdo a Bures [33], las transiciones de los adelgazamientos pueden ser demasiado abruptas o muy suaves; dependiendo de esta condición se da el criterio de adiabaticidad. Si una transición es demasiado suave, no habrá

transferencia de energía o acoplamiento de modos de orden mayor, por lo cual el modo que se propaga se adaptara a lo largo del adelgazamiento, entonces es adiabático.

Una de las características mas importantes de los adelgazamientos de fibra es la sensibilidad al medio que los rodea, debido a la exposición de los modos acoplados en la interfaz núcleo-revestimiento-medio externo. Pueden ser empleados como sensores de índice de refracción o temperatura. Otras aplicaciones importantes son sensores de desplazamiento, sensores de curvatura así como dispositivos de filtrado óptico. Son dispositivos de inserción sencilla en arreglos experimentales, además de ser elementos de bajo costo por su producción en fibras monomodales estándar SMF-28.

Otro punto importante es que pueden ser concatenados (dos o mas adelgazamientos de fibra) para producir interferómetros tipo Mach-Zehnder, que encuentra aplicaciones directas en láseres de fibra óptica. Debido a las características de transmisión, se pueden generar láseres multi-longitud de onda, con la capacidad de ser manipulados espectralmente empleando alguna perturbación como tensión o curvatura.

En la sección siguiente, se hace una introducción al principio de operación de los adelgazamientos de fibra óptica concatenados, que conforman filtros de tipo Mach-Zehnder, empleados en esta tesis para la manipulación de láseres de fibra óptica.

2.3.4 FILTROS MACH-ZEHNDER BASADOS EN ADELGAZAMIENTOS CONCATENADOS.

Un filtro Mach-Zehnder de fibra óptica se basa en dos segmentos adelgazados en serie o concatenados, tal como muestra la figura 12. Existen diferentes configuraciones y distintos tipos de fibras ópticas para formar estos dispositivos, sin embargo en esta sección únicamente se hace referencia a aquellos formados por adelgazamientos.

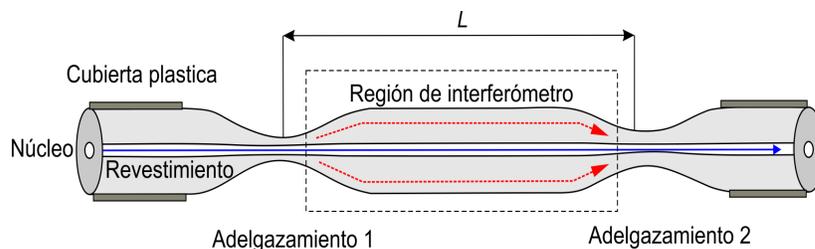


Figura 12. Filtro Mach-Zehnder basado en adelgazamientos concatenados.

El principio de funcionamiento es similar al descrito en la sección 2.3.3. En el adelgazamiento 1 se excitan modos de orden mayor en la interfaz revestimiento-aire, los cuales se propagan en la región de interferómetro (figura x) a la cual se le ha removido la cubierta plástica, pero mantiene su geometría y dimensiones sin modificar. En esta sección ocurre una acumulación de fase de los modos acoplados. Finalmente en el segundo adelgazamiento estos modos se reacoplan al modo del núcleo, generando un patrón espectral de interferencia de tipo peine. Este patrón y sus características espectrales (separación entre picos, visibilidad de franjas, ancho espectral) dependen de su diseño geométrico, además de la separación entre adelgazamientos. Un ejemplo de este tipo de espectros tipo peine se muestra en la figura 13 [34]. En ella se observa un típico espectro modulado, basado en un filtro Mach-Zehnder de adelgazamientos concatenados, entre 1500 nm y 1600 nm.

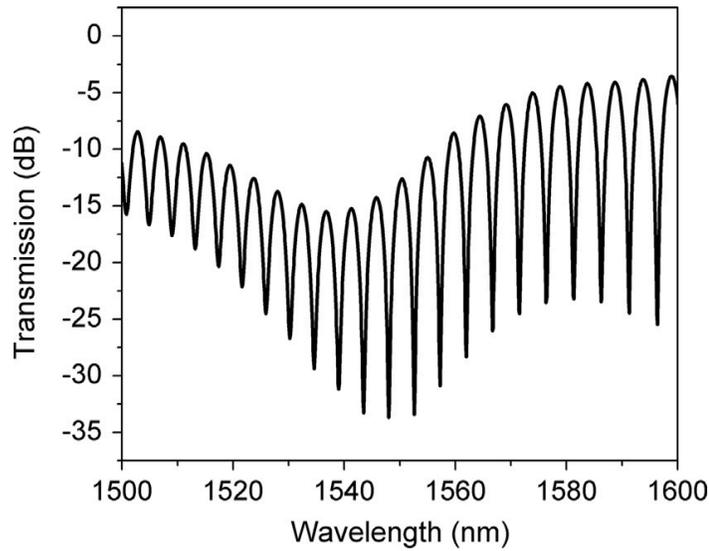


Figura 13. Espectro de transmisión de un par de adelgazamientos concatenados [31].

La diferencia de fase que existe entre los modos acoplados y del núcleo que experimenta este tipo de filtros se da como:

$$\phi = \frac{2\pi(n_{co,eff} - n_{cl,eff})L}{\lambda}, \quad (4)$$

en donde L es la separación que existe entre los adelgazamientos (figura 12), $n_{co,eff}$ y $n_{cl,eff}$ son los índices de refracción efectivos del núcleo y revestimiento, λ corresponde a la longitud de onda de operación. Cuando la diferencia de fase satisface la condición $\phi = 2m\pi$ en donde m es el orden del interferómetro, el pico de transmisión de la longitud de onda λ_m se da como [35]:

$$\lambda_m = \frac{\Delta n L}{m} = \frac{(n_{co,eff} - n_{cl,eff})L}{m}. \quad (5)$$

Por otra parte, el rango espectral libre esta determinado en gran medida por la longitud de separación entre adelgazamientos. Si bien, una separación larga entre adelgazamientos da como resultado rangos espectrales de mayor fineza (de menor separación entre picos). Todo lo contrario ocurre a separaciones cortas de L en la figura 12 y está se da como [36]:

$$\Lambda = \frac{\lambda^2}{(\Delta n)}, \quad (6)$$

Como se ha mencionado en la sección anterior, estos dispositivos al ser perturbados externamente (torsión, doblamiento, índice de refracción), modifican los índices efectivos de los modos del núcleo y revestimiento. De ésta manera, las características espectrales como las longitudes de onda de los picos máximos se desplazan, se atenúan o incrementan. El ancho espectral de igual manera se modifica.

Incluir este tipo de filtros en cavidades de láseres de fibra óptica genera la posibilidad de manipulación espectral, tanto en sintonización de la emisión láser como en la obtención de láseres con múltiples oscilaciones. En el caso de láseres multi-emisión, estos generalmente obtienen su pico de emisión en las longitudes de onda de los picos máximos de modulación creada por los filtros. Por lo tanto es deseable implementar filtros Mach-Zehnder con rangos espectrales libres cortos. Por otra parte, aplicar doblamiento o cambio en índice de refracción al filtro genera sintonización o en algunos casos conmutación láser. En esta tesis se aplican este tipo de filtros en láseres de fibra óptica dopados con erbio, al igual que en pulsados tipo Q-switch, multi-emisión, sintonizables y conmutables.

CAPÍTULO TRES

3.1 LÁSER DE FIBRA ÓPTICA DOPADO CON ERBIO, MULTI-LONGITUD DE ONDA Y CONMUTABLE BASADO EN LAS CARACTERÍSTICAS DE SENSITIVIDAD CRUZADA DE ADELGAZAMIENTOS DE FIBRA.

En este capítulo, se presentan los resultados experimentales de conmutación y multi-emisión de un láser de fibra óptica dopado con erbio, explotando las características de sensibilidad cruzada (doblamiento y cambio en índice de refracción) de un par de adelgazamientos concatenados. En esta propuesta la combinación entre índice de refracción externo y curvatura incrementa el rango de multi-emisión entre 1530.62–1565 nm, a diferencia de solo emplear curvatura, el cual presenta un rango de emisión entre 1544.66–1565.7 nm.

3.2 INTRODUCCIÓN

El uso de filtros todo-fibra, como los interferómetros de fibra Mach-Zehnder (MZFI), se han empleado para la obtención de láseres conmutables y multi-longitud de onda, los cuales han sido propuestos utilizando diferentes configuraciones y elementos de fibra óptica. Cabe decir que este tipo de filtros son versátiles, ya que sus características espectrales pueden ser ajustadas, modificando ciertos aspectos geométricos de las fibras ópticas empleadas en su fabricación. Como ejemplo, se han utilizado secciones de fibras doble-revestimiento empalmadas con fibras estándar SMF-28 para formar un MZFI, con el cual se genera conmutación de la multi-longitud de onda de un EDFL controlando el estado de polarización en la cavidad [37]. También, se han usado acopladores de fibra óptica concatenados, en el cual se aplica tensión a un brazo del interferómetro para obtener multi-longitud de onda conmutable [38], o en su caso un MZFI formado con un acoplador de fibra óptica 50/50 en conjunto con un divisor de haz polarizado [39], y la incorporación a una cavidad láser en anillo de un MZFI estándar, usando un par acopladores concatenados que permiten conmutar la multi-emisión [40].

Recientemente, se ha demostrado la utilidad de la fibra fotónica (PCF) en la generación de filtros tipo peine y su aplicación en láseres de fibra óptica multi-longitud de onda. En este sentido, se ha logrado demostrar la sintonización de multi-emisión en un EDFRL utilizando una estructura formada por una fibra fotónica entre dos segmentos de fibra SMF, en la cual el filtro genera la multi-emisión y la sintonización se realiza controlando el estado de polarización [41]. Incluso, se han desarrollado filtros empleando acopladores concatenados con secciones de PCF con doble núcleo, en el cual la multi-emisión láser puede ser sintonizada aplicando doblamiento [42] ó, en su caso, utilizando PCF en combinación con amplificadores ópticos de semiconductor para obtener multi-emisión láser [43].

Otro tipo de filtros tipo peine han sido fabricados en secciones de fibras ópticas con el núcleo expandido térmicamente, los cuales son empalmados con fibras ópticas activas y pueden ser utilizados como generadores de láseres multi-longitud de onda [44, 45]. Siguiendo este contexto, un método simple y de bajo costo para generar filtros tipo Mach-Zehnder es el uso de rejillas de período largo o adelgazamientos de fibra óptica concatenados, como la reportada en la referencia [46]. En el caso particular de los adelgazamientos de fibra para generar multi-emisión láser de EDFRL, han sido reportados en la generación de doble emisión [47,48]. Es conocido que la respuesta espectral de este tipo de filtros pueden ser modificada, ya que presentan sensibilidad a perturbaciones físicas, tales como tensión, temperatura, curvatura, cambio en índice de refracción o en ciertos casos combinación (dos o más perturbaciones), originando de esta manera la manipulación de la emisión láser. Generalmente hablando, la sensibilidad cruzada es un efecto indeseable, especialmente en sensores de fibra óptica. Con base en la literatura considerada, se propuso utilizar un par de adelgazamientos de fibra concatenados y añadirlos en un EDFL, para generar multi-longitud de onda. Por otra parte, la manipulación de la emisión láser se realiza aplicando dos perturbaciones en conjunto: doblamiento y

cambio de índice de refracción externo aplicado en el filtro formado por los adelgazamientos. Los resultados experimentales se presentan en detalle en las siguientes secciones.

3.3 ARREGLO EXPERIMENTAL Y CARACTERISTICAS DE SENSITIVIDAD CRUZADA DEL FILTRO MZFI.

El filtro MZFI consiste en dos secciones de adelgazamientos de fibra, concatenados y cuasi-abruptos, fabricados sobre fibra estándar SMF-28 mediante un sistema de procesamiento de vidrio GPX 3400 Vytran. Las dimensiones geométricas de cada sección adelgazada están dadas son: 2 mm de longitud de transición, 1mm de longitud de cintura, 60 μm de diámetro de cintura y 40 cm de separación entre adelgazamientos.

Por otra parte, la figura 14 a muestra el arreglo experimental del láser multi-longitud de onda en configuración de anillo propuesta. Está compuesta de 3m de fibra dopada con erbio como medio de ganancia (*large area* LIEKKI Er16-8/125), bombeado con un diodo láser a 975 nm con salida de pigtail a través de un multiplexor por división de longitud de onda. El 30% de la señal láser es acoplada fuera de la cavidad y monitoreada con un analizador de espectro óptico (OSA), mientras el 70% restante es acoplado a la cavidad en anillo.

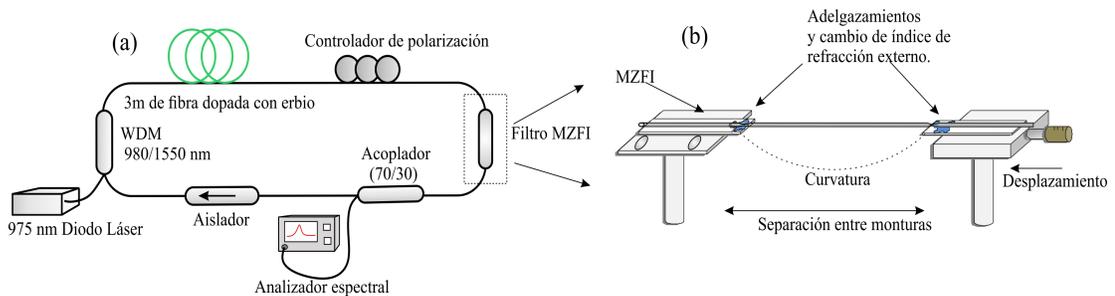


Figura 14. (a) Arreglo experimental del láser en configuración de anillo, (b) mecanismo para inducir doblamiento e índice de refracción.

Un control de polarización es insertado en la cavidad, para ajustar el estado de polarización. Finalmente, se añade un aislador óptico para asegurar la oscilación láser en sentido unidireccional.

El filtro MZFI es colocado entre dos monturas para inducir curvatura, una de ellas se mantiene fija mientras la otra puede desplazarse longitudinalmente una distancia máxima de 2.54 cm. Para cambiar el índice de refracción en la zona donde se encuentran los adelgazamientos, dos tiras plásticas fueron colocadas y ajustadas entre las monturas y la zona entre la transición de los adelgazamientos, esto para mantener el área alrededor de los adelgazamientos cubierta en su totalidad por diferentes sustancias, tal y como se muestra en la figura 14(b). El dispositivo para inducir doblamiento tiene un rango de 0 cm^{-1} hasta 3.91 m^{-1} . Las sustancias empleadas para cambiar el índice de refracción fueron primeramente caracterizadas empleando un refractómetro (Anton Paar) a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

La respuesta espectral del filtro MZFI fue inicialmente caracterizada empleando la emisión de fluorescencia generada por la fibra dopada con Erblio. Las sustancias para inducir cambio en índice de refracción empleadas fueron aceite de olivo, glicerol y tritón, con índices de refracción 1.4692, 1.4709, 1.4913 y 1 (índice de refracción del aire) respectivamente. El espectro de fluorescencia modulado se puede observar en la figura 15; comparada con el espectro de referencia (en el recuadro de la figura 15), el cual presenta una curvatura de 1.146 m^{-1} . La visibilidad de franjas se incrementa y el cambio en índice de refracción atenúa el espectro de referencia.

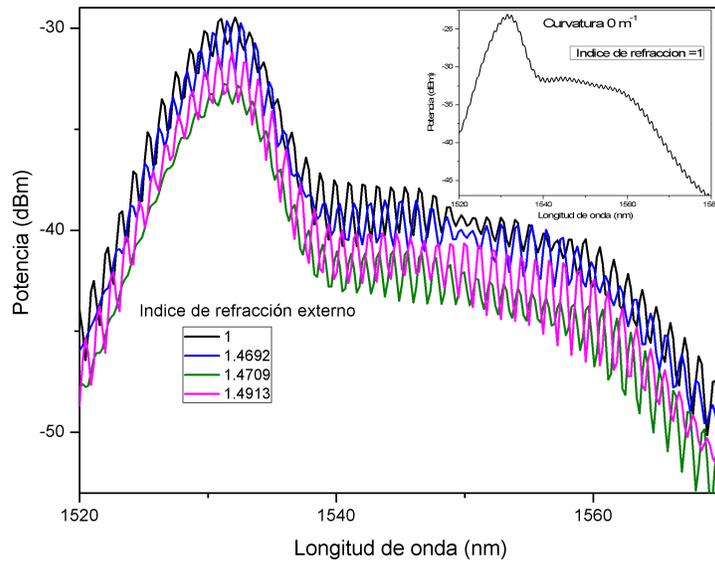


Fig. 15. Espectro de referencia y espectro modificado de fluorescencia, para una curvatura de 1.146 m^{-1} y cambio en índice de refracción externo.

El rango espectral libre (FSR) del filtro MZFI es de 1.1 nm. Por otra parte, la evolución de visibilidad de franjas en función de la curvatura y cambio en índice de refracción se presenta en la figura 16. Como se puede observar, la visibilidad de franjas se incrementa de un valor muy bajo (~ 0) a diferentes valores mas altos, conforme se incrementa el nivel de curvatura. Este comportamiento puede ser empleado como un mecanismo muy fino para proporcionar la funcionalidad necesaria al filtro tipo peine para la obtención de láseres multi-longitud de onda. Un punto bastante importante es que las sustancias con un índice de refracción mayor que el valor de índice de el núcleo y el revestimiento de las fibras ópticas empleadas, atenúan de mayor manera los picos espectro. Este punto confirma la declaración anterior, en el que las características de sensibilidad cruzada pueden ser usadas como un mecanismo para reconfigurar el espectro de transmisión del filtro tipo peine.

