



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FCFM

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

A QUIEN CORRESPONDA

Presente.-

Por medio de la presente se hace constar que el **DR. ROMEO DE JESÚS SELVAS AGUILAR**, profesor Investigador adscrito a esta Facultad fue **Director de Tesis** del Lic. **Daniel Toral Acosta** (matricula: 1158751) durante sus estudios de posgrado dentro del programa de **Doctorado en Ingeniería Física Industrial**, programa del padrón de CONACYT-PNPC-consolidado, y desarrollo el trabajo de investigación bajo el título de **“control de pérdidas en láseres de fibras ópticas para operación pulsada o sintonizable”** y cuya defensa lo realizo el día 27 de Julio de 2015.

Se adjunta el acta de examen correspondiente que da validez a la obtención del título Universitario. A petición del interesado para los fines y usos legales que a él convengan, se extiende la presente constancia.

Atentamente

“Alere Flammam Veritatis”

Ciudad Universitaria, 29 de septiembre de 2015


DR. ARTURO ALBERTO CASTILLO GUZMÁN
Coordinador del Posgrado en Ingeniería Física Industrial



“Educación de clase mundial,
un compromiso social”

Ciudad Universitaria, C.P. 66455
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Tels. 8329 4030, Fax: 8352 2954



REGISTRO
Y
TITULACIÓN

Acta Núm. 349



En la Ciudad de Monterrey, capital del Estado de Nuevo León, al día 27 del mes de JULIO del año 2015, siendo las 16:00 horas, reunidos en las instalaciones de la **FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS** de la Universidad Autónoma de Nuevo León los(as) señores (fias) DR. ROMEO DE JESUS SELVAS AGUILAR ^{catedráticos (as) de la misma,} quienes fueron designados por la dirección de la facultad para integrar el jurado calificador del Examen de **DOCTOR EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL** de **DANIEL TORAL ACOSTA**, quien sustentó la defensa de su tesis titulada "**CONTROL DE PERDIDAS EN LASERES DE FIBRA PARA OPERACION PULSADA O SINTONIZABLE**"

, tal como lo disponen la Ley Orgánica de la Universidad Autónoma de Nuevo León publicada en el Periódico Oficial el siete de junio de mil novecientos setenta y uno, el reglamento general de estudios de posgrado y el reglamento interno de la facultad. Se procedió a iniciar dicho Examen Doctoral, en forma de disertación pública, seguido de réplica en privado. Previa deliberación del Jurado sobre la disertación y los antecedentes académicos y curriculares del sustentante, se resolvió comunicar a **DANIEL TORAL ACOSTA**, que fue **APROBADO**, con la mención **MAGA GUM LAIDE**, por lo que se determinó otorgarle el grado de **DOCTOR EN INGENIERÍA FÍSICA INDUSTRIAL**. Con lo anterior se dio por terminado el acto, y en cumplimiento de lo dispuesto por los preceptos legales y reglamentarios, firman la presente acta los señores sinodales, ante la presencia del Secretario del Jurado, que da fe.

PRESIDENTE

SECRETARIO

DR. ROMEO DE JESUS SELVAS AGUILAR

DR. ALEJANDRO MARTINEZ RIOS

1er. VOCAL

DR. ARTURO ALBERTO CASTILLO GIZMAN

2do. VOCAL

3er. VOCAL

S. N. Morales

M. Garcia M.

DR. GUSTAVO RODRIGUEZ MORALES

DR. MANUEL GARCIA MENDEZ

El suscrito, Director de la FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS, CERTIFICA que las firmas que aparecen en la presente acta son auténticas y las mismas que utilizan los C.C. profesores mencionados en ella.

Monterrey, N.L., a 27 de JULIO del año 2015

M. T. ROGELIO JUVERVAL SEPULVEDA GUERRERO CIENCIAS FÍSICO-MATEMÁTICAS

El C. Secretario General de la Universidad Autónoma de Nuevo León CERTIFICA que la firma del C. Director de la FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS que aparece en la presente acta, es auténtica.

