

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN LÁSER DE FIBRA DOPADA CON ITERBIO, SINTONIZABLE Y MULTI-LONGITUD DE ONDA EN RÉGIMEN CONTINUO Y ANÁLISIS DE SU POTENCIAL PARA GENERAR PULSOS ULTRA-CORTOS DE ALTA ENERGÍA.

Tesis que para obtener el grado de
Maestro en Optomecatrónica
presenta el estudiante:

Ing. Carlos Moisés Carrillo Delgado



**CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN OPTICA, A.C.**

Centro de Investigaciones en Óptica A. C.

Maestría en Optomecatrónica.

Asesores: Dr. Olivier Pottiez y Dr. José Alfredo Álvarez Chávez.

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN LÁSER DE FIBRA DOPADA CON ITERBIO, SINTONIZABLE Y MULTI-LONGITUD DE ONDA EN RÉGIMEN CONTINUO Y ANÁLISIS DE SU POTENCIAL PARA GENERAR PULSOS ULTRA-CORTOS DE ALTA ENERGÍA.

Ing. Carlos Moisés Carrillo Delgado

Directores de tesis: Dr. Olivier Pottiez y Dr. José Alfredo Álvarez Chávez

RESUMEN

En el presente trabajo se muestran primeramente las bases análíticas y matemáticas, para posteriormente proponer un diseño novedoso que se desarrolla en el laboratorio. Primeramente tenemos una configuración de láser en anillo y mas tarde una configuración de figura ocho.

El láser con el que se trabaja es un lazo de fibra que contiene una porción de fibra con impurezas de iterbio (YDF, Ytterbim Doped Fiber), el lazo forma un anillo el cual comprende toda la cavidad. En primer término, este arreglo se hace operar en onda continua, presentando mas adelante los resultados de operación y por otra parte se presentan métodos para que dicho láser opere en el régimen pulsado.

El método utilizado para la generación de pulsos es el de Amarre de Modos Pasivo y dentro de las propuestas se tiene primeramente: el filtrado de los modos propagantes dentro de la cavidad, que por medio de la NPR, se consiga un defazamiento suficiente para el amarre de los modos y que así el láser en anillo genere pulsos, dentro de la configuración de anillo hará falta pues un filtro, con el que se seleccionen dichos modos de propagación. Como ya se mencionó, la diferencia en la polarización hará que algunos pulsos permanezcan en fase y otros no, provocando la interferencia constructiva para obtener el amarre de modos pasivo casi de manera natural por la configuración de la cavidad. Algo que se debe detallar en este arreglo es que debe existir una perturbación suficiente para generar inestabilidad en la intensidad de la señal y haya amplificación estimulada en dichos modos, por lo que puede ser difícil obtener pulsos si no se cuenta con la suficiente potencia o un agente exterior conveniente para que

rompa con el estado metaestable del medio. Por otra parte también se propone un esquema que contenga un absorbedor saturable, arreglo completamente de fibra, que tiene como base una configuración de un Láser de Figura Ocho (F8L, Figure Eight Laser).

El láser de fibra óptica en configuración de figura ocho permite la generación de pulsos ultra-cortos y de alta energía, al asegurar modos de propagación de ancho espectral equivalentes al rango espectral del absorbedor saturable.

Dicho arreglo contiene el láser de anillo y el Espejo Optico No-lineal (NOLM, Nonlinear Optical Loop Mirror), que funciona como absorbedor saturable; el NOLM ayuda con la generación de pulsos de alta potencia al llevar a cabo el estrechamiento de los pulsos. Para este punto, se pudieron obtener como resultados de simulación: pulsos con energías cercanas a los 100 nJ; y a la salida del láser después de la compresión, pulsos con duración de ≈ 50 fs y potencias pico de hasta 1 MW.

Los resultados experimentales del Láser en configuración de Anillo, presenta las siguientes características: láser construido completamente de fibra, con un tramo (20 cm) de YDF como medio de ganancia y un diodo láser a @ 985 nm, son:

- trabaja en el régimen de onda continua (CW, Continuous Wave mode);
- tiene una banda espectral angosta ≤ 0.7 nm;
- es sintonizable por los efectos no lineales en un gran rango espectral que va de los ≈ 1015 nm a los ≈ 1067 nm de forma continua;
- laseo a varias longitudes de onda de manera simultanea (de dos hasta tres longitudes de onda, con separaciones de ≈ 20 nm entre las longitudes de onda principales);
- baja pérdidas de inserción y baja Emisión Espontanea Amplificada (ASE).

El esquema de F8L también fué construido en el laboratorio pero no se pudieron conseguir pulsos debido a la poca potencia de la fuente de bombeo con que se contaba y las pérdidas por los empalmes.

Hoy le permití al sol levantarse antes que yo [...]

Agradecimientos

Los agradecimientos están dirigidos a la gente de la que obtuve el conocimiento, apoyo y confianza en el trabajo objeto de la presente tesis, por lo que primeramente me gustaría mostrar mi agradecimiento hacia el Dr. Olivier Pottiez, asesor de tesis, compañero del laboratorio de fibras ópticas que con su paciencia se pudieron conseguir las metas presentadas.

Agradezco la valiosa colaboración de las siguientes personas, responsables de buena parte de mi formación como estudiante de posgrado: M. C. Andrés Gonzales García, M. C. Lelio de la Cruz Mei, Dr. José Alfredo Álvarez Chávez; a mis sinodales por los comentarios que dieron fin al trabajo de tesis Dr. Rubén Grajales Coutiño y Dr. Efraín Mejía Beltrán. Además a todas aquellas personas que directa o indirectamente contribuyeron en la elaboración de la tesis y con su colaboración, referencias, consejos, apoyo y estima, se pudieron alcanzar niveles que no me hubiera imaginado.

Agradezco de igual manera al Centro de Investigaciones en Óptica A. C. por haberme facilitado el uso a sus instalaciones, el apoyo humano de cada uno de sus trabajadores y el apoyo económico. De igual manera un agradecimiento muy especial por el apoyo recibido por parte del CONCYTEG y el CONACyT, quien se encuentra en colaboración directa con el CIO A. C.

Este trabajo de tesis no hubiera sido posible sin el constante apoyo de mi familia ¡muchas gracias!.

Un agradecimiento muy especial, éste, que se escapa de las paredes del centro de investigaciones y llega para todos aquellos que he involucrado en mi vida educativa así como extracurricular y han formado parte importante en la estancia aquí completada y también en la Cd. de León Gto, muchas gracias a todos ustedes.

Contenido General

	Pag.
Resumen	ii
Lista de figuras	viii
Nomenclatura	xi
Objetivo	1
1 Introducción.	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 El Láser de Fibra Óptica en la actualidad	10
1.2.1 LFO en régimen de onda continua.	10
1.2.2 LFO en régimen pulsado.	12
1.3 Organización de la tesis.	12
2 Láser de Fibra Óptica de Figura Ocho.	15
2.1 Introducción.	15
2.2 Principio de funcionamiento.	16
2.2.1 Láseres de Fibra Óptica.	17
2.2.2 Propiedades electrónicas y ópticas del medio de ganancia.	18
2.2.3 El Iterbio, características espectrales.	19
2.2.4 Esquemas de cavidades resonantes.	21
2.3 Láseres de Fibra Óptica en el modo pulsado	24
2.3.1 Método para la generación de pulsos: Q-switch.	25
2.3.2 Método para la generación de pulsos: Amarre de Modos.	28
2.4 Espejo de lazo óptico no-lineal.	32
2.4.1 Caso para polarización circular de la señal de entrada.	35
2.4.2 Caso para polarización lineal de la señal de entrada.	37
3 Análisis Matemático.	40
3.1 Simulación del Láser de Figura Ocho.	40
3.2 Conclusiones.	43

	Pag.
4 Análisis Experimental.	46
4.1 Intruducción.	46
4.2 Procedimiento experimental.	47
4.2.1 Esquema del láser en configuracion de anillo en régimen de onda continua.	48
4.2.2 Resultados Obtenidos.	53
4.2.3 Esquema del láser en configuracion de anillo en régimen pulsado.	55
4.2.4 Resultados obtenidos.	58
4.3 Conclusiones.	59
Conclusiones	61
Referencias	63

Lista de figuras

Figura	Pag.
2.1 Desdoblamiento de los niveles de energía para el grupo de los iones de tierra rara $4f^3$, entre las que vemos la interacción Coulombiana, espín-órbita e ión-red. . . .	20
2.2 Espectro de emisión y absorción características para los iones de Yb^{3+} sobre una base de sílice SiO_2 . Con un pico de absorción y emisión centrado a los 975 nm. . .	21
2.3 Se muestran los dos tipos de cavidades mas representativas para las configuraciones de los láseres de fibra óptica, por una parte se encuentra a) la cavidad lineal conocida como la configuración Fabry-Perot y b) la cavidad de anillo o lazo de fibra.	22
2.4 Diagramas transversales para diferentes tipos de geometrías de recubrimientos de fibras ópticas usadas como cavidades láser.	25
2.5 En esta figura se muestra: a) un esquema para un láser de fibra óptica en modo pulsado por el método Q-switch, b) pérdidas de potencia dentro de la cavidad láser, que al no tener completa la cavidad de oscilación resulta imposible la ASE, c) una vez que del nivel base N1 se ha llevado a cabo la inversión de población, se obtiene una gran cantidad de potencia acumulada en el medio de ganancia. Ahora el absorbedor saturable en el extremo de la fibra permite el paso de estas altas potencias y por último en d) la cavidad se cierra con el espejo R_1 y se obtiene un pulso con un ancho temporal igual al doble del recorrido de la señal dentro de la cavidad.	26
2.6 En esta figura se muestra la simulación para el modo Q-switch, éstos cambios se dan al momento de que: a) la cavidad es bomeada con una potencia que llega para éste caso a 250 W, b) potencia de bombeo absorbida, consiguiendo la inversión de la población hasta llegar a un máximo de absorción cercano la potencia de bombeo 200 W, c) nótese que en ningún momento del proceso se tiene laseo.	27
2.7 Amarre de modos activo por medio de un dispositivo ya sea electro-óptico u acusto-óptico.	29
2.8 Cavidad resonante que incluye: al absorbedor saturable, el medio de ganancia y la generación del pulso.	30

Figura	Pag.
2.9 Este esquema representa el absorbedor saturable de fibra, el cual es un absorbedor rápido, donde el tiempo de respuesta de efecto Kerr es de 1fs y la ganancia ($t=10\text{ms}$) satura sobre la potencia promedio.	31
2.10 Espejo de lazo óptico no lineal, NOLM.	32
2.11 NOLM con QWR \equiv Retardador de Cuarto de Onda, usado para efecto del proceso de interferencia a través de la NPR en el lazo, $\psi \equiv$ ángulo de polarización para la señal de entrada E_{in} y $\alpha \equiv$ ángulo del QWR respecto a la normal de la guía de onda.	33
2.12 Curvas de transmisión del NOLM cuando ψ se mantiene fijo y se varia α	38
2.13 Curvas de transmisión del NOLM cuando α es ajustado para mínima transmisión a baja señal, para varios valores de ψ	39
3.1 Láser de figura ocho, F8L. Esquema utilizado para la simulación.	41
3.2 Simulación de la dispersión del pulso a lo largo del láser de figura ocho; a) esquema que representa el viaje del pulso a través de los dispositivos: NOLM, filtro, YDF y NDF; características del pulso de acuerdo a su: b) duración temporal; c) ancho de banda y d) el producto entre los procesos de b) y c).	42
3.3 Esta figura muestra: a) el perfil normalizado de la potencia del pulso a la salida del láser, b) el perfil normalizado de la potencia después de ser comprimido y c) la frecuencia instantanea.	44
3.4 Se muestra a) la transimisión del filtro FWHM y b) el espectro del pulso a la salida del láser.	44
4.1 Espectro de emisión de fluorescencia de la fibra con iones de Yb utilizada en el trabajo experimental.	50
4.2 Láser en configuración de anillo. Representación del esquema construido en el laboratorio con cada una de las partes que lo componen.	51
4.3 Sintonización del láser operando en el modo de frecuencia sencilla (Single-Frequency Traveling Wave Fiber Laser), se presentan los valores espectrales los cuales no presentan alteraciones en ancho espectral ni potencia.	54

Figura	Pag.
4.4 Longitudes de onda de láser que de manera simultánea se presentaron, para: a) el extremo de 1037 nm y 1057 nm, b) el límite de láser para estos modos polarizados los cuales se consiguió desplazar hasta 1041 nm y 1065 nm, por último c) y d) muestran algunos de los rangos de desplazamiento intermedios entre los casos anteriores.	55
4.5 Caso especial de láser, las longitudes de onda a las que se obtuvo láser son 1026, 1036 y 1046 nm	55
4.6 Longitudes de onda de láser para tres formas de oscilación de manera simultánea dentro de la cavidad de anillo.	56
4.7 Algunas de las longitudes de onda pueden atenuarse de manera controlada, como se presenta en esta figura, donde la componente a 1052 nm es eliminada.	56
4.8 Láser de figura ocho, F8L. Esquema utilizado para la experimentación.	57

Nomenclatura

<i>LFO</i>	Láser de Fibra Óptica
<i>F8L</i>	Láser de Figura en Ocho (Figure Eight Laser)
<i>NPR</i>	Rotación No-lineal de la Polarización (Nonlinear Polarization Rotation)
<i>AS</i>	Absorbedor Saturable
@	Longitud de onda centrada a:
<i>NOLM</i>	Espejo de Lazo Óptico No-lineal (Nonlinear Optical Loop Mirror)
<i>NALM</i>	Amplificador de Lazo Óptico No-lineal (Nonlinear Amplifying-Loop Mirror)
<i>QWR</i>	Retardador de Cuarto de Onda (Quarter Wave Retarder)
<i>HWR</i>	Retardador de Media Onda (Half Wave Retarder)
<i>CW</i>	Propagación en sentido horario (Clockwise)
<i>CCW</i>	Propagación en sentido antihorario (counterclockwise)
<i>YDF</i>	Fibra con impurezas de Iterbio (Ytterbium Doped Fiber)
<i>WDM</i>	Multiplexor por longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing)
<i>GVD</i>	Dispersión de Velocidad de Grupo (Group Velocity Dispersion)
<i>SMF</i>	Fibra Mono Modo (Single Mode Fibre)

PC	Controlador de Polarización (Polarization Controller)
C	Acoplador (Coupler)
l	Longitud de la fibra
W	Watts
m	metros
J	Joules
N_1	Iones en estado de reposo
N_2	Iones en estado de excitado
$ASE-$	Emisión Espontánea Amplificada negativa
$ASE+$	Emisión Espontánea Amplificada positiva
ISO	Aislador Isolator
Yb^{3+}	Ion de Yterbio
Er^{3+}	Ion de Erblio
Nd^{3+}	Ion de Neodimio
NA	Apertura Numerica

Objetivo General.

Se propone un esquema de láser cosntruido completamente de fibra óptica, a partir del cual se pretenden conseguir los siguientes objetivos:

1. Proponer un esquema láser con base en una configuración de anillo y construirlo en el laboratorio.
2. Utilizar como medio de ganancia una fibra con iones de iterbio, con la intención de utilizar el laseo para: el procesado de materiales (interacción con: madera, acero, piel, etc.).
3. Obtener el fenómeno de laseo para esta configuración operando en el régimen continuo y pulsado.
4. Analizar los resultados experimentales para el modo continuo.
5. Tratar de que el láser en anillo opere en diferentes longitudes de onda simultanea.
6. Realizar un láser sintonizable.
7. Tratar de que el láser en anillo opere en modo pulsado.
8. Construir en el laboratorio como complemento del láser anterior, un láser de amarre de modos.
9. Obtener laseo en forma pulsada, por medio de dicha configuración.
10. Analizar los resultados experimentales, para las longitudes de onda obtenidas, ya sea en modo continuo o pulsado.

11. Llevar a cabo una simulación del comportamiento del pulso dentro de la cavidad del láser de figura ocho.
12. Presentar parte de la simulación como complemento del trabajo de tesis.
13. Por último, discutir los resultados generales obtenidos y presentar un panorama del trabajo a futuro.

Capítulo 1

Introducción.

1.1 Antecedentes

En 1961, se reporta el primer láser de fibra óptica con los trabajos de Snitzer y Koester [1]. En éste experimento se propone 1m de fibra óptica como cavidad, en cuyo núcleo, de índice de refracción 1.54, se depositaron iones de Nd^{3+} . El recubrimiento tenía un índice de 1.52; la claridad del recubrimiento permitía el bombeo por medio de una lámpara flash. El trabajo en general plantea las ventajas de incorporar el medio de ganancia dentro de un dieléctrico como guía de onda, sin embargo ésta manera de bombear la cavidad resulta ser muy ineficiente; y en 1973 Stone y Burrus [2], proponen bombear la cavidad por uno de los extremos de la fibra óptica (end pumped fibre laser), aprovechando así las características de la cavidad como guía de onda y consiguiendo el incremento de potencia que exitan los iones del medio de ganancia.

Por otra parte, el avance mas significativo en el desarrollo de láseres de fibra óptica se presenta al encontrar grandes desarrollos en los nuevos medios para la fabricación de fibras ópticas, las nuevas fuentes de bombeo y el estudio de una gran variedad de Tierras Raras como medios de ganancia en las cavidades.

Una de estas nuevas tierras raras de estudio muy extensivo ha sido el erbio Er^{3+} , causando gran impacto de interés, debido principalmente por sus aplicaciones en el area de la industria de las telecomunicaciones y es en 1987 con D.N. Payne y su grupo [3], que se reportan la construcción de un amplificador de fibra óptica (EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier).

En éste campo, el de las telecomunicaciones, el trabajo de Doran y Wood [4], en 1988, da un giro completo a la manera en que los dispositivos de fibra óptica son utilizados para éste fin, proponen un arreglo completamente de fibra. El trabajo detalla el uso de un interferómetro

de Sagnac y cómo, a partir del fenómeno de la auto-modulación de fase (SPM, Self-Phase Modulation), se obtiene la conmutación ultra-rápida de señales. Mas tarde en este mismo año 1988, David B. Mortimore [5] describe cómo éste esquema puede utilizarse como espejo reflector, demostrando variaciones de reflectividad de 0 a 1 por medio de la birrefringencia de la fibra y seleccionando la longitud de onda del haz de entrada.

En 1989 Y. Chaoyu *et al.* [6], presentan un láser sintonizable de Nd^{3+} con el uso de la cavidad en anillo. El esquema del interferómetro de Sagnac no lineal ha sido estudiado de manera exhaustiva y mas tarde se le dio a conocer como NOLM (de sus siglas en inglés, Nonlinear Optical Loop Mirror) consiguiendo aplicaciones como son: el de modulador óptico, trabajo presentado por K. Blow *et al.* en 1990 [7], presentando un análisis teórico y experimental del NOLM; y como compresor y supresor de pedestal, trabajo publicado en 1990 por K. Smith *et al.* [8].

En el campo de los láseres, éste dispositivo ha dado como resultado la construcción de láseres que hacen uso de las funciones de absorbedor saturable propias del interferómetro, para así ofrecer láseres de amarre de modos pasivos y es en 1990 cuando A. G. Bulushev *et al.* [9] presentan un arreglo con un acoplador desbalanceado generando dos pulsos contrapropagantes de diferentes potencias obteniendo una respuesta no lineal del reflector y debido a la característica de switcheo se da el amarre de los modos.

Algunas otras aplicaciones del absorbedor saturable han dado como resultado láseres de amarre de modos de manera pasiva, teniendo como ejemplo a Duling [10] que en 1991, presenta un láser de fibra utilizando un Espejo de Lazo Amplificador No Lineal (Non-linear Amplifier Loop Mirror, NALM), que es un dispositivo parecido al NOLM pero este incluye un trozo de fibra dopada con alguna tierra rara como amplificador, en el caso del trabajo expuesto se utilizaron iones de Er. Una de las principales características de operación fué que se pudo conseguir el autoencendido del láser en modo pulsado, ésto, cuando se hizo aumentar la potencia de bombeo por encima de 80 mW. En este caso, se hace uso de un lazo de fibra que contiene una sección de fibra con impurezas o iones de erbio, ayudando a que uno de los pulsos se amplifique y a la vez lo comprime para obtener una diferencia de potencia entre los pulsos contrapropagantes dentro del lazo interferométrico. El arreglo también contiene un controlador

de polarización, el NALM es conectado por medio de un acoplador 50:50 hacia una cavidad de anillo que de igual manera hace uso de un controlador de polarización y un aislador para que la circulación de la luz fuera en un solo sentido. En este trabajo se presentan como resultados experimentales pulsos de 2ps con una potencia promedio de 3 mW en la longitud de onda de @ 1535 nm.

En 1992 V. J. Matsas *et al.* [11] proponen hacer uso de la evolución de la polarización no lineal (NPE, Nonlinear Polarization Evolution), éste trabajo dio como resultado en 1993 la publicación por parte del mismo investigador (V. J. Matsas) [12], de un láser en anillo autoencendible que genera pulsos cuadrados de duración 500ps o solitones cuyo ancho de pulso se puede variar de 1.55 a 4 ps. Haciendo variaciones a la longitud de fibra que comprende la cavidad así como los tipos de fibra usada, obtuvo las diferencias presentadas anteriormente para la operación del láser.