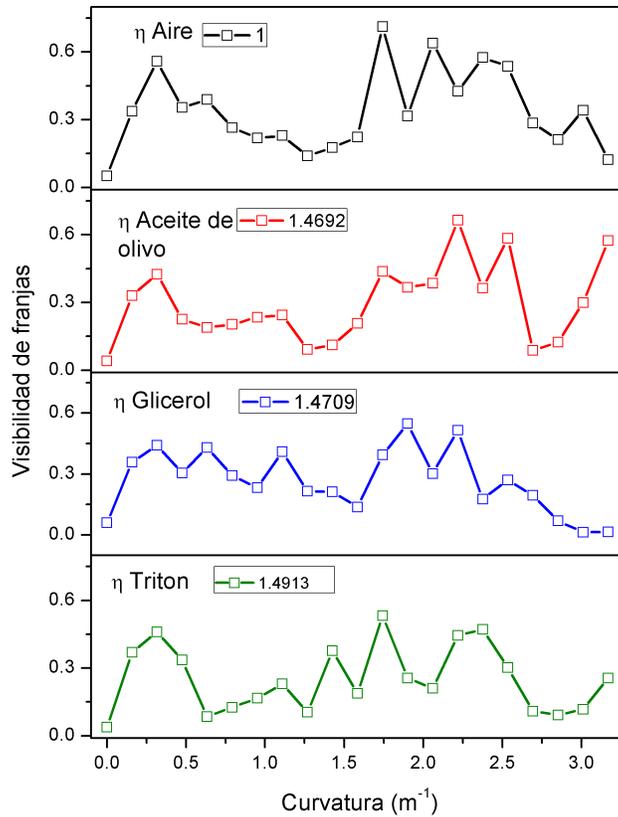


Figura 16. Variación de la visibilidad de franjas en función de la curvatura para diferentes índices de refracción.

3.4 CARACTERISTICAS DE EMISIÓN MÚLTIPLE: RESULTADOS EXPERIMENTALES

Bombeando la cavidad en anillo con una potencia de 115 mW e iniciando el sistema en condiciones iniciales ($0 m^{-1}$ y $n=1$), se genera doble emisión láser en las longitudes de onda 1565.72 nm y 1564.64 nm mostrada en la figura 17(a), en donde se presenta la evolución de longitud de onda en función de los cambios en curvatura y aire como medio externo. La emisión dual se desplaza hacia el lado de longitudes de onda mas cortas entre 1561.76 nm y 1554.2 nm para una curvatura de $1.783 m^{-1}$ para finalmente generar triple emisión (1544.6 nm, 1554.56 nm y 1564.46 nm) para un nivel máximo de curvatura.

Por otra parte, el aceite de olivo ($n=1.4692$) genera doble emisión, mostrado en la figura 17(b). La emisión dual se desplaza en la misma dirección que la

figura 17(a) pero con una menor separación entre líneas láser (1559.96–1557 nm) para una curvatura de 1.783 m^{-1} . Para el nivel de curvatura máximo, la emisión láser para las longitudes de onda largas son suprimidas y la emisión se desplaza, generándose en tres longitudes de onda mas cortas, entre 1532.78 nm y 1530.62 nm como se puede observar en la figura 17(b).

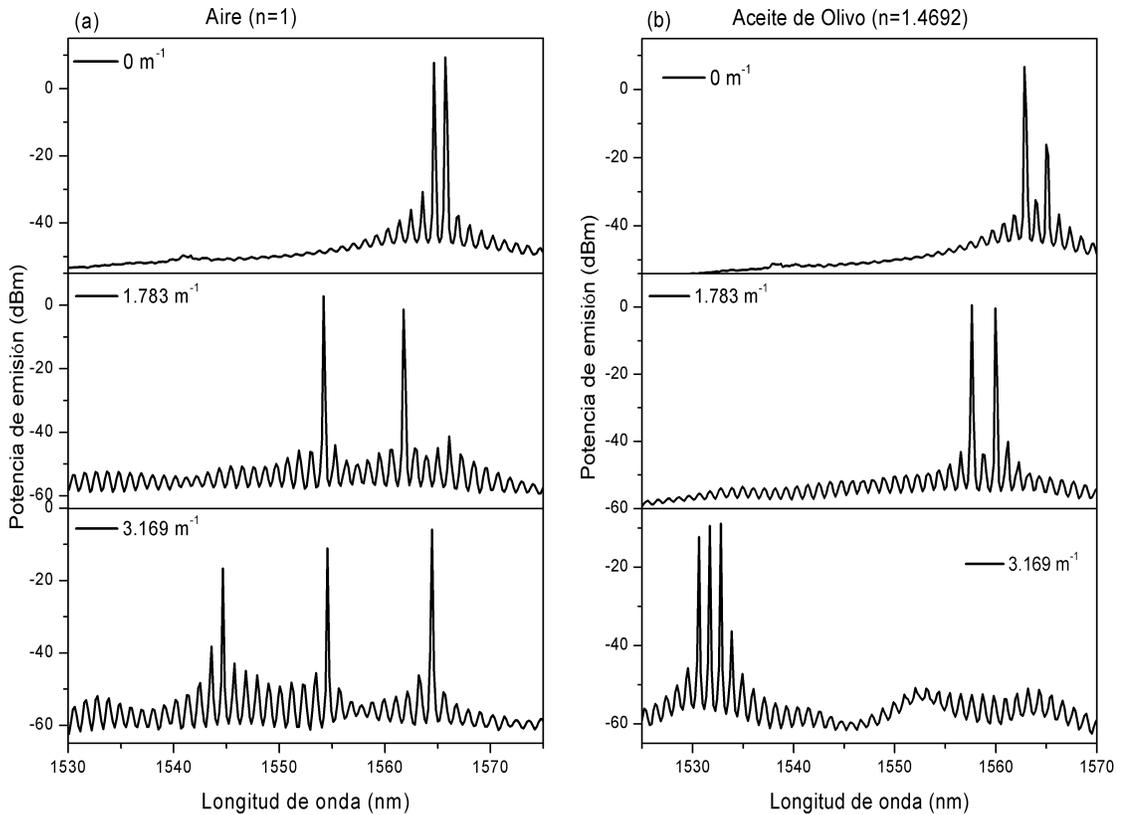


Figura 17. (a) Emisión láser para índice de refracción en aire ($n=1$) y cambio en curvatura (de 0 m^{-1} a 3.169 m^{-1}), (b) emisión láser para aceite de olivo ($n=1.4692$) y curvatura para los rangos de curvatura anteriores.

El glicerol ($n=1.4709$), genera emisión láser en una sola longitud de onda (para una curvatura de 0 m^{-1}) y se muestra en la figura 18(a). El incremento en la curvatura genera cuádruple emisión láser, tres de ellas entre 1566.18 nm y 1531.34 nm y la cuarta en 1556.17 nm. Finalmente, la multi-emisión láser se mantiene en longitudes de onda cortas para el máximo nivel de curvatura.

En el caso del tritón, ($n=1.4913$), el láser se genera en 1564.64 nm , ligeramente desfasada en comparación con el glicerol. En este caso, para la curvatura 1.783 m^{-1} , el índice de refracción externo permite la reconfiguración del espectro del filtro MZFI de tal manera que permite oscilar cinco longitudes de onda láser, distribuidas entre 1561 nm y 1532 nm , como se puede observar en la figura 18(b). Finalmente, la multi-emisión conmuta hacia longitudes de onda cortas (como en las figuras 17(b) y 18(a)), para la máxima curvatura aplicada. A medida que la curvatura se incrementan la visibilidad de franjas es mayor, como se puede apreciar en el espectro modulado; consecuentemente, mas líneas láser pueden ser generadas. La mayor atenuación de la emisión láser se produce para las sustancias tritón

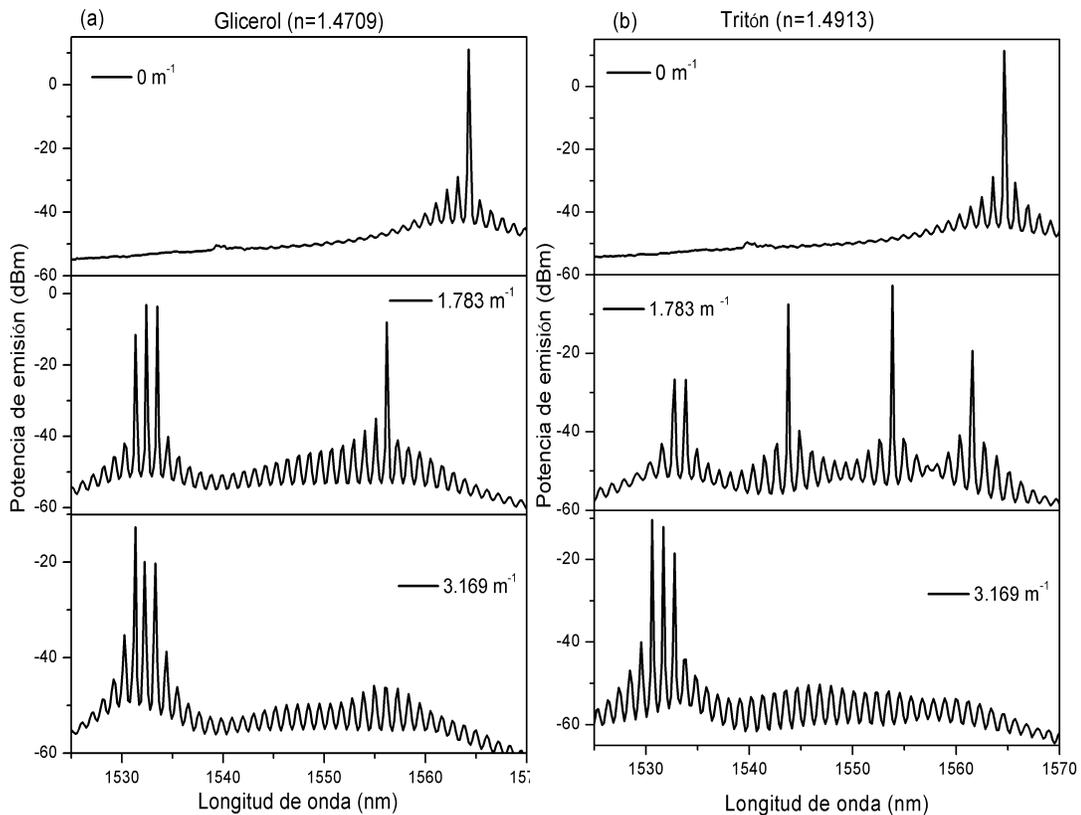


Figura 18. (a) Emisión láser para glicerol ($n=1.4709$) y variación de curvatura (b) emisión láser para tritón ($n=1.4913$) y cambio en nivel de curvatura.

y glicerol depositadas en el filtro. Las sustancias para inducir cambio en índice de refracción externo en las fibras adelgazadas permiten conmutar la

multi-emisión hacia el lado izquierdo del espectro óptico (longitudes de onda cortas). La emisión puede ser generada y conmutada en el rango de 1540–1560 nm para solo curvatura cuando el medio externo es el aire, como se puede observar en la figura 17(a), en contraste con la combinación de curvatura y diferentes sustancias para modificar el índice de refracción, las cuales conmutan la emisión hacia longitudes de onda corta 1530 nm (mostrada en las figuras 17(b) y 18).

Las características espectrales de transmisión del filtro MZFI dependen de parámetros tales como la longitud de onda, longitud del interferómetro y la diferencia entre índices de refracción efectivos de los modos del núcleo y revestimiento. El índice de refracción efectivo de los modos en la interfaz aire-revestimiento tienen una gran dependencia hacia el medio exterior, ya que el campo eléctrico de los modos acoplados en esta zona interactúan de manera directa con el medio exterior. Como ejemplo, la combinación de curvatura y tritón decrece la visibilidad de franjas en comparación con curvatura-aire, el cual tiene un valor de 0.71 (figura 16). Este mecanismo de pérdidas dependientes de la longitud de onda interactúa con la ganancia, y reajusta el espectro de fluorescencia permitiendo la emisión láser en longitudes de onda específicas.

El efecto de la curvatura en el filtro MZFI incrementa la visibilidad de franjas y el índice de refracción externo introduce pérdidas en la amplitud del espectro de fluorescencia. Ésta característica de sensibilidad cruzada habilita la reconfiguración del espectro de ganancia modulada en forma de peine, suprimiendo la ganancia en longitudes de onda largas y haciendo posible la oscilación láser a longitudes de onda más cortas, con la posibilidad de generar múltiples longitudes de onda debido a la competición entre modos. La combinación de estos parámetros incrementa la capacidad del sistema para generar emisión en un amplio rango de longitudes de onda, limitado únicamente por el ancho espectral de la emisión de fluorescencia. Este mecanismo, por ejemplo, se ha implementado en un sensor de curvatura e

índice de refracción, mejorando la sensibilidad del sensor basado en adelgazamientos [48] y en un sensor de temperatura basado en un filtro SMF-MMFC-SMS [49]. En este contexto, variando el índice de refracción externo, se ha logrado obtener láseres sintonizables empleando un filtro multimodal [50,51].

La variación de los diferentes parámetros ambientales puede resultar en la fluctuación de la visibilidad de franjas (vibración, temperatura), por lo que el filtro se mantuvo fijo en su montura a una temperatura controlada de 20 °C, con la finalidad de mantener estable la multi-emisión. La simplicidad y el bajo costo es un punto importante a comentar: solo se usa un filtro de bajo costo de fabricación, manufacturado en fibra estándar. Otro punto es el uso de sustancias comunes y de fabricación casera, como el glicerol o el aceite de olivo. Este tipo de láseres multi-longitud de onda pueden ser explotados y estudiados añadiendo mas grados de libertad, como anteriormente se ha mencionado, empleando diferentes perturbaciones físicas.

3.5 CONCLUSIONES

Se han presentado los resultados de un EDFRL multi-longitud de onda conmutable, empleando un interferómetro Mach-Zehnder basado en un par de adelgazamientos concatenados, como filtro modulador tipo peine. Empleando las características de sensibilidad cruzada del filtro, la multi-emisión puede conmutar en el rango de 1544.66 nm a 1564.46 nm únicamente para curvatura aplicada y de 1530.62 nm a 1565 nm para la combinación entre curvatura y cambios en el índice de refracción externo, generando quintuple emisión láser. Consecuentemente, un nuevo método se ha propuesto para llevar a cabo sistemas de láseres de fibra óptica multi-emisión y conmutables, de tal manera que la conmutación es generada con un filtro todo-fibra de bajo costo de fabricación, reconfigurable, con posibles aplicaciones en sistemas de sensores de láseres de fibra óptica.

CAPÍTULO CUATRO

4.1 AJUSTE DE LA LONGITUD DE ONDA EN LÁSERES DE FIBRA ÓPTICA, MEDIANTE LA INSCRIPCIÓN DE LPFGS

El ajuste de las características espectrales de la longitud de onda de un láser de fibra óptica dopado con erbio, mediante la inscripción de rejillas de período largo, se demuestra de manera experimental en este capítulo. La fabricación intra-cavidad permite un preciso posicionamiento de las bandas de atenuación de las rejillas de período largo, para ajustar la longitud de onda de emisión láser y al mismo tiempo, suprimir los modos laterales del espectro de emisión. El desplazamiento de la banda de atenuación se emplea como un filtro tipo eje el cual modifica el espectro de ganancia, ya que esta pendiente se modifica a medida que la banda de atenuación de la rejilla crece en profundidad. Tan solo tres períodos son suficientes para ajustar la longitud de onda láser a una operación de un solo modo longitudinal, con un SMSR de 34.2 dB; mientras que para seis períodos se demuestra doble emisión y un SMSR de 37.79 dB.

4.2 INTRODUCCIÓN.

El uso de rejillas de período largo (LPFG) como filtros de rechazo de banda, se ha convertido en un método muy popular en la manipulación de la longitud de emisión en láseres de fibra óptica, gracias a sus características intrínsecas de filtrado tales como su amplio ancho de banda, bajas pérdidas de inserción, alta sensibilidad a perturbaciones externas, simple sintonización y reconfigurabilidad. En este contexto, muchos trabajos que incluyen multi-emisión [52–54], sintonización de la emisión [55–60], equalización del espectro de emisión [61], multi-emisión conmutable [62–64] se han reportado en láseres de fibra óptica usando diferentes tipos de LPFG manufacturadas, como filtros intra-cavidad. Los diferentes métodos de manufactura de las

LPFGs pueden incluir rejillas inducidas mecánicamente, por radiación láser UV, láseres de femtosegundos, por arco eléctrico o por desbaste químico de las fibras ópticas. Generalmente, las LPFG son inscritas antes de su inserción dentro de la cavidad láser. Posteriormente, se puede manipular la rejilla ya sea doblándola, torciéndola o induciendo alguna otra perturbación con la intención de sintonizar sus bandas de atenuación. Sin embargo, en algunos casos, esta es acompañada con un incremento de pérdidas.

Un elemento de pérdidas dependientes de la longitud de onda, como lo son las LPFGs, modifican la longitud de onda en el punto máximo de ganancia. Así también, sucede con otros elementos de fibra óptica como aisladores WDMs, controladores de polarización, que son empleados en las cavidades láser. Por otro lado, se han utilizado filtros de la longitud de onda en cavidades EDFL para suprimir modos laterales y favorecer la operación de un solo modo longitudinal, como las rejillas de Bragg [65], elementos Fabry-Perot [66], Mach-Zehnder [67], entre otros. También, es muy conocido que la longitud de la fibra dopada con erbio determina la longitud de onda de emisión en una cavidad *free-running*. A medida que esta se incrementa, la emisión láser se desplaza sobre longitudes de onda más largas. Consecuentemente, la selección de la longitud de onda requiere específicamente una longitud de fibra activa adecuada.

En términos generales, muchos de los filtros implementados son de alto costo, con un complejo proceso de fabricación y en ciertos casos con altas pérdidas por inserción. De acuerdo a lo anterior, se propuso por primera vez un nuevo método para adecuar o ajustar la longitud de onda en una cavidad láser de fibra en anillo (*free-running*), mediante la inscripción de LPFGs por medio de arco eléctrico dentro de la cavidad, monitoreando simultáneamente los parámetros del láser (potencia óptica y longitud de onda). Con este enfoque, la longitud de onda de la emisión láser puede ser adaptada ajustando el número de descargas periódicas que forman la LPFG. De esta manera, a medida que la intensidad de la LPFG varía (definida

principalmente por el número de períodos), la longitud de operación láser puede ser ajustada a un valor fijo. Los resultados experimentales correspondientes se presentan en las subsecuentes secciones.