UANL
DEYA

SECRETARÍA GENERAL
DEPARTAMENTO ESCOLAR Y DE ARCHIVO

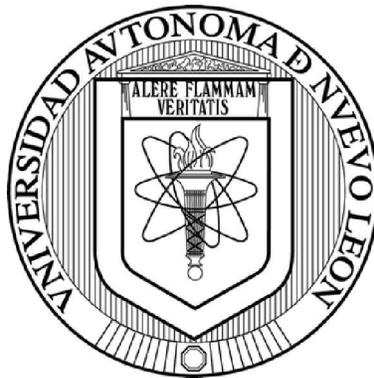
UANL T
000596

ORIGINAL PROFESIONES

gilda

El recibir de conformidad este documento académico, compromete al interesado a dar el uso legal y correcto del mismo. Quien altere cualquiera de las partes que lo conforman, invalida inmediatamente su autenticidad, haciéndose acreedor a la aplicación de las sanciones previstas en las leyes y reglamentos de la UANL, independientemente de los efectos legales que procedan.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS



CONTROL DE PÉRDIDAS EN LÁSERES DE FIBRA PARA OPERACIÓN PULSADA O
SINTONIZABLE

POR

DANIEL TORAL ACOSTA

COMO REQUERIMIENTO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA
FÍSICA INDUSTRIAL

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN
MAYO 2015

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS FÍSICO MATEMÁTICAS

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “CONTROL DE PÉRDIDAS EN LÁSERES DE FIBRA PARA OPERACIÓN PULSADA O SINTONIZABLE”, realizada por el alumno DANIEL TORAL ACOSTA, con número de matrícula 1158751, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería Física Industrial.

El Comité de Tesis

Dr. Romeo Selvas Aguilar
Presidente

Dr. Alejandro Martínez Ríos
Secretario

Dr. Arturo Alberto Castillo Guzmán
1^{er} Vocal

Dr. Daniel Enrique Ceballos Herrera
2^{do} Vocal

Dr. Gustavo Rodríguez Morales
3^{er} Vocal

Dr. Romeo de Jesús Selvas Aguilar
Subdirector de Estudios de Posgrado
Centro de Investigación en Ciencias Físico Matemáticas

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Mayo 2015

Con amor a mi familia

Agradecimientos

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas por la formación académica y personal.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el otorgamiento de la beca 260496 para la realización de mi Doctorado.

CONTENIDO

1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN A LOS LÁSERES.....	1
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS LÁSERES	2
1.2 FÍSICA DEL LÁSER.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1.3 OSCILACIÓN LÁSER.....	4
1.4 VALIDEZ DE LOS MODELOS DE ECUACIONES DE RAZÓN ATÓMICAS PARA CAVIDADES LÁSER	¡ERROR!
MARCADOR NO DEFINIDO.	
1.5 HISTORIA DE LOS LÁSERES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1.6 PARÁMETROS IMPORTANTES EN LOS LÁSERES.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
1.6.1 Ancho de línea	¡Error! Marcador no definido.
1.6.2 Coherencia temporal y longitud de coherencia	¡Error! Marcador no definido.
1.6.3 Coherencia espacial y direccionalidad.....	¡Error! Marcador no definido.
1.6.4 Brillo.....	¡Error! Marcador no definido.
1.6.5 Colimación y enfocamiento	¡Error! Marcador no definido.
1.6.6 Calidad de rayo.....	¡Error! Marcador no definido.
1.7 LÁSERES DE FIBRAS ÓPTICAS DOPADAS DE TIERRAS RARAS VS LÁSERES DE BULTO	¡ERROR! MARCADOR
NO DEFINIDO.	
1.8 ENFOQUE Y MOTIVACIÓN DEL TRABAJO TESIS.....	15
1.9 HIPÓTESIS DEL TRABAJO 1: AUTOPULSADO EN LÁSER DE FIBRA ÓPTICA DOPADA DE ITERBIO DE GRAN ÁREA MODAL.....	15
1.10 HIPÓTESIS DEL TRABAJO 2: SENSOR DE TEMPERATURA BASADO EN SINTONIZACIÓN DE UNA FIBRA LÁSER DOPADA DE ERBIO.....	15
1.11 REFERENCIAS.....	68
2. CAPÍTULO 2: ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS LÁSERES DE FIBRAS ÓPTICAS DOPADAS DE TIERRAS RARAS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.1 LÁSERES DE FIBRAS OPTICAS DOPADAS DE TIERRAS RARAS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.2 ESQUEMAS DE CAVIDADES RESONANTES COMÚNMENTE EMPLEADAS EN LÁSERES DE FIBRA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.3 TIPOS DE LÁSERES DE FIBRAS DOPADAS DE TIERRAS RARAS	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.4 ESTRUCTURA ELECTRÓNICAS DE NIVELES Y ESPECTROSCOPIA EN IONES DE Yb^{3+} ..	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.5 ESTRUCTURA ELECTRÓNICAS DE NIVELES Y ESPECTROSCOPIA EN IONES DE Er^{3+} ..	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.6 EFECTO DE LA EMISIÓN ESPONTÁNEA SOBRE LA GANANCIA DEL LÁSER.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.7 EFICIENCIA DE CONVERSIÓN CUÁNTICA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.8 FÍSICA DE LA GUÍA DE ONDA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.9 APROXIMACIÓN GAUSSIANA	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