K. Tamura *et al.* [13] en 1993, reportan el trabajo experimental de un láser en configuración de anillo para la obtención de pulsos en el orden de los femtosegundos (77 fs). Este trabajo hace uso de un acoplador WDM para la inyección de la potencia de bombeo dentro de la cavidad, una fibra dopada con erbio, un aislador para asegurar la propagación de la señal en un solo sentido, un par de controladores de polarización necesarios para obtener el efecto de absorbedor saturable. El anillo funciona de la siguiente manera: la luz se propaga a travez de la fibra dopada con erbio donde sufre de una dispersión positiva y se evita al máximo los efectos solitón.

Siguiendo con las configuraciones en anillo se han obtenido una variedad de láseres sintonizables: J. Peng *et al.* 1993 [14], T. Yamamoto *et al.* 1994 [15], L. Congnolato *et al.* 1995 [16]; todas estas consideraciones hacen uso de de un acoplador WDM en el anillo permitiendo circular de manera simultanea la longitud de onda de bombeo y la señal de laseo. Por otra parte, cada uno de los esquemas propuestos hace uso de algún tipo de filtro, este proceso implica la atenuación de señales no deseadas ya sea por procesos de polarización, control de la longitud de onda, control de la potencia, etc.

En 1996 S. Gray y A. B. Grudinin *et al.* [17] reportan un láser de amarre de modos pasivo, donde usan como absorbedor saturable un semiconductor en conjunto con el NALM. Se obtuvieron pulsos con una repetición de 2 GHz y una duración de 2.5 ps, el principal interés de este arreglo es presentar dispositivos alternos como absorbedores saturables y en 1997 J. Theimer y J. W. Haus [18] reportan la simulación numérica de un láser en anillo y un absorbedor saturable NOLM, consiguiendo pulsos.

Más tarde, a partir del año 2000 se publican esquemas para el láser de figura ocho (F8L) muy interesantes, ya sea para la simulación o el análisis experimental, obteniendo un nuevo campo de trabajo, teniendo como base el amarre de modo pasivo utilizando el NOLM como absorbedor saturable, en el mismo año E. A. Kuzin *et al.* [19], muestran analítica y numéricamente que se puede elegir un valor crítico de la cantidad de torsión y birrefringencia de modo que el periodo y el cambio de fase no lineal no sean tan sensibles al estado de polarización de la señal de entrada.

En el 2001 E. A. Kuzin *et al.* [20] presenta una teoría del NOLM con fibra de baja birrefringencia y altamente torcida. La evolución de la polarización no lineal es periódica y es aplicada para el análisis del interferómetro de Sagnac. El periodo lo calcularon usando la teoría de perturbación y encontraron una condición para que pueda ser independiente del estado de polarización inicial. También derivaron un conjunto simplificado de ecuaciones que ayudan a describir la evolución de la fase no lineal y demuestran, de forma muy útil, para poder visualizar el comportamiento del NOLM (trabajando en función de la birrefringencia, torsión, longitud y estado de polarización) en términos de la esfera de Poincare. Finalmente, logran obtener un alto rango dinámico entre la transmisión máxima y la transmisión mínima, además de un fácil y simple ajuste a bajas potencias de transmisión, que puede ser usado en aplicaciones de amarre de modos. En el mismo año E. A. Kuzin *et al.* [21], publican una nueva configuración láser de figura ocho de amarre de modos pasivo basado en un NOLM con un acoplador simétrico operando a través de la NPR.

F. Ö. Ilday y F. W. Wise [22] en el 2002, presentan un láser completamente de fibra que haciendo uso del NOLM, obtienen pulsos estrechos de alta energía. Para la formación inicial de los pulsos, se colocó después de la fibra de erbio un absorbedor saturable de semiconductor

de InGaAs, el cual tiene un tiempo de respuesta de 100 ps, sin el semiconductor es posible conseguir pulsos pero se necesita de una perturbación externa que saque el sistema de su estado meta-estable e iniciar el amarre de modos.

En el 2003 B. Ibarra Escamilla *et al.* [23] analizan el NOLM con fibra birrefringente y torcida. Demuestran que este NOLM formado con un acoplador 0.5/0.5, fibra con alta torsion y un retardador de un cuarto de onda en el lazo puede ser aplicado a un F8L. Generan pulsos estables en el orden de subpicosegundos con una potencia promedio de salida de miliwatts. Este esquema al hacer uso un acoplador 50/50, necesita una diferencia de polarización entre los pulsos contrapropagantes, para el sucesivo proceso de interferencia. Se consiga por medio de una placa retardadora de cuarto de onda; la placa retardadora es colocada en uno de los brazos de manera asimétrica cambiando la polarización en una de las señales.

Por otra parte, tenemos otra de las relativamente nuevas tierras raras de interés, el iterbio Yb^{3+} , que a pesar de haber sido opacado por el Nd^{3+} , retoma lugar dentro de los iones mas importantes utilizados como medio de ganancia debido a su sistema de tres-niveles y quasi cuatro-niveles, su buena eficiencia que da la posibilidad de alta concetración de iones en un trozo muy corto de guía de onda (≤ 1 m) y la obtención de alta potencia láser.

A continuación se da una presentación de algunos de los trabajos en los que se ha propuesto el iterbio como ion medio de ganancia, así como también se continua con la presentación de trabajos en algunas otras longitudes de onda que comprenden el área de las telecomunicaciones y el procesado de materiales.

Uno de los principales retos para los láseres de fibra óptica es el de poder conseguir elevadas potencias de salida ya sea en modo continuo o en modo pulsado por lo que se han llevado a cabo estudios para saber cuales serían las máximas potencias obtenidas, de igual manera, las vías mas eficientes en los esquemas de trabajo, entre otras cualidades de operación en los láseres de fibra.

J. R. Buckley *et al.* [24] en el 2005, reportan una serie de experimentos con la meta de determnar cual sería el máximo de energía en un pulso generado por un laser de fibra, teniendo una fibra de iterbio como medio de ganancia y obteniendo como resultado: pulsos con energía en el orden de los 14 nJ y duración por debajo de los 100 fs después de la compresión (la etapa

de compresión es un proceso que se consigue a la salida del láser); demostrando la obtención de pulsos que pueden alcanzar potencias pico de hasta 100 kW. El láser presentado en este trabajo es un esquema en anillo y hace uso de un par de diodos láser centrados a @ 980 nm, utilizados para bombear la fibra con gran concentración de iones de iterbio; el láser opera en régimen de dispersión normal, por lo que los pulsos presentan un fuerte chirp, parte del esquema del láser presentado son dispositivos de bulto. La señal pasa por un par de rejillas de bulto con objeto de introducir dispersión anormal y compensar parcialmente la dispersión normal de la fibra a 1030 nm; la señal regresa hacia un segmento de fibra SMF para completar el anillo inyectando la señal con un acoplador WDM hacia la fibra dopada con iterbio. La señal, a completado el ciclo de viaje en el anillo, habiendo sufrido varios procesos de dispersión y se ha sacado parte de la señal cuando el ancho temporal es más estrecho.

En el 2005 D. A. Chestnut and J. R. Taylor [25] reportan diferentes configuraciones para láseres de figura ocho. Los pulsos obtenidos se obtienen a partir del amarre de modos pasivo. Las longitudes de onda para las que se dan resultados son principalmente fuentes a @1570 nm, @1330 nm y @1410 nm con duración de soliton de 440, 500 y 860 fs respectivamente. El esparcimiento Raman es utilizado como mecanismo de ganancia para la construcción de un láser de fibra, la salida de este láser se inyecta a una configuración de figura ocho por medio de un acoplador y la señal circula a través de 2.1 Km de fibra DSF con cero dispersión para @ 1537 nm tomando lugar la ganancia Raman. La señal de laseo se extrae de la cavidad con un acoplador 80/20 y el resto de la señal entra a un filtro sintonizable pasa-banda (tunable-bandpass filter, TBPF), un aislador y un controlador de polarización completando en total un esquema de anillo para el proceso de interferencia.

En el 2006 Andy Chong *et al.* [26], reportan el análisis experimental a partir del cual obtienen pulsos tan cortos como 170 fs con una energía de pulso por encima de los 3 nJ en régimen de dispersión normal. Una de las principales ventajas en la obtención de pulsos en las cavidades construidas completamente de fibra, es la dispersión por velocidad de grupo (Group Velocity Dispersion, GVD), la dispersión normal y el efecto Kerr no lineal inducen un chirp con el mismo signo, el pulso se ensancha temporalmente manteniendo la potencia pico baja y permite alcanzar energías mas altas antes de que el exceso de efectos no lineales destabilicen

el pulso. Por lo que en el trabajo se presenta un arreglo en anillo en el que una parte de éste esta formado por un filtro espectral. Este filtro sirve para compensar el ensanchamiento del pulso en la fibra y ayuda en la generación de pulsos en el orden de los femto-segundos sin sección de dispersión anormal dentro de la cavidad. El láser usa una YDF y secciones de SMF, una fuente de bombeo de 980 nm y ya dentro del anillo, el lazo se complementa con un filtro para evitar la dispersión anormal. En este artículo se demuestra que la generación de pulsos en régimen de dispersión normal no requiere compensación de dispersión (que es el caso anteriormente presentado [24]), algo interesante es que el esquema puede ser armado completamente de fibra.

R. Grajales-Coutiño *et al.* [27] en el 2007, usando un NOLM como absorbedor saturable presentan un láser de figura ocho pulsado, generan pulsos de 30ps con una frecuencia de repetición de 0.8 MHz. EL NOLM esta formado de un acoplador 50/50, para un acoplador simétrico es necesario utilizar la rotación de la polarización no lineal (Nonlinear Polarization Rotation, NPR) para obtener el switcheo; de un lazo de fibra altamente torcida para evitar cambios de birrefringencia cuasados por interacciones con el ambiente y hacer un interferómetro mas estable; un QWR con el que la polarización en uno de los lazos propagantes en el lazo cambie su estado de polarización y al llegar al acoplador sea posible la interferencia no lineal. El láser contiene una fibra dopada con erbio (Erbium-Doped Fiber, EDF).

B. Ibarra-Escamilla *et al.* [28] en el 2008, reportan un F8L en operación de autoencendido con resultados experimentales para la generación de pulsos a una frecuencia de repetición de 0.78 MHz y duraciones de 20 ps. El láser de figura ocho hace uso de un NOLM simétrico y de retardadores de cuarto de onda.

Andrés Gonzales-García *et al.* [29] en 2009, presentan los resultados experimentales de un esquema de láser completamente de fibra en configuración de anillo. Este láser es sintonizable en la región de los @1550nm y puede operar en el modo de multi-longitud-de-onda. El anillo hace uso de un filtro Sagnac con objeto de introducir una pérdida que depende periódicamente de la longitud de onda de la cavidad y así seleccionar un modo de oscilación en el anillo. Cambiando el ángulo del retardador del filtro, se genera el modo de oscilación en frecuencia sencilla o multifrecuencia. En frecuencia continua el láser es capaz de sintonizarse desde 1545

hasta 1563 nm y el laseo para el modo multi-longitud de onda se observó para un máximo de tres longitudes de onda con espaciamentos de 8 nm y 1 nm.

1.2 El Láser de Fibra Óptica en la actualidad

El láser de fibra óptica se ha posicionado como uno de los dispositivos ópticos con mayores campos de aplicación. Algunas de las ventajas que se le pueden atribuir pueden ser su tamaño compacto, alta concentración de potencia del haz de salida cuando es colimado, mantenimiento casi nulo, dispositivos plug and play (con respecto al tiempo de espera para que comience a operar), alta eficiencia, buena calidad del haz de acuerdo a su coherencia temporal y espacial tanto como de su intensidad, entre otras cualidades.

El que el láser se pueda construir en un sólo encapsulado completamente de fibra, con la luz confinada dentro del núcleo de la guía de onda, lo provee de inmunidad con respecto a los cambios de temperatura u otras variaciones ambientales. Por lo que éste tipo de configuraciones láser han tomado área de aplicación en campos como la industria, medicina, milicia, etc.

Si uno piensa en el mantenimiento, los láseres de fibra no necesitan de la alineación de sus piezas o dispositivos que lo componen y tampoco necesita de limpieza o cualquier otro tipo de intervención de personal especializado para la puesta en operación en eventos futuros.

De acuerdo a una variedad de esquemas en la configuración para los láseres de fibra óptica, éste no solamente puede escalar en potencia sino que también se pueden conseguir diferentes modos de operación. Algunas de estas son: frecuencia simple, fuentes de banda ancha, fuentes en la región visible, modo pulsado, modo continuo, sintonizables, multi-longitud de onda, etc.

1.2.1 LFO en régimen de onda continua.

Parte del significativo avance de los láseres de fibra óptica se ha debido al desarrollo, mejora y evolución de las fuentes de bombeo. La combinación entre diodos láser y fibras ópticas ha dado paso a la construcción de dispositivos ultra-rápidos necesarios en el área de las telecomunicaciones, dentro de los que se pueden destacar los amplificadores, reconstructores de señal, ruteadores, canalizadores, etc.

Otra de las ventajas de operación que se han encontrado en los láseres de fibra óptica, a partir del mejoramiento en los diodos láser es, la capacidad de estos últimos para formar grandes arreglos de diodos, cada uno de los cuales provee una cantidad de potencia que luego es inyectada a fibras con tierras raras y se ha llegado obtener salidas láser en [31, 32], para régimen de onda continua:

- 1.4 kW, con YDF operando a @ 1070 nm.
- 600 W, con YDF con fibra polarizada (PM).
- 120 W, con YDF en modo Q-switch (con pulsos de 0.6 a 8.4 mJ).
- 200 W, con fibras co-dopadas Er:Yb operando a @1550 nm.
- 75 W, con fibra super sensible a 2 μm y dopada con tulio.

Por otra parte el escalamiento en potencia ha hecho posible la presentación de nuevos dispositivos que nos hacen visualizar un panorama mucho mas amplio en el futuro de los láseres de fibra óptica [33, 34], a este nuevo grupo de láseres se les conoce como MOPA (de sus siglas en inglés Master Oscillator/Power Amplifier Configuration) y algunos ejemplos son:

- 633 W, con YDF-PM.
- 511 W, con YDF operando en frecuencia simple.
- 321 W, amplificador Er:Yb (20 ps a 1 GHz) @ 1550 nm.
- 150 W, con fibras co-dopadas Er:Yb operando a @ 1550 nm en el régimen de frecuencia simple.
- 25 W 100 fs 5 MW potencia pico después de compresión, amplificador a @ 1060 nm.

1.2.2 LFO en régimen pulsado.

En esta sección se hace una recopilación de los principales logros alcanzados para los láseres de fibra óptica en el régimen de pulsos ultra-cortos.

La tecnología de los láseres de pulsos ultra-cortos tiene tres diferentes áreas de aplicación según sean los aspectos a considerar, algunos de los cuales se pueden generalizar con respecto a:

- Ultra-cortos, con respecto al tiempo de duración (en el orden de los pico y femto segundos).
- Ultra-angostos, con respecto a su ancho espectral.
- Alta concentración de energía por pulso.

Posibles áreas de aplicación:

- Experimentación, usandolos como fuentes de bombeo [55].
- Procesado de materiales, ya sea por: ablación, vaporización, entre otros [56, 57].
- Medicina [58, 59].
- Tomografía [60, 61].
- Resolución tri-dimensional [62, 63].
- Comunicaciones opticas [29, 64, 65].

1.3 Organización de la tesis.

En los siguientes capítulos, se lleva a cabo un análisis matemático, de simulación y experimental para el esquema del láser de figura ocho, pulsado por medio del amarre de modos pasivo, usando como absorbedor saturable un espejo de lazo óptico no lineal (NOLM), (F8L, de sus siglas en inglés Figure Eight Laser).

En el Capítulo 2, se analizan los puntos mas importantes de los que se compone un láser de fibra óptica y se hace referencia a otro tipo de láseres, para que a través de su comparación, se pueda tener una idea detallada de su funcionamiento y principalmente de las ventajas que ofrece sobre estos. El láser que nos interesa contiene una sección de fibra que contiene iones de iterbio, por lo que se detallan las características espectrales de dicha fibra y se dibuja un panorama de las posibles aplicaciones para esta longitud de onda de laseo. Puesto que parte del objetivo del trabajo de tesis es la de hacer que el láser opere en el régimen pulsado, se presentan dos métodos ampliamente usados: el método de amarre de modos y el método Q-switch. Como último punto y siguiendo con la descripción analítica del láser, se revisan los conceptos matemáticos del NOLM, que haciendo uso del algebra matricial se muestra parte de su simulación u operación como dispositivo AS.

El Capítulo 3 muestra algunos datos del proceso de simulación necesario para ejemplificar y asimilar el funcionamiento del F8L en régimen de dispersión normal. Este capítulo es importante porque nos permite entender el funcionamiento del láser, las ventajas y las deficiencias del sistema, con respecto a las variables de las que nos hagamos valer. Parte de los datos que podemos variar son: la razón de acoplamiento en el acoplador de salida, la longitud de la cavidad con respecto a la longitud de la YDF, el lazo del NOLM o la fibra del anillo, etc. Se discuten las conclusiones a las que se llega después de la simulación y se presenta una propuesta para la implementación en el laboratorio obtenida por medio de los resultados analíticos.

El Capítulo 4 presenta los datos experimentales que arrojó el armado del láser en el laboratorio, así como el procedimiento con el que se trabajó para obtener dichos resultados, presentando los puntos de interés para su posible reconstrucción y ofrecer de tal suerte un esquema completamente duplicable en cualquier ambiente de laboratorio. El láser de anillo se hace operar en modo CW por lo que se dan a conocer las longitudes de onda que se generan y se discute sobre un caso particular en la operación de dicho esquema. Por ultimo se da una conclusión. Se presenta un intento para obtener amarre de modos con el esquema de anillo y con el esquema de F8.

En el último apartado de esta tesis se presentan las conclusiones generales del trabajo expuesto y para fenecer se comparten algunos de los proyectos con miras a realizar en próximas fechas para de manera mas directa, mostrar la importancia en la continuación de la presente propuesta de investigación.

Capítulo 2

Láser de Fibra Óptica de Figura Ocho.

2.1 Introducción.

En el presente capítulo se hace un análisis teórico del funcionamiento del láser de fibra óptica en configuración de anillo y el láser de figura ocho, objetivos de la tesis, construidos en el laboratorio (vease los Capítulos 3 y 4 para los detalles de simulación y experimentación respectivamente).

El esquema del F8L se compone de dos partes, cada una de las cuales son conocidas a partir de la siguiente terminología: láser en anillo y del NOLM. En cada una de ellas hace uso de la polarización de la luz dentro de la cavidad y por lo tanto en cada una es necesario llevar a cabo el respectivo análisis matemático con respecto a la polarización de la luz y la interacción con los dispositivos.

Siguiendo en contexto, parte de la propuesta del presente trabajo de tesis es el uso de la tierra rara Iterbio Yb^{3+} (ion huesped en la fibra óptica de SiO_2), así que se detallan las características espectrales de la misma.

Para estudiar el tema se propone el álgebra matricial como herramienta, donde cada uno de los dispositivos representa una matriz; de tal modo que se den a conocer las ecuaciones de los dispositivos, llámense: fibra óptica, polarizadores, retardadores de onda, etc. El tema se extiende hasta aportar una ecuación general para el esquema NOLM en su conjunto.

Finalmente, habiendo cubierto este punto y haciendo notar de antemano que el funcionamiento del NOLM es necesario para la operación del láser en modo pulsado, se hace una revisión de los láseres en modo pulsado por medio del método de amarre de modos pasivo (el amarre de modos es un método experimental estudiado ampliamente, por medio del cual

se obtiene la generación de pulsos ultra-cortos para cualquier tipo de láser, algunos ejemplos pueden ser: diodos láser, láseres de cristal fotónico, láseres de gas, láseres de fibra óptica, etc.).

2.2 Principio de funcionamiento.

Los láseres de fibra óptica, como cualquier láser en general, deben contener necesariamente: una cavidad resonante, un medio de ganancia y una fuente de bombeo. Consiguiendo en conjunto el fenómeno conocido como laseo o técnicamente el fenómeno LASER (acrónimo del inglés de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), por otra parte si alguno de los elementos enumerados anteriormente llegara a faltar no sería posible la obtención de este fenómeno.

A continuación se muestran de manera escueta las características elementales de algunos de los láseres mas comunes en el mercado, sabiendo de antemano que existe una variedad mas extensa, sin embargo los siguientes casos ayudan a visualizar con mas claridad el punto de que las características elementales con las que debe cumplir un láser cualquiera, deben ser las mismas.