4.3 FABRICACIÓN INTRA-CAVIDAD DE LAS LPFG

Las LPFG fueron fabricadas por el método de arco eléctrico. La figura 19 muestra la evolución de espectro de transmisión durante la fabricación de la LPFG (empleando una fuente de luz blanca) a medida que se incrementa el número de períodos. De la figura 19 se puede notar que con 11 descargas periódicas, la profundidad de la banda de atenuación es de aproximadamente 30 dB. De hecho, un enfoque de este trabajo está relacionado con el eje derecho de la banda de atenuación, el cual es usado como un filtro eje para controlar el espectro de emisión láser.

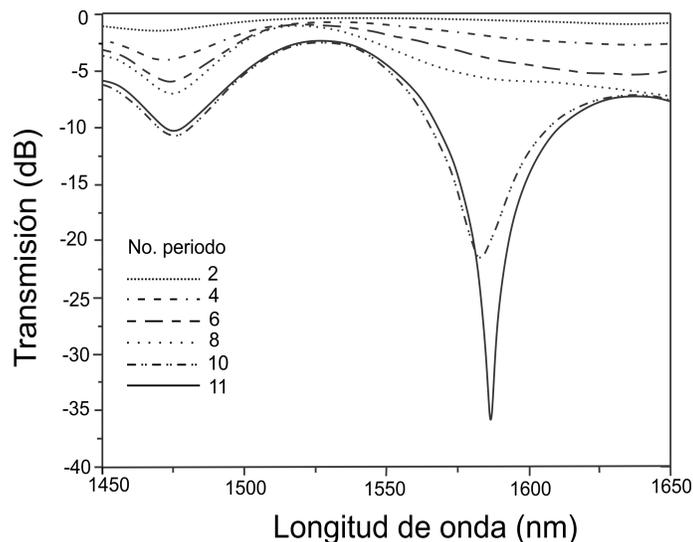


Figura 19. Evolución espectral en la fabricación de una rejilla de período largo

Es muy claro que la pendiente de ambos ejes cambia con el número de período, es decir, con la intensidad de la LPFG. Estas características son muy útiles en la modificación del espectro de ganancia de las fibras activas empleadas en el sistema láser. Generalmente hablando, para suprimir los

modos laterales del espectro de emisión láser, es necesaria la selección con precisión de la posición de las bandas de atenuación, así como su profundidad.

El arreglo experimental del láser y el sistema de fabricación de las LPFGs se muestra en la figura 20. Una fibra estándar SMF-28 se empalma con la fibra dopada con erbio. Una sección corta de esta fibra SMF-28 (<2 cm) se desnuda, se limpia y coloca sobre las ranuras tipo V de una empalmadora por fusión Fitel-S175. La fibra está soportada por un extremo con un sujetador de fibra unido a un motor de traslación (Thorlabs 150 mm Linear Translation Stage, Stepper Motor, con una resolución de 100 nm), y controlada por un motor Thorlabs Benchtop Stepper.

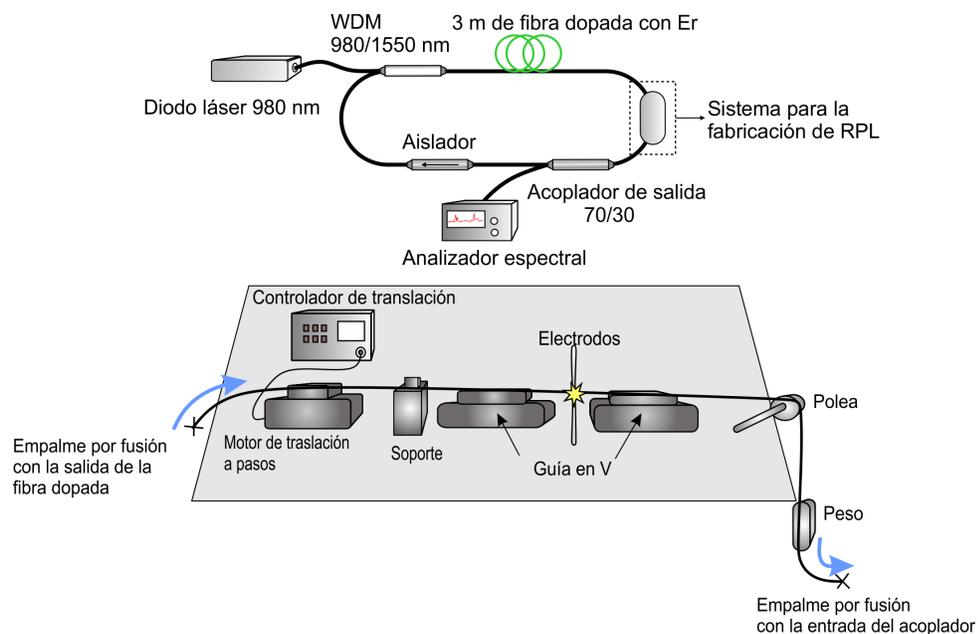


Figura 20. Arreglo experimental del láser de fibra óptica y arreglo para el grabado de rejillas de período largo

El otro extremo de la fibra óptica pasa a través de una polea, para deslizar la fibra, la cual cuenta con un peso muerto para mantenerla bajo tensión.

Después de que el arco eléctrico es aplicado, el motor desplaza la fibra a la siguiente posición con una alta precisión. Las características espectrales fueron monitoreadas paso a paso en cada descarga de arco eléctrico. La

ventaja de este método es que la inscripción de la LPFG puede detenerse en el momento que se obtienen las características de emisión deseadas.

4.4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

La figura 21 muestra la evolución del espectro de emisión láser, a medida que la profundidad de la banda de atenuación de la LPFG se forma, durante el proceso de fabricación. Se puede observar, a medida que el número de períodos se incrementa, la longitud de onda láser se desplaza hacia el lado izquierdo del espectro, conmutando entre una y doble longitud de onda láser. En la figura 22, este comportamiento descrito se muestra en detalle.

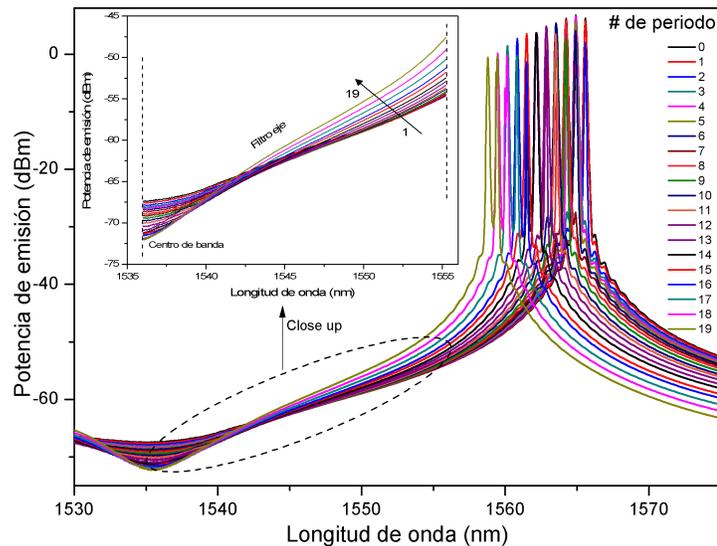


Figura 21. Ajuste de la emisión láser en función de el período de descarga eléctrica

Se puede observar que tan solo tres períodos son suficientes para obtener una sola línea láser con 34.2 dBm de SMSR, mientras que con seis períodos se obtiene en SMRS de 37.79 dBm con doble emisión láser. Una proporción de supresión de modos similar se obtuvo en el trabajo descrito en [68]. El comportamiento de operación de una o doble longitud de onda es, de hecho,

repetitiva a diferentes períodos; sin embargo, las pérdidas por inserción son mayores a medida que se incrementa el número de períodos. Entonces, si se observa una operación de un solo modo el proceso debe detenerse, con el mínimo número de períodos grabados en la rejilla. Cabe mencionar, que el espectro de la figura 22 fue medido con una resolución en longitud de onda de 10 pm.

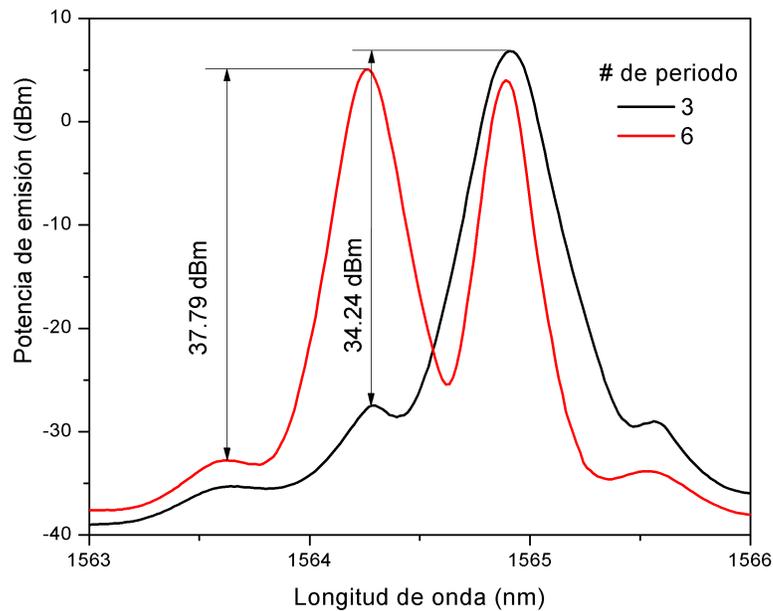


Figura 22. Espectro de emisión para tres y seis períodos de la LPFG

Cabe la posibilidad de que se encuentren modos laterales presentes, por lo que esta medición se tiene que comprobar con una resolución de sub-picómetro. De hecho, para un período de 558 μm de la LPFG, el punto máximo de atenuación está separado de la longitud de onda láser por más de 20 nm (figura 21); es por ésta razón que se emplea la LPFG como un filtro eje. Eso significa que la variación en la longitud de onda láser es consecuencia de los cambios espectrales en el filtro eje, inducido por cada período, como se puede observar en el recuadro de la figura 21, que es el principal factor en el ajuste de la longitud de onda.

La profundidad de la banda de atenuación de la LPFG está determinada por el número de descargas y el número de períodos demuestra un comportamiento cuasi-lineal, como se aprecia en la figura 23.

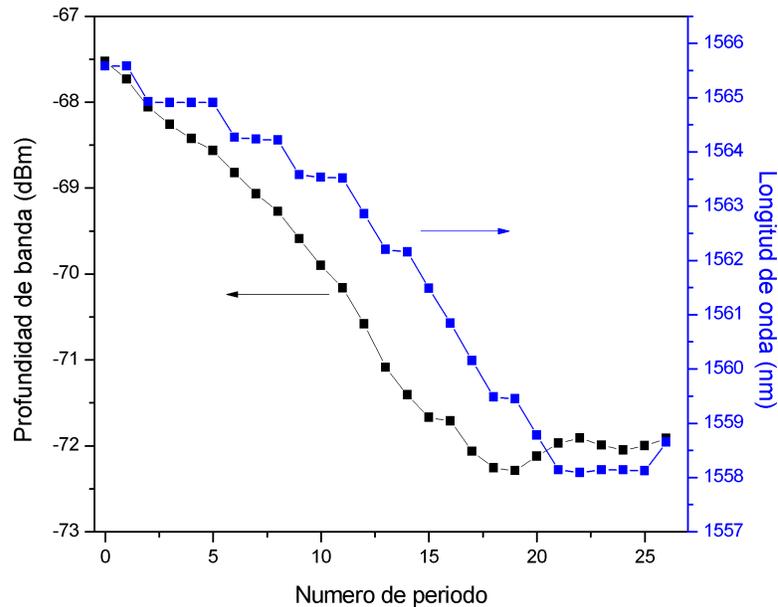


Figura 23. Profundidad de la banda de atenuación y longitud de onda láser como función del número de períodos.

La potencia de emisión láser se atenúa, siguiendo el comportamiento de la profundidad de la banda de atenuación de la LPFG. El efecto en el proceso de fabricación de la LPFG sobre la longitud de onda de emisión se observa claramente en la figura 23, en el cual, la formación de la banda de atenuación desplaza o sintoniza el láser hacia longitudes de onda más cortas, de 1565 nm a 1558 nm. El punto más importante de discusión de la figura 23, es que se puede adecuar la longitud de onda láser con tan solo unos cuantos períodos (2 o 3 períodos), ya que la pendiente de la banda de atenuación es el punto o factor más importante para lograr este objetivo.

Después de 11 descargas o períodos, la longitud de onda decrece de una manera cuasi-lineal como función del período, hasta alcanzar la máxima profundidad de atenuación. Finalmente, más períodos por encima de la

máxima atenuación alcanzada, reduce la profundidad de la banda de rechazo y como consecuencia, la emisión láser se desplaza nuevamente hacia longitudes de onda más largas. Esta dependencia de longitud de emisión láser con el número de períodos permite otra posibilidad de seleccionar la longitud de onda (en una cavidad *free-running*), manteniendo la potencia de emisión láser. Las características de esta LPFG son: longitud de onda de la banda de resonancia centrada en 1538 nm, la cual corresponde a un período de 558 μm , y alcanza su máxima profundidad de atenuación después de 19 descargas eléctricas.

4.5 DISCUSIÓN

El uso de filtros de la longitud de onda empleados para suprimir modos laterales es un método que ha sido sumamente abordado. Por ejemplo, H. Ahmad *et. al.* usaron un filtro Mach-Zehnder basado en un par de adelgazamientos abruptos de fibra óptica, con lo cual demostraron la factibilidad en la supresión de modos laterales hasta el punto en el que la emisión láser oscila en un solo modo longitudinal [67]. El hecho de que se emplee un adelgazamiento abrupto y muy delgado implica que las pérdidas por inserción son elevadas, además de ser un dispositivo muy frágil y con extrema sensibilidad a perturbaciones externas. Por otro lado, las LPFGs comerciales o prefabricadas pueden no presentar las características de filtrado adecuadas y modificar su respuesta espectral muchas veces no es una cuestión práctica, ya que esto involucra doblar la rejilla, desbastar, entre otras, incrementando el nivel de pérdidas. Con este método, es posible obtener la supresión de modos con una LPFG que consta de tan solo tres períodos, para la obtención de una sola longitud de onda de emisión láser. Esto significa que la longitud total de este dispositivo es de tan solo 1.7 mm, además de que la fibra es muy robusta, ya que mantiene su diámetro original. Además, los modos acoplados al revestimiento, responsables de la longitud de onda de resonancia de la LPFG son de orden menor, teniendo en

cuenta que mientras menor sea el orden de los modos acoplados, menor es la sensibilidad a perturbaciones externas.

Una ventaja de la fabricación en línea punto a punto de la LPFG y el monitoreo en tiempo real de la longitud de onda láser es la posibilidad de controlar la pendiente del filtro eje. Este punto es difícil de obtener con otros enfoques basados en dispositivos todo-fibra fabricados en un solo paso (filtros basados en adelgazamientos), o aquellos que requieren un interrupción temporal del camino óptico de las fibras, por ejemplo, estructuras SMS, empalmes, estructuras basadas en micro cavidades Fabry-Perot, entre otras. El proceso empleado en este trabajo puede ser considerado como un método no invasivo y de monitoreo continuo, con diversas ventajas sobre otros sistemas.

4.6 CONCLUSIONES

Fueron presentados los resultados del ajuste de la longitud de onda y las características espectrales de la potencia de emisión de un EDFL, mediante la fabricación intra-cavidad de LPFGs por medio de arco eléctrico. Se encontró que, controlando la pendiente de la banda de atenuación de la rejilla (empleándola como filtro eje), la cual se traslapa con el perfil de ganancia del espectro de la EDF, puede ser empleado para sintonizar la longitud de onda láser. Tres períodos como mínimo, son suficientes para suprimir los modos laterales que oscilan en la cavidad, el cual presenta un nivel de 34.3 dB para un solo modo de operación láser. El filtro es ultra compacto, ya que con tan solo 1.7 mm de longitud es suficiente para lograr el efecto descrito con anterioridad. Además con seis períodos (3.34 mm de longitud total de la rejilla) se obtiene una supresión de modos con un nivel de 37.79 dB, para una doble operación en longitud de onda láser. Este método simple y versátil puede implementarse la mayoría de las cavidades de fibras láser.

CAPÍTULO CINCO

5.1 COMBINACIÓN DE FILTROS BASADOS EN ADELGAZAMIENTOS DE FIBRAS PARA SELECTIVIDAD DE OPERACIÓN EN LÁSERES DE FIBRA ÓPTICA DOPADOS CON ERBIO

En esta sección, se reporta un nuevo método para la selección entre sintonización o emisión múltiple de un láser dopado con erbio. Su funcionamiento está basado en la incorporación de dos filtros tipo peine concatenados, fabricados en secciones de fibras adelgazadas. Ajustando un apropiado nivel de curvatura a los filtros, la longitud de onda puede ser selectiva en dos maneras: oscilación láser con sintonización o la generación de emisión múltiple.

5.2 INTRODUCCIÓN

Los dispositivos ópticos basados en fibra óptica, especialmente los filtros con características de modulación espectrales tipo peine, son elementos adecuados para la generación de láseres multi-longitud de onda. Tienen la gran ventaja de ser implementados en diversos elementos micro-estructurados de fibra óptica, así como en diferentes configuraciones. Como se mencionó en la sección 3.1, su respuesta espectral puede ser modulada a través de perturbaciones físicas, así como su funcionalidad depende de las características geométricas de fabricación. En este sentido, cabe mencionar que se han reportado estructuras tipo Mach-Zehnder, compuestas por dos acopladores 3 dB en combinación con un sistema de control de polarización, esto para obtener múltiple-longitud de onda de un láser dopado con erbio [69]. Incluso, se han desarrollado filtros MZFI utilizando secciones de fibras de cristal fotónico para la generación de láseres multi-longitud de onda, en combinación con técnicas polarización [70], secciones basadas en fibras doble revestimiento fotónicas, dopadas con iterbio para conmutar la emisión

múltiple [71] o secciones de fibra *few-mode* empalmadas con secciones de fibras con desplazamiento de núcleo, en la generación de cuádruple emisión láser [72].