2.10	ECUACIONES DE RAZÓN ATÓMICAS EN SISTEMAS LÁSER	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
2.10.1	<i>Ecuaciones de razón atómicas para sistemas de 4 niveles.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.10.2	<i>Ecuaciones de razón atómicas para sistemas de 3 niveles.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.10.3	<i>Representación de dos niveles, espectro de potencia y coeficiente de ganancia modal.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
2.11	REFERENCIAS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

3. CAPÍTULO 3: TRABAJO EXPERIMENTAL 1: AUTO-PULSADO EN LÁSER DE FIBRA OPTICA DOPADA DE YB DE GRAN ÁREA MODAL.....¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

3.1	RESUMEN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.2	INTRODUCCIÓN.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.3	ARREGLO EXPERIMENTAL	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.4	PARÁMETROS LÁSER Y ANÁLISIS DEL MECANISMO DE AUTO-PULSADO.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.5	RESULTADOS EXPERIMENTALES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.5.1	<i>Láser de fibra en configuración IP-OP.....</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
3.5.2	<i>Láser de fibra en configuración IP-OA</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
3.5.3	<i>Láser de fibra en configuración IA-OA</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>
3.6	DISCUSIÓN	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

4. CAPÍTULO 4: SENSOR DE TEMPERATURA BASADO EN SINTONIZACIÓN DE UNA FIBRA LÁSER DOPADA DE ERBIO60

4.1	RESUMEN	65
4.2	INTRODUCCIÓN.....	70
4.3	ARREGLO EXPERIMENTAL Y RESULTADOS.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
4.4	DISCUSIÓN	75
4.5	CONCLUSIONES	80
4.6	REFERENCIAS.....	80

5. CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, PERSPECTIVAS Y TRABAJO FUTURO .¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

5.1	CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN 1: AUTO-PULSADO EN LASER DE FIBRA ÓPTICA DOPADA DE ITERBIO DE GRAN ÁREA MODAL.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
5.2	PERSPECTIVAS Y PROPUESTAS FUTURAS PARA EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN 1	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
5.2.1	<i>Vertiente 1: Filtrado de longitudes de onda para permitir la emisión de una sola línea láser</i>	<i>¡Error! Marcador no definido.</i>

5.2.2 *Vertiente 2: Filtrado espacial de las longitudes de onda de los pulsos láser emitidos para resolver de forma independiente la correspondiente razón de repetición. . ¡Error! Marcador no definido.*

5.3 CONCLUSIONES DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN 2: ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