Se muestran los siguientes casos:

- Láser de estado sólido [35]. Medio de ganancia: cristal con iones, conocido como cristal iónico (Cr^{3+} - Al_2O_3 , ruby ó Nd^{3+} -YAG); fuente de bombeo: lámpara de mercurio a alta presión, lámpara de destello de Xe; cavidad resonante: espejos esféricos pára cualquiera de los casos presentados.
- Láser de gas [35]. Medio de ganancia: gases (HeNe λ @ 632.8 nm, CO_2 λ de 5 a 773 μm), metales vaporizados (HeCd λ @ 441 nm-325 nm), dimoleculares (Xe_2 λ @ 173 nm); fuente de bombeo: medios eléctricos, descargas de corriente eléctrica ya sea en corriente alterna AC o corriente directa DC para todos los casos en general; cavidad resonante: espejos esféricos en general.
- Láser de semiconductor [35] [47]. Medio de ganancia: uniones de semiconductores (GaAs λ @ 840 nm, AlGaAs λ @ 800-850 nm, InGaAs λ @ 980nm); fuente de bombeo:

corriente eléctrica directa DC polarizando las uniones como cualquier diodo; cavidad resonante: caras de las terminales de la unión planas y pulidas aun cuando en la actualidad existen diversas configuraciones geométricas que han dado como resultado mejoras en la eficiencia para la obtención de amplificación estimulada.

- Láser de fibra óptica [47]. Medio de ganancia: iones pertenecientes al grupo de los lantanidos (capa 4 *f* llena) y actinidos (capa 5 *f* llena), grupos también conocidos como tierras raras entre las que se encuentran el erbio Er^{3+} emite a $\lambda \cong 1.55 \mu\text{m}$, neodimio Nd^{3+} emite a $\lambda @ 0.9\text{-}1.3 \mu\text{m}$ e iterbio Yb^{3+} emite a $\lambda @ 0.97\text{-}1.2 \mu\text{m}$, entre otras; fuente de bombeo: láseres de semiconductor, el cual se elige de acuerdo al ion utilizado; cavidad resonante: Fabry-Perot con reflectores dieléctricos, Fabry-Perot con reflectores completamente de fibra, Fabry-Perot con rejillas de Bragg, configuración en anillo, Fox-Smith, etc.

A continuación se presenta un análisis más detallado de los láseres de fibra óptica.

2.2.1 Láseres de Fibra Óptica.

Los avances en la construcción de fibras ópticas, así como el desarrollo y evolución de los diodos láser como fuentes de bombeo, han dado como resultado la construcción de Láseres de Fibra Óptica (LFO) más confiables, eficientes, compactos y económicos, entre otros de sus aspectos. Dirigiéndolos necesariamente hacia la implementación de éstos en muchas de las aplicaciones de la actualidad como ya se vió en el capítulo 1.

Una de las principales ventajas con respecto a su contraparte de los láseres de bulto (bulk lasers), es la distribución de altas intensidades de energía en largas regiones de interacción de manera longitudinal. La guía de onda o fibra óptica puede disipar las radiaciones no fotónicas como la radiación calorífica a lo largo de toda la longitud de la fibra de la que esté armado el láser, ofrecen mejor confinamiento transversal produciendo mayor concentración de energía.

La principal configuración de las guías de onda utilizadas para amplificadores o láseres se compone de un núcleo en el que se han depositado iones de alguna tierra rara.

La interacción de los iones de la tierra rara con el vidrio en el que están contenidos afectan el tiempo de vida en la fluorescencia, absorción, emisión, estados excitados de absorción en la sección transversal de la fibra [47], etc.

Dado que el objeto de la tesis no es ahondar en temas de este tipo, a continuación se muestra, de manera sencilla, una de las teorías que explica algunos de los procesos de interacción de los iones en el medio huésped. Con la que se puede dar una aproximación analítica más compleja de la estructura electrónica del medio de ganancia.

2.2.2 Propiedades electrónicas y ópticas del medio de ganancia.

Las tierras raras más usadas como medio de ganancia comparten entre sí la interacción entre electrones del nivel $4f^3$. Esta interacción es conocida como **Interacción Coulombiana**. Para comprender mejor el proceso de interacción es necesario visualizar el efecto de la suma de las energías cinéticas de los electrones y la interacción con el núcleo, así como la interacción repulsiva entre los electrones [38].

A partir del Principio de Exclusión de Pauli, se deduce que cada una de las capas en el átomo contendrá un número limitado de electrones para el caso de las tierras raras va de 1 a un máximo de 14 electrones, donde para explicar la estructura atómica tenemos dos reglas a saber, las reglas de Hund:

“El estado de máximo espín tiene menor energía”.

De la que se deduce que existe un potencial repulsivo electrón-electrón, evitando traslape de las funciones de onda.

“Para un valor dado de espín, el estado de máximo momento angular orbital L tiene menor energía”.

Esta regla postula que entre mayor sea L , la función de onda tiene más hojas lo cual permite que los electrones estén más separados reduciendo su interacción coulombiana [38].

Distribuidos éstos electrones en el desdoblamiento de las capas, tenemos:

$$4f^3 \rightarrow {}_4I_{4,4} {}_4F_{4,4} {}_4H_{4,4} {}_4G, \dots$$

Por otra parte se tiene la **Interacción Espín-Órbita**.

De acuerdo a los momentos magnéticos del electrón y el campo magnético que surge como consecuencia del movimiento del núcleo, observando el sistema de referencia cuando el electrón esta en reposo, tenemos esta segunda perturbación [38]. Cada uno de los niveles tendra un desdoblamiento de acuerdo a su espín donde la suma del momento angular esta relacionada con el espín y el momento angular orbital, $J = L + S$. Considerando el ejemplo del nivel $4F(S = 3/2, L = 3)$.

Tomando en cuenta la interacción espín-órbita, este nivel se desdobla en los siguientes niveles, que pertenecen al momento angular $J = (L+S), (L+S-1), \dots, (L-S) = 9/2, 7/2, 5/2$ y $3/2$.

Por último es necesario considerar una interacción muy importante que tiene que ver con el material en el que esten contenidos los iones de la tierra rara. Por lo regular es una matriz de vidrio completamente inhomogeneo donde se crean tensores lineales. El nombre que recibe esta interacción es la **la Interacción Ión-Red**. Una vez mas tendremos una desdoblamiento de los niveles ya encontrados para el caso anterior a estos nuevos niveles se les llama niveles de Stark. Obteniendo el siguiente esquema que ejemplifica el proceso a partir del cual conoceremos las interacciones de los niveles atómicos, figura 2.1.

2.2.3 El Iterbio, características espectrales.

El iterbio es una de éstas tierras raras, ion medio de ganancia, que por un tiempo estuvo menospreciado y no bien valuado viendose opacado por el neodimio que tiene emisión láser en las mismas longitudes de onda. Sin embargo, debido a la estructura relativamente sencilla del iterbio y a la alta eficiencia de amplificación ha retomado un lugar muy importante para la construcción de láseres de alta potencia. La figura 2.2 muestra los espectros de absorción y emisión del iterbio. Entre otras cualidades, el iterbio tambien ha sido recientemente utilizado para ayudar en el proceso de absorción para el bombeo del erbio, $\text{Yb}^{3+}:\text{Er}^{3+}$, aprovechando los estados excitados del iterbio que concuerdan con los niveles de mayor eficiencia de absorción del erbio, haciendolo a éste mas eficiente para el proceso de amplificación.

El iterbio es un metal blando muy dúctil, en la naturaleza se encuentra en su estado de oxidación Yb^{3+} , tal como otras tierras raras. El Yb tiene un número atómico de 70 y su configuración electrónica es la siguiente:

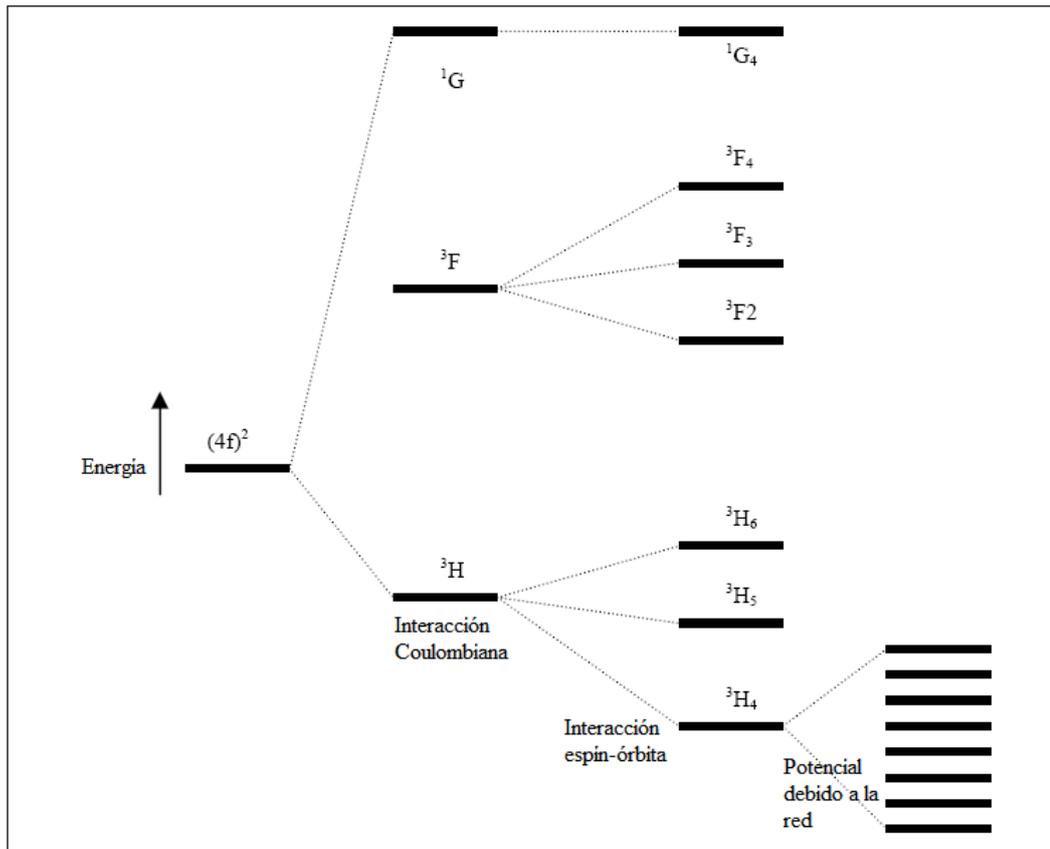
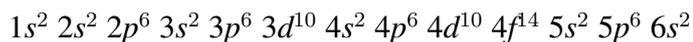


Figura 2.1 Desdoblamiento de los niveles de energía para el grupo de los iones de tierra rara $4f^3$, entre las que vemos la interacción Coulombiana, espín-órbita e ión-red.



Una de las principales ventajas es la inusual banda de absorción que va de los 850 nm a 1070 nm debida a los niveles internos de transición del material localizados en ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ [53]. Otra de las características del Yb^{3+} es que tiene un rango de fluorescencia considerablemente grande aproximadamente de 970 a 1200 nm. Por su parte el diagrama de niveles de energía para el Yb^{3+} exhibe sólo un nivel de estado base (${}^2F_{7/2}$) y uno metaestable (${}^2F_{5/2}$), espaciados aproximadamente por $10,000 \text{ cm}^{-1}$. El tiempo de vida radiativo para el segundo nivel va de 700-1400 μs [53]. Sin embargo, estudios recientes demuestran que iones depositados en bases de SiO_2 se consigue interacción de tres o quasi-cuatro niveles.

Otro punto importante a considerar, es no bombear al iterbio en su pico de absorción y emisión máximo $\lambda @ 975 \text{ nm}$, puesto una fracción de la potencia se pierde por reabsorción

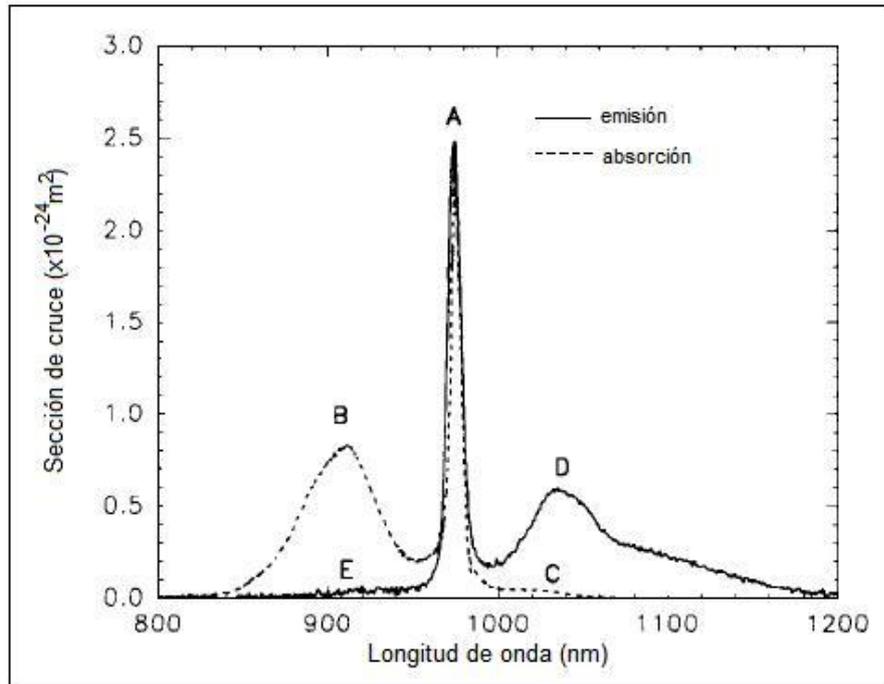


Figura 2.2 Espectro de emisión y absorción características para los iones de Yb^{3+} sobre una base de sílice SiO_2 . Con un pico de absorción y emisión centrado a los 975 nm.

[54], obteniendo pérdidas considerables y baja eficiencia. Por consiguiente es recomendable hacer uso de fuentes de bombeo con longitudes de onda un poco desplazadas de este pico máximo, figura 2.2. Se puede agragar que la mayoría de los trabajos sobre láseres de Yb^{3+} de amarre de modos en régimen de dispersión normal usan un bombeo a ≈ 975 nm.

2.2.4 Esquemas de cavidades resonantes.

Dos cavidades resonantes para los láseres de fibra óptica resultan ser las mas representativas y comunmente usadas, estan son: la cavidad de anillo y la cavidad Fabry-Perot en cualesquiera sean sus representaciones. De entre estas, en el presente trabajo es utilizada la configuración en anillo, vease la figura 2.3.

Como primer punto a tomar en cuenta, lo mas importante para la construcción del oscilador es la guía de onda en sí, que es en la que se propagan las señales, tanto de bombeo como la de emisión estimulada. Sin embargo, para generar la amplificación por emisión estimulada es

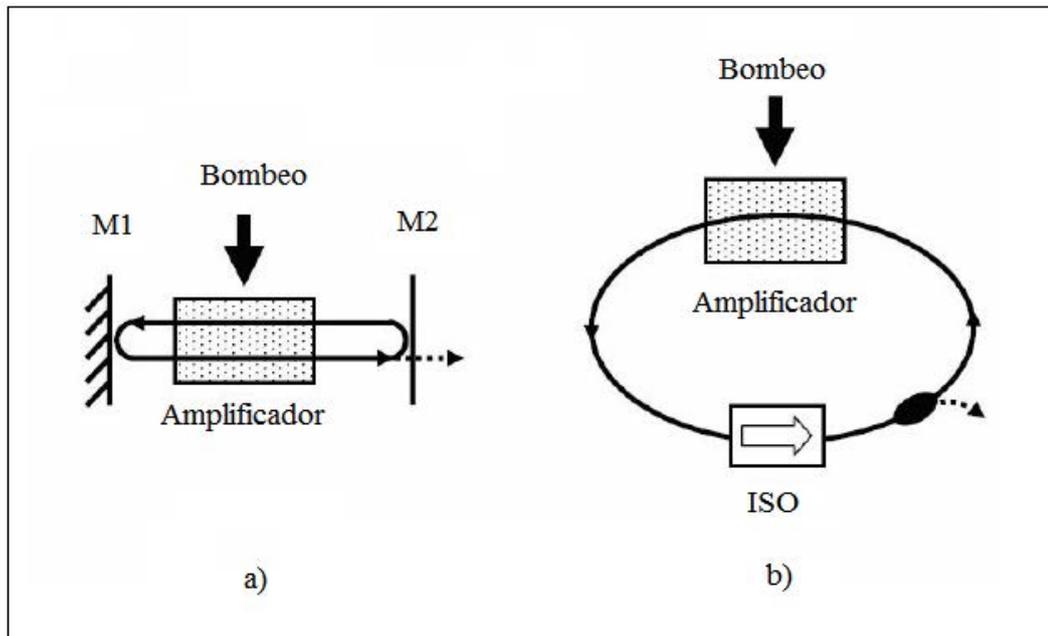


Figura 2.3 Se muestran los dos tipos de cavidades más representativas para las configuraciones de los láseres de fibra óptica, por una parte se encuentra a) la cavidad lineal conocida como la configuración Fabry-Perot y b) la cavidad de anillo o lazo de fibra.

necesario que la cavidad cuente con un par de espejos que completen la retroalimentación de la señal.

Las cavidades que se explican a continuación son específicamente para la generación de láser en modo continuo, esto, en su primera interpretación. Claro que los esquemas presentados se pueden prestar para la generación de pulsos, pero para este punto se requiere hacer algunas adiciones y cambios que permitan, por medio de cualquier método, la generación de pulsos.

El primer ejemplo de cavidad presentado es la cavidad Fabry-Perot. En esta configuración la señal de bombeo es inyectada dentro de la guía de onda y viaja hasta ser absorbida por el medio de ganancia. En la mayoría de estas configuraciones, el simple hecho de que las caras de la guía de onda tengan un corte plano y liso hace viable que por medio de la reflexión de Fresnell obtengamos un 4% de la reflexión de la luz hacia dentro de la guía de onda. Recordemos que la guía de onda está construida principalmente a base de vidrio, ya sea a base de sílice o germanio, lo que hace posible tal efecto. Cuando el corte en las extremidades es diferente en

ángulo con respecto al corte de 90° la oscilación no es posible. Cuando esto no se cumple, algunos esquemas propuestos van desde la deposición de una delgada película reflectora en las terminales de la fibra y asegurar la reflexión.

Otro ejemplo de cavidad Fabry-Perot es el etalón formado por un par de espejos en cada una de las terminales, los espejos son construidos completamente de fibra conocidos como espejos ópticos de Sagnac. Con este par de lazos que son unidos por un par de acopladores respectivamente, es posible controlar la reflexión hacia dentro de la cavidad por medio de la interferencia de la señal de láser al pasar por los acopladores. Permitiendo según sea el caso, cuando el lazo es simétrico o lo forma un acoplador 50/50, el resultado es el reflejo del 100% de la señal de láser hacia el resonador, del otro lado el acoplador tiene otra razón de acople permitiendo la extracción de la señal.

Por otra parte, buenos elementos hechos completamente de fibra son, las rejillas de Bragg con las que se filtra la señal, permitiendo por una parte el paso de la señal de bombeo y reflejando la señal de láser. Las rejillas de Bragg son elaboradas por medio de la inscripción directa en el núcleo de la fibra, modificando periódicamente el índice de refracción de la guía de onda en dicha región. De las configuraciones más usuales es la de escribir o empalmar una rejilla sólo del lado donde se está siendo inyectada la longitud de bombeo y del otro lado permanece solamente la fibra con un corte de 90° .

Por último se presenta un esquema por medio del cual nos podemos hacer valer para la generación de pulsos.

De manera natural, esta configuración hace uso del proceso interferométrico para su funcionamiento, este esquema es el conocido como cavidad en forma de anillo. La cavidad en anillo es una configuración hecha la mayoría de las veces con dispositivos completamente de fibra, para comenzar la enumeración de los elementos de los que se compone el esquema tenemos: un acoplador de multicanalización de longitud de onda, conocido como WDM (Wave Division Multiplexing), con el que se acopla la longitud de onda de bombeo dentro de la cavidad; fibra óptica dopada con alguna tierra rara que sirve como amplificador de la señal; ahora, como las señales se encuentran viajando en ambos sentidos del anillo se propone la eliminación de alguna por medio de un aislador óptico, acoplado al lazo y obtener un solo sentido de circulación, dando

como resultado la generación de láser en una sola frecuencia y evitando el proceso de Spatial Hole Burning o múltiples frecuencias resonantes que oscilan de manera simultánea dentro de la cavidad y por último dentro del anillo se suele poner un filtro ya sea para fijar una longitud de onda o un modo de oscilación sea el que prevalezca dentro de la cavidad. El proceso de filtraje ayuda en la generación de pulsos; suelen utilizarse como filtros: arreglos de fibra como el interferómetro de Sagnac con fibra birrefringente, rejillas de Bragg, etc.

Los láseres en configuración de anillo han dado paso a un tipo de láseres, novedosos y eficientes, con ancho de banda angosta, alta coherencia espacial y longitudinal, convirtiéndolo en un esquema de interés para el estudio y desarrollo de nuevos prototipos de cavidades con base en este arreglo.

A continuación y como complemento del tema, se presentan algunos de los avances en la construcción de guías de onda aplicadas como cavidades para LFO. Me refiero a las configuraciones de las cavidades en relación al acomodo del núcleo y del recubrimiento. Este tipo de configuraciones para las guías de onda tiene como fin último el de acoplar la mayor cantidad de potencia de bombeo dentro del núcleo de la fibra que es donde los iones del medio de ganancia son depositados. A este tipo de fibras se incluyen también las de cristal fotónico, las cuales son arreglos capilares con estructuras novedosas que permiten tanto la disipación de altas temperaturas como el confinamiento de la luz en núcleos de unas cuantas micras, novedades especiales que incrementan la versatilidad en láseres de alta potencia; por otra parte recubrimientos que tengan formas geométricas que van desde rectángulos, medios círculos, triángulos, etc., todo, con el objetivo de no permitir la circulación de haces helicoidales en la cavidad, las paredes del recubrimiento provocan pues, que los haces de este tipo sea reflejados en su totalidad hacia el núcleo, hagase referencia a la figura 2.4, para mostrar mejor la idea.