Otra estructura son las rejillas de período largo en cascada para formar un MZFI, usadas en láseres de erbio, sintonizables y multi-longitud de onda [73–76]. Estructuras especiales, como fibras con doble núcleo fabricadas en sílice y en fibra de cristal fotónico se han desarrollado como filtros MZFI para láseres multi-longitud de onda, controlados con técnicas de polarización [77,78]. Recientemente, los filtros MZFI basados en adelgazamientos de fibra óptica se han convertido en un dispositivo muy popular en la búsqueda de nuevos dispositivos para láseres de fibra sintonizables y multi-emisión, gracias a su viabilidad en el proceso de fabricación y su directa implementación en cavidades de fibras láser. Con este enfoque, se ha reportado el uso de adelgazamientos de fibra concatenados para configurar filtros MZFI, que ha sido aplicados para sintonizar las bandas ópticas C y L [79], la obtención de multi-emisión láser basado en el doblamiento de un adelgazamiento en forma S [80], adelgazamientos MZFI grabados químicamente, modulados por un transductor electro-acústico [81] y fibras tipo *up-taper* concatenados fabricados con el mismo propósito [82].

Con base a esta tendencia, se propuso un EDFRL con una variante, la cual consta de la inserción de un brazo formado por dos filtros MZFI concatenados, manufacturados en adelgazamientos de fibra con diferencias en sus características geométricas. Debido a estas características, se puede obtener emisión láser sintonizable o multi-longitud de onda conmutable, aplicando apropiadamente un nivel de curvatura a los filtros. Por otra parte, se analizan las características de los filtros, así como la estabilidad de la emisión láser.

5.3 ARREGLO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental del láser de fibra propuesto se ilustra en la figura 24(a). Esta formado por los mismos elementos empleados y descritos con anterioridad en la sección 3.2, con una variante en la cual un circulador óptico en conjunto con un espejo retroreflector de plata es incluido en la cavidad para mejorar las características del los filtros MZFI, el cual se discutirá en la siguiente sección. Cada interferómetro consiste en dos secciones adelgazadas manufacturadas con un equipo de procesamiento de vidrio Vytran GPX 3400. Las dimensiones geométricas son las empleadas en la manufactura de los adelgazamientos descrita en la sección 3.2, con una diferencia de separación de 5 cm y 50 cm entre adelgazamientos de cada filtro MZFI. La estructura propuesta se muestra en la figura 24(c).

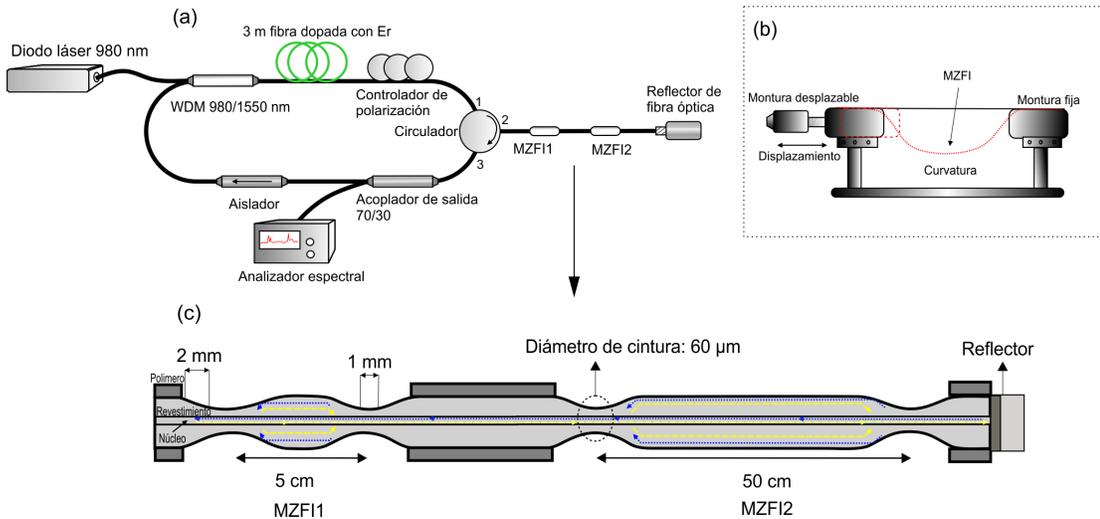


Figura 24. (a) Arreglo experimental del láser en anillo, (b) mecanismo para inducir curvatura, (c) filtro basado en adelgazamientos concatenados

Para una identificación práctica de los interferómetros, estos son etiquetados como MZFI1 y MZFI2. La luz viaja sobre este brazo y es reflejada en la dirección contraria empleando un reflector de plata, con un 97.6 % de reflectividad. El 30 % de la señal es extraída y analizada empleando un analizador de espectro óptico. Los filtros MZFI1 y MZFI2 se colocaron en un

mecanismo formado por dos monturas con desplazamiento micrométrico para inducir curvatura, mostrado en la figura 24(b).

Para obtener las características espectrales de transmisión de los filtros empleados, los dos MZFI se caracterizaron inicialmente empleando como fuente de luz el espectro de fluorescencia de la fibra dopada con erbio.

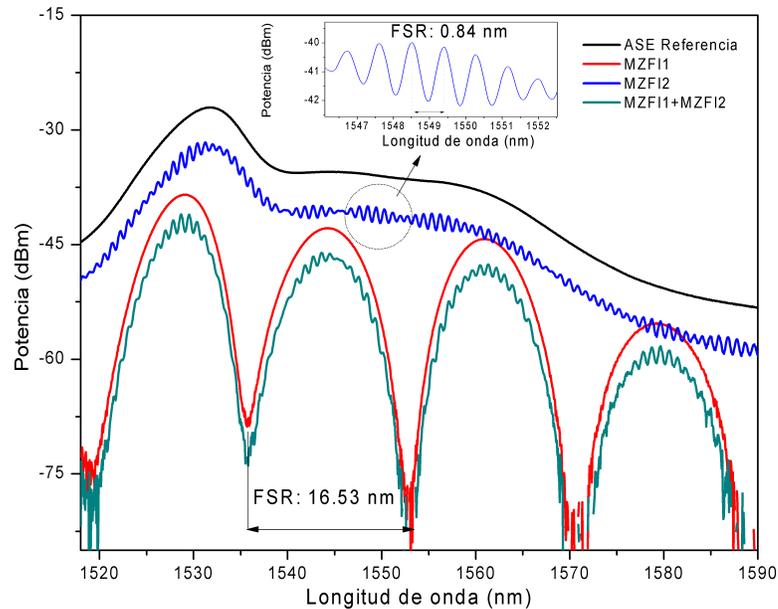


Figura 25. Espectro de transmisión de los filtros concatenados

La figura 25 muestra la respuesta espectral de los interferómetros, en la cual la señal de referencia ASE está trazada en color negro. El espectro de transmisión del MZFI1 y MZFI2 están presentados en las gráficas de color rojo y azul, respectivamente. Finalmente, la respuesta de los filtros MZFI concatenados están representados en la gráfica de color verde. Como se puede observar, de la figura 25, el filtro MZFI1 provee un FSR de 16.53 nm y una visibilidad de franjas de 0.99, mientras que el filtro MZFI2 presenta un FSR de 0.84 nm y una visibilidad de franjas de 0.23. De hecho, el FSR de los filtros está relacionado con la separación entre adelgazamientos. En esta zona, los modos que se propagan adquieren un retardo de desfaseamiento que determina el grado de interferencia, y por ejemplo, el MZFI1 tiene una

separación corta de 5 cm, como consecuencia un FSR mas largo. Si la zona de separación es mas larga, el FSR del interferómetro decrece, como se observa para el MZF12, con una separación de 50 cm resulta en un FSR mas estrecho. El espectro final es la superposición de los dos espectros, en el cual la modulación producida por el MZF12 se superpone al espectro del filtro MZF11.

5.4 SINTONIZACIÓN Y MULTIPLE EMISIÓN: RESULTADOS EXPERIMENTALES

La cavidad láser es bombeada con 65.7 mW de potencia óptica. La oscilación láser se establece en 1562.4 nm en condiciones iniciales, manteniendo los dos MZFI en una posición recta. El incremento en el nivel de curvatura de 0 m^{-1} a 1.1125 m^{-1} (manteniendo en posición recta el MZF12), sintoniza la emisión láser de 1561.4 nm a 1530.41 nm con una tendencia cuasi-lineal. En el proceso de sintonización, se obtiene doble emisión láser, la cual conmuta y sintoniza hacia longitudes de onda mas cortas, con una pendiente de 16.7 nm m^{-1} (de 1561.4–1555.28 nm) y 15.5 nm m^{-1} (de 1536.04–1530.41 nm) Este comportamiento esta presentado en la figura 26 (la línea roja indica la dirección de la sintonización láser), en donde el incremento de curvatura desplaza las bandas de atenuación producidas por el MZF11 hacia el lado izquierdo del espectro óptico, y la emisión láser se establece en los picos modulados de máxima ganancia producidos por el filtro MZF12. Por otra parte, la curvatura incrementa las pérdidas dentro de la cavidad; la relación señal-ruido es cercana a los 30 dB para la longitud de onda sintonizada a 1530.42 nm.

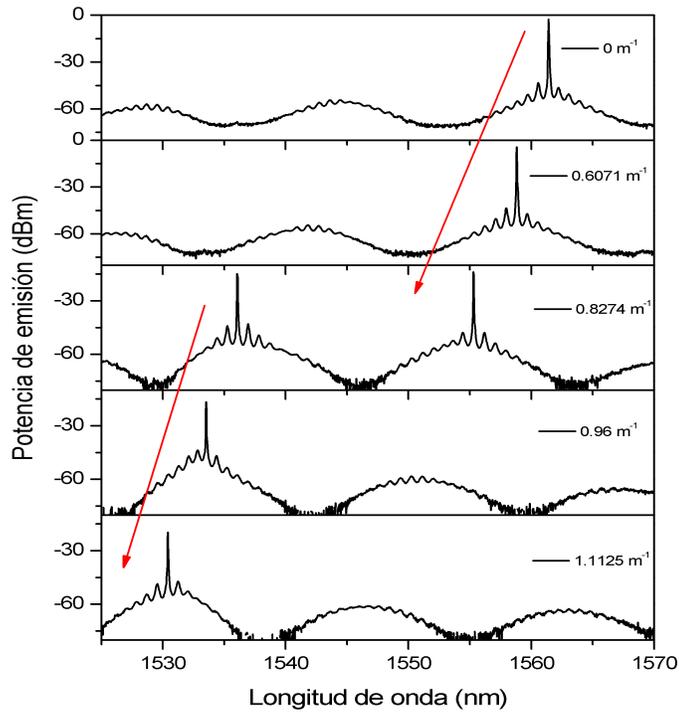


Figura 26. Sintonización de la emisión láser en función de la curvatura aplicada

Regresando a la posición original el MZF11 y aplicando curvatura al MZF12, la emisión láser conmuta entre doble emisión y triple emisión entre 1561.4 nm y 1528.43 nm. La figura 27 muestra el comportamiento multi emisión láser para un nivel de curvatura de 0 m^{-1} a 0.3508 m^{-1} . Como puede apreciarse, la doble emisión conmuta a triple emisión, pero con un espaciado entre líneas láser menor, que va de 32.5 nm a 15.81 nm (para las curvaturas de 0.2883 m^{-1} y 0.3412 m^{-1}). Finalmente, se generan tres longitudes de onda, con separaciones de 15.87 nm y 16.29 nm respecto a la longitud de onda centrada en 1545.23 nm.

Por otra parte, las bandas de atenuación producidas por el filtro MZF11 no presentan desplazamientos en el espectro con el ajuste de la curvatura del MZF12.

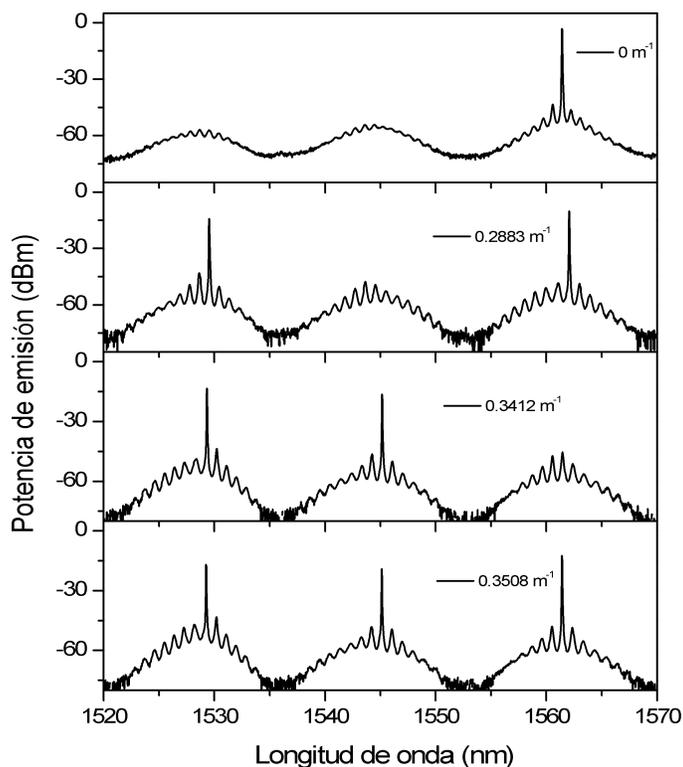


Figura 27. Múltiple emisión y conmutación de la emisión láser en función de la curvatura aplicada

A medida que la curvatura es mayor, la modulación tipo peine del MZF12 se incrementa y modifica la ganancia y pérdidas en la cavidad, reajustando la banda de ganancia en tres zonas con mayor ganancia en picos específicos, generado por el MZF11 en donde la multi emisión láser se establece. La relación señal-ruido se atenúa de 40 a 30 dB debido al incremento de pérdidas dentro de la cavidad.

Con el fin de estudiar la estabilidad del láser a temperatura ambiente, se escanearon los espectros de doble emisión del filtro MZF11 (a una curvatura de 0.8274 m^{-1}) y la triple emisión del MZF12 (a una curvatura de 0.358 m^{-1}) 10 veces en un intervalo de una hora. La figura 28(a) ilustra el espectro de estabilidad de la doble emisión en intervalos de 6 minutos y la figura 28(b) muestra la fluctuación de potencia de emisión láser. Estos resultados indican

que la oscilación láser es muy estable, sin cambios significativos en función del tiempo.

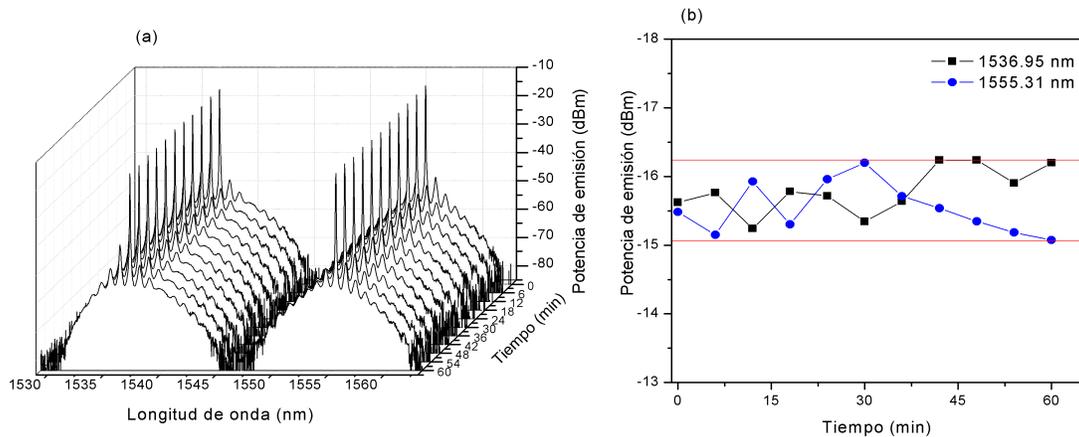


Figura 28. (a) Estabilidad de la distribución de doble emisión en el tiempo, (b) desviación de potencia en función del tiempo.

La máxima fluctuación es 1.1 dB para la longitud de onda de 1555.31 nm dentro de una banda de 1.2 dB (línea roja de la figura 28(b)). Para el caso de la triple emisión láser, la figura 29(a) muestra la respuesta espectral en función del tiempo. La variación de la estabilidad en longitud de onda es de 0.03 nm y su variación máxima es de 1 dB para la longitud de onda centrada en 1561.49 nm. Las longitudes de onda restantes presentan una fluctuación menor a 0.6 dB. Entre mas líneas láser oscilen en la cavidad, mayor es la variación de la estabilidad de la multi emisión láser. De hecho, estas estabildades se pueden incrementar por variaciones de temperatura en el ambiente que rodea los filtros MZFI, ya que los modos que viajan en esta zona están expuestos al medio externo; incluso las vibraciones mecánicas en el arreglo experimental pueden generar estabildades indeseadas. Por lo tanto, en base a los resultados, el láser presenta una alta estabilidad en longitud de onda y potencia de emisión.

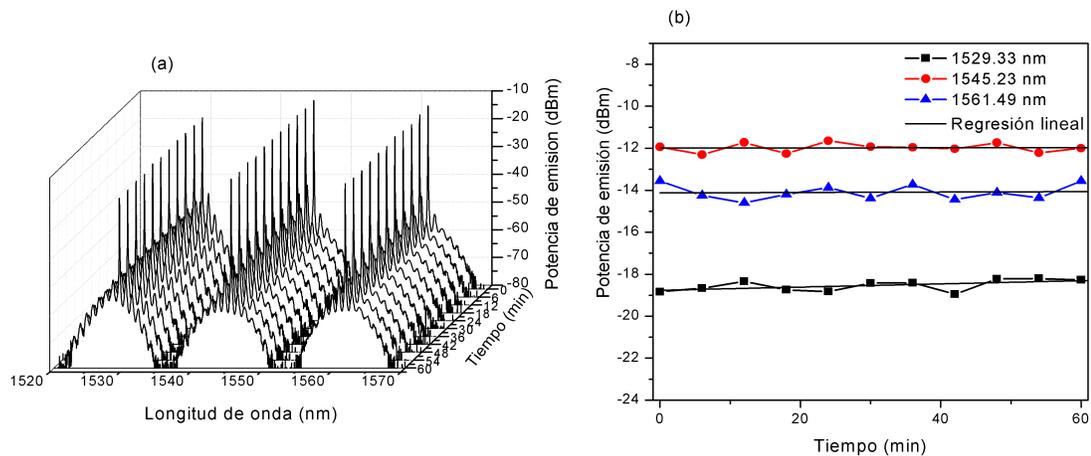


Figura 29. (a) Estabilidad de la distribución de triple emisión en el tiempo, (b) variación en potencia de la triple emisión en intervalo de 60 minutos

La configuración de doble paso formado por el brazo y los filtros MZFI se propuso de esta manera, ya que la visibilidad de franjas de ambos interferómetros es mayor, comparada con la configuración de un simple paso [83]. En nuestro caso, el incremento en la visibilidad de franjas permite la posibilidad de generar número mayor de longitudes de onda láser, con una amplitud similar y alta estabilidad.