5.4 REFERENCIAS..... 75

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1** (a) Esquema simplificado de los elementos que componen un láser. (b) Esquema de dos niveles de energía entre los cuales se producen las transiciones atómicas de absorción y emisión estimuladas, correspondientes a una población de átomos láser activos dentro una cavidad láser. N_1 representa la población de átomos en el nivel de energía E_1 , mientras que N_2 es la población de átomos en el nivel E_2 . Para producir inversión de población ($N_2 > N_1$) se requiere que el tiempo de vida del nivel láser superior sea significativamente mayor que el del nivel inferior, y que un bombeo constante de energía permita mantener un umbral de inversión de población. La flecha curvada indica que la población N_2 es producida por una razón efectiva de la energía de bombeo que se aplica a la cavidad láser.....3
- Figura 1.2** (a) Esquema del proceso de oscilación láser. Considerando un umbral de inversión población de átomos láser, la oscilación iniciará con unos pocos fotones emitidos de forma espontánea que tienen la dirección axial de la cavidad, así, en cada viaje de ida y vuelta dentro de la misma, experimentarán una amplificación exponencial. La reflectividad de los espejos es tal que en la salida se permite que una porción de la intensidad óptica sea retroalimentada, mientras que el resto es transmitida hacia la salida (rayo láser de salida). En este proceso, cada fotón dentro de la cavidad interactúa con un átomo en el estado excitado produciendo emisión estimulada de otro fotón (los átomos excitados decaen emitiendo fotones), sumándose a la intensidad óptica que circula dentro de la cavidad. Llega un momento en el que la intensidad dentro la cavidad es tan grande que consumen el total de los átomos excitados a la misma razón con la que son bombeados, dándose de este modo un estado estable en la intensidad óptica. (b) La Ganancia de intensidad óptica y tiempo de viaje en un cavidad láser.....4
- Figura 1.3** (a) Esquema básico de un láser de fibra, en ésta el medio de ganancia es una fibra óptica. El bombeo (óptico) lo provee por lo general un diodo láser semiconductor que se introduce a la guía de onda y conforme se propaga es absorbido por los iones de tierras raras con los que está dopado el núcleo de la fibra, permitiendo así producir inversión de población y por lo tanto ganancia láser. (b) Esquema de un láser de bulto, en donde el medio de ganancia es un vidrio o cristal dopado de volumen. La fuente de alimentación eléctrica activa una lámpara cuyo flujo luminoso se hace pasar a través de la pieza cilíndrica dopada con iones láser activos los cuales absorben dicho bombeo proveyendo así el medio de ganancia de dicha cavidad láser 8
- Figura 1.4** Clasificación de las aplicaciones de las fibras láser de onda continua en función de la potencia requerida [4].....9
- Figura 1.5** Esquema típico de una fibra laser pulsada 11
- Figura 2.1** Esquema básico de un láser de fibra dopada de tierras raras con un bombeo por revestimiento. El cono de aceptación del bombeo óptico que ingresa a la fibra debe tener una apertura numérica similar a la del

	revestimiento, de esta manera se podrá propagar dentro del mismo. Se puede considerar que por la reflexión interna total, los rayos de bombeo atraviesan repetidas veces el núcleo dopado, siendo absorbidos por los iones de tierras raras cuya población pasa a un estado de inversión (cantidad mayoritaria de iones en el estado excitado) conforme se propagan.....	19
Figura 2.2	Esquemas comunes de bombeo de las fibras láser	20
Figura 2.3	Cavidad tipo Fabry-Perot en un láser de fibra, las reflectividades de la cavidad la proporcionan espejos dicróicos en donde el del extremo de salida deja pasar una porción de la potencia de la señal laser oscilatoria. 21	
Figura 2.4	Esquemas comunes de cavidades láser de fibras dopadas de Erblio.	21
Figura 2.5	(a) Esquema de la estructura electrónica del Yb^{3+} (b) sección transversal de absorción típica de una fibra dopada de Yb^{3+}	24
Figura 3.5	A scheme of irradiation of cells during AFM analysis. The Atomic Force Microscope mounted on an Olympus inverted microscope.....	58
Figura 4.1	DPSCs proliferation at 24, 48, and 72 h assessed by acid phosphatase activity determination	62
Figura 4.2	DPSCs proliferation at 24, 48, and 72 h assessed by Trypan blue exclusion method.....	63
Figura 4.3	AFM image in contact mode of control group 1 of DPSCs	67
Figura 4.4	AFM image in contact mode of DPSCs-group 2.....	69
Figura 4.5	AFM image in contact mode of DPSCs-group 3.....	70
Figura 4.6	AFM image in contact mode of irradiated group 4 of DPSCs.....	71
Figura 4.7	AFM image in contact mode of irradiated group 5 of DPSCs.....	71
Figura 5.1	AFM image in contact mode of group 1 differentiated cells (chondrocytes).....	80
Figura 5.2	AFM image in contact mode of group 2 differentiated cells (chondrocytes).....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Clasificación de los diferentes tipos de láseres	7
Tabla 1.2	Eukaryotic cell structures and their functions	12
Tabla 1.3	Cell lines commonly used of each culture type	17
Tabla 1.4	Cell produced by ESC differentiation.....	23
Tabla 2.1	Transiciones de fibras laser y amplificadores.....	23
Tabla 3.1	Nd:YAG laser used parameters.....	48
Tabla 3.2	Description of variations made in each experiment.....	59
Tabla 3.3	Energy and energy densities for each irradiation time	59