2.3 Láseres de Fibra Óptica en el modo pulsado

En este apartado se da una vista general de dos de los métodos más utilizados para la generación de pulsos en los láseres de fibra óptica, teniendo particular interés en el método de amarre de modos, que es el método ocupado para la simulación del láser presentado en el Capítulo 3 de la tesis.

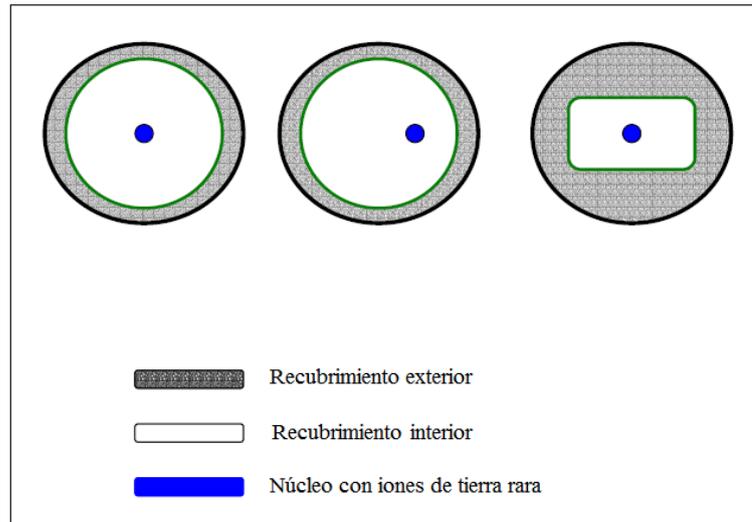


Figura 2.4 Diagramas transversales para diferentes tipos de geometrías de recubrimientos de fibras ópticas usadas como cavidades láser.

El primer método que se describe es el modo Q-switch, donde se hace uso de la amplificación dentro del medio de ganancia hasta incrementar la energía de los iones a un estado excitado y la liberación de toda esta energía de manera simultánea que dará como resultado un pulso con duración equivalente al doble del tiempo que le toma a la señal realizar un recorrido en la cavidad.

Por otra parte tenemos el método de amarre de modos, que juega con la posibilidad de igualar las fases de los modos de propagación en la cavidad para así dar como resultado un pulso o pulsos viajando dentro de la cavidad que por medio de la interferencia constructiva oscilan dentro de la cavidad.

2.3.1 Método para la generación de pulsos: Q-switch.

Q-switch es un método confiable y poderoso para la obtención de pulsos en la terminal del láser de fibra. El principio de operación consiste en acumular la mayor cantidad de la potencia de bombeo dentro de la cavidad, donde al evitar la cavidad resonante los iones comienzan a subir a niveles de energía superiores donde al no tener modo de relajarse solo obtenemos iones excitados. Cuando una gran cantidad de energía se ha almacenado en el medio de ganancia

ahora es el momento en el que la cavidad resonante se completa obteniendo la oscilación y la liberación de la energía almacenada.

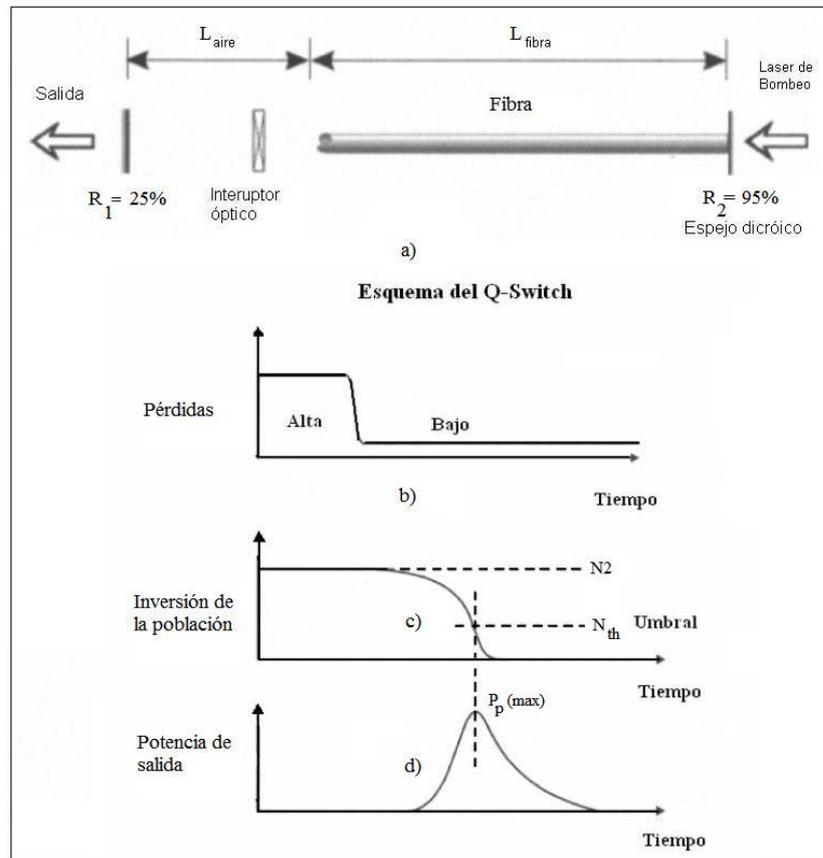


Figura 2.5 En esta figura se muestra: a) un esquema para un láser de fibra óptica en modo pulsado por el método Q-switch, b) pérdidas de potencia dentro de la cavidad láser, que al no tener completa la cavidad de oscilación resulta imposible la ASE, c) una vez que del nivel base N_1 se ha llevado a cabo la inversión de población, se obtiene una gran cantidad de potencia acumulada en el medio de ganancia. Ahora el absorbedor saturable en el extremo de la fibra permite el paso de estas altas potencias y por último en d) la cavidad se cierra con el espejo R_1 y se obtiene un pulso con un ancho temporal igual al doble del recorrido de la señal dentro de la cavidad.

A continuación se presenta la ejemplificación de este proceso para un esquema de un láser de cavidad abierta que utiliza un interruptor óptico para evitar que la cavidad se complete, una vez que el absorbedor se satura, este se vuelve transparente para la longitud de onda de los iones excitados y se completa la cavidad generando la emisión espontánea.

Una de las principales desventajas de éste método con respecto a los láseres de bulto es la poca concentración de energía a lo largo de la fibra en comparación claro, con el bloque de cristal que puede ser de unos cuantos centímetros cúbicos.

En la figura 2.5 se muestra el esquema del láser pulsado. La figura presenta el proceso para la obtención de pulsos, que tendrá una frecuencia de repetibilidad correspondiente a la respuesta del absorbedor saturable.

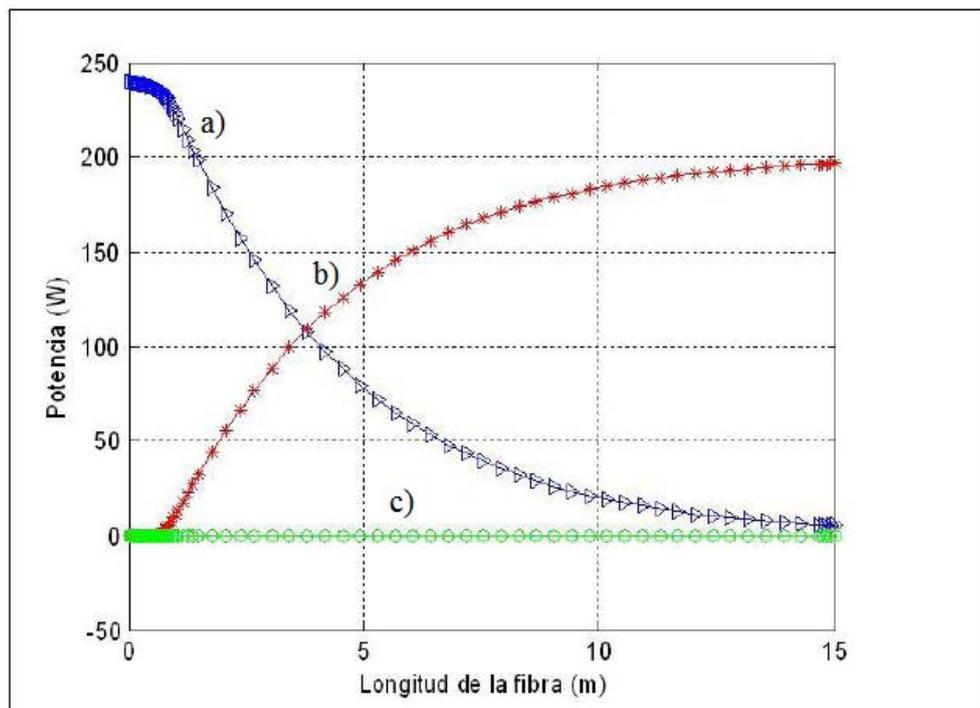


Figura 2.6 En esta figura se muestra la simulación para el modo Q-switch, éstos cambios se dan al momento de que: a) la cavidad es bomeada con una potencia que llega para éste caso a 250 W, b) potencia de bombeo absorbida, consiguiendo la inversión de la población hasta llegar a un máximo de absorción cercano la potencia de bombeo 200 W, c) nótese que en ningún momento del proceso se tiene laseo.

Al momento del bombeo, la concentración de energía en los iones es elevada debido a que no existe la emisión estimulada ni la emisión espontanea, sin embargo la población de iones llegan a un determinado tiempo (denominado tiempo Q) el cual es característico del Yb^{3+} y se da el fenómeno de la emisión espontanea amplificada positiva ASE+ (Amplified Spontaneous Emission +), obteniendo entonces una disminución de la inversión de la población, donde los iones excitados regresan hacia el estado de reposo. En la fig. 2.6 se muestra el proceso ASE+

al momento del bombeo y se muestra de igual manera el laseo en el momento en que la cavidad esta abierta, que se puede saber no será posible.

2.3.2 Método para la generación de pulsos: Amarre de Modos.

En esta sección se muestra uno de los modos mas populares para la generación de pulsos ultracortos. Este mismo método como ya se ha comentado es el que se usa para la producción de resultados experimentales y de simulación.

Una cavidad láser opera en una variedad de longitudes de onda o modos oscilantes que el espectro de salida de su señal de laseo resulta contener un amplio rango de frecuencias. Las frecuencias de estos modos están dadas por $\nu_q = qc/2L$ (donde q es un valor entero, c la velocidad de la luz en el medio y L la longitud de la cavidad láser (en el caso del Fabry-Perot). De esta relación se puede ver que un láser operando en régimen libre (free-running) no podría generar pulsos ultracortos, porque los modos no tienen la misma fase. Sin embargo, cuando a la cavidad se le añade un dispositivo para igualar las fases permitiendo que el láser genere pulsos ultracortos [52].

Cuando se obtiene la transformada de Fourier para el espectro de salida de una señal láser operando en modo free-running, se puede apreciar un espectro suficientemente amplio para contener un gran número de modos, cada una de estas longitudes de onda dentro de la cavidad no guardan coherencia temporal entre ellas, por lo que al tener varias longitudes de onda con diferencias de fase en el tiempo podemos hacer que algunas de ellas interfieran de manera constructiva y conseguir el amarre de modos.

A este efecto de operación, donde tenemos n cantidad de modos oscilando de manera senoidal dentro de la cavidad con la misma fase, se obtiene una sucesión periódica de pulsos con duración inversamente proporcional a n y tasa de repetición $T = 2L/c$. Bajo estas condiciones, se dice que el láser opera en el régimen de amarre de modos.

Cuando el láser se encuentra operando en modo multimodo, cada uno de los modos compite en el proceso de amplificación. Cuando el láser opera en el régimen free-running hay muchos modos, pero si se modula a la frecuencia de resonancia de la cavidad el número de modos es

mucho mas grande y el ancho espectral tambien. Para sacar de operación en el régimen multimodo, la cavidad láser debe contener un dispositivo que promueva ciertos modos de manera periódica sobre otros. Con otras palabras, debe existir un modulador con periodo $c/2L$ donde la fase de los modos sea amarrada con la del resto.

A continuación se presentan las dos grandes técnicas de amarre de modos:

- *amarre de modos activo*: resultado de la modulación con un modulador de amplitud o fase controlado por un generador de radio frecuencias (RF) externo de señal senoidal, tal como pueden ser la modulación de las pérdidas en la cavidad o la ganancia en el medio de amplificación.

Este caso hace uso por lo regular de dispositivos electro-ópticos y acusto-ópticos [37], el mas adoptado para altas tasas de repetición ya que se tiene un controlador de la frecuencia de modulación hasta 10-40GHz o más y pulsos de tiempos en el orden de los \approx ps. Presentando patrones de difracción para el caso de los acusto-ópticos con los que se consiguen atenuación en la potencia de la señal propagandose dentro de la cavidad y en el máximo donde se mantiene alta potencia se obtiene un pulso periódico de oscilación. Este es el caso de la modulación por amplitud (AM, Amplitud Modulation), que al aplicar a un bloque una señal de radio-frecuencia en la longitud L adoptandose a la separación de frecuencias intermodal $c/2L$ a la frecuencia angular $\Omega/2\pi$ del dispositivo, figura 2.7.

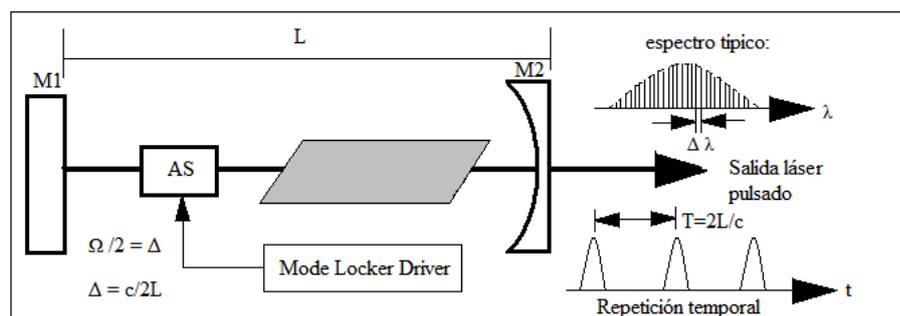


Figura 2.7 Amarre de modos activo por medio de un dispositivo ya sea electro-óptico u acusto-óptico.

- *amarre de modos pasivo*: resultado de la inserción de un absorbente saturable dentro de la cavidad, con objeto de favorecer el modo pulsado.

Esta otra técnica de amarre de modos, hace uso de un absorbedor saturable (AS) que opera en el régimen no lineal, pero su funcionamiento se da sin la necesidad del control externo del dispositivo, haciendolo totalmente pasivo, por lo que de ahí recibe su nombre 2.8.

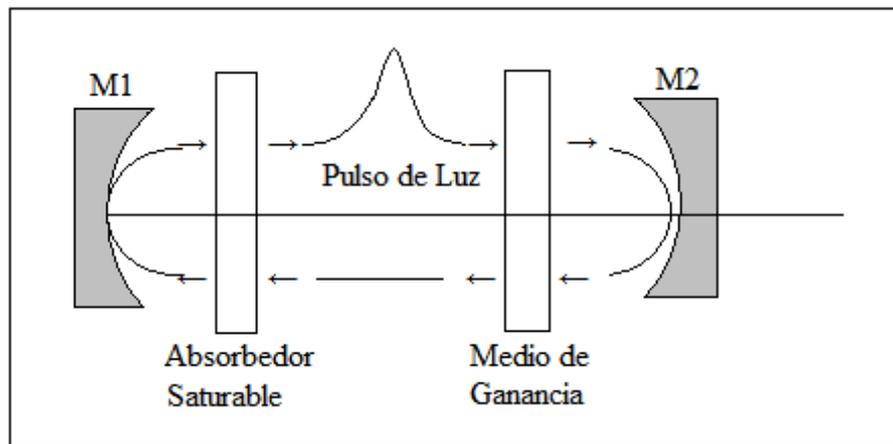


Figura 2.8 Cavidad resonante que incluye: al absorbedor saturable, el medio de ganancia y la generación del pulso.

Este proceso para el amarre de modos es simple de explicar y tiene que ver con las características de transmisión del AS. Donde la razón de transmisión T varía de acuerdo al incremento de la intensidad dentro de la cavidad. La figura 2.9 nos ayudará a visualizar cual es el efecto que se tiene con respecto al absorbedor saturable y la ganancia dentro de la cavidad con respecto al incremento de la intensidad.

El amarre de modos pasivo abre nuevas posibilidades de operación para los láseres pulsados, puesto que el AS puede comprimir pulsos atenuando señales de pedestal, entre otras posibilidades. Una de estas opciones de AS resulta ser el NOLM. Por lo que a continuación se hace referencia a este dispositivo de manera mas detallada.

En el presente trabajo se usa como dispositivo para el amarre de modos, un absorbedor saturable conocido aquí como NOLM. A continuación se presenta el análisis matemático que nos permite conocer el funcionamiento del sistema de manera analítica y que puede servir para hacer una aproximación de simulación.

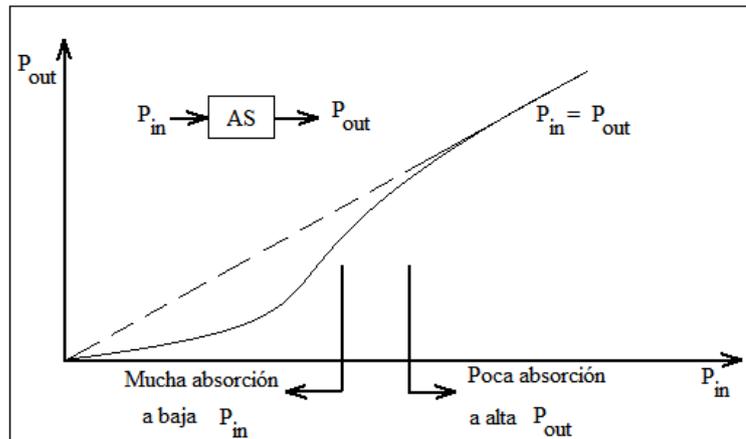


Figura 2.9 Este esquema representa el absorbente saturable de fibra, el cual es un absorbente rápido, donde el tiempo de respuesta de efecto Kerr es de 1fs y la ganancia ($t=10ms$) satura sobre la potencia promedio.

Como complemento de este punto, es necesario enunciar las características de operación del láser en anillo. El láser en anillo en operación no lineal es capaz de generar pulsos. Este fenómeno se da también por el amarre de modos. Para comenzar se necesita que la cavidad en anillo sea unidireccional para lo que se suele hacer uso de un ISO que absorba la suficiente potencia en una de las direcciones para que estas se vuelvan insignificantes. O por otra parte se hace uso de un polarizador; el polarizador permite el paso de modos lineales de polarización cuyo eje de propagación coincide con el del polarizador, dichos modos polarizados se deben asegurar de alguna manera por lo que es indispensable de un controlador de la polarización localizado antes del polarizador. Cada que la señal se propaga y completa un ciclo de viaje en la cavidad, esta va asegurando un modo polarizado específico que al igual que un absorbente saturable llega el momento que la señal central será aquella de mayor potencia. Esta señal contiene modos con fases iguales a 2π de defasamiento por lo que estos serán los modos que se amarren.

2.4 Espejo de lazo óptico no-lineal.

El interferómetro de Sagnac no lineal o espejo de lazo óptico no lineal, es un lazo de fibra óptica al que se le insertan pulsos cortos, mas cortos que la longitud total del lazo, con el objeto de producir el fenómeno de interferencia de la luz, figura 2.10.

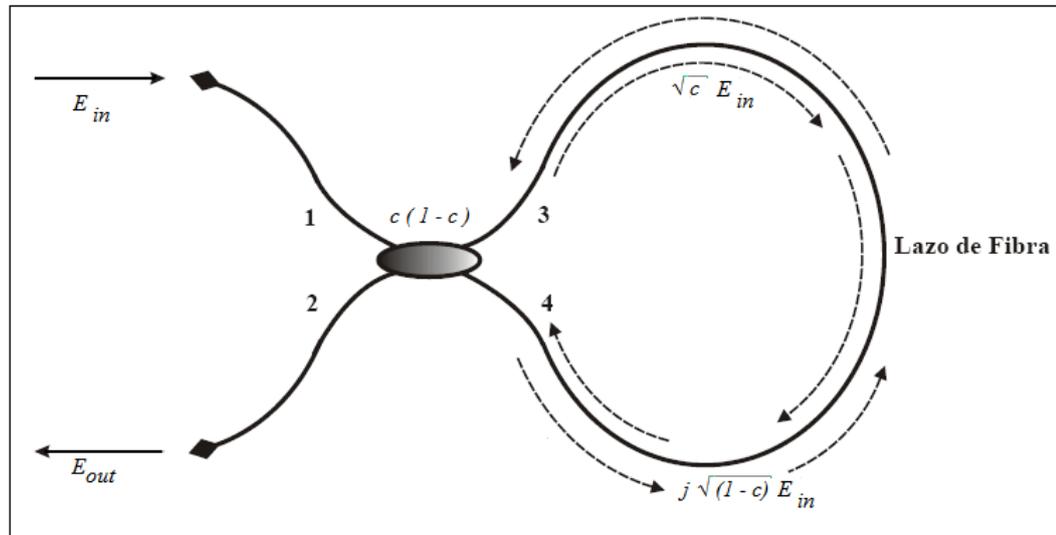


Figura 2.10 Espejo de lazo óptico no lineal, NOLM.