La respuesta espectral de cada interferómetro sometido a curvatura es independiente, es decir que la curvatura de MZFI1 no afecta la respuesta espectral del MZFI2 y viceversa, debido a la gran diferencia que existe entre sus FSRs. La separación máxima entre líneas láser es de 31 nm para la operación sintonizable y 33.64 nm para la operación en multi longitud de onda. De esta manera, la mayor ventaja de esta propuesta es que la curvatura aplicada independientemente a cada filtro, permite seleccionar la operación del láser, entre sintonización o múltiple emisión. Adicionalmente, para curvaturas mayores reportadas en este trabajo, las pérdidas son mayores, afectando directamente el umbral de emisión láser, la potencia de emisión y en ciertos casos la oscilación láser desaparece. Finalmente, el filtro puede ser usado en combinación con diferentes elementos de fibra [84] para

obtener multi emisión laser sintonizable, conmutable o incluso para aumentar la sensibilidad de sistemas sensores basados en fibras láser.

5.5 CONCLUSIÓN

En resumen, se han presentado los resultados experimentales de un nuevo método para la selección entre sintonización o múltiple emisión de un láser de fibra óptica dopado con erbio. Dos filtros tipo peine concatenados con diferentes características geométricas fueron empleados como el mecanismo selector de la longitud de onda. La curvatura aplicada a estos filtros induce un comportamiento en la oscilación láser en dos condiciones diferentes. La primera sintonización de la emisión láser entre 1561.4 nm y 1530.41 nm y la segunda es la generación de hasta tres longitudes de onda simultaneas distribuidas entre 1562.06 nm y 1528.43 nm. El láser presenta alta estabilidad, con variaciones menores a 1 dB y una relación señal-ruido por arriba de los 29 dB.

CAPÍTULO SEIS

6.1 LÁSER DOPADO CON ERBIO Q-SWITCH MULTI-LONGITUD DE ONDA, BASADO EN FIBRAS TM-HO COMO ABSORBEDORES SATURABLES Y ASISTIDO POR FILTROS EN ADELGAZAMIENTOS DE FIBRA

En el presente capítulo, se analizan y reportan los resultados de un láser dopado con erbio, multi-longitud de onda Q-switch, basado en una sección de fibra co-dopada Tm-Ho como absorbedor saturable. La cavidad es asistida por un filtro de adelgazamientos concatenados, para estabilizar la longitud de onda. Este filtro actúa como un filtro peine que permite la emisión láser simultánea en las longitudes de onda de 1529.69 nm, 1531.74 nm y 1533.48 nm con alta estabilidad. Incrementando el nivel de bombeo, se obtienen pulsos ópticos que varían de 10.46 kHz a 61.8 kHz. Los parámetros propios del láser como la energía de pulsos, potencia de emisión y estabilidad son también analizados.

6.2 INTRODUCCIÓN

Los láseres de fibra óptica tipo Q-switch, ambos pasivos y activos, son fuentes de pulsos ópticos con propiedades interesantes, tales como robustez, compactos, con pulsos altamente energéticos, tasas de repetición altas y en ciertos casos con la capacidad de generar multi-emisión láser. Estas fuentes ópticas se han vuelto muy demandadas en aplicaciones como sensado óptico, micro fabricación o procesamiento de materiales, entre otros. La integración de estos sistemas en esquemas todo-fibra incluso ofrecen importantes características en el ámbito científico.

En años recientes, sistemas láser Q-switch pasivos todo-fibra se han reportado utilizando una diversidad de materiales con características de absorción saturable incluyendo, por ejemplo, nano tubos de carbón [85–91],

MoS₂, WS₂, MoSe₂, WSe₂, calcogenuros de metales de transición [92-98], nano partículas de Fe₃O₄ [99,101], grafeno [102-109], aislantes topológicos [110-112], o espejos semiconductores saturables [113,114]. Todos estos materiales presentan diferentes propiedades ópticas como tiempos de recuperación rápidos, alto nivel de umbral de daño óptico o respuesta óptica no lineal alta que permite la operación efectiva en EDFL pulsados Q-switch, con pulsos que varían de decenas de kHz a cientos de kHz con una alta energía.

Recientemente, un número importante de láseres de fibra Q-switch que operan en las bandas ópticas C y L se han desarrollado utilizando secciones de fibras dopadas con Tm y co-dopadas Tm-Ho, como fibras con absorción saturable (FSA). Esencialmente, los pioneros en el desarrollo de Q-switch EDFL basados en secciones de fibra dopadas con tulio, fueron *Tsai et. al.* [115] y *Kurkov et. al.* [116]. Demostraron pulsos ópticos con repeticiones menores a 10 kHz y emisión láser entre 1570 nm y 1580 nm. Mas tarde, *Tao et. al.* demostró Q-switch y Mode-locked EDFLs usando una sección de fibra Tm-Ho, incrementando la repetición de los pulsos ópticos (comparado con el uso de Tm FSA), debido a la alta interacción entre el sistema formado por los iones de Tm y Ho y sus propiedades temporales de absorción y relajación, [117,118]. Posteriormente, desarrollaron un EDFL pulsado Q-switch, sintonizable 38 nm en una amplia banda óptica de 1535 nm a 1573 nm, con una sección de Tm-Ho FSA y un filtro Fabry-Perot [119]. Recientemente, un láser multi-longitud de onda Q-switch se obtuvo al emplear el efecto de bateo de modos (*mode beating*), creado por las características modales de transmisión entre una sección de 37 cm de fibra co-dopada Tm-Ho y fibra estándar SMF-28 que componen la cavidad láser, generando multi-emisión en el rango de 1545 nm 1560 nm [120]. Así también, se demostró doble emisión de un láser pulsado Q-switch y Mode-locked, usando 19 cm de fibra Tm-Ho como FSA y la posterior inserción de 195 m de fibra estándar en la cavidad [121].

En la sección antes descrita, la generación de láseres EDFL multi-longitud de onda y pulsados Q-switched empleando fibras Tm-Ho como FSA necesita un trabajo mas profundo, como lo sugiere *Tao et. al.* en [120], en términos de estabilidad de la longitud de onda o su manipulación. Siguiendo esta dirección, se propone un EDFL altamente estable (en longitud de onda), Q-switch multi-longitud de onda basado en una sección de fibra Tm-Ho como FSA, con la ventaja de ser asistido por una estructura a base de adelgazamientos, el cual actúa como un filtro tipo peine. El filtro permite la multi-emisión láser, con una operación de alta estabilidad temporal, manteniendo las características ya conocidas de los pulsos Q-switch referenciados en esta sección. Esta es la primera vez (hasta el tiempo de realización de este trabajo) que se emplea una estructura basada en adelgazamientos, como estabilizador del funcionamiento de la longitud de onda, cuando se utiliza una sección de fibra Tm-Ho como FSA en láseres de fibra Q-Switch.

6.3 ARREGLO EXPERIMENTAL

El arreglo experimental del láser en anillo se muestra en la figura 30(a). El sistema consiste en 3 m de fibra dopada con erbio, la cual es bombeada con un diodo láser a 980 nm a través de un multiplexor por división de longitud de onda WDM. Un acoplador se integra a la cavidad, el cual extrae el 30% de la señal láser, mientras que el 70% restante retroalimenta la cavidad. La señal extraída es dividida mediante un acoplador 50/50 para monitorear ambas respuestas, la temporal y la respuesta en longitud de onda. La respuesta temporal es medida empleando un osciloscopio (Tektronix DPO7054) y un fotodetector (DET08CFC InGaAs Thorlabs), mientras que la longitud de onda usando un analizador de espectro óptico (OSA Anritsu MS9740A).

Los pulsos son generados incorporando a la cavidad un FSA, que consiste en una sección de 40 cm de fibra co-dopada Tm-Ho, mono modal (TH512 CorActive).

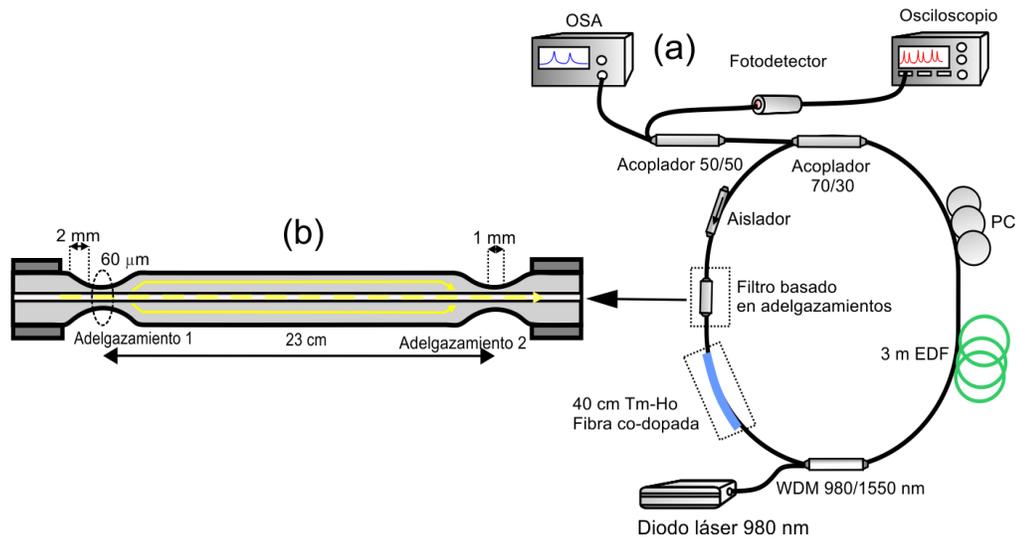


Figura 30. a) Arreglo experimental del láser Q-switch multi-longitud de onda, b) filtro peine formado por dos adelgazamientos con separación de 23 cm.

Por otra parte, el filtro está compuesto por dos secciones de adelgazamientos cuasi-abruptos fabricados en fibra SMF-28, con las mismas dimensiones geométricas empleadas en las secciones 3 y 4 de esta tesis, con una separación entre adelgazamientos de 23 cm, representado en la figura 30(b). Finalmente un aislador y polarizador se incluyen en la cavidad, para asegurar la oscilación láser unidireccional y controlar el estado de polarización, respectivamente.

El sistema de absorción y relajación de iones, construido entre los iones del Erblio y la fibra Tm-Ho FSA (y la intensiva interacción entre los iones del Tm y Ho) es el principal mecanismo en la generación del láser EDFL Q-switch (explicado en detalle en la referencia [118]). Inicialmente, un primer experimento implementado del EDFL Q-switch se realizó sin el filtro tipo peine. Con esta condición, el umbral láser se ubica en 28.78 mW de potencia de bombeo y el láser se genera en la longitud de onda de 1534.44 nm, como se puede apreciar en la figura 31(a). Para este nivel de bombeo, se observa un comportamiento de régimen continuo del láser.

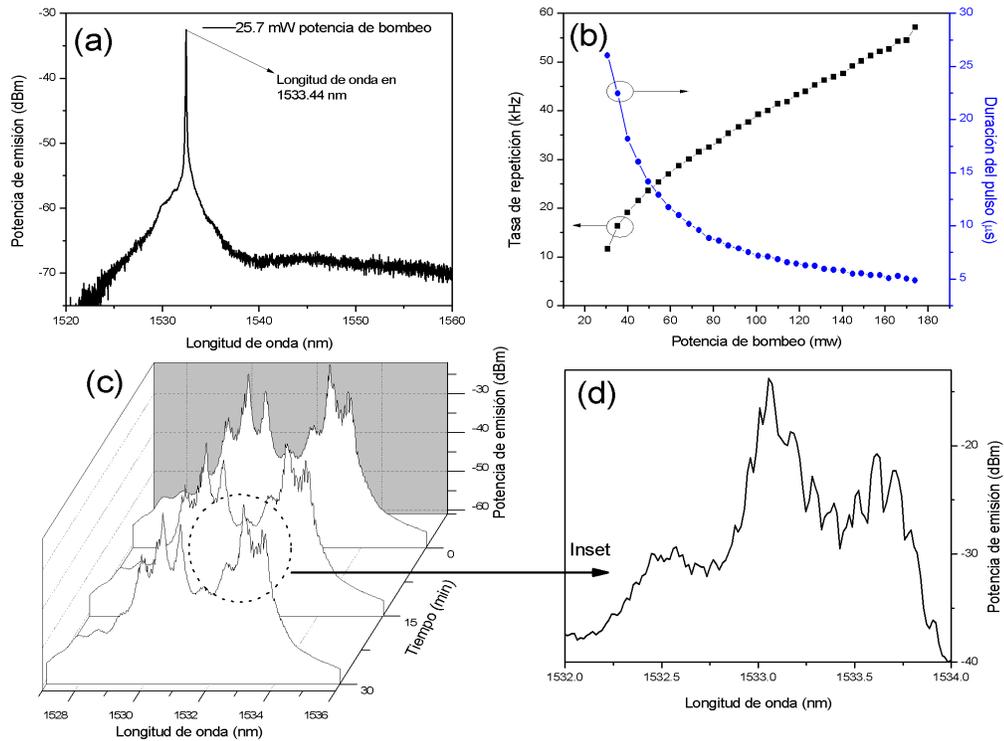


Figura 31. a) Emisión a 1533.44 nm antes del régimen Q-switch, b) tasa de repetición del pulso y duración como función de la potencia de bombeo, c) espectro del láser ensanchado y escaneado 30 min, d) recuadro de la figura 31 (c) .

El láser se genera en esta longitud de onda, como resultado de las propiedades de absorción del FSA, en el cual los iones del Tulio absorben preferentemente las longitudes de onda mas largas de la banda de emisión generada por la fibra dopada con erbio, reajustando el espectro de emisión y permitiendo la oscilación láser en el punto de ganancia máximo, en este caso, cercana a los 1530 nm.

Bombeando la cavidad con 30.6 mW de potencia óptica, se generan pulsos ópticos Q-switch estables. La figura 31(b) ilustra el comportamiento de la tasa de repetición de pulsos y la duración de éstos en función de la potencia de bombeo, en donde los pulsos varían de 11.6 kHz a 57.14 kHz y la duración del pulso decrece de 26.05 μm a 4.86 μm, para un máximo bombeo de 174

mW. Además, por encima de este valor de bombeo, el FSA es totalmente saturado y el láser opera en régimen continuo. Por otro lado, a medida que se incrementa el bombeo, el ancho espectral del láser es mas amplio, generando multi-emisión inestable, debido a la intensa competición entre modos. La figura 31(c) muestra el comportamiento inestable de espectro de multi-emisión láser, a un nivel de bombeo de 110 mW, escaneado tres veces en un intervalo de 30 minutos, el cual tiene una fluctuación de ± 2.45 dB en potencia y 0.2 nm en longitud de onda.

6.4 OPERACIÓN LÁSER Q-SWITCH MULTI-LONGITUD DE ONDA

Para contrarrestar las inestabilidades en términos de longitud de onda en el régimen pulsado Q-switch del láser, se insertó el filtro tipo peine, con la finalidad de mitigar la intensa competición entre modos y generar multi-emisión estable. El principio de operación del filtro se fundamenta en la sección 2.3.4. Las características espectrales dependen de la geometría de los adelgazamientos.

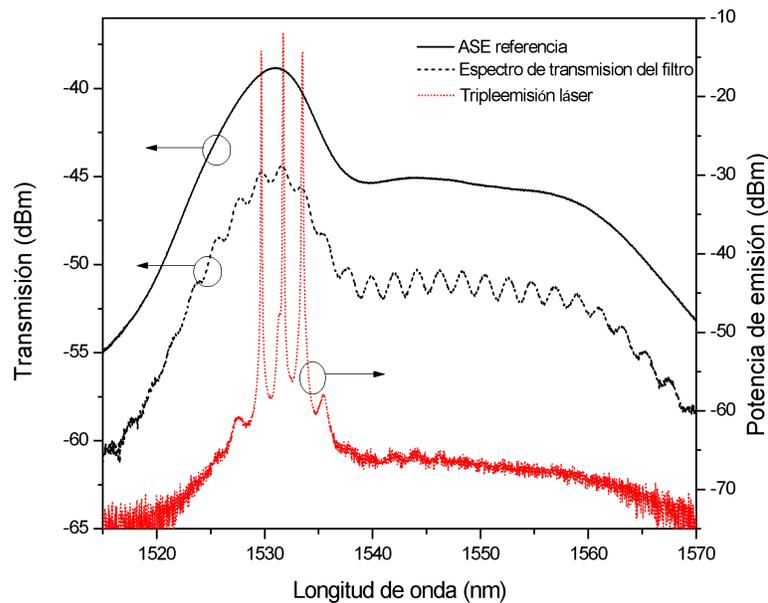


Figura 32. Transmisión espectral del filtro en adelgazamientos (línea punteada) caracterizada empleando la fluorescencia de la fibra de Er (línea sólida). Triple emisión láser (línea punteada roja)

Antes de la inserción del filtro en la cavidad, se obtuvieron sus características espectrales de transmisión (línea discontinua de la figura 32), empleando la fluorescencia de la fibra de erbio (línea negra en la figura 32) como referencia. La visibilidad de franjas del filtro o interferómetro es de ~ 0.15 , mientras que su FSR es ~ 2.1 nm. Las pérdidas por inserción del filtro son ~ 3.3 dB. Una vez que el filtro se inserta en la cavidad, tres longitudes de onda láser se generan y se establecen en 1529.69 nm, 1531.74 nm y 1533.48 nm, trazadas en segmentos de punto rojo en la figura 32 (para un bombeo de 110 mW). De la figura 32, se puede observar que los picos de la longitud de onda láser, coincide con los picos de transmisión generados por el filtro peine, como era esperado, mostrando una OSNR de 54 dB y 0.06 nm de ancho espectral de las líneas láser.