LIST OF ABBREVIATIONS

<i>Symbol</i>	<i>Term</i>
α-MEM	Alpha minimum essential medium
AFM	Atomic force microscopy
ASCs	Adipose stem cells

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN A LOS LÁSERES

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS LÁSERES

En la presente sección se muestra de manera general la física del proceso de generación láser, se plantea una clasificación de los láseres así como las características y los parámetros principales que definen el desempeño que poseen estos dispositivos.

La coherencia espacial y temporal así como un ancho espectral muy reducido es lo que diferencia a la radiación emitida por los láseres de entre otras fuentes de radiación. Los láseres son considerados como fuentes de luz casi monocromática que poseen un alto grado de direccionalidad, por tal motivo con la ayuda de lentes pueden ser enfocados en áreas muy reducidas o colimados en función de lo que se requiera. Los diferentes tipos de dispositivos láser generan o amplifican radiación coherente y podemos clasificarlos por los rangos espectrales en los que operan y que van desde el UV cercano, pasando por el visible, llegando hasta el infrarrojo cercano. Cada dispositivo láser puede tener su propia distribución espectral, pero las variaciones de los campos electromagnéticos que producen poseen amplitudes y fases que se desvían entre sí en el primer orden de aproximación.

Desde la demostración del primer láser [1], el interés por la investigación y desarrollo de nuevos tipos de láseres tuvo un rápido crecimiento lo cual llevó a la demostración de muy diversos tipos de láseres para muy numerosas aplicaciones. La tendencia actual de la investigación va encaminada en diversas vertientes como ampliar el espectro de longitudes de onda de los láseres hacia ambos lados del espectro EM (Láseres de Rayos-X – Láseres de IR Lejano), desarrollar láseres con potencia de onda continua de muy alta potencia para diversas aplicaciones, para láseres pulsados de muy alta energía, láseres de muy alta monocromaticidad para comunicaciones, holografía, espectroscopia, etc. La tabla 1.1 muestra de forma breve una clasificación de los diferentes tipos de láser.

Tabla 1.1 Clasificación de diferentes tipos de láseres.

Tipo de láser (medio de ganancia)		Longitud de onda de operación	Tipo de bombeo	
LÁSERES DE GAS	He-Ne	632.8 nm, 543.5 nm, 1.52nm, etc	Descarga eléctrica	
	CO2	2.4µm, 4 µm, 4.8µm, 10µm etc.		
	Excimer	193 nm, 248 nm, 308 nm, 353 nm		
LÁSERES QUÍMICOS	Fluoruro de Hidrógeno	2.7 µm a 2.9 µm	Reacción química	
	Yodo químico oxigenado	1.315 µm		
LÁSERES DE ESTADO SÓLIDO	<i>En vidrio o en barras</i>	Ruby	694.3 nm	Lámpara flash
		Ti:Sa	650-1100 nm	Otro láser
		Nd:YVO4	1.064 µm	Diodo láser
		Nd:YAG	1.064 µm (1.320 µm)	Lámpara flash, diodo láser
	<i>En vidrio, FIBRAS ÓPTICAS LÁSER</i>	Vidrio dopado de Neodimio	1.062 µm(Silicatos), 1.054 µm(Fosfatos)	Lámpara flash, diodo láser
		Vidrio dopado de Iterbio	1.0 µm	Diodo láser
		Vidrio dopado de Erbio	1.53 µm - 1.56 µm	
		Vidrio dopado de Tulio	2.0 µm	
LÁSERES DE SEMI-CONDUCTOR	Diodo láser semiconductor	0.4 µm – 20 µm	Corriente eléctrica	
	InGaAsP	1.0 mm - 2.1 mm		
	AlGaInP,AlGaAs	0.63 mm – 0.9 mm		
OTROS LÁSERES	Láser de electrones libres	0.0001 µm – varios mm	Rayos de electrones relativistas	
	Láser Raman	1 µm – 2 µm en fibras láser	Fibras láser dopadas de Iterbio	