El NOLM es ampliamente utilizado como absorbedor saturable, supresor de pedestal, el amarre de modos pasivo, regeneración de señales ópticas en el área de telecomunicaciones ultrarápidas, etc.

Lo componen un acoplador o divisor de haz el cual hace que la potencia de la luz de entrada se divida en dos señales con potencias iguales o diferentes de acuerdo a las características del acoplador. Una vez que se ha dividido el haz, cada una de las potencias viaja dentro del lazo de fibra, uno en sentido horario (CW, clockwise) y otro en sentido antihorario (CCW, counterclockwise), la interferencia se da cuando el par de pulsos regresa hacia el acoplador; es aquí donde la interferencia se presenta, sin embargo para que la interferencia de penda de la potencia se debe introducir una asimetría en el esquema, algunas de las propuestas que se presentan pueden ser: que la polarización de un pulso cambie con respecto a la otra; o que las potencias de los pulsos sea diferente debido al uso de un acoplador asimétrico, de un atenuador o amplificador localizado en alguno de los brazos del lazo. Otra propuesta es que el lazo se

fabrique con fibras mantenedoras de la polarización y acoplarlas de tal modo que los ejes de birefringencia no coincidan uno con el otro, haciendo un corto asimétrico dentro del lazo, entre otras propuestas.

En nuestro caso la diferencia de camino óptico se hace a partir del cambio de polarización de uno de los pulsos de entrada y el switcheo de obtiene a través de la NPR. Al colocar un retardador de cuarto de onda (QWR, Quarter Wave Retarder) localizado de manera asimétrica en el lazo, no se tiene la necesidad de cambiar la potencia de los pulsos y el acoplador utilizado es un divisor 50/50, a esta configuración del lazo se le conoce como simétrico en potencia y hace referencia al acoplador utilizado. Para realizar el análisis en el esquema presentado, se necesita saber el tipo de polarización de entrada hacia el lazo a través del acoplador (circular lineal o elíptica). El esquema utilizado se presenta en la figura 2.11.

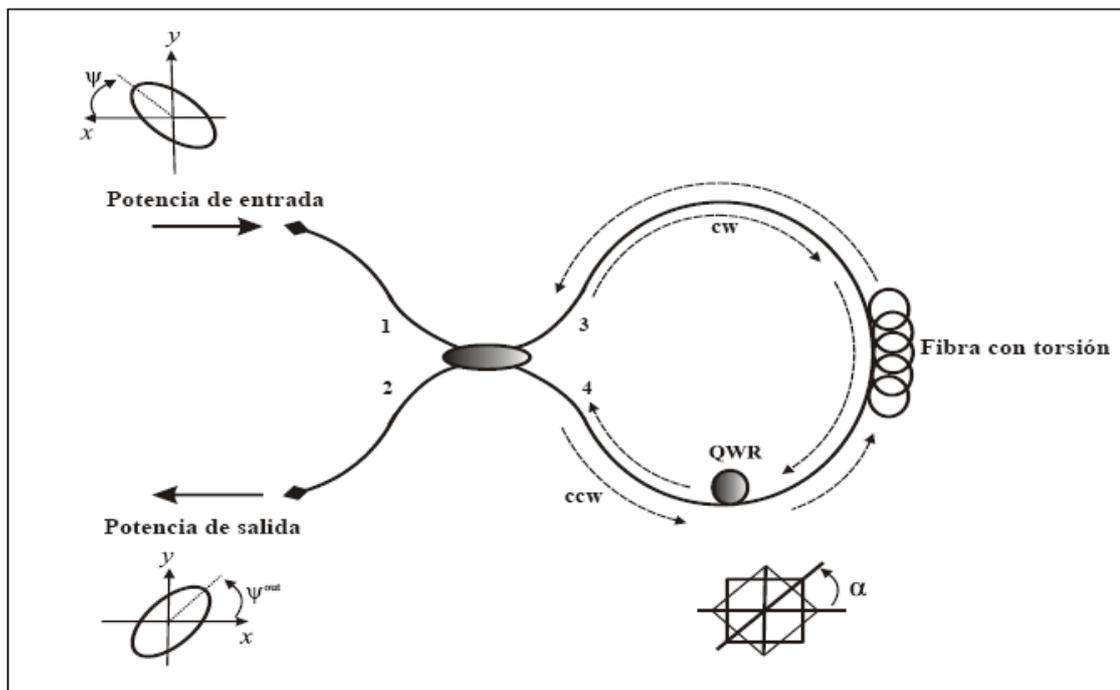


Figura 2.11 NOLM con QWR \equiv Retardador de Cuarto de Onda, usado para efecto del proceso de interferencia a través de la NPR en el lazo, $\psi \equiv$ ángulo de polarización para la señal de entrada E_{in} y $\alpha \equiv$ ángulo del QWR respecto a la normal de la guía de onda.

El primer elemento con el que la luz tiene interacción es con el acoplador y la razón de acople tiene la siguiente relación

$$E_{in} = \sqrt{c}E_{in} + j\sqrt{1-c}E_{in}, \quad (2.1)$$

donde c es la razón de acople ($c = 0.5$, caso simétrico).

Las ecuaciones de la evolución de polarización en el caso continuo se pueden expresar de acuerdo a la ecuación (2.2).

$$\frac{dC^+}{dz} = i\beta \left(\frac{3}{2} - \frac{1}{2}A \right) C^+,$$

$$\frac{dC^-}{dz} = i\beta \left(\frac{3}{2} + \frac{1}{2}A \right) C^-, \quad (2.2)$$

Donde β representa el coeficiente no lineal para polarización circular [$\text{W}^{-1}\text{Km}^{-1}$], $\beta = \frac{4\pi\eta_2}{3\lambda A_{eff}}$ para polarización circular y el coeficiente no lineal para polarización lineal tenemos: $\gamma = \frac{2\pi\eta_2}{\lambda A_{eff}}$ ó de manera equivalente, $\gamma = \frac{3}{2}\beta$; ambos relacionados con C^+ , $C^- \equiv$ componentes de polarización circular, el cual es el coeficiente de Kerr.

El la ecuación (2.2) encontramos dos términos: uno independiente de la polarización con un valor constante ($\frac{3}{2}$) y otro dependiente de ésta, relacionado con el parámetro de Stokes (constante en aproximación de no linealidad débil), $A = |C^+|^2 - |C^-|^2$ ($A = \pm 1$ en el caso circular).

Ahora se puede hacer una representación matricial para los vectores de Jones para cada una de las polarizaciones que entran hacia el lazo y con objeto de realizar el análisis numérico, el lazo de fibra se caracteriza por medio de matrices que permiten calcular los estados de polarización de la luz al viajar por el NOLM.

2.4.1 Caso para polarización circular de la señal de entrada.

La primer matriz que obtenemos es la de la fibra, ecuación (2.3), la ecuación esta dada tanto para la señal CW como para la señal en sentido CCW , para éste último caso, tenemos que el parámetro de Stokes CCW sera igual a cero, cuando la polarización de entrada es circular.

$$F_{cw,ccw} = \begin{bmatrix} e^{i\beta\left(\frac{3}{2}-\frac{1}{2}A_{cw,ccw}\right)\frac{P_{in}}{2}} & 0 \\ 0 & e^{i\beta\left(\frac{3}{2}-\frac{1}{2}A_{cw,ccw}\right)\frac{P_{in}}{2}} \end{bmatrix}$$

(2.3)

Matriz para el retardador de cuarto de onda, ec. (2.4):

$$QWR_{cw}(\alpha) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & -j/\sqrt{2}e^{j2\alpha} \\ -j/\sqrt{2}e^{-j2\alpha} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

(2.4)

La matriz del QWR en sentido CCW (counterclockwise, sentido antihorario): $QWR_{ccw}(\alpha) = QWR_{cw}(-\alpha)$.

Dependiendo de la polarización de entrada al lazo de fibra obtendremos una matriz para cada una de las polarizaciones, para el caso que trataremos se supone una polarización de entrada circular en base circular y la matriz de entrada será:

$$E_{in} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \sqrt{P_{in}} ;$$

(2.5)

donde P_{in} , representa el valor de la potencia de entrada.

Para éste caso tendremos para cada una de las señales contrapropagandose un valor de acuerdo a la señal en CW $E_{out,CW} = 0.5QWR_{CW}F_{CW}E_{in}$, ecuación (2.6) y para la señal en CCW $E_{out,CCW} = -0.5F_{CCW}QWR_{CCW}E_{in}$ ecuación (2.7)

$$E_{out,cw} = \frac{\sqrt{P_{in}}}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\beta L P_{in}/2} \\ -i \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\beta L P_{in}/2} \end{bmatrix}$$

(2.6)

$$E_{out,ccw} = \frac{\sqrt{P_{in}}}{2} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\beta \frac{3}{2} L P_{in}/2} \\ -i \\ \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i(\beta \frac{3}{2} L P_{in}/2 + 2\alpha)} \end{bmatrix}$$

(2.7)

donde L representa el valor para la longitud total del lazo de fibra.

En el vector de Jones para $E_{out,CCW}$ sólo se cuenta con una variable α . Esta variable representa el ángulo del QWR, puesto que no se encuentra ninguna otra variable dentro de las ecuaciones, podemos adelantar que obtendremos variación en la transmisión del NOLM con respecto al ángulo α . La variación para la interferencia se dará entonces en la interacción entre la polarización de la señal de entrada suponiendo que el acoplador no influye en la polarización de la señal y el QWR. La NPR hará que obtengamos la asimetría de los pulsos contrapropagantes en el acoplador.

Ahora podemos obtener la ecuación de interferencia entre las señales al momento de llegar al acoplador, a saber, $E_{out} = E_{out,CW} + E_{out,CCW}$, dandonos como resultando la ecuación (2.7).

$$E_{out} = \frac{\sqrt{P_{in}}}{2} \begin{bmatrix} -isen\left(\frac{1}{8}\beta LP_{in}\right) \\ -sen\left(\frac{1}{8}\beta LP_{in} + 2\alpha\right) \end{bmatrix} e^{i\psi} \quad (2.8)$$

donde ψ representa el ángulo de polarización de entrada que como ya mencionamos en éste caso la polarización es circular y α representa el ángulo del QWR. Si $\alpha = 0$, se tiene polarización lineal de salida y para $\alpha \neq 0$, se tiene polarización elíptica.

El ajuste de α permite ajustar el rango dinámico y la transmisión de baja señal.

La ecuación transmitancia esta dada por:

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\alpha) \cos\left(\frac{1}{4}\beta LP_{in} + 2\alpha\right) \quad (2.9)$$

Como caso especial tenemos que cuando $\alpha = 0$, el valor de la transmitancia es $T = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{1}{4}\beta LP_{in}\right)$

En la figura 2.12 se presenta el comportamiento de la transmitancia del NOLM, donde para la primera se ha cambiado el ángulo de polarización en el QWR y la polarización de la señal de entrada se mantuvo fija.

2.4.2 Caso para polarización lineal de la señal de entrada.

Ahora, haciendo el análisis para un polarización de entrada lineal, tenemos el vector de Jones de la energía de entrada de acuerdo a:

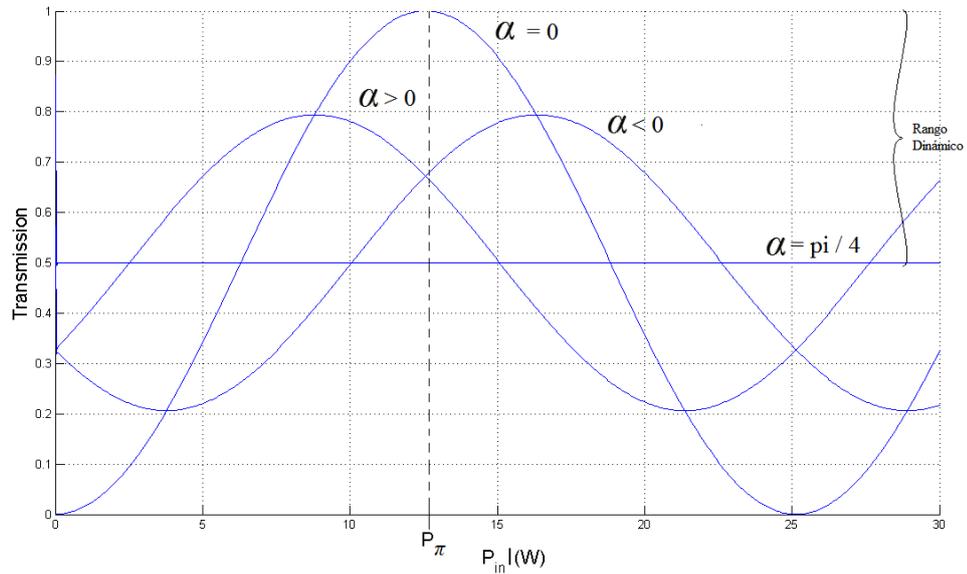


Figura 2.12 Curvas de transmisión del NOLM cuando ψ se mantiene fijo y se varia α .

$$E_{in} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} e^{j\psi} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} e^{-j\psi} \end{bmatrix} \sqrt{P_{in}} ;$$

(2.10)

para este estado de polarización, las variaciones en la interferencia las encontraremos al variar el ángulo de polarización de la señal de entrada, que al pasar por el *QWR* cambiará la polarización de la señal. La matriz de la ecuación (2.10), representa el vector de Jones de salida con $\alpha = 0$. En este vector podemos darnos cuenta que la simulación se hará con respecto a una variable el ángulo ψ , como se muestra en la figura 2.8.

(2.11)

El valor de la transmitancia esta dado por $T = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{1}{4}\beta L \sin(2\psi) P_{in}\right)$.

El ajuste de ψ permite ajustar la potencia crítica (de switcheo):

$$E_{out} = \frac{\sqrt{P_{in}}}{2} \begin{bmatrix} \cos(\psi + \frac{\pi}{4}) \\ \cos(\psi - \frac{\pi}{4}) \end{bmatrix} e^{i(\frac{3}{2}\beta L \frac{P_{in}}{2} - \frac{\pi}{4})}$$

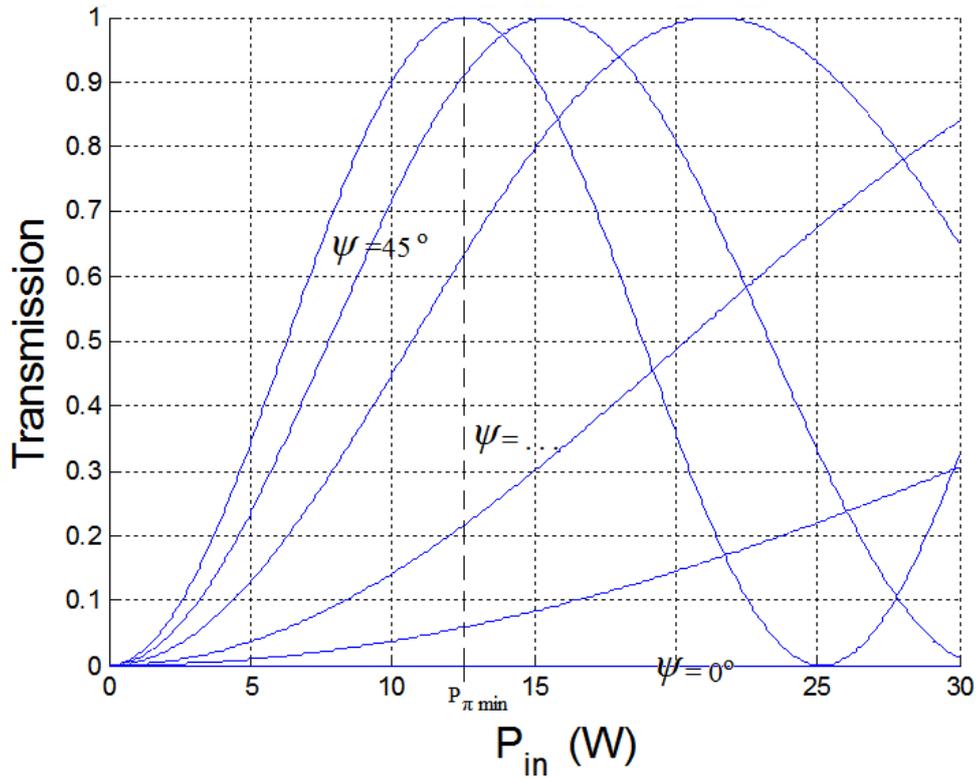


Figura 2.13 Curvas de transmisión del NOLM cuando α es ajustado para mínima transmisión a baja señal, para varios valores de ψ .

$$P_{\pi} = \frac{P_{\pi min}}{\text{sen}(2\psi)}$$

$$P_{\pi min} = \frac{4\pi}{\beta L}$$

En este segundo caso, figura 2.13, el QWR se mantuvo en un ángulo fijo y la polarización de la señal es la que se cambia; los resultados presentados son de parte del análisis matemático de simulación.

Capítulo 3

Análisis Matemático.

En el presente capítulo se lleva a cabo un proceso de simulación para la evolución de los pulsos que se encuentran viajando dentro de la cavidad láser. Esto, porque es importante conocer el estado característico de las modificaciones que sufre, ya sea el ensanchamiento temporal o espectral que sufre el pulso. Por lo que se hace el análisis, tanto en el láser de anillo como en el interferómetro de Sagnac.

3.1 Simulación del Láser de Figura Ocho.

A este complemento entre el láser en anillo y el NOLM se le conoce con el nombre de “Láser de Figura Ocho (F8L, Figure Eight Laser)”. El diagrama esquemático para la simulación se muestra en la figura 3.1.

El láser se compone de:

- un acoplador WDM
- un tramo de YDF, con una longitud L_A
- un acoplador C1
- un tramo de fibra de dispersión normal, con longitud L_B
- un aislador ISO
- un par de retardadores de cuarto de onda QWR1 y QWR2 respectivamente
- un polarizador P1

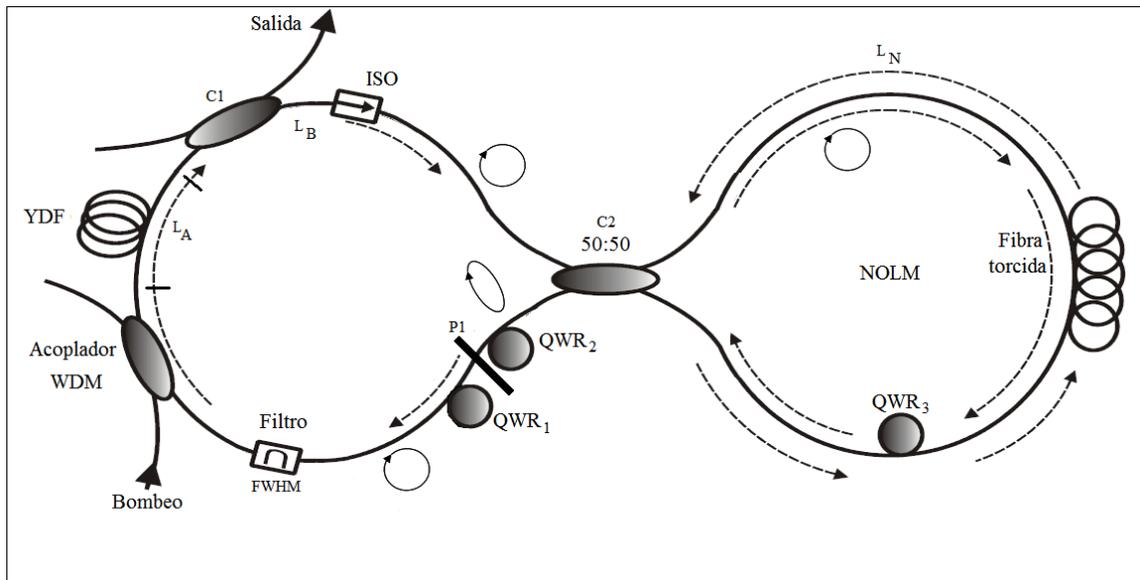


Figura 3.1 Láser de figura ocho, F8L. Esquema utilizado para la simulación.

- un filtro Ancho Total a la Mitad del Máximo (Full Width at Half Maximum, FWHM)
- un acoplador simétrico C2
- un tramo de fibra altamente trocida para el lazo NOLM, de longitud L_N
- un retardador de cuarto de onda QWR3

La importancia de la simulación para la señal de luz viajando en esta longitud de fibra tiene como objeto el de presentar a detalle el proceso de interacción en cuanto a la dispersión y el efecto Kerr no lineal.