Por otra parte, los pulsos Q-switch se caracterizaron con el filtro en la cavidad, y su respuesta temporal se muestra en la figura 33.

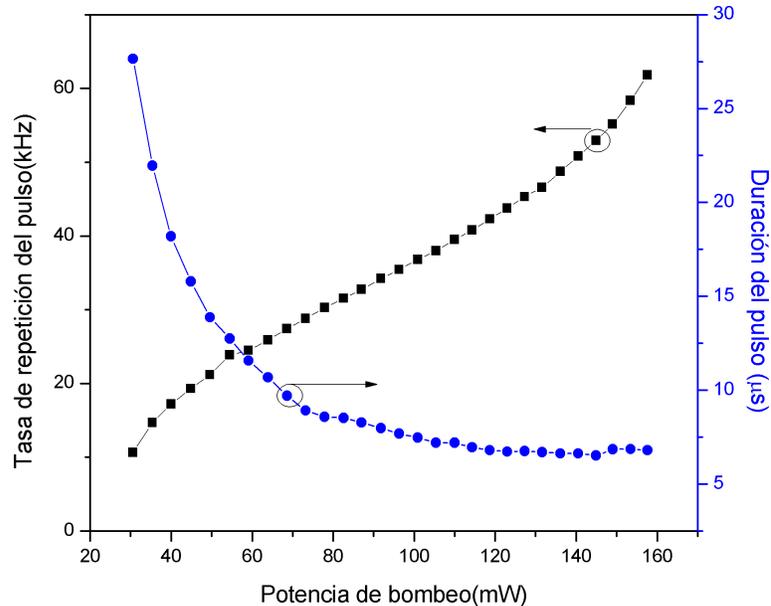


Figura 33. Repetición del pulso Q-switch y duración en función de la potencia de bombeo.

Inicialmente el régimen Q-switch se establece a 30 mW de potencia de bombeo, con una repetición de pulsos de 10.46 kHz. Subsecuentemente, el incremento en el bombeo incrementa la tasa de repetición de 10.46 kHz a 61.8 kHz para un bombeo máximo de 157.6 mW. El ancho de pulso disminuye de 27.65 μ s a 6.8 μ s.

La figura 34, muestra cuatro muestras de los trenes de pulsos Q-switch estables, indicando las tasas de repetición a diferentes niveles de bombeo (de 30.6 mW a 149 mW).

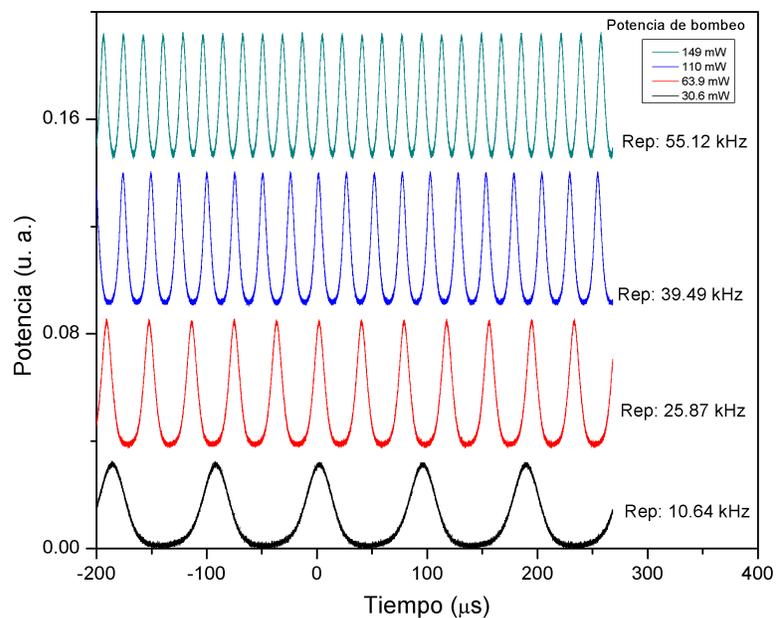


Figura 34. Cuatro diferentes trenes de pulsos, mostrando diferentes tasas de repetición.

Otro parámetro importante del láser Q-switch multi-longitud de onda es la potencia de emisión y la energía de los pulsos, los cuales se ilustran en la figura 35 como función de la potencia de bombeo. La máxima potencia obtenida de este sistema láser en el régimen Q-switch es \sim 27.61 mW y exhibe una eficiencia óptica de 17.51%. La máxima energía es de 496.34 nJ para una repetición de pulso de 48.75 kHz y 136.1 mW de potencia de bombeo.

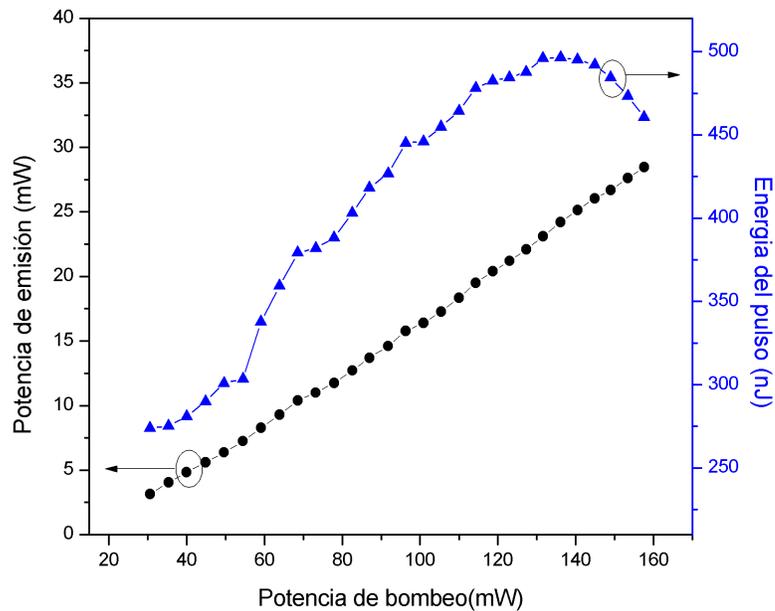


Figura 35. El comportamiento de la potencia de emisión láser y la energía de pulsos en función del bombeo,

Finalmente, para caracterizar la estabilidad multi-longitud de onda, el espectro de emisión láser se monitoreó en un intervalo de una hora, tomando capturas de espectros cada cinco minutos, mientras la cavidad era bombeada a 110 mW de potencia. De la figura 36(a) se observa una alta uniformidad en la intensidad de la multi-emisión láser. Por otra parte, la máxima desviación de la longitud de onda es de 0.03 nm para las tres longitudes de onda, y su comportamiento se muestra en la figura 36(b). La estabilidad en la potencia de emisión, por otro lado, presenta una máxima desviación de ± 0.371 dB, ± 0.374 y ± 0.376 para las tres diferentes longitudes de onda.

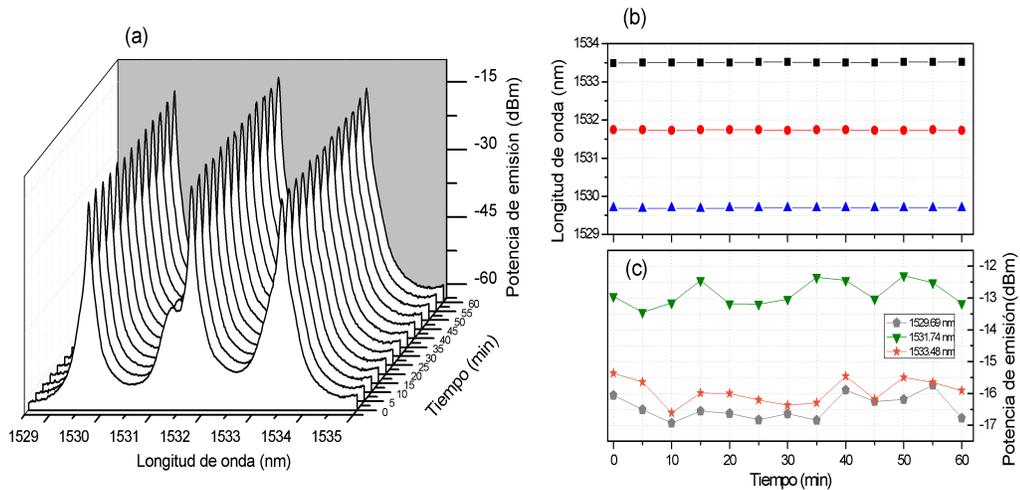


Figura 36. a) Distribución espectral de la triple emisión, tomadas cada 5 minutos en un intervalo de una hora, b) desviación máxima de 0.03 nm, c) desviación de potencia para las respectivas líneas láser.

6.5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

De la figura 31 (c), se puede observar que en la cavidad *Free-running*, la multi-emisión laser Q-switch tiende a ensanchar su rango espectral con algunos rizados (ver figura 31(d)) debido a la modulación de autofase (*self-phase modulation*) [122]. Este ensanchamiento espectral induce una intensa competición de modos en la cavidad láser, induciendo inestabilidades (longitud de onda inestable y potencia de emisión). Para mitigar este fenómeno, se propone la inserción del filtro en adelgazamientos con el fin de adecuar el espectro de ganancia, usando un elemento con pérdidas dependientes de la longitud de onda y generar multi-emisión con alta estabilidad (ver figura 32). La máxima desviación en potencia es de ± 0.376 dB para la longitud de onda a 1533.48 nm, corroborando de esta manera la efectividad del filtro, el cual mejora las características de estabilidad, mitigando la competición entre modos.

Finalmente, para comparar esta propuesta con otras que usan diferentes materiales y efectos ópticos para estabilizar láseres Q-switch multi-longitud de onda, se hacen las siguientes observaciones: una ventaja de utilizar Tm-

Ho como absorbedor saturable y un filtro en adelgazamientos para asistir la multi-emisión láser, es la simplicidad de inserción en la cavidad (empalme por fusión), mientras que los resultados obtenidos son comparables en términos de tasas de repetición de pulsos, duración, energía o potencias de emisión con diferentes materiales con absorción saturable [86,93,102]. Además, el filtro es una estructura con un relativo bajo costo de fabricación (utilizando fibra SMF-28) y puede ser comparado con el uso de MoS₂ como estabilizador de la multi-emisión láser en la manera en que suprime la competición de modos [94]. En el caso de las referencias [120,121], la fibra Tm-Ho es empleada además de FSA, como una estructura con efecto de filtrado. En ambos casos, el FSA necesita una longitud apropiada de fibra Tm-Ho. Este requerimiento puede afectar directamente la dinámica del láser Q-switch en términos de frecuencia de repetición y ancho de pulso. Cabe destacar que, debido a la sensibilidad del filtro peine a perturbaciones externas como tensión, doblamiento, temperatura o cambios en índice de refracción, cabe la posibilidad de que el láser pueda ser sintonizado o presente conmutación entre sus líneas láser.

6.6 CONCLUSIÓN.

En resumen, se presentaron y analizaron los resultados de un láser Q-switch dopado con erbio multi-longitud de onda, empleando una sección de 40 cm de fibra Tm-Ho como absorbedor saturable. La cavidad es asistida por un filtro tipo peine, permitiendo la emisión multi-longitud de onda con alta estabilidad (1529.69 nm, 1531.74 nm y 1533.48 nm). Se obtuvo una tasa de repetición de 10.46 kHz a 61.8 kHz con variación en la duración del pulso de 27.65 μ s a 6.8 μ s, una potencia de 27.61 mW y una máxima energía de 496.34 nJ. El filtro actúa como un estabilizador, el cual mejora las características críticas como la estabilidad en potencia y longitud de onda.

CAPÍTULO SIETE

7.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección, se realizó una comparación de los resultados obtenidos en la experimentación (de los capítulos 3 al 6) con resultados basados en algunos trabajos en la literatura. En éstas se enlistan parámetros como longitud de onda de emisión, estabilidad, ancho espectral, rango de sintonización entre otros. En el caso del láser pulsado, se hace un comparativo entre repetición de pulso, longitud de onda, tipo de absorbedor saturable y demás. Estas tablas nos indican que tan efectivos son los métodos de manipulación espectral, los tipos de filtros y arreglos experimentales que se implementaron en esta tesis, así como el de evaluar similitudes entre ellos.

Tabla 2. Comparación de resultados obtenidos del capítulo 3 con resultados demostrados en la literatura.

Referencia	[41]	[43]	[45]	[48]	Este trabajo
Longitud de onda	Emisión múltiple 1546.25–1565.07 nm	Cuádruple emisión 1531–1542 nm	Doble emisión 1557 nm y 1558.6 nm	Sintonización (39 nm) de 1532–1564 nm	Emisión múltiple 1544.66–1564.46 nm
Tipo de filtro	Filtro basado en una sección de fibra fotónica de doble núcleo.	Filtro peine basado en secciones de fibra SMF con núcleos expandidos	Un adelgazamiento en fibra SMF de 1 μ m de diámetro	Una sección de fibra sin revestimiento, empalmada entre dos fibras SMF 28	Filtro MZ basado en adelgazamientos concatenados
SNR	28 dB	35 dB	40 dB	40 dB	30 dB
FWHM	-----	-----	-----	0.02 nm	.03 nm
Estabilidad	0.8 dB	> 1 dB	> 0.5 dB	> 3 dB	> 3 dB
Tipo de cavidad	Anillo	Anillo	Anillo	Anillo	Anillo

Principio de Operación	Controlan el estado de polarización en la cavidad, además de aplicar temperatura al filtro	El filtro actúa como interferómetro MZ. Se ajusta la longitud de onda variando el estado de polarización	La doble emisión se genera debido a las características espectrales (tipo peine) del adelgazamiento	Variación del índice de refracción externo en el filtro empleando diferentes concentraciones de glicerol	Aplicando curvatura al filtro en combinación con soluciones de diferentes índices de refracción
------------------------	--	--	---	--	---

Tabla 3. Comparación de resultados obtenidos del capítulo 4 con resultados demostrados en la literatura.

Referencia	[57]	[58]	[63]	[64]	Este trabajo
Longitud de onda	Sintonización (107 nm) 1865–1972 nm	Sintonización (40 nm) 1563.1–1604 nm	Sintonización (8nm) 1558–1564 nm	Sintonización (37 nm) 1525–1563 nm	Sintonización (7.5 nm) entre 1565.5 nm y 1558 nm
Tipo de filtro	Dos LPFG inducidas mecánicamente	LPFG inducida mecánicamente	Filtro Fabry-Pérot formado con dos rejillas de Bragg	Filtro MZ induciendo dos adelgazamientos de fibra SMF	Rejillas de periodo largo
SNR	25 dB	-----	68 dB	60 dB	38 dB
FWHM	-----	-----	2.5 kHz	0.16 pm	0.02 nm
Estabilidad	3 dB	3 dB	0.4 dB	0.4 dB	> 0.5 dB
Tipo de cavidad	Anillo	Anillo	Anillo	Anillo	Anillo (integrando un sistema para producir LPFG)
Principio de operación	Aplicando diferentes niveles de fuerza a las LPFG, se modifica el periodo de la rejilla y sintoniza su banda de atenuación	Variando el periodo de la rejilla mediante la aplicación de fuerza sobre un rodillo de grafito	Se modifica la finesa espectral del filtro Fabry-Pérot aplicando tensión controlada	La sintonización se realiza con un filtro sintonizable óptico pasabanda. EL filtro MZ añade alta estabilidad	La emisión sintoniza a medida que se graba la LPFG dentro de la cavidad

Tabla 4. Comparación de resultados obtenidos del capítulo 5 con resultados demostrados en la literatura

Ref.	[76]	[77]	[79]	[80]	Este trabajo
Longitud de onda	Emisión múltiple 1552.84–1557.81 nm	Sintonización (55 nm) 1564–1605 nm 1550–1565 nm	Doble emisión y sintonización (3.6 nm) 1561.6–1568.9 nm	Triple emisión 1544.3–1548.82 nm	Sintonización y múltiple emisión independiente (30 nm) 1561.4–1530.41 nm
Tipo de filtro	MZ fabricado en fibra fotónica de doble núcleo	MZ concatenando dos adelgazamientos en fibra SMF	MZ en adelgazamientos por desbaste químico, en conjunto con un transductor acústico óptico	Filtro MZ basado en dos secciones aumentadas empalmadas con un fibra SMF desalineada	Dos filtros MZ en adelgazamientos con diferentes longitudes (5 y 50 cm).
SNR	30 dB	50 dB	55 dB	45 dB	30 dB
FWHM	-----	0.1 nm	0.1–0.2 nm	-----	0.03 nm
Estabilidad	1.5 dB	0.5–2 dB	3 dB	0.9 dB	1.1 dB
Tipo de cavidad	Anillo	Anillo	Anillo	Anillo	Anillo con un brazo interferométrico
Principio de operación	El filtro MZ induce la emisión múltiple. Se controla el estado de polarización para variar el espaciamiento entre líneas	La sintonización se realiza cambiando las características espectrales del filtro MZ aplicando doblamiento	Modificando la frecuencia del transductor electro óptico las bandas de atenuación se desplazan y la doble emisión es sintonizada.	El filtro genera la múltiple emisión y esta se controla mediante el estado de polarización en la cavidad	Se aplica curvatura independiente a cada filtro. Uno de ellos sintoniza la emisión mientras que el otro genera emisión múltiple

Tabla 5. Comparación de resultados obtenidos del capítulo 6 con resultados demostrados en la literatura

Referencia	[93]	[98]	[108]	[113]	Este trabajo
Tipo de absorbedor saturable	Película de WS ₂	Nano partículas de Fe ₃ O ₄	Película de SB ₂ -Te ₃	Sección de fibra Tm-Ho	Sección de fibra Tm-Ho
Cavidad	Anillo	Anillo	Anillo	Anillo	Anillo
Longitud de onda	1565 nm	1555 nm	1559 nm	1557.5 nm	1529.69 nm, 1531.74 nm y 1533.48 nm
Ancho de pulso	1.3–3 μs	47–3.5 μs	5.24 μs–857 ns	-----	27.65 μs a 6.8 μs
Repetición del pulso	33–108 kHz	5.5–49 kHz	42–132 kHz	6–42 kHz	10.46 kHz a 61.8 kHz
Energía	-----	71 nJ	152 nJ	-----	496.34 nJ

Con base en las tablas comparativas anteriores, los resultados de esta tesis ofrecen características importantes en términos de longitud de onda (amplio rango de sintonización) tanto en estabilidad y relación señal a ruido, comparables con la mayoría de los trabajos presentes en la literatura.