Es evidente que en función de la aplicación que se desea resolver es importante que además de elegir la longitud de onda de operación del láser, se debe determinar qué tipo de características debe cumplir el láser, esto es, si se requiere operación de onda continua, pulsada, parámetros de potencia, brillo, calidad de rayo, etc.

1.2 FÍSICA DEL LÁSER

El estudio teórico de los láseres pertenece al área de la electrónica cuántica. Aunque de forma general el diseño y construcción de cavidades ópticas y la física relacionada con la obtención de inversión de población en un medio laser son denominados física del láser. La figura 1.1 (a) muestra un esquema simplificado de una cavidad láser.

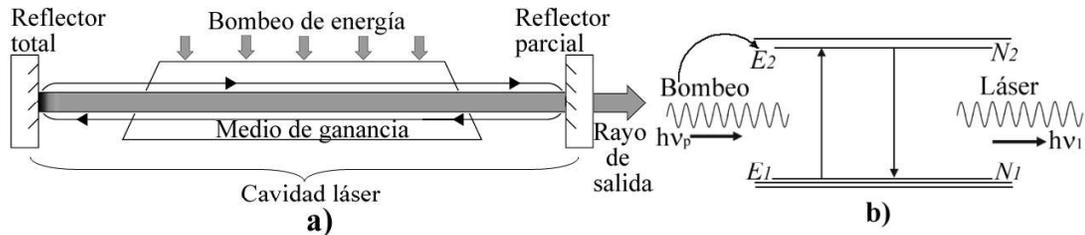


Figura 1.1 (a) Esquema simplificado de los elementos que componen un láser. (b) Esquema de dos niveles de energía entre los cuales se producen las transiciones atómicas de absorción y emisión estimuladas, correspondientes a una población de átomos láser activos dentro una cavidad láser. N_1 representa la población de átomos en el nivel de energía E_1 , mientras que N_2 es la población de átomos en el nivel E_2 . Para producir inversión de población ($N_2 > N_1$) se requiere que el tiempo de vida del nivel láser superior sea significativamente mayor que el del nivel inferior, y que un bombeo constante de energía permita mantener un umbral de inversión de población. La flecha curvada indica que la población N_2 es producida por una razón efectiva de la energía de bombeo que se aplica a la cavidad láser.

Como se muestra en la figura 1.1 (b), el esquema de dos niveles de energía se puede emplear en el conjunto de átomos láser activos (dentro del medio de ganancia), cuando las transiciones de relajación no radiativas de los átomos en niveles mayores que el nivel meta-estable E_2 son muy rápidas. De esta manera se puede considerar que la población total de iones está distribuida en los estados base y meta-estable respectivamente.