La interacción a la que hacemos referencia da como resultado el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión normal que presenta la fibra óptica para la longitud de onda a $@ 1 \mu\text{m}$, a diferencia de la región de $@ 1.55 \mu\text{m}$ donde la dispersión de la luz en la fibra es anormal. El efecto de ensanchamiento del pulso en esta región se debe al corrimiento de frecuencias. Otro punto importante a rescatar de la parte de simulación, es que se puede llevar a cabo la evolución del pulso dentro de la cavidad y a partir de el conocer la potencia contenida, su ensanchamiento espectral, etc., en cada tramo de la fibra. Cosa que no se puede hacer de manera experimental, puesto que las únicas mediciones que se pueden realizar son a la salida del acoplador

La figura 3.2(a), muestra la evolución del pulso en la cavidad de láser compuesta: por el NOLM, el filtro FWHM, la etapa de amplificación YDF y por último cuando atraviesa la fibra de dispersión normal (NDF, Normal Dispersion Fibre).

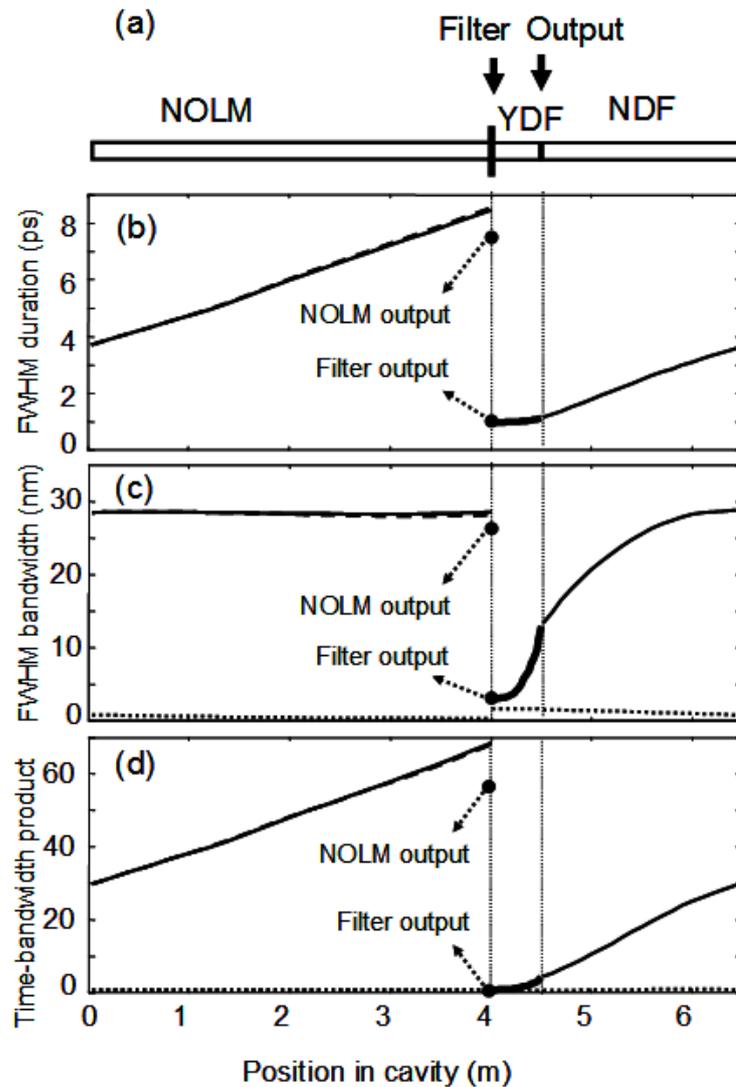


Figura 3.2 Simulación de la dispersión del pulso a lo largo del láser de figura ocho; a) esquema que representa el viaje del pulso a través de los dispositivos: NOLM, filtro, YDF y NDF; características del pulso de acuerdo a su: b) duración temporal; c) ancho de banda y d) el producto entre los procesos de b) y c).

A continuación se muestra la simulación del láser de acuerdo a las siguientes consideraciones: $L_A = 0.5$ m, $L_B = 2$ m, $L_N = 4$ m, dispersión y $D = -40$ ps/nm/km.

De acuerdo a la posición del pulso en la cavidad (distancia en metros, [m]), el pulso sufre un ensanchamiento temporal. Tal como se muestra en la figura 3.2(b). El efecto se debe al recorrido que tiene el pulso a través del NOLM; después cuando el pulso llega al filtro se contrae y al llegar al tramo de YDF se mantiene estable, a continuación se simula la etapa cuando el pulso recorre la fibra de dispersión normal y se muestra un ligero ensanchamiento temporal (≥ 4 nm). La simulación es cíclica puesto que la cavidad así lo sugiere, por lo que después del tramo de la NDF se debe continuar el recorrido del pulso de nueva cuenta hacia el NOLM.

En la figura 3.2(c), se simula la evolución del pulso de acuerdo a su variación espectral. Como se puede ver, el recorrido dentro del NOLM no provoca ensanchamiento, mantiene el pulso en un rango que fue adquirido antes, proveniente del tramo NDF. Cuando llega al filtro este lo comprime eliminando gran cantidad de frecuencias y llevando al pulso a unos cuantos nm (≈ 4 nm), en la etapa del YDF se puede ver que el pulso sufre un ligero ensanchamiento (≈ 11 nm) debido a la amplificación de algunas longitudes de onda localizadas en las faldas del pulso (como se verá más adelante). Al final cuando la señal entra en la fibra de dispersión normal se da el ensanchamiento más pronunciado, llegando hasta un límite (≥ 30 nm) dado por el inicio de la etapa del NOLM.

Por último en la figura 3.2(d) se aprecia el producto de los dos casos anteriores con objeto de ejemplificar de mejor manera el proceso evolutivo del pulso en la cavidad.

El pulso a la salida del láser está representada en la figura 3.3. En esta figura se presentan los perfiles del pulso exactamente a la salida y después de ser comprimido, por último se muestra su espectro en frecuencia.

Como se pudo apreciar, el filtro tiene alta importancia en la interacción con el pulso en evolución, cuyas características se muestran en la figura 3.2.

3.2 Conclusiones.

En conclusión se pudo hacer una aproximación matemática para la simulación del funcionamiento del láser de figura ocho. Una de las principales consideraciones fue la presentación de la evolución de los pulsos dentro de la cavidad.

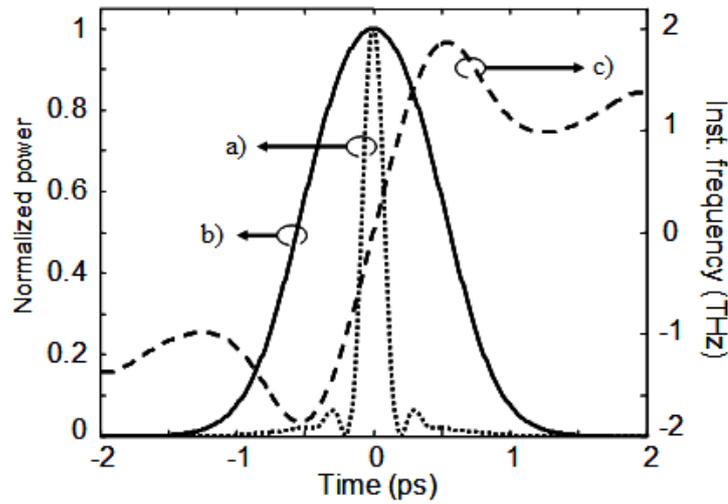


Figura 3.3 Esta figura muestra: a) el perfil normalizado de la potencia del pulso a la salida del láser, b) el perfil normalizado de la potencia después de ser comprimido y c) la frecuencia instantánea.

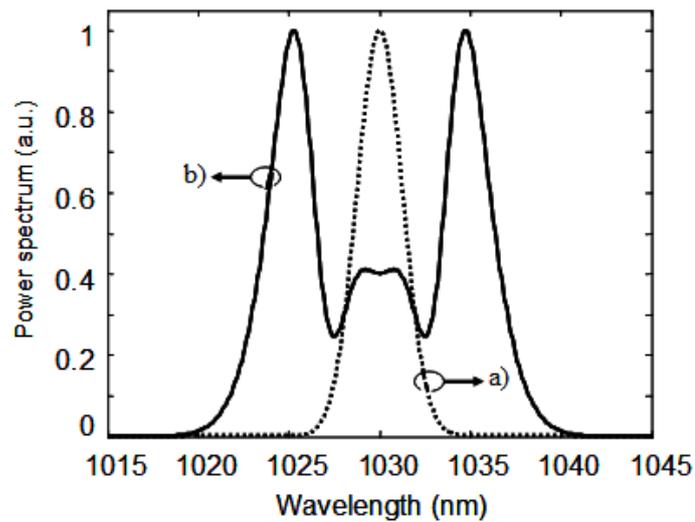


Figura 3.4 Se muestra a) la transmisión del filtro FWHM y b) el espectro del pulso a la salida del láser.

Por otra parte las variaciones que se pueden generar para la optimización de la eficiencia del láser hace el programa una herramienta poderosa para desarrollar un láser de manera experimental de una manera mas confiable.

Los resultados presentados, dan idea de las capacidades del láser y lo posicionan como una posibilidad de competencia con respecto a los láseres en régimen pulsado en el mercado.

La simulación muestra a su vez, que es posible generar pulsos ultra-cortos y de alta energía para láseres de iterbio completamente de fibra operando en dispersión normal en el modo de amarre de modos.

Capítulo 4

Análisis Experimental.

4.1 Intruducción.

Parte del propósito de la tesis, es el de presentar un láser que pueda ser implementado en la industria (en específico para el Procesado de Materiales), se propone la utilización de una fibra óptica con iones de Yb como medio de ganancia, para obtener longitudes de onda en el ancho espectral que va de ≈ 985 nm a ≈ 1200 nm. Esta región de longitudes de onda es importante dado que se tiene interacción con algunos metales (aun cuando se necesita de mucha energía por pulso) como: aluminio y algunos aceros [46]; además trabajando en esta región del espectro lumínico, podemos tener interacción con la piel humana, con lo que crece nuestro campo de trabajo en otros campos de aplicación.

De acuerdo a la última idea expuesta, en este capítulo se muestra: el procedimiento experimental y los resultados arrojados para un esquema de un láser en configuración de anillo completamente de fibra. El láser primeramente se pretende trabajar en el régimen de onda continua y se espera mostrar laseo a varias longitudes de onda ya sea en forma sencilla o de manera simultanea (este fenómeno se explica mas adelante).

El láser a su vez se intenta pulsar a partir de dos principios de operación, ambos en el régimen no-lineal:

El primero por la Rotación No lineal de la Polarización (NPR). Este procedimiento se consigue a través del recorrido de la señal de laseo a lo largo de la cavidad resonante y a dispositivos utilizados para esta configuración: el controlador de polarización (PC), el polarizador (POL) y el retardador de media onda (HWR), figura 4.2.

El segundo es por el método del amarre de modos. Para el cual es necesario acoplar un absorbedor saturable (AS) dentro del lazo del láser de anillo, esquema anteriormente presentado. El AS es el NOLM y por medio de la interferometría se espera conseguir pulsos ultra-cortos y de alta energía.

4.2 Procedimiento experimental.

El trabajo con fibras ópticas que implique la construcción de arreglos completamente de fibra, a diferencia del resto de los trabajos de óptica que incluya dispositivos de bulto, como: lentes, objetivos de microscopio, espejos, entre otros; requiere de equipo de precisión así como de equipo sofisticado (como: empalmadora, cortadora, peladora, entre otras), para la manipulación de las fibras ópticas. Por lo que muchos de los resultados dependen de la calidad del equipo utilizado.

En el laboratorio de fibras ópticas del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) se cuenta con el equipo suficiente para realizar el trabajo que se presenta en este capítulo, sin embargo no es lo suficientemente sofisticado, al tener algunos años de haber salido del mercado y ser adquiridos por el equipo de investigación; y para la manipulación de las fibras es necesario un poco más de pericia para empalmarlas. Aun cuando las diferencias entre las fibras a empalmar sean considerables, como lo son: diámetros de los núcleos, diferentes modos de propagación, diferentes materiales, etc. Estas, a pesar de parecer complicaciones sencillas de solucionar, pueden tener impactos importantes que se reflejan directamente en el desarrollo experimental y éstos a su vez en la obtención de datos de calidad. Estos problemas degeneran en: pérdidas de inserción de la potencia de bombeo, grandes cantidades de ruido en la cavidad, pérdidas en los acoples que necesariamente afectarán el fenómeno de láser produciendo ASE (Amplified Spontaneous Emission, la cual es no deseada principalmente porque compite contra la señal) resultando en una baja eficiencia de láser.

4.2.1 Esquema del láser en configuración de anillo en régimen de onda continua.

El láser en anillo es un diseño de cavidad resonante propuesto en 1990 por P. R. Morkel et al. [40], con objeto de obtener un láser trabajando en el modo de una Sola Frecuencia (Single-Frequency). En esta primera aparición como en las siguientes se ha estado utilizando, tanto Er^{3+} @ 1550 nm, como Pr^{3+} el cual lasea 1330 nm [42]. Ambas longitudes de onda centradas en las principales ventanas de comunicaciones ópticas, con gran impacto para el desarrollo de nuevos dispositivos llámense: transmisores, multiplexores o demultiplexores, etc. Por un momento éste tipo de configuración, láser en anillo, fue dejado de lado [47] debido a la baja eficiencia por estar construido completamente de fibra y también a que aparecieron láseres de semiconductor trabajando en estas regiones espectrales [41], teniendo la facilidad de controlarse por medio de sistemas electrónicos. Actualmente los sistemas tienden a ser completamente de fibra por lo que comienzan a tener un gran impacto en la investigación y desarrollo de nueva tecnología.

En este trabajo se hace la propuesta de retomar el diseño del láser en anillo y como medio de ganancia el ion Yb. Con este medio de ganancia se espera conseguir longitudes de onda de láser en una región que va de los ≈ 985 nm a ≈ 1200 nm. Para esta región de láser, una de las longitudes de onda más importante es @ 1060 nm, con la que se tiene interacción con materiales como aceros de diferentes tipos y aluminio de diferentes características de preparación [45], estos materiales son algunos de los más utilizados en la industria de maquinado de piezas u otros equipos industriales.

Algunos de los resultados de operación de láser, para el caso del láser que se muestra, dependen directamente en la longitud de onda de bombeo así como su potencia máxima, pero se espera controlar la sintonización del mismo haciendo variaciones directamente en el esquema de la cavidad resonante.

La configuración de láser en anillo presenta en su diseño algunas desventajas de operación principalmente debidas a las pérdidas en la cavidad. Sin embargo este tipo de esquema láser ha tenido una mejor eficiencia trabajando como una cavidad unidireccional (unidirectional ring cavity, [40, 42]); haciendo uso de un aislador (ISO), que se acopla dentro del lazo de fibra,

se puede conseguir la unidireccionalidad. Dicho aislador tiene que operar a las longitudes de onda de la tierra rara que se este utilizando, mas tarde se dan los detalles técnicos del mismo.

Por otra parte, se tiene la selección de los modos longitudilades, por medio de los controladores de polarización (PC, POL, HWR) [29], el objeto del PC, es el de acoplar la potencia máxima hacia el HWR; el HWR a su vez cambia la polarización de entrada hacia lineal y por ultimo con el POL se mantiene dicha polarización en su recorrido por el anillo. Se puede agregar en este punto que con estos mismos dispositivos se puede conseguir el efecto de filtrado de la señal de laseo para la futura selección de un solo modo que oscile en la cavidad. Al haber solo un modo compitiendo se pretende la generación de pulsos.

El objeto de la construcción del láser en anillo es obtener un láser construido completamente de fibra con laseo en longitud de onda sencillo con un ancho espectral muy angosto. Otro efecto esperado es que los pulsos de salida sean del orden de los femto-segundos y concentración de alta energía [12].

Estas y otras características son las que permiten la aplicación del láser en el procesamiento de materiales [46, 45] al no permitir la interacción de varias longitudes de ondas con el material, proceso que conduce al sobrecalentamiento de la superficie de trabajo o a la generación de otros fenómenos no deseados como la generación de plasma, entre algunos otros.

Tomemos en cuenta las consideraciones necesarias para la construcción de un láser de anillo lo que implica [47] los siguientes puntos, un cada uno de los que se presenta el principio de funcionamiento de cada equipo:

- Un acoplador (Wave Division Multiplexing, WDM 976 nm / 1064 nm) , éste dispositivo permite el acople de dos longitudes de onda diferentes, en este caso por un lado la inyección de la frecuencia de bombeo en el anillo al mismo tiempo que la longitud de onda de laseo del medio de ganancia.
- Medio de ganancia (Ytterbium Doped Fiber, YDF Yb1200-41125, fibra THORLABS), la cual es una fibra óptica que contiene impurezas de Yb^{3+} , la figura 4.1 muestra el espectro de emisión.

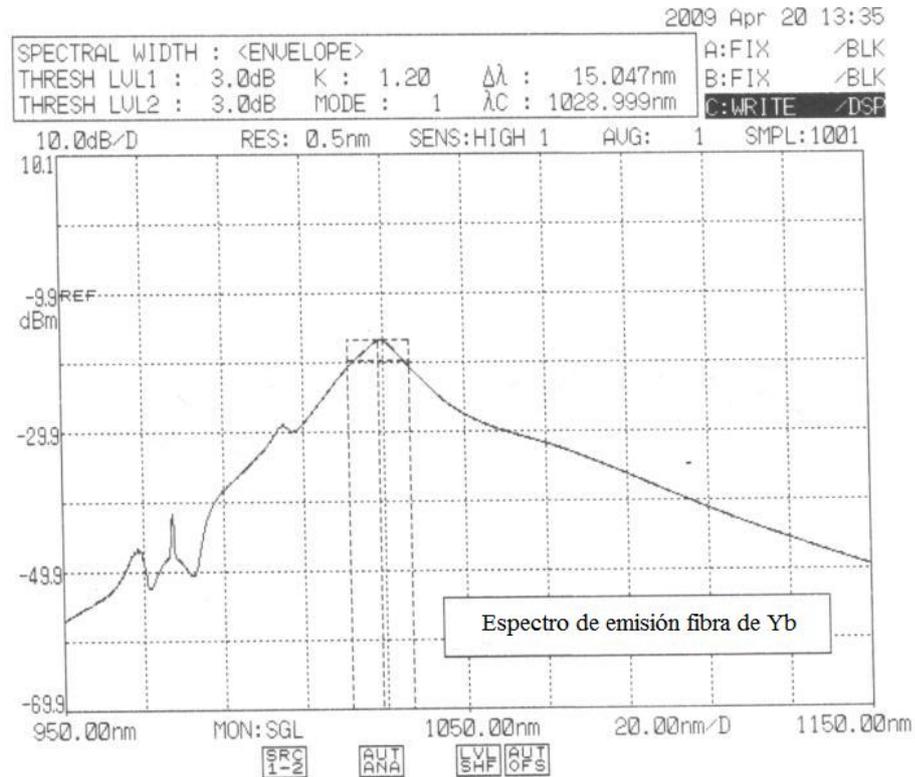


Figura 4.1 Espectro de emisión de fluorescencia de la fibra con iones de Yb utilizada en el trabajo experimental.

- Fuente de bombeo, diodo láser con una longitud de onda de trabajo λ_{pump} @ 975 nm y una potencia $P_{max} = 200$ mW. Algunas de las fuentes de bombeo mas comunes para el Yb suelen ser láseres de estado sólido como el AlGaAs (≈ 800 -850 nm) y el de InGaAs (≈ 980 nm), entre otros tambien se pueden considerar los láseres de cristal fotónico como el Nd:YLF (1047 nm) y Nd:YAG (1064 nm).
- Una placa retardadora de fibra óptica de media onda (HWR, Half Wave Retarder), que polarice la señal de salida del laseo directo de la fibra dopada.
- Controlador de polarización (PC), que nos ayuda a seleccionar los modos de oscilación dentro de la cavidad resonante.
- Un polarizador de fibra (POL), que asegura la polarización lineal en su salida.

- Un aislador (ISO), que permita la circulación en un sólo sentido evitando oscilación bidireccional.
- Por último es necesario un acoplador (Coupler, C1 89.8/10.2 @ 1064 nm 2x2), con el que podamos extraer una fracción de la potencia del láser fuera del anillo y hacer las mediciones correspondientes.

En la figura 4.2 se muestra el esquema del láser en anillo fabricado en el laboratorio, completamente de fibra y se señala cada uno de los componentes.