CAPÍTULO OCHO

8.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan los aspectos mas relevantes a modo de conclusiones y recomendaciones de este trabajo de tesis. Entre las conclusiones se encuentran aspectos como los métodos y dispositivos utilizados para la producción y manipulación de láseres de fibra óptica sintonizables, conmutables, multi-longitud de onda y pulsados en la región infrarroja cercana a 1550 nm, así como los rangos de emisión alcanzados. Por lo tanto, en base al análisis de resultados se puede concluir que:

- Los dispositivos de filtrado óptico basados adelgazamientos de fibra óptica y LPFGs empleados en el proceso de experimentación, además de su sencilla implementación en las cavidades láser de fibra óptica, reducen el costo total del sistema principalmente por ser fabricadas en fibras estándar SMF-28. Son elementos de relativo bajo costo, comparados con dispositivos que se pueden adquirir comercialmente, por mencionar algunos: rejillas de Bragg, fibras fotónica, fibra polarizada, fibra con dos o más núcleos.
- La características espectrales de los adelgazamientos de fibra óptica fueron empleadas para estimular en la cavidad láser la oscilación de múltiples longitudes de onda, con características de alta estabilidad temporal en potencia y distribución espectral incluyendo además, diferentes parámetros geométricos de las fibras adelgazadas, con el fin de obtener diferentes rangos espectrales de emisión láser.
- En el capítulo 3, se empleo un filtro Mach-Zehnder sometido a doblamiento y cambio de índice de refracción externo de manera simultanea, encontrando que esta sensibilidad cruzada permite conmutar

entre 1530.62 nm y 1565 nm la emisión, contrario al solo aplicar únicamente curvatura que genera emisión entre 1544.66 nm y 1564.46 nm. Se incrementa aproximadamente en 14 nm el rango de sintonización, generando un máximo de cinco longitudes de onda láser, probando ser un método novedoso de acuerdo a la literatura.

- En el caso de las LPFG en el capítulo 4, la fabricación de este elemento en línea con la cavidad láser permite monitorear en tiempo real el proceso de grabado en función de la emisión láser, posibilitando ajustar la longitud de onda a un valor deseado. La banda de atenuación de la LPFG es empleada como un filtro eje, a medida que cambia su pendiente la longitud de onda se ajusta entre doble emisión o solo una emisión, suprimiendo de manera efectiva modos adyacentes indeseables, con únicamente tres períodos como mínimo, haciendo muy compacta (1.7 mm) la LPFG. Este método es versátil ya que se puede implementar la mayoría de las cavidades láser de fibra.

- Para la sección 5, concatenando un par de filtros Mach-Zehnder y aplicando curvatura independiente a cada uno, fue posible manipular la emisión láser de dos maneras diferentes. La sintonización de la emisión láser continua entre 1561.4 nm y 1530.41 nm. Aplicando curvatura al segundo filtro, se generan hasta tres longitudes de onda simultáneas distribuidas entre 1562.06 nm y 1528.43 nm. La ventaja en este trabajo fue la versatilidad de operación del láser, además de presentar una alta estabilidad con variaciones máximas de 1.1 dB.

- En la generación del láser pulsado Q-switch (capítulo 6), se empleó una sección de fibra óptica dopada con tierras raras como absorbente saturable Tm-Ho. La aportación importante en este trabajo fue la implementación de un filtro Mach-Zehnder con el fin de generar triple

emisión láser, además de añadir una alta estabilidad temporal a la emisión, suprimiendo la competición de modos ocasionada por efectos no lineales en la cavidad. Así mismo, se mantuvieron los parámetros del régimen pulsado como su tasa de repetición, ancho de pulso y energía, resultados muy comparables publicados en la literatura utilizando diferentes materiales como absorbedores saturables.

- El ancho espectral de emisión láser que se obtuvo en todo el proceso de experimentación abarca completamente la banda óptica infrarroja C, con un total de 37 nm desde 1528 nm a 1567 nm.

Como recomendaciones para un futuro trabajo en este tipo de láseres se puede decir que:

- Un complemento muy importante es modelar el comportamiento de los filtros empleados en esta tesis y el comportamiento de la emisión láser bajo los esquemas de aplicación de perturbaciones como curvatura, cambio en índice de refracción, así como en el régimen pulsado Q-switch. Un reto sustancial que dará un mayor impacto al trabajo de investigación en su parte experimental.
- La búsqueda e implementación de nuevos esquemas y dispositivos de fibra óptica con características espectrales similares a los empleados en este trabajo, de bajo costo e implementación sencilla es uno de los objetivos que se contemplan en un futuro inmediato, tanto para la manipulación de láseres pulsados como de onda continua.
- Otro punto importante en láseres pulsados es la aplicación de nuevos materiales para producir láseres con elementos todo-fibra pulsado del tipo Q-switch y Mode-locked.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. Digonnet, Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers, revised and expanded. CRC press 2001.
- [2] E. Snitzer, Proposed fiber cavities for optical masers, *J. Appl. Phys.* 32 (1961) 36–39.
- [3] E. Snitzer, Optical maser action of Nd³⁺ in a barium crown glass, *Phys. Rev. Lett.* 7 (1961) 444.
- [4] C. J. Koester, E. Snitzer, Amplification in a fiber laser, *Appl. Optics*, 3 (1964) 1182–1186.
- [5] J. Stone, C. A. Burrus, Neodymium-doped silica lasers in end-pumped fiber geometry, *App. Phys. Lett.* 23 (1973) 388–389.
- [6] J. Stone, C. A. Burrus, Neodymium-doped fiber lasers: room temperature cw operation with an injection laser pump. *App. Opt.* 13 (1974) 1256–1258.
- [7] D. Payne, R. J. Mears, L. Reeky, I. M. Jauncy, Low noise erbium doped fiber amplifier operating at 1.54 μm , *Electron. Lett.* 23 (1987) 1026–1028.
- [8] R. J. Mears, L. Reekie, S. B. Poole, D. Payne, Neodymium-doped silica single-mode fibre lasers, *Electron. Lett.* 21 (1985) 738–740.
- [9] Ball, G. A., & Glenn, W. H. (1992). Design of a single-mode linear-cavity erbium fiber laser utilizing Bragg reflectors. *Journal of Lightwave Technology*, 10(10), 1338-1343.
- [10] E. Mejía-Beltrán, Rare-Earth Doped Optical Fibers, In *Selected Topics on Optical Fiber Technology*. InTech 2012.
- [11] V. V. Ter-Mikirtychev, *Fundamentals of fiber lasers and fiber amplifiers*, Springer, 2014.
- [12] M. Shimizu, H. Suda, M. Horiguchi, High-efficiency Nd-doped fibre lasers using direct coated dielectric mirrors, *Electron. Lett.* 23 (1987) 768–769.
- [13] G. A. Ball, W. H. Glenn, Design of a single-mode linear-cavity erbium fiber laser utilizing Bragg reflectors, *J. Lightwave Technol.* 10 (1992) 1338–1343.

- [14] L. Cognolato, A. Gnazzo, B. Sordo, C. Bruschi, Tunable erbium-doped silica fiber ring laser source: design and realization, *J. Opt. Commun.* 16 (1995) 122–125.
- [15] P. Barnsley, P. Urquhart, C. Millar, M. Brierley, Fiber Fox–Smith resonators: application to single-longitudinal-mode operation of fiber lasers, *J. Opt. Soc. Am. A.* 5 (1988) 1339–1346.
- [16] R. Paschotta, *Encyclopedia of laser physics and technology* (Vol. 1), Berlin: Wiley-vch, 2008.
- [17] A. E. Siegman, *Lasers*, university science books. Mill Valley, CA, 1986.
- [18] R.J Mears, L. Reekie, S.B. Poole, D.N Payne, Low-threshold, tunable cw and Q-switched fibre laser operating at 1.55 μm , *Electron. Lett.* 23 (1986) 159–160.
- [19] R. I. Laming, S. B. Poole, E. J. Tarbox, Pump excited-state absorption in erbium-doped fibers, *Opt. Lett.* 13 (1988) 1084–1086.
- [20] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, J. E. Sipe, Long-period fiber gratings as band-rejection filters, *J. Lightwave Technol.* 14(1996) 58–65.
- [21] A. Martinez-Rios, D. Monzon-Hernandez, I. Torres-Gomez, G. Salceda-Delgado, Long period fibre gratings, In *Fiber Optic Sensors*. InTech 2012.
- [22] L. A. Overall, R. W. Fallon, J. A. R. Williams, L. Zhang, I. Bennion, Flexible fabrication of long-period in-fiber gratings. *IEEE LEOS*.(1998) 513–514.
- [23] E. M. Dianov, D. S. Stardubov, S. A. Vasiliev, A. A. Frolov, O. I. Medvedkov, Refractive-index gratings written by near-ultraviolet radiation, *Opt. Lett.* 22 (1997) 221–223. Citado en: A. Martinez-Rios, D. Monzon-Hernandez, I. Torres-Gomez, G. Salceda-Delgado, Long period fibre gratings, In *Fiber Optic Sensors*. InTech 2012.
- [24] C. S. Kim, Y. Han, B. H. Lee, W. T. Han, U. C. Paek, Y. Chung, Induction of the refractive index change in B-doped optical fibers through relaxation of the mechanical stress. *Opt. Commun.* 185 (2000) 337–342.

- [25] C. Chung, H. Lee, Wavelength characteristics of arc-induced long-period fiber grating by core and cladding diameter modulation. *IEEE LEOS*. 2 (2001) 778–779.
- [26] C. Y. Lin, L. A. Wang, Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure. *Electron. Lett.* 35 (1999) 1872–1873.
- [27] G. Rego, J. R. A. Fernandes, J. L. Santos, H. M. Salgado, P. V. S. Marques, New technique to mechanically induce long-period fibre gratings. *Opt. Commun.* 220 (2003) 111–118.
- [28] N. M. Gosset, A. Girardot, Reliability of acousto-optic tunable filters. In *Optical Fiber and Fiber Component Mechanical Reliability and Testing II* 4639 (2002) 160–170.
- [29] E. Anemogiannis, E. N. Glytsis, T. K. Gaylord, Transmission Characteristics of Long-Period Fibre Gratings Having Arbitrary Azimuthal/Radial Refractive Index Variations, *J. Lightwave Technol.* 21 (2003) 218–227. Citado en: A. Martinez-Rios, D. Monzon-Hernandez, I. Torres-Gomez, G. Salceda-Delgado, Long period fibre gratings, In *Fiber Optic Sensors*. InTech 2012.
- [30] S. Y. Tan, Y. T. Yong, S. C. Lee, F. Abd Rahman, Review on an arc-induced long-period fiber grating and its sensor applications. *J. Electromagnet. Wave.* 29 (2015) 703–726.
- [31] G. Rego, Arc-Induced Long Period Fiber Gratings, *J. Sensors*, Article ID 3598634, (2016) 1–14.
- [32] G. Brambilla, F. Xu, P. Horak, Y. Jung, F. Koizumi, N. P. Sessions, D. J. Richardson, Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications, *Ad. Opt. Photon.* 1 (2009) 107–161.
- [33] J. Bures, *Guided optics*. John Wiley & Sons (2009).
- [34] G. Anzueto-Sánchez, A. Martínez-Rios, Short-wavelength multiline erbium-doped fiber ring laser by a broadband long-period fiber grating inscribed in a taper transition, *Laser. Phys.* 24 (2013) 015101.

- [35] G. Yin, X. Wang, X. Bao, Effect of beam waists on performance of the tunable fiber laser based on in-line two-taper Mach–Zehnder interferometer filter, *Appl. Opt.* 50 (2011) 5714–5720.
- [36] Y. M. Raji, H. S. Lin, S. A. Ibrahim, M. R. Mokhtar, Z. Yusoff. Intensity-modulated abrupt tapered Fiber Mach-Zehnder Interferometer for the simultaneous sensing of temperature and curvature, *Opt. Laser. Technol.* 86 (2016) 8–13.
- [37] Q. Zhang, X. Zeng, F. Pang, M. Wang, T. Wang, Switchable multiwavelength fiber laser by using a compact in-fiber Mach–Zehnder interferometer, *J. Opt.* 14 (2012) 045403.
- [38] H. L. An, X. Z. Lin, E. Y. B. Pun, H. D. Liu, Multi-wavelength operation of an erbium-doped fiber ring laser using a dual-pass Mach–Zehnder comb filter. *Opt. Commun.* 1 (1999) 159–165.
- [39] A. P. Lou, Z. C. Luo, W. C. Xu, Multiwavelength switchable erbium-doped fiber ring laser with a PBS-based Mach–Zehnder comb filter, *IEEE Photon J.* 3 (2011) 197–202.
- [40] X. Feng, P.K.A. Wai, H.Y. Tam, C. Lu, B.O. Guan, Switchable multiwavelength erbium-doped fiber laser employing wavelength-dependent loss, *Opt. Fiber Technol.* 17 (2011) 138–140.
- [41] W. G. Chen, S.Q. Lou, S.C. Feng, L.W. Wang, H.L. Li, T.Y. Guo, S.S. Jian, Switchable multi-wavelength fiber ring laser based on a compact in-fiber Mach–Zehnder interferometer with photonic crystal fiber, *Laser Phys.* 19 (2009) 2115–2119.
- [42] G. Yin, S. Lou, X. Wang, B. Han, Tunable multi-wavelength erbium-doped fiber laser by cascading a standard Mach-Zehnder interferometer and a twin-core fiber-based filter, *Laser Phys. Lett.* 10 (2013) 125110.
- [43] B.K. Kim, Y. Chung, Tunable and switchable SOA-based multi-wavelength fiber laser using twin-core photonic crystal fiber, *Laser Phys. Lett.* 9 (2012) 734–738.

- [44] L.V Nguyen, D.S. Hwang, D.S. Moon, Y. Chung, Tunable comb-filter using thermally expanded core fiber and ytterbium doped fiber and its application to multi-wavelength fiber laser, *Opt. Commun.* 281 (2008) 5793–5796.
- [45] L. V. Nguyen, D. Hwang, H. M. Kim, J. Im, Y. Chung, EDF-based multi-wavelength fiber laser with adjustable number of channels using a novel comb-filter. *OECC/ACOFT 2008 - Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology (2008)* 1-2.
- [46] M. M. Ali, S. A. Ibrahim, M. A. Bakar, A. S. M. Noor, S. A. Anas, A. K. Zamzuri, M. A Mahdi, Tapered-EDF-based Mach–Zehnder interferometer for dual-wavelength fiber laser. *IEEE Photon. J.* 6 (2014) 1-9.
- [47] S.W. Harun, K.S. Lim, A.A. Jasim, H. Ahmad, Dual wavelength erbium-doped fiber laser using a tapered fiber, *J. Mod. Opt.* 57 (2010) 2111–2113.
- [48] L.P. Sun, J. Li, Y. Tan, S. Gao, L. Jin, B.O. Guan, Bending effect on modal interference in a fiber taper and sensitivity enhancement for refractive index measurement, *Opt. Express* 21 (2013) 26714–26720.
- [49] H. Sun, Q. Rong, Y. Du, X. Yang, X. Qiao, High sensitivity optical fiber temperature sensor based on cross-sensitivity feature of RI-sensitive device, *Opt. Commun.* 323 (2014) 28–31.
- [50] L. Ma, Y. Qi, Z. Kang, Y. Bai, S. Jian, Tunable fiber laser based on the refractive index characteristic of MMI effects, *Opt. Laser Technol.* 57 (2014) 96–99.
- [51] Z.B. Liu, Z. Tan, B. Yin, Y. Bai, S. Jian, Refractive index sensing characterization of a singlemode–claddingless–singlemode fiber structure based fiber ring cavity laser, *Opt. Express* 22 (2014) 5037–5042.
- [52] S. Li, Z. Wang, Y.G. Liu, B. Tai, T. Han, Z. Wu, Y. Zhang, Cascaded long-period fiber gratings on an all-solid photonic bandgap fiber, *Laser Phys* 23 (2013) 065103.
- [53] Y.G. Han, C.S. Kim, J.U. Kang, U.C. Paek, Y. Chung, Multiwavelength

Raman fiber-ring laser based on tunable cascaded long period fiber gratings, *IEEE Photon Technol. Lett.* 15 (2003) 383–385.

[54] Y.Y. Zhu, W.L. Zhang, Y. Jiang, Tunable multi-wavelength fiber laser based on random Rayleigh back-scattering, *IEEE Photon Technol. Lett.* 25 (2013) 1559–1561.

[55] P. Peterka, J. Maria, B. Dussardier, R. Slavik, P. Honzatko, V. Kubec̃ek, Long-period fiber grating as wavelength selective element in double-clad Yb-doped fiber-ring lasers, *Laser Phys. Lett.* 6 (2009) 732–733.

[56] L.L. Shi, T. Zhu, F.Y. Chen, M. Deng, W. Huang, Tunable filter based on a pair of special long-period fiber gratings and its application in fiber ring laser, *Laser Phys.* 22 (2012) 575–578.

[57] G. Anzueto-Sánchez, A. Martinez-Rios, J. Castellon-Urbe, Tuning and wavelength switching erbium-doped fiber ring lasers by controlled bending in arc-induced long-period fiber gratings, *Opt. Fiber Technol.* 18 (2012) 513–517.

[58] G. Anzueto-Sánchez, A. Martinez-Rios, I. Torres-Gómez, D. Ceballos-Herrera, R. Selvas-Aguilar, V. Duran-Ramirez, Tunable ytterbium-doped fiber laser based on a mechanically induced long period holey fiber grating, *Opt. Rev.* 14 (2007) 75–77.

[59] M. Ichikawa, S. Araki, H. Sakata, Wavelength control of a Tm-doped fiber laser using nonidentical mechanical long-period fiber gratings, *Laser Phys. Lett.* 10 (2013) 025101.

[60] H. Sakata, H. Yoshimi, Y. Otake, Wavelength tunability of L-band fiber ring lasers using mechanically induced long-period fiber gratings, *Opt. Commun.* 282 (2009) 1179–1182.

[61] G. Rego, Optical filters for fiber lasers and amplifiers, *Microwave Opt. Technol. Lett.* 50 (2008) 890–894.