En la construcción de un láser es indispensable una fuente de bombeo de potencia que sea capaz de mantener una razón de excitación energética de átomos láser activos en un medio material (sólidos o gases), dichos átomos, a través de procesos de absorción y emisión estimuladas ocurriendo entre los niveles láser E_2 y E_1 (superior e inferior respectivamente) generan amplificación de una señal resonante con la frecuencia de estas transiciones, y que para producir oscilación de la señal láser se requiere de una cavidad óptica resonante. Con referencia a la figura 1.1(a)-(b), lo necesario para lograr la oscilación láser estable es lo siguiente: **i)** que el bombeo de energía mantenga lo que se llama inversión de población $N_2|_{E_1} > N_1|_{E_2}$ entre los niveles energéticos láser E_2 y E_1 , **ii)** que la señal láser oscilante experimente una ganancia (producida por los procesos de

emisión estimulada coherente de los átomos en el nivel láser superior) que sea mayor que las pérdidas totales de ida y vuelta (producidas por la reflectividad de los espejos, por dispersión y por difracción) y **iii**) que el tiempo de vida de los átomos excitados en el nivel láser superior E_2 sean mucho más grandes que los del nivel inferior antes de ser emitidos de forma espontánea desde el nivel laser inferior a niveles más bajos. Con las condiciones anteriores se garantiza que la inversión de población se mantiene presente y que todo el proceso amplificación pueda mantener una condición estable.

Al mismo tiempo, ocurren dentro del medio activo procesos de relajación radiativa y no radiativa desde niveles altos hacia niveles más bajos y que se conocen como transiciones o emisiones espontáneas. En la emisión espontánea, la parte no radiativa transfiere energía de los átomos en el nivel láser superior en forma de radiación acústica o fonones a la red cristalina, mientras que la parte radiativa corresponde con el fenómeno de fluorescencia en el cual la radiación espontánea emerge en todas direcciones y de forma incoherente.

1.3 OSCILACIÓN LÁSER

Como se muestra en la figura 1.2 (a), el proceso de oscilación láser se puede explicar de la siguiente manera: suponer una razón constante de bombeo de energía que permita lograr inversión de población $N_2 > N_1$ de los átomos láser en el nivel superior E_2 . Debido a la emisión espontánea de los átomos láser (decaen radiativamente hacia el nivel láser inferior), se tendrá inicialmente una emisión incoherente (que se da en todas direcciones), pero existirán unos pocos fotones de esta emisión, que irán en la dirección del eje axial de la cavidad, se amplificarán a una razón que está determinada por el monto de ganancia disponible conforme se propaga dentro del medio activo, es decir, estimulando de forma coherente a los átomos láser del nivel superior para que emitan radiación de esa misma longitud de onda. Esta amplificación es favorecida a través de múltiples viajes de ida y vuelta, ya que una cavidad láser posee espejos en sus extremos, de alta reflectividad y parcialmente reflectivos (a la longitud de onda de la señal) respectivamente, de este modo una fracción de la intensidad óptica generada será emitida al exterior en forma de rayo láser. Habrá un momento en el que tras haber realizado un cierto número de viajes de ida y vuelta la intensidad del rayo u onda oscilante dentro de la cavidad habrá crecido tanto que ya no habrá suficientes átomos activos en el nivel láser superior para que el medio de ganancia siga entregando más fotones de forma estimulada como respuesta a la onda amplificada. Por tal motivo la intensidad llegará a un valor de estado estable en el cual la

conversión por bombeo de los átomos láser al nivel superior tendrá un balance de equilibrio con dicha intensidad, dicho estado estable es también conocido como saturación de intensidad. Con fines comparativos cabría mencionar que en láseres de colorantes se requerirían solo dos pasadas o una vuelta completa para logra la saturación de intensidad, mientras que para láseres de He-Ne requeriría alrededor de 500 pasadas ó 250 vueltas.