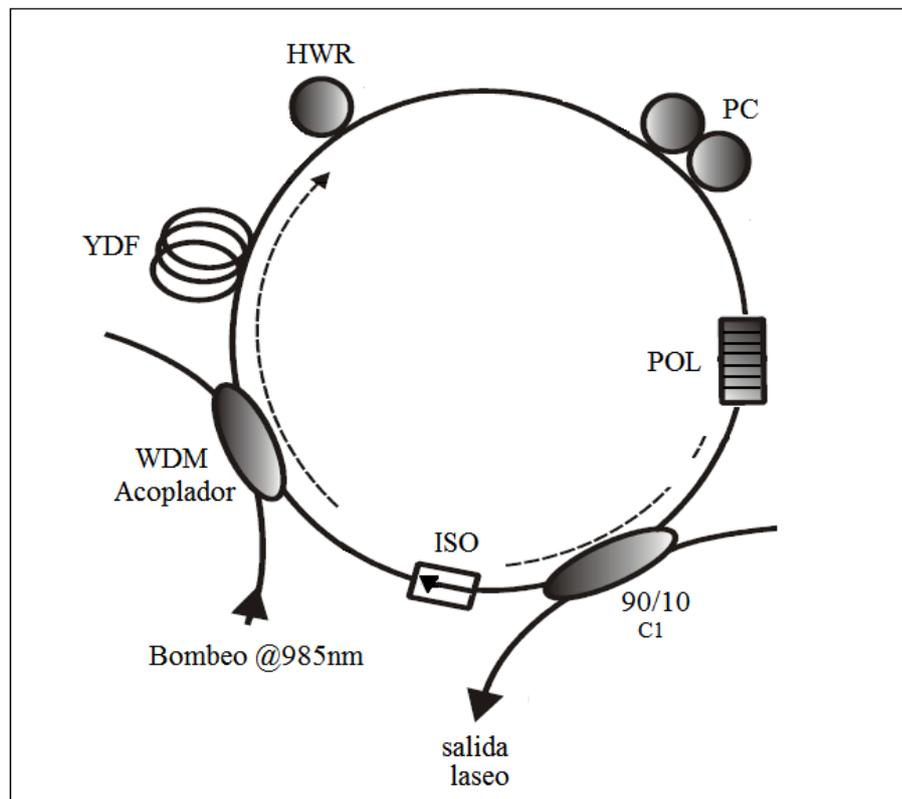


Figura 4.2 Láser en configuración de anillo. Representación del esquema construido en el laboratorio con cada una de las partes que lo componen.

Dentro de los dispositivos utilizados para la sintonización del láser, se encuentra el controlador de polarización PC, con el cual podemos hacer variaciones de la polarización en la fibra para filtrar los modos longitudinales en la cavidad. El PC es una pieza mecánica en la que se sujeta una porción de fibra de aproximadamente 1.5 cm. El cilindro en el que es depositada

la fibra, puede ser girado sobre su eje transversal para así conseguir un esfuerzo mecánico de torsión que produzca birrefringencia circular promoviendo el paso máximo de la potencia hacia el polarizador.

Por otra parte, con la birrefringencia por presión (stress birefringence [36]), se provoca birrefringencia lineal a través del dispositivo; otra característica del dispositivo es que podemos variar la presión sobre una región de la fibra con la que conseguimos diferentes variación en la birrefringencia de forma (shape birefringence [36]) de la fibra.

Teniendo las consideraciones ya citadas, se presentan algunos procesos en la manipulación de los controladores durante la experimentación, necesarios para la obtención de los resultados que mas tarde se presentan con todo detalle. Una vez armado el arreglo de la figura 4.2, se tienen las siguientes consideraciones:

1. Primero se busca la máxima potencia de láser a la salida del láser a través del acoplador 90/10. Para lo que fue necesario hacer girar la placa retardadora de onda QWR, hasta encontrar dicha potencia máxima de operación.
2. Ahora, manteniendo el PC con la fibra bajo una presión moderada, se obtuvo:
 - una sola frecuencia de láser, principalmente a 1030 nm hasta 1040 nm.
 - frecuencias de láser de manera simultánea localizadas a 1030 nm y 1040 nm, con desplazamientos de hasta alcanzar los 1040 nm y 1050 nm.
3. Al liberar un poco la sujeción de la fibra en el PC, se pudo conseguir:
 - tres frecuencias de láser centradas en 1033 nm, 1053 nm y 1073 nm.
4. Al variar la torsión en los casos anteriores, como ya se mencionó, se pudo sintonizar cada una de las frecuencias reportadas.
5. Sometiendo la fibra a mas birrefringencia por presión, se pudo sintonizar el láser como se señala a continuación: 1031, 1034, 1036, 1038, 1041, 1042, 1043, 1045, 1046 y 1047 nm trabajando en frecuencia simple.

En el siguiente apartado se presentan los resultados para este primer caso, entre los cuales podemos encontrar: las longitudes de onda en las que se obtuvo sintonización para el láser de anillo, así como algunas de las ventajas con respecto a otros métodos de sintonización y de igual manera un fenómeno característico de este láser (el cual consistente en la generación de láseo simultaneo de dos y hasta tres longitudes de onda) y por último las figuras que contienen los espectros con algunas de las longitudes de onda de trabajo principales.

4.2.2 Resultados Obtenidos.

El láser mostró láseo en un rango de 1038 nm a 1057 nm en una sólo frecuencia (fenómeno conocido como: Single-Frecency Traveling Wave Fiber Laser), de sintonización continua y ancho de línea de ≈ 0.7 nm, la figura 4.3 muestran algunas de las frecuencias obtenidas, siendo éstas las mas representativas para el caso en el que el láseo estuvo centrado en sólo una frecuencia, es importante hacer notar como veremos mas adelante, que tambien se obtuvo láseo a varias longitudes de onda de manera simultanea (fenómeno conocido como: Multiple Wave-Length Operation of Rare-Earth-Doped Fiber Lasers).

En estos resultados, el láseo se dividió en dos frecuencias de onda independientes con una separación ≈ 20 nm para el caso mínimo y ≈ 24 nm, la figura 4.4 muestra algunos de los resultados. Los anchos espectrales son similares para las frecuencias simples o las del caso anterior.

Un caso especial se muestra a continuación, figura 4.5, en el que se obtuvo láseo de manera simultanea con frecuencias centradas en: 1026nm, 1036 nm y 1046 nm. Sin poder conseguir sintonización o desplazamiento de las longitudes de onda manteniendo las características de separación entre pulsos al mismo tiempo. Siendo modos únicos de oscilación que al cambiar los parámetros de operación del láser, saltarón hacia otros modos de polarización longitudinales completamente diferentes.

Finalmente, se presentan los siguientes rangos de sintonización en los que el láser generó tres frecuencias de láseo de manera simultanea obteniendo así, longitudes de onda en: 1029 nm, 1049 nm, 1069 nm y de igual manera se pudieron obtener desplazamientos en forma continua,

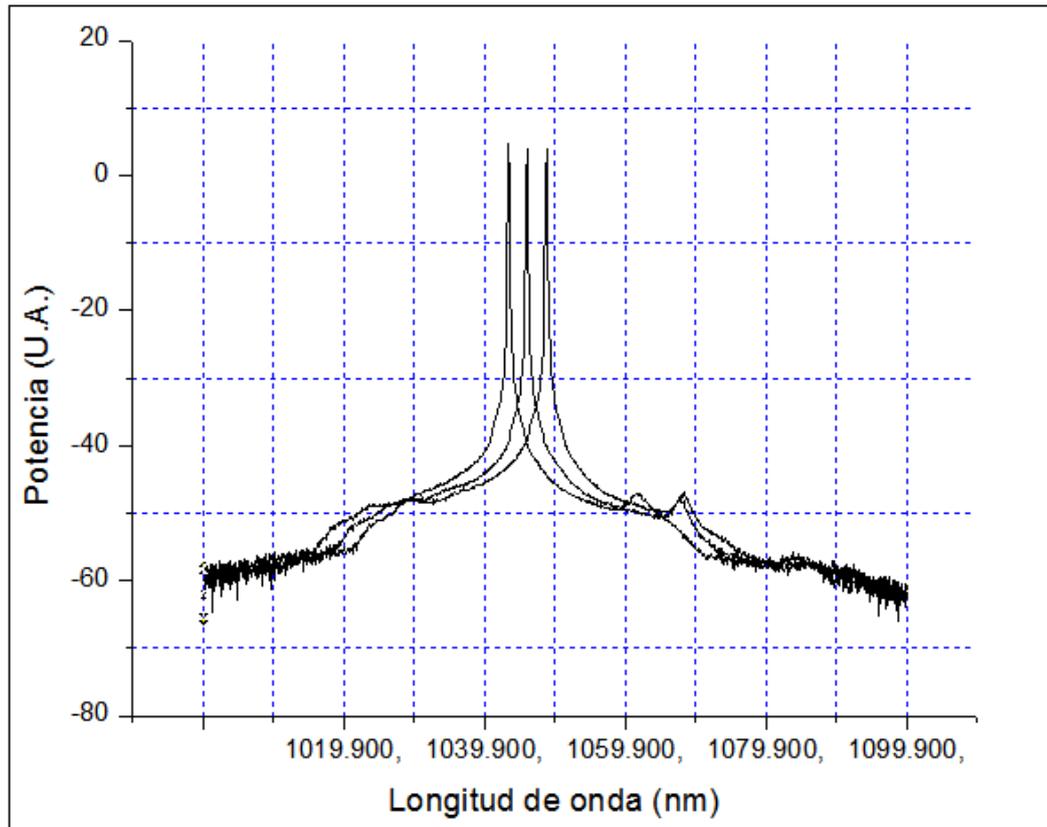


Figura 4.3 Sintonización del láser operando en el modo de frecuencia sencilla (Single-Frequency Traveling Wave Fiber Laser), se presentan los valores espectrales los cuales no presentan alteraciones en ancho espectral ni potencia.

donde se presenta como un último rango de láser en: 1033 nm, 1053 nm y 1073 nm, la figura 4.6 muestra este caso.

Como parte de éste último caso, al jugar con la polarización de la cavidad, se obtuvo el decaimiento de uno de los modos de oscilación, quedando solamente dos centrados en 1029 nm y 1070 nm para un caso y 1022 nm a 1077 nm para el otro, los resultados son mostrados de mejor manera en la figura 4.7.

Los casos anteriores se presentaron para una posición específica en el HWR y haciendo variar el PC, ya sea apretando la fibra o torciendola de los extremos, como ya se explicó anteriormente.

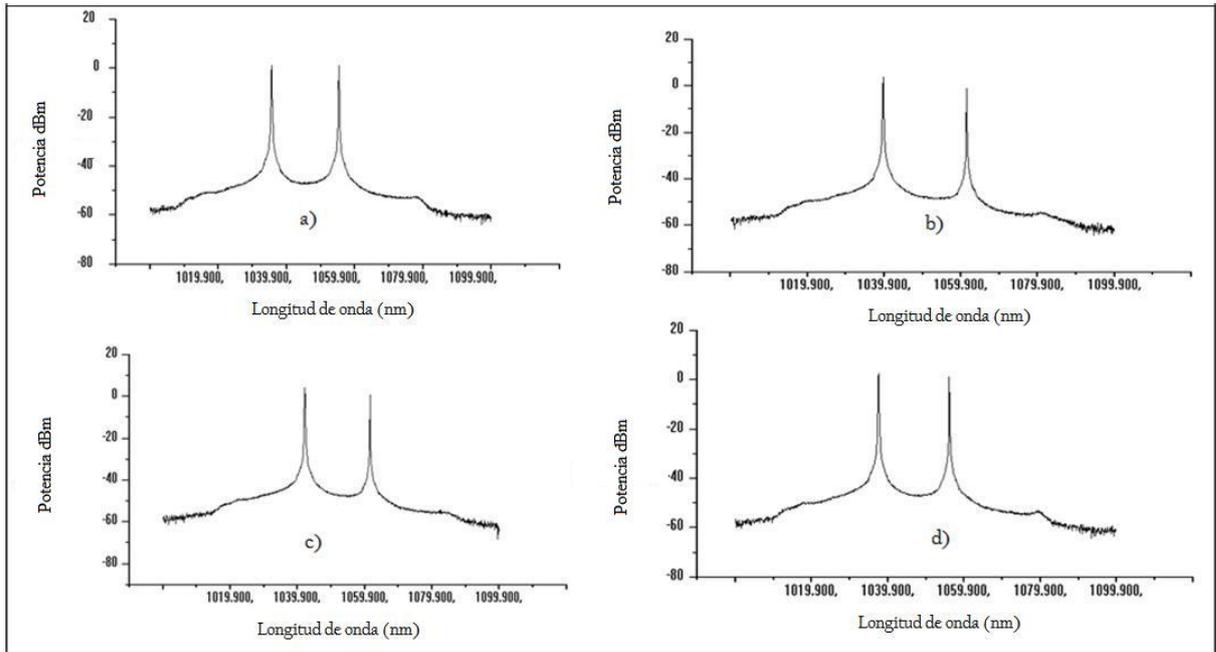


Figura 4.4 Longitudes de onda de láser que de manera simultánea se presentaron, para: a) el extremo de 1037 nm y 1057 nm, b) el límite de láser para estos modos polarizados los cuales se consiguió desplazar hasta 1041 nm y 1065 nm, por último c) y d) muestran algunos de los rangos de desplazamiento intermedios entre los casos anteriores.

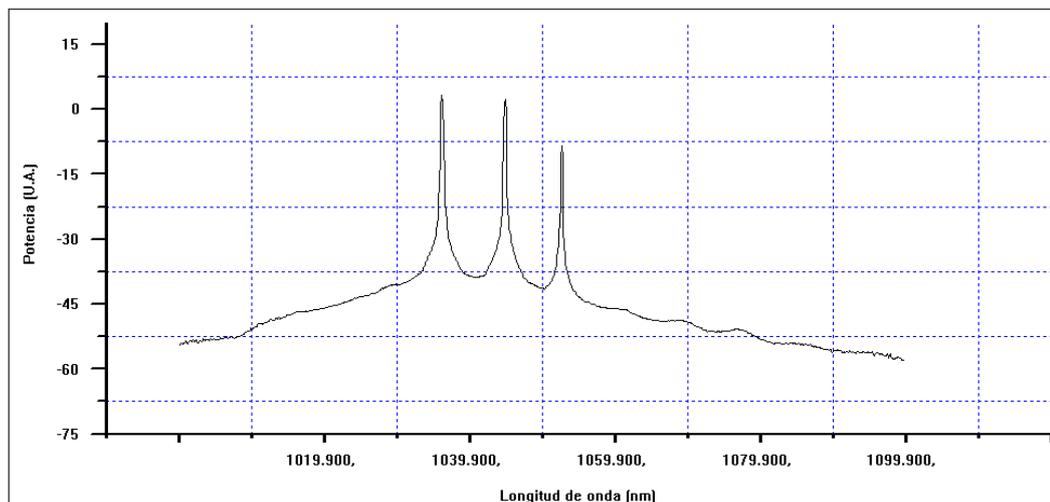


Figura 4.5 Caso especial de láser, las longitudes de onda a las que se obtuvo láser son 1026, 1036 y 1046 nm

4.2.3 Esquema del láser en configuración de anillo en régimen pulsado.

Se tienen dos métodos con los que se intentó generar pulsos para el láser en anillo el primero de estos, aprovechando el esquema presentado en la figura 4.8, se vale de la NPR de la señal dentro del lazo. El segundo método intentado es el de la configuración de figura ocho.

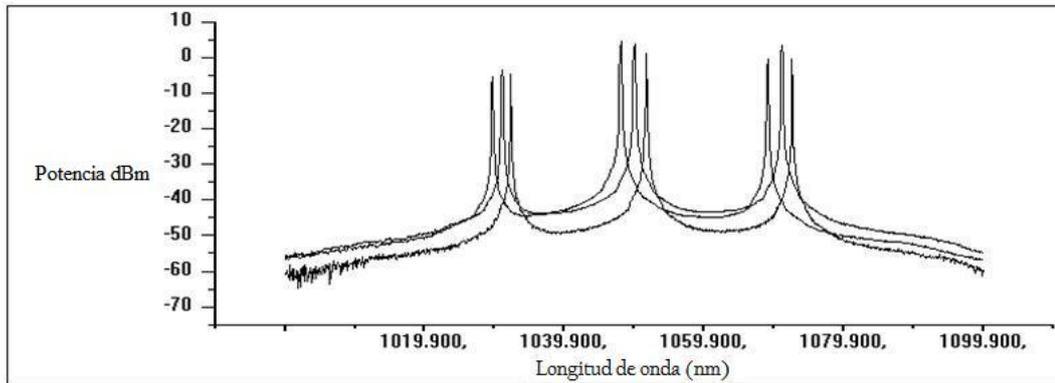


Figura 4.6 Longitudes de onda de láser para tres formas de oscilación de manera simultánea dentro de la cavidad de anillo.

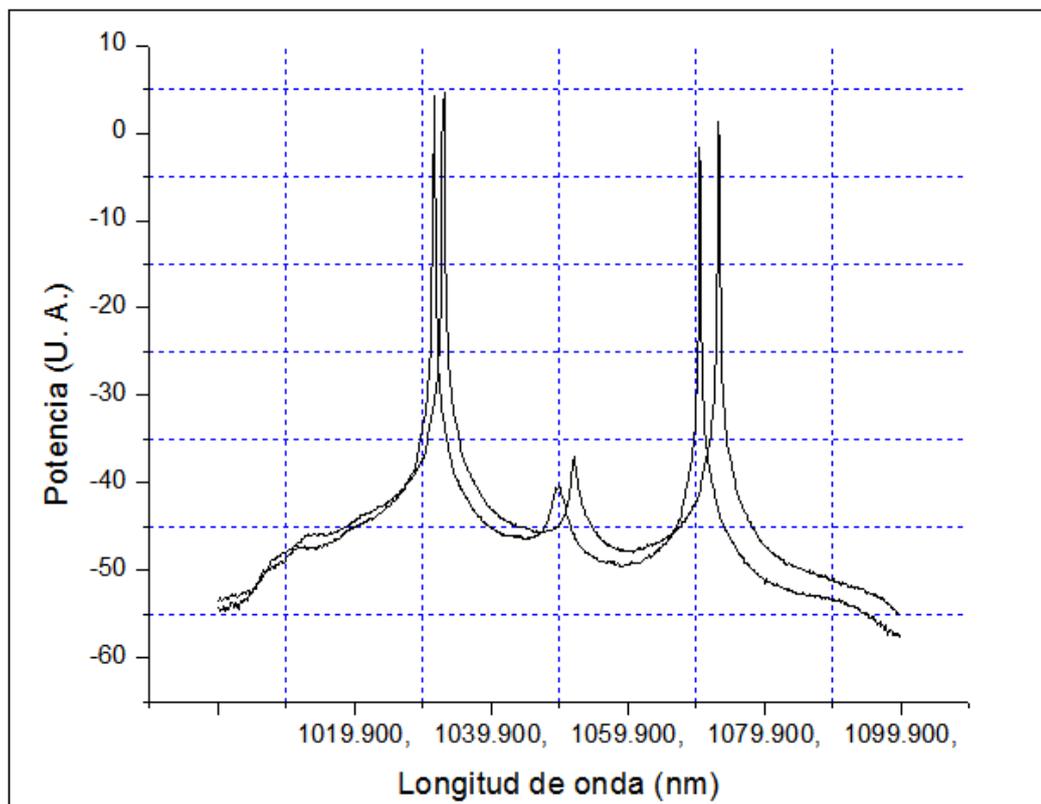


Figura 4.7 Algunas de las longitudes de onda pueden atenuarse de manera controlada, como se presenta en esta figura, donde la componente a 1052 nm es eliminada.

Este efecto se trató de conseguir al variar el PC hasta obtener un máximo de potencia transmitido a través del POL, la señal de referencia fué medido en la salida de C1 el cual representa un 10% de la potencia que circula hacia la cavidad.

La configuración del F8L, ya fue explicada en el Capítulo 3, para este caso no se cuenta con un filtro como el que se presenta en el esquema de la figura 3.1. Para este caso se continúa utilizando el láser en anillo de la experimentación anterior. El lazo se abre entre el HWR y el PC. La señal que sale del HWR es empalmada en una de las entradas del acoplador C1, que es un acoplador 2X2 quasi-simétrico (49.8:50.2, trabajando a @1060nm); hacia el espejo óptico no lineal.

El NOLM, esta hecho de fibra PM1550-HP con una dispersión de $-39.27(\text{ps}/\text{nm}/\text{km})$ a @1060nm. La longitud de fibra con la que se construyó el lazo del espejo es de 9m, la cual ha sido torcida en una relación de 3 vueltas/m. La torción ayuda a asegurar que la polarización dentro del lazo no sufra variaciones debida a birrefringencia o perturbaciones del medio ambiente [27].

Se espera que las señales contra-propagantes mantengan las polarizaciones que fueron provocadas en el HWR, localizado a la entrada del NOLM y una vez dentro del lazo, la interacción de esta polarización con el QWR. Cuando los pulsos, con similar potencia, hayan hecho el recorrido y regresen al acoplador, interfieran por la asimetría en polarización de la señal provocada por la rotación de la polarización no lineal.