[62] S. X. Liu, C. H. Wang, X. J. Zhu, C. X. Bu, G. J. Zhang, Arbitrarily switchable multi-wavelength Yb-doped fiber lasers with phase-shifted long-period fiber grating, *Laser Phys.* 22 (2012) 1260–1264.

[63] X. Liu, L. Zhan, S. Luo, Y. Wang, Q. Shen, Individually switchable and

widely tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on cascaded mismatching long-period fiber gratings, *J. Lightwave Technol.* 29 (2011) 3319–3326.

[64] M. Yan, S. Luo, L. Zhan, Z. Zhang, Y. Xia, Triple-wavelength switchable Erbium doped fiber laser with cascaded asymmetric exposure long-period fiber gratings, *Opt. Express* 15 (2007) 3685–3691.

[65] X. P. Cheng, P. Shum, C.H. Tse, J.L. Zhou, M. Tang, W.C. Tan, J. Zhang, Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating Fabry–Pérot etalon, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 20 (2008) 976–978.

[66] F. F. Zhong, Y. Xu, Y.J. Zhang, Y. Ju, Widely ultra-narrow linewidth 104 nm tunable all-fiber compact erbium-doped ring laser, *Laser Phys.* 21 (2011) 219–221.

[67] H. Ahmad, M. Dernaika, O.M. Kharraz, M. Alimadad, M. F. Ibrahim, K. S. Lim, S.W. Harun, A tuneable, power efficient and narrow single longitudinal mode fibre ring laser using an inline dual-taper fibre Mach–Zehnder filter, *Laser Phys.* 24 (2014) 085111.

[68] H. Wang, W. Jiang, Y. Gong, C. Pan, X. Sun, Single-longitudinal mode fiber ring laser stabilized by a tandem all-fiber Fabry-Perot micro-cavities, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 24 (2012) 404–406.

[69] A. P. Luo, Z. C. Luo, W. C. Xu, Wavelength switchable all-fiber comb filter using a dual-pass Mach-Zehnder interferometer and its application in multiwavelength laser, *Laser Phys.* 20 (2010) 1814–1817.

[70] J. M. Sierra-Hernandez, R. Rojas-Laguna, E. Vargas-Rodriguez, J. M. Estudillo-Ayala, R. I. Mata-Chavez, D. Jauregui-Vazquez, J. C. Hernandez-Garcia, J. A. Andrade-Lucio, J. C. Gutierrez-Gutierrez, A tunable multi-wavelength laser based on a Mach–Zehnder interferometer with photonic crystal fiber. *Laser Phys.* 23 (2013) 055105.

[71] A. Castillo-Guzman, J. M. Sierra-Hernandez, R. Selvas-Aguilar, D. Toral-Acosta, E. Vargas-Rodriguez, E. Gallegos-Arellano, M. Torres-Cisneros, M.

S. Avila-Garcia, R. Rojas-Laguna, Ytterbium Fiber Laser Based on a Three Beam Optical Path Mach–Zehnder Interferometer. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 28 (2016) 2768-2771.

[72] Y. Qi, Z. Kang, J. Sun, L. Ma, W. Jin, Y. Lian, S. Jian, Wavelength-switchable fiber laser based on few-mode fiber filter with core-offset structure, *Opt. Laser Technol.* 81 (2016) 26–32.

[73] Y. G. Han, Tunable multiwavelength erbium-doped fiber laser based on an in-line Mach Zehnder interferometer. *J. Korean Phys. Soc.* 57 (2010) 1743–1746.

[74] L. Shi, T. Zhu, Y. E. Fan, L. S. Chiang, Y. Rao, Torsion sensing with a fiber ring laser incorporating a pair of rotary long-period fiber gratings, *Opt. Commun.* 284 (2011) 5299–5302.

[75] O. Frazão, C. Correia, J. M. Baptista, M. B. Marques, J. L. Santos, Ring fibre laser with interferometer based in long period grating for sensing applications. *Opt. Commun.* 281 (2008) 5601–5604.

[76] G. G. Perez-Sanchez, J. A. Alvarez-Chavez, J. H. Rodriguez-Rodriguez, C. Gosset, Temperature tuning of superluminescent Er³⁺-doped source based on Mach–Zehnder interferometer and long-period fiber gratings. *Opti. Eng.* 55 (2016) 014102.

[77] G. Yin, S. Lou, H. Zou, A multiwavelength Er-doped fiber laser using a nonlinear optical loop mirror and a twin-core fiber-based Mach–Zehnder interferometer, *Laser Phys. Lett.* 10 (2013) 045103.

[78] B. K. Kim, Y. Chung, Multiwavelength erbium-doped fiber laser using twin-core photonic crystal fiber, *Laser Phys.* 22 (2012) 967–971.

[79] X. Wang, Y. Li, X. Bao, C-and L-band tunable fiber ring laser using a two-taper Mach–Zehnder interferometer filter, *Opt. Lett.* 35 (2010) 3354–3356.

[80] A. Martinez-Rios, G. Anzueto-Sanchez, D. Monzon-Hernandez, G. Salceda-Delgado, J. Castellon-Urbe, Multiwavelength switching of an EDFL by using a fixed fiber-comb filter and a broadband tunable S-bent fiber filter. *Opt. Laser Technol.* 58 (2014) 197–201.

- [81] L. Huang, P. Chang, X. Song, W. Peng, W. Zhang, F. Gao, J. Xu, Tunable in-fiber Mach-Zehnder interferometer driven by unique acoustic transducer and its application in tunable multi-wavelength laser. *Opt. Express*. 24 (2016) 2406–2412.
- [82] M. Lin, J. Sun, Q. Yan-Hui, K. Ze-Xin, J. Shui-Sheng, Switchable multi-wavelength fiber laser based on modal interference. *Chinese Phys. B*. 24 (2015) 084201.
- [83] Y. Li, L. Chen, E. Harris, X. Bao, Double-pass in-line fiber taper Mach-Zehnder interferometer sensor. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 22 (2010) 1750–1752.
- [84] H. Zeng, T. Geng, W. Yang, M. An, J. Li, F. Yang, L. Yuan, Combining two types of gratings for simultaneous strain and temperature measurement. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 28 (2016) 477–480.
- [85] L. Liu, Z. Zheng, X. Zhao, S. Sun, Y. Bian, Y. Su, J. Zhu, Dual-wavelength passively Q-switched Erbium doped fiber laser based on an SWNT saturable absorber, *Opt. Commun.* 294 (2013) 267–270.
- [86] B. Dong, J. Hu, C. Yu, J. Hao, Multi-wavelength Q-switched erbium doped fiber laser with a short carbon nanotube based saturable absorber, *Opt. Commun.* 285 (2012) 3864–3867.
- [87] J. Ko, H. Jeong, S. Y. Choi, F. Rotermund, D. I. Yeom, B. Y. Kim, Single-walled carbon nanotubes on side polished fiber as a universal saturable absorber for various laser output states, *Curr. Appl. Phys.* 17 (2017) 37–40.
- [88] M. H. M. Ahmed, N.M Ali, Z. S. Salleh, A. A. Rahman, S. W. Harun, M. Manaf, H. Q. Arof, Q-switched erbium doped fiber laser based on single and multiple walled carbon nanotubes embedded in polyethylene oxide film as saturable absorber, *Opt. Laser Technol.* 65 2015 25–28.
- [89] D. P. Zhou, L. Wei, B. Dong, W. K. Liu, Tunable passively Q-switched erbium-doped fiber laser with carbon nanotubes as a saturable absorber, *IEEE Photon. Technol. Lett.* 22 (2010) 9–11.

- [90] X. Xu, J. Zhai, Y. Chen, H. Zhu, L. Li, S. Ruan, Z. Tang, Well-aligned single-walled carbon nanotubes for optical pulse generation and laser operation states manipulation, *Carbon*. 95 (2015) 84–90.
- [91] M. H. M. Ahmed, Z. S. Salleh, N. M. Ali, S. W. Harun, H. Arof, Q-switched erbium doped fiber laser using single-walled carbon nanotubes embedded in polyethylene oxide film saturable absorber, *Microw. Opt. Technol. Lett.* 56 (2014) 2734–2737.
- [92] J. H. Chen, G. Q. Deng, S. C. Yan, C. Li, K. Xi, F. Xu, Y. Q. Lu, Microfiber-coupler-assisted control of wavelength tuning for Q-switched fiber laser with few-layer molybdenum disulfide nanoplates, *Opt. Lett.* 40, (2015) 3576–3579.
- [93] Y. Huang, Z. Luo, Y. Li, M. Zhong, B. Xu, K. Che, J. Weng, Widely-tunable, passively Q-switched erbium-doped fiber laser with few-layer MoS₂ saturable absorber, *Opt. Express* 22 (2014) 25258–25266.
- [94] H. Ahmad, S. N. Aidit, Z. C. Tiu, M. F. Ismail, M. Suthaskumar, S. W. Harun, Application of MoS₂ thin film in multi-wavelength and Q-switched EDFL, *J. Mod. Opt.* 64 (2017) 457–461.
- [95] R. Khazaeinezhad, T. Nazari, H. Jeong, K. J. Park, B. Y. Kim, D. I. Yeom, K. Oh, Passive Q-switching of an all-fiber laser using WS₂-deposited optical fiber taper, *IEEE Photon. J.* 7 (2015) 1–7.
- [96] L. Li, Y. Wang, Z. F. Wang, X. Wang, G. Yang, High energy Er-doped Q-switched fiber laser with WS₂ saturable absorber, *Opt. Commun.* 406 (2017) 80–84.
- [97] M. Zhang, G. Hu, G. Hu, R. C. T. Howe, L. Chen, Z. Zheng, T. Hasan, Yb-and Er-doped fiber laser Q-switched with an optically uniform, broadband WS₂ saturable absorber, *Sci. Rep.* 5 (2015) 17482.
- [98] B. Chen, X. Zhang, K. Wu, H. Wang, J. Wang, J. Chen, Q-switched fiber laser based on transition metal dichalcogenides MoS₂, MoSe₂, WS₂, and WSe₂, *Opt. Express.* 23, (2015) 26723–26737.

- [99] Y. Chen, J. Yin, H. Chen, J. Wang, P. Yan, S. Ruan, Single-Wavelength and Multiwavelength Q-Switched Fiber Laser Using Fe_3O_4 Nanoparticles, *IEEE Photon. J.* 9 (2017) 1–9.
- [100] D. Mao, X. Cui, W. Zhang, M. Li, T. Feng, B. Du, J. Zhao, Q-switched fiber laser based on saturable absorption of ferroferric-oxide nanoparticles, *Photon. Res.* 5 (2017) 52–56.
- [101] X. Bai, C. Mou, L. Xu, S. Wang, S. Pu, X. Zeng, Passively Q-switched erbium-doped fiber laser using Fe_3O_4 -nanoparticle saturable absorber, *Appl. Phys. Exp.* 9 (2016) 042701.
- [102] Z. Luo, M. Zhou, J. Weng, G. Huang, H. Xu, C. Ye, Z. Cai, Graphene-based passively Q-switched dual-wavelength erbium-doped fiber laser, *Opt. Lett.* 35, (2010) 3709–3711.
- [103] Z. Luo, M. Zhou, D. Wu, C. Ye, J. Weng, J. Dong, L. Chen, Graphene-induced nonlinear four-wave-mixing and its application to multiwavelength Q-switched rare-earth-doped fiber lasers, *J. Lightw. Technol.* 29 (2011) 2732–2739.
- [104] M. Wu, S. Chen, Y. Chen, Y. Li, Wavelength switchable graphene Q-switched fiber laser with cascaded fiber Bragg gratings, *Opt. Com.* 368 (2016) 81–85.
- [105] J. Zhao, P. Yan, S. Ruan, Y. Yu, G. Du, G. Zhang, J. Luo, Multi-wavelength graphene-based Q-switched erbium-doped fiber laser, *Opt. Eng.* 51(2012) 074201-1–074201-4.
- [106] J. Wang, Z. Luo, M. Zhou, C. Ye, H. Fu, Z. Cai, W. Qi, Evanescent-light deposition of graphene onto tapered fibers for passive Q-switch and mode-locker, *IEEE Photon. J.* 4 (2012) 1295–1305.
- [107] J. Lee, J. Lee, J. Koo, J. H. Lee, Graphite saturable absorber based on the pencil-sketching method for Q-switching of an erbium fiber laser, *Appl. Opt.* 55 (2016) 303–309.

- [108] M. Han, S. Zhang, X. Li, H. Zhang, F. Wen, Z. Yang, High-energy, tunable-wavelengths, Q-switched pulse laser, *Opt. Commun.* 326 (2014) 24–28.
- [109] H. Ahmad, M. R. K. Soltanian, C. H. Pua, M. Alimadad, S. W. Harun, Photonic crystal fiber based dual-wavelength Q-switched fiber laser using graphene oxide as a saturable absorber, *Appl. Opt.* 53 (2014) 3581–3586.
- [110] J., Bogusławski, G. J. Soboń, K. Tarnowski, R. Zybala, K. Mars, A. Mikula, J. Z. Sotor, All-polarization-maintaining-fiber laser Q-switched by evanescent field interaction with Sb₂ Te₃ saturable absorber. *Op. Eng.* 55 (2016) 081316.
- [111] M. Wu, Y. Chen, H. Zhang, and S. Wen, Nanosecond Q-Switched Erbium-Doped Fiber Laser With Wide Pulse-Repetition-Rate Range Based on Topological Insulator, *IEEE J. Quant. Electron.* 50 (2014) 393–396.
- [112] P. Yan, H. Chen, K. Li, C. Guo, S. Ruan, J. Wang, J. Ding, X. Zhang, T. Guo, Q-switched fiber laser using a fiber-tip-integrated TI saturable absorption mirror *IEEE Photon. J.* 8 (2016) 1–6.
- [113] Y. Zhang, C. Yang, Z. Feng, H. Deng, M. Peng, Z. Yang, S. Xu, Dual-wavelength passively q-switched single-frequency fiber laser, *Opt. Express.* 24 (2016) 16149–16155.
- [114] M. Wang, C. Chen, Q. Li, K. Huang, H. Chen, Modulated dual-wavelength Er-doped fiber laser based on a semiconductor saturable absorber mirror, *Opt. Fiber. Technol.* 21 (2015) 51–54.
- [115] T. Y. Tsai, Y. C. Fang, S. H. Hung, Passively Q-switched erbium all-fiber lasers by use of thulium-doped saturable-absorber fibers, *Opt. Express.* 18, (2010) 10049–10054.
- [116] A. S. Kurkov, Y. E. Sadovnikova, A. V. Marakulin, E. M. Sholokhov, All fiber Er-Tm Q-switched laser, *Laser. Phys. Lett.* 7 (2010) 795–797.
- [117] M. Tao, J. Wu, J. Peng, Y. Wu, P. Yang, X. Ye, Experimental demonstration of an Er-doped fiber ring laser mode-locked with a Tm–Ho co-doped fiber saturable absorber, *Laser. Phys.* 23 (2013) 085102.

- [118] M. Tao, X. Ye, Z. Wang, P. Yang, G. Feng, Tm–Ho codoped fiber-based high repetition rate passive Q-switching of an Er-doped fiber laser, *Laser. Phys. Lett.* 11 (2013) 015103.
- [119] M. Tao, X. Ye, P. Wang, T. Yu, Z. Wang, P. Yang, G. Feng, A Tm–Ho co-doped fiber based 38 nm wideband wavelength tunable passively Q-switched Er-doped fiber laser, *Laser. Phys.* 23 (2013) 105104.
- [120] M. Tao, G. Feng, A. Andrianov, A. Kim, T. Yu, H. Zhao, X. Ye. Tm-Ho codoped fiber based multi-wavelength Q-switching of an Er-doped fiber laser, *Opt. Commun.* 354 (2015) 209–212.
- [121] A. A. Latiff, N. A. Kadir, E. I. Ismail, H. Shamsuddin, H. Ahmad, and S. W Harun, All-fiber dual-wavelength Q-switched and mode-locked EDFL by SMF-THDF-SMF structure as a saturable absorber, *Opt. Commun.* 389 (2017) 29–34.
- [122] M.J. Digonnet, *Rare-earth-doped Fiber Lasers and Amplifiers*, CRC Press, New York, 2001.

ANEXO 1

PUBLICACIONES:

- **R. E. Nuñez-Gomez**, G. Anzueto-Sanchez, A. Martinez-Rios, M.A. Basurto-Pensado, J. Castellon-Urbe, R. Selvas-Aguilar, J. Camas-Anzueto, V.M. Duran-Ramirez, Multi-wavelength switching of an erbium-doped fiber ring laser based on the cross sensitivities' features of tapered fiber filters. *Opt. Rev.* 22 (2015) 526–531.
- **R. E. Nuñez-Gomez**, G. Anzueto-Sánchez, A. Martínez-Rios, I. Torres Gomez, J. Camas-Anzueto, R. Selvas-Aguilar, G. Salceda-Delgado, V. M Duran-Ramirez, Tailoring the output laser wavelength of fiber lasers by the intra-cavity inscription of LPFGs. *Microwave. Opt. Technol. Lett.* 58 (2016) 1430 1433.
- **R. E. Nuñez-Gomez**, G. Anzueto-Sanchez, A. Martinez-Rios, M. A. Basurto-Pensado, J. Castellon-Urbe, J Camas-Anzueto, Combining comb-filters based on tapered fibers for selective lasing performance in erbium-doped fiber lasers. *Laser Phys.* 26 (2016) 125101.
- G. Anzueto-Sánchez, G., **R. E. Nuñez-Gomez**, A. Martínez-Rios, J. Camas-Anzueto, J. Castellon-Urbe, M. Basurto-Pensado, Highly Stable, Tapered Fiber Filter-Assisted, Multiwavelength Q-Switched Erbium-Doped Fiber Laser Based on Tm-Ho Fiber as a Saturable Absorber. *IEEE Photon. J.* 9 (2017) 1–8.

PARTICIPACIONES EN CONGRESOS:

- **R. E. N Gomez**, G. A. Sanchez, A. Martinez-Rios, R. Selvas-Aguilar, J. C. Uribe, Random-Period LPFG for Broadband Reshaping of Erbium-Doped Fiber Emission. In Latin America Optics and Photonics Conference (pp. LTu4A-11). Optical Society of America.