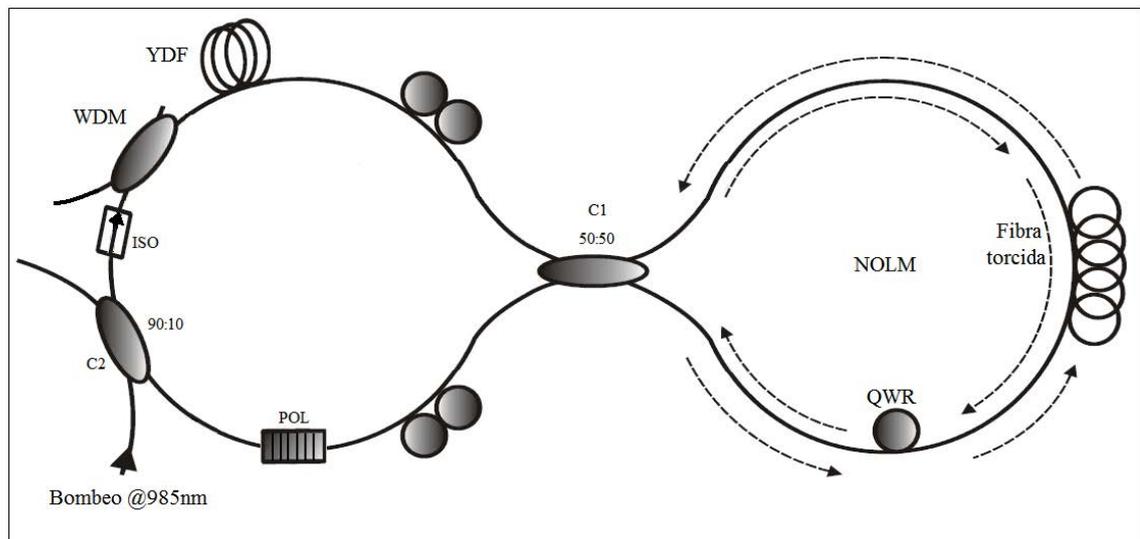


Figura 4.8 Láser de figura ocho, F8L. Esquema utilizado para la experimentación.

El láser en anillo, como se mostró anteriormente se encuentra en operación y se espera que la potencia de pequeña señal sea amplificada en cada uno de los recorridos de la cavidad hasta que el sistema comience a generar pulsos por el amarre de modos en el acoplador del NOLM. Esto se espera que ocurra cuando la potencia sea lo suficientemente grande como para saturar el absorbedor (NOLM) y las señales de mayor potencia sea las que prevalezcan después de cada recorrido.

Contando la longitud de la cavidad del anillo (≈ 2 m) y la del NOLM (≈ 9 m), el total es de $L = \approx 11$ m. Se obtiene un rango libre espectral de 2 MHz (Free Spectral Range).

4.2.4 Resultados obtenidos.

Para completar el análisis experimental con respecto al pulsado del láser, se puede decir que varios fueron los intentos para la generación de pulsos.

Primeramente con la simple configuración de anillo, no se obtuvieron resultados satisfactorios. Esto se debe principalmente a las altas pérdidas de potencia con las que operaba el láser. Otro punto a rescatar es que la YDF producía fluorescencia. Con lo que su eficiencia de amplificación se veía limitada.

Como parte del procedimiento experimental, los empalmes de fibra mostraron baja eficiencia y pobremente se obtuvieron buenos valores de inyección de la señal tanto a la entrada de la cavidad así como en todos los puntos en que hubo empalmes. Con un total de 7 dispositivos de diferentes características de la fibra, los empalmes entre sí produjeron, a partir de una potencia máxima de entrada $E_{in} = 140$ mW, una potencia de salida medida en la salida de C1 (acoplador 90:10) $E_{out} = 3.3$ mW, valor que equivale al 10.2% de la señal total circulando en la cavidad, tenemos que 25.4 mW el sistema reporta pérdidas del 87.31%, que a nuestro parecer se deben principalmente a los empalmes.

Esta potencia circulando dentro de la cavidad es equivalente, de acuerdo a la sección transversal de la fibra [54], a la potencia mínima necesaria para obtener láser en la YDF. Razón por la que solamente se obtuvo láser en el régimen de onda continua.

En segundo punto tenemos el F8L. Cuando se abrió el anillo se le empalmó el acoplador C1 de la figura 4.8 y se midieron potencias de 8.5mW para el brazo en sentido CW y 10.1

mW en sentido *CCW*. A la salida del acoplador una vez que se acopló a las terminales de salida del C1 el tramo de fibra para hacer el lazo, se midió una salida de 2.5 mW. Las pérdidas en este caso fueron considerablemente altas y no se pudieron mejorar aun después de varios intentos de empalmes posteriores. A saber la fibra utilizada no es una fibra que cumpla con las características de estandarización por lo que es difícil empalmarla con el equipo empalmador del laboratorio.

Como se puede anticipar, una vez armado el láser, no se consiguieron pulsos a la salida.

Sin embargo se hizo el intento al aplicar una perturbación exterior en el sistema. La perturbación es un golpeteo en cualquiera de los lazos del anillo para provocar la amplificación de la pequeña señal. Este procedimiento dio buenos resultados y en algún momento se mostraron aumentos de potencia que se pretendía generaran el amarre de modos, pero el sistema se mostró demasiado inestable y no se pudo salvar ninguno de los resultados arrojados.

La parte de experimentación termina aquí, como consecuencia de que la fuente de bombeo se quemó. El diodo láser a su salida tenía empalmada una rejilla con objeto de reflejar las señales centradas en la longitud de láser de emisión de este, pero el láser en anillo tiene un gran espectro de emisión y no se duda que en algún momento haya emitido a @ 985 nm y el reflejo quemara el diodo.

El repuesto pedido no llegó a tiempo y no se pudo continuar con la experimentación.

4.3 Conclusiones.

El láser en configuración de anillo cumplió con los objetivos esperados en cuando a su operación en modo continuo. Sin embargo hizo falta, ya sea de mayor potencia de bombeo o de una mejor empalmadora para la generación de pulsos.

La propuesta de la utilización del PC y el POL, mostró buenos resultados para el control del láser. Para con estos, sintonizar las longitudes de onda de salida dentro de un rango muy amplio.

A pesar de que la potencia en la configuración del F8L era muy pequeña, en algunos momentos se generó amplificación de la intensidad suficiente para la generación de pulsos por lo

que hizo falta aumentar la potencia hacia valores superiores a los 25.4 mW dentro de la cavidad para que el sistema se estabilizara.

Como ya se reportó en [37], el F8L genera pulsos con potencia muy pequeñas y una vez que se han conseguido dichos pulsos la potencia de entrada se puede disminuir y el sistema sigue trabajando sin inducirle perturbación alguna.

Para nuestro trabajo, hizo falta incrementar la potencia para generar pulsos y cuando se generaran estos, la potencia con la que contabamos hubiera sido suficiente para mantenerlos.

Conclusiones

En cuanto a la simulación, se pudo comprobar que el láser de figura ocho puede generar pulsos ultra-cortos y de alta energía después de la compresión.

Por otra parte los esquemas láser presentados, se pudieron armar en el laboratorio y se obtuvieron resultados satisfactorios en la operación del estos para el régimen de onda continua.

Para el láser en configuración de anillo, a pesar de que no contaba con un filtro real, como dispositivo para la generación de pulsos por el método de amarre de modos; se pudo presentar un esquema con una buena aproximación conformada a partir de la operación conjunta de un controlador de operación y un polarizador. Sin embargo no fue posible obtener pulsos, hizo falta potencia de bombeo.

El láser en anillo es bueno para la sintonización de varias longitudes de onda, en el presente trabajo el láser fue posible sintonizarlo de manera continua en un rango muy amplio y los anchos espectrales fueron muy cortos, cercanos a la operación en frecuencia simple. Por otra parte también se pudo comprobar el laseo en el modo de multi longitud de onda.

Para el caso del láser en configuración de figura ocho montado en el laboratorio, el absorbedor saturable, aun cuando presentó considerables debidas a la acumulación de atenuaciones de potencia en cada uno de los empalmes; algunos paquetes de modos, generados por la amplificación de intensidad de la pequeña señal; a pesar de este logro, al igual que el láser en anillo no se pudieron conseguir pulsos e hizo falta una vez mas de incrementar la potencia de bombeo hasta conseguir que el láser operara de manera estable para la generación de pulsos por el amarre de dichos modos generados.

Trabajo a futuro.

Se planea continuar con el trabajo de elaboración de esquemas de láseres de fibra óptica, aplicando algunos de los métodos aprendidos durante la experimentación, con el objeto de presentar uno que compita de manera directa con los láseres en régimen pulsados para la posible aplicación en la industria.

La concentración de altas energías después de la comprensión de los pulsos y la buena colimación del spot a la salida del láser de fibra óptica lo hace rentable para el procesamiento de materiales en áreas de trabajo micrométricas. Por lo que se seguirá en el mismo campo de trabajo y se espera poder aplicar el láser para el corte de células biológicas.

El láser en anillo presenta características necesarias para el láser en longitudes de onda de un ancho espectral muy angosto, así que se desea continuar con el trabajo de este tipo de esquemas con el objeto de hacer láseres de una sola longitud de onda.

Por último y como principal tópico de trabajo, se pretende aplicar para la obtención de beca y realizar estudios en el extranjero en una universidad interesada en el desarrollo experimental de este tipo de láseres.

Referencias

- [1] Snitzer E., "Proposed fibre cavities for optical masers", *Journal of Applied Optics*, 32:1,36-39, 1961.
- [2] Burrus C. A., et al., "Nd³⁺-doped SiO₂ in an end-pumped fibre geometry", *Applied Physics Letters* 23:7 388-389, 1973.
- [3] Pyne D. N., et al., "Low-noise Erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m", *Electronics Lett.*, 23:19 1026-1028, 1987.
- [4] N. J. Doran and David Wood, "Nonlinear-optical Loop Mirror", *Optics Lett.*, Vol. 13 pp. 56-58, 1988.
- [5] David B. Mortimore, "Fiber Loop Reflectors", *Journal of Lightwave technology*, Vol. 6 pp. 1217-1224, 1988.
- [6] Y. Chaoyu, et al., "Tuneable Nd³⁺-doped fibre ring laser", *Electron. Lett.* 25:101-102, 1989.
- [7] K. J. Blow, et al., "Two-wavelength operation of nonlinear fibre loop mirror", *Optics Lett.* 15:248-250, 1990.
- [8] K. Smith, et al., "Pulse shaping, compression, and pedestal suppression employing a nonlinear-optical loop mirror", *Optics Lett.* 15:1294-1296, 1990.
- [9] A. G. Bulushev, et al., "Passive mode locking of laser with a nonlinear fiber reflector", *Optics Lett.* 15:968-970, 1990.
- [10] Irl N. Duling III, "All-fibre ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror", *Optics Lett.* 16:539-541, 1991.
- [11] V. J. Matsas, et al., "Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarization rotation", *Electron. Lett.* 28:1391-1393, 1992.
- [12] V. J. Matsas, et al., "Characterization of a self-starting, passively mode-locked fiber ring laser that exploits nonlinear polarization evolution", *Optics Lett.* 18:358-360, 1993.
- [13] K. Tamura, et al., "77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser", *Optics Lett.* 18:1080-1082, 1993.

- [14] J. Peng, et al., “All-fiber tunable and composite cavity ring fiber laser using ultra low loss fiber couplers”, *Fiber Integrat. Opt.*, 12:31-38, 1993.
- [15] T. Yamamoto, et al., “1.9 μm Tm-doped silica fibre laser pumped at 1.57 μm ”, *Electron. Lett.* 30:220-221, 1994.
- [16] L. Congolato , et al., “Tuneable Er-doped fibre laser source: desing and realization”, *J. Opt. Commun.*, 16:122-125, 1995.
- [17] S. Gray and A. B. Grudinin, “Passive Harmonically Modelocked Fiber Soliton Laser with Repetition Rate above 2GHz”, *Optical Fiber Technology* 2:241-248, 1996.
- [18] J. Theimer and J. W. Haus, “Dispersion balanced figure-eight laser”, *Optics Commun.* 134:161-164, 1997.
- [19] E. A. Kuzin, et al., “Polarization independent nonlinear fiber sagnac interferometer”, *Optics Commun.*, 183:389-393, 2000.
- [20] E. A. Kuzin, et al., “Theory of nonlinear loop mirrors with twisted low-birrefringence fiber”, *Optics Commun.* 183:389-393, 2001.
- [21] E. A. Kuzin, et al., “Fiber laser mode locked by a Sagnac interferometer with nonlinear polarization rotation”, *Optics Letters*, 26:1559-1561, 2001.
- [22] F. Ö. Ilday and F. W. Wise, “High-energy femtosecond stretched-pulse fiber laser with a nonlinear optical loop mirror”, *Optics Letters*, 27:1531-1533, 2002.
- [23] B. Ibarra Escamilla, et al., “A mode-locked fibre laser using a Sagnac interferometer and nonlinear polarization rotation”, *Journal of Optics A.*, 5:S225-S230, 2003.
- [24] J. R. Buckley, et al., “Femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10nJ”, *Optics Lett.*, 30:1888-1890, 2005.
- [25] D. A. Chestnut and J. R. Taylor, “Wavelength-versatile subpicosecond pulsed lasers using Raman gain in figure-of-eight fiber geometries”, *Optics Lett.*, 30:2982-2984, 2005.
- [26] Andy Chong, et al., “All-normal-dispersion femtosecond fiber laser”, *Optics Express*, 14:10095-10100, 2006.
- [27] R. Grajales-Coutiño, et. al., “Láser de fibra de amarre de modos de figura ocho basado en un espejo de lazo óptico no lineal simétrico”, *Revista Mexicana de Física*, 53:380-385, 2007.
- [28] B. Ibarra-Escamilla, et al., “Experimental investigation of self-starting operation in a F8L based on a simmetrical NOLM”, *Optics Commun.*, 281:1226-1232, 2008.
- [29] Andrés González-García, et al., “Switchable and tunable multi-wavelength Er-doped fiber ring laser using Sagnac filters”, *Report No. 9.3.4 of the Laser Phisycs 2009 Workshop.*

- [30] O. Pottiez, et al., “Generation of high-energy pulses from an all-normal-dispersion figure-8 fiber laser”, *Report No.9.2.4 of the Laser Physics 2009 Workshop*.
- [31] Y. Jeong, et al., “Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1 kW of continuous-wave output power”, *Electron. Lett.*, 40:8,470-472, 2004.
- [32] D. N. Payne, et al., “Kilowatt-class single-frequency fiber sources”, *Fiber Laser II: technology, systems, and applications, SPIE, 5709:133-141*, 2005.
- [33] V. P. Gapontsev, “High-power, kilo-Watt class fiber lasers winning and securing new opportunities in automotive and heavy industry”, *Technical Summary Digest, Photonics West, San Jose, USA, 24-29:6,5332-5335*, 2004.
- [34] P. Dupriez, et al., “321 W average power, 1GHz 20ps 1060nm pulsed fiber MOPA source”, *OFC Anaheim 6-11 Mar 2005*.
- [35] Orazio Svelto, “Principles of Lasers”, *Plenum Press, New York and London*, 1979.
- [36] John A. Buck, “Fundamentals of Optical Fibers”, *WILEY-INTERSCIENCE*, 2004.
- [37] Rubén Grajales Coutiño, “Investigación experimental del autoencendido de un láser de fibra de figura ocho basado en un NOLM simétrico”, Noviembre 2007, Tesis Doctoral, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica INAO, Tonantzintla, Puebla, México.
- [38] Alejandrina Martínez Gámez, “Decaimiento de la fluorescencia de preformas de fibras láser”, Abril 1999, Tesis Doctoral, Centro de Investigaciones en Óptica CIO, León, Gto., Mexico.
- [39] David Monzón Hernández, “El interferómetro de Sagnac y su aplicación como dispositivo con selectividad espectral y el la medición del coeficiente no lineal del índice de refracción de las fibras ópticas”, Noviembre 1999, Tesis Doctoral, Centro de Investigaciones en Óptica CIO, León, Gto., Mexico.
- [40] P. R. Morkel, et al., “Traveling-wave erbium fibre ring laser with 60kHz linewidth”, *Electron. Lett.* 26:632, 1990.
- [41] N. Agrawal, et al., “Semiconductor Laser Amplifier Based Integrator Interferometers for Add/Drop Multiplexing in OTDM Systems”, *SPIE 166:2954*, 1996.
- [42] Y. Ohishi, et al., “Laser ring operation at 1.3 μ m of Pr³⁺-doped fluoride singlemode fibre”, *Electron. Lett.* 28:164, 1992.
- [43] H. Schmuck, et al., “Widely tunable narrow linewidth erbium doped fibre ring laser”, *Electron. Lett.* 28:2117, 1991.
- [44] N. Park, et al., “All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry-Perot filter”, *Appl. Phys. Lett.* 59:2369, 1991.

- [45] Walter W. Dudley, "Laser Welding", *John Wiley and Sons, Inc.*, 1999.
- [46] Leonard Migliore, "Laser Material Processing", *Marcel Dekker, Inc.*, 1996.
- [47] Michael J. F. Digonnet, "Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers", *Marcel Dekker, Inc.*, 1999.
- [48] José Alfredo Álvarez Chávez, "High Power Fibre Lasers", April 2003, Tesis Doctoral, University of Southampton, United Kingdom.
- [49] K. McCallion, et al., "Tunable in-line fiber-optic bandpass filter", *Opt. Lett.* 19:542, 1994.
- [50] I. M. Jauncey, et al., "Narrow-linewidth fiber laser operating at 1.55- μm ", *Opt. Lett.*, 12:164, 1987.
- [51] G. A. Ball, et al., "Continuously tunable single-frequency Bragg grating fiber laser", *Opt. Lett.*, 17:420, 1992.
- [52] Claude Rulliere, "Femtosecond Laser Pulses", *Springer* 2003.
- [53] H. M. Pask, Robert J. Carman, David C. Hanna, Anne C. Tropper, Colin J. Mackechnie, Paul R. Barber, and Judith M. Dawes "Ytterbium-Doped Silica Fiber Laser: Versatile Sources for the 1-1.2 μm Region" *IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics*, Vol. 1, No. 1, April 1995.
- [54] R. Paschotta, et al., "Lifetime quenching in Yb-doped silica fibers", *Opt. Commun.*, 136:375-378, 1997.
- [55] E. Winter, *Opt. and Laser Technology*, 17:159, 1985.
- [56] D. Scifres, Conf. on Lasers and Electro-Optics, *CLEO*, 1999.
- [57] C. Momma, et al., *Laser und Optoelektronik*, 29:82, 1997.
- [58] M. D. Perry, et al., "Ultra-short pulse laser machining of dielectric materials", *J. Appl. Phys.*, 65, 1999.
- [59] T. Juhasz, F.H. Loesel, C. Horvath, R.M. Kurtz, G. Mourou, invited talk, *Digest Ultrafast Phenomena, Garmisch Partenkirchen*, 1998.
- [60] Ultrafast Phenomena XII-OSA Technical Digest *Optical Society of America, Washington DC* (2000); Ultrafast Phenomena X-Proceedings of the 10th International Conference, Del Coronado, CA (1996) *Springer Series in Chemical Physics 62*; Ultrafast Phenomena XI-Proceedings of the 11th International Conference, Garmisch-Partenkirchen, *Springer Series in Chemical Physics 63*, 1998.
- [61] A. Baumgartner, Ch.K. Hitzenberger, S. Dichtl, H. Sattmann, A. Moritz, W. Sperr, A.F. Fercher, *Proc. SPIE 3248*, 130, 1998.

- [62] Ch. Xu, W. Zipfel, J. Shear, R. Williams, W. Webb, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 93, 10763, 1996.
- [63] K. Minoshima, A.M. Kovalevich, I. Hartl, E.P. Ippen and J.G. Fujimoto, *Opt. Lett.*, in press 2001.
- [64] B.C. Collings, M.L. Mitchell, L. Boivin, W.H. Knox, *IEEE Photon. Tech. Lett.* 12, 906, 2000.
- [65] *E.P. Ippen, private communication*, 2001.
- [66] G. G. Vienne, J. E. Caplen, L. Dong, “Fabrication and Characterization of Yb³⁺:Er³⁺ phosphosilicate fibres for lasers”, Optoelectronic Research Centre, University of Southampton, Highfield, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom
- [67] Valentin Gaponstev and William Krupke, “Fiber laser grow in power”, *Laser Focus World*, Agosto 2002, pp.83-87
- [68] Stephen Grubb, “Fiber Amps and Laser Get Down To Earth”, *Circuits and Devices*, Marzo 1995, pp. 37-41
- [69] John Canning, “Fibre lasers and related technologies”, Optical Fibre Centre and Australian Photonics Cooperative Research Centre, University of Sydney, Sydney, Australia.
- [70] Anthony Tartarilla “Laser Ignition Technology”, AMSRD-AAR-AEW-F(D), Indirect fire team, Junio 2004
- [71] A. M. Rubenchik, L. B. Da Silva, M. D. Perry, B. C. Stuart, J. Neev, “Dental Tissue Processing with Ultra-Short Pulse Laser”, *SPIE* 2672, pp. 222,230 (1996)
- [72] www.avantes.com, info@avantes.com
- [73] Ultrafast Phenomena XII-OSA Technical Digest (Optical society of América, Washington DC (2000)); Ultrafast Phenomena X-Proceedings of the 10th International Conference Del Coronado, CA 1996
- [74] Miguel Hernández Gonzalez, Fundación Cananan de la ciencia *Leoncio Rodriguez S. A.*, 2004.
- [75] Millman-Halkias, “Integrated Electronics” *McGrawHill*, 1972.
- [76] Ray Horley, “The fiber advantage”, Southampton Photonics Inc., Septiembre 2005, pp. 22-24
- [77] www.educaplus.org 2006
- [78] Hecht Eugene, “Optica”. *Addisson Wesley Iberoamericana, Madrid*, 2000.
- [79] Senior, John M. “Optical fiber communication”. *Prentice-Hall, London*, 1985.

- [80] M. Goossens, F. Mittelbach, and A. Samarin, *The LATEX Companion*. Reading, MA: Addison-Wesley Pub. Co., 1994.