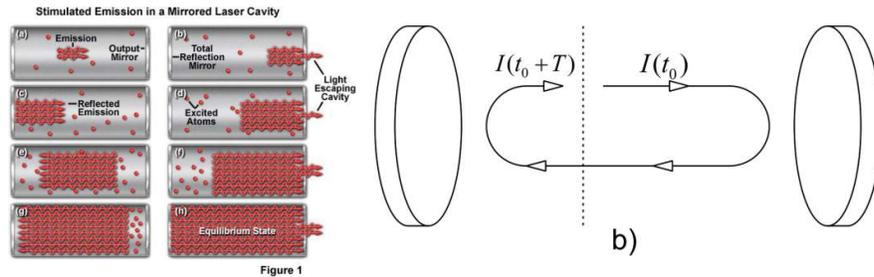


Figura 1.2 (a) Esquema del proceso de oscilación láser. Considerando un umbral de inversión población de átomos láser, la oscilación iniciará con unos pocos fotones emitidos de forma espontánea que tienen la dirección axial de la cavidad, así, en cada viaje de ida y vuelta dentro de la misma, experimentarán una amplificación exponencial. La reflectividad de los espejos es tal que en la salida se permite que una porción de la intensidad óptica sea retroalimentada, mientras que el resto es transmitida hacia la salida (rayo láser de salida). En este proceso, cada fotón dentro de la cavidad interactúa con un átomo en el estado excitado produciendo emisión estimulada de otro fotón (los átomos excitados decaen emitiendo fotones), sumándose a la intensidad óptica que circula dentro de la cavidad. Llega un momento en el que la intensidad dentro la cavidad es tan grande que consumen el total de los átomos excitados a la misma razón con la que son bombeados, dándose de este modo un estado estable en la intensidad óptica. (b) La Ganancia de intensidad óptica y tiempo de viaje en un cavidad láser.

Es sabido que la intensidad óptica de una señal que se propaga dentro de una cavidad láser experimenta una amplificación (por emisión estimulada) expresada por $I(z) = I(z_0) \exp[-2\alpha_m(z - z_0)]$ o de forma equivalente (diferencial) $\frac{1}{I} \frac{dI(z)}{dz} = -2\alpha_m$ siendo $-2\alpha_m$ la razón de cambio. De acuerdo con lo anterior, como se indica en la figura 1.2 (b), un pequeño paquete de señal denominado I_0 originado por emisión espontánea, experimentará durante su propagación dentro del medio de ganancia, una amplificación neta “de un solo paso” (ganancia - pérdidas) representada por $\exp(\alpha_m p_m - \alpha_0 p)$, tomando en cuenta las pérdidas por reflexión parcial de los espejos (ya que tienen una reflectividad inferior al 100 %) indicadas por $R_1 R_2$ se tendrá al cabo de una vuelta completa: $I(T) = I_0 R_1 R_2 \exp[2\alpha_m p_m - 2\alpha_0 p] = I_0 \exp[\delta_m - \delta_c]$ siendo $T = np / c$ el tiempo que tarda la luz en propagarse una vuelta completa en la cavidad, n es el índice de refracción y

$p = 2L$ es el doble de la longitud de la cavidad. Los valores típicos del tiempo de ida y vuelta son $T = 1-10ns$. Al cabo de N vuelta completas el crecimiento neto será:

$$I(NT) = I_0 R_1 R_2 \exp[2\alpha_m p_m - 2\alpha_0 p]^N = I_0 \exp[N(\delta_m - \delta_c)] \quad (1.1)$$

La cual se puede re-escribir como:

$$I(t) = I_0 \exp\left[\frac{\delta_m - \delta_c}{T} t\right] \quad (1.2)$$

Con; $t = NT$ y $\begin{cases} \frac{\delta_m}{T} = \frac{2\alpha_m p_m}{T} \\ \frac{\delta_c}{T} = \frac{2\alpha_0 p + \ln(1/R_{tot})}{T} \end{cases}$. Así mismo es conveniente re-escribir la ecuación

(1.2) como:

$$I(t) = I_0 \exp[\gamma_m - \gamma_c t] \quad (1.3)$$

Con; $\gamma_m = \frac{\delta_m}{T}$ y $\gamma_c = \frac{\delta_c}{T}$. Al inspeccionar la ecuación (1.3) podemos ver que el tiempo de vida de la cavidad o decaimiento exponencial (denominado como τ_c) para señales ópticas dentro de la cavidad en ausencia de ganancia láser es:

$$\tau_c = \gamma_c^{-1} \frac{T}{\delta_c} \quad (1.4)$$

Cabe mencionar que en los láseres reales, el tiempo de decaimiento también denominado de “cavidad fría” toma valores típicos de $\sim 1ns$ a $1\mu s$. Así mismo, en el estado estable, la circulación de la intensidad óptica mostrada en la figura 1.2 (b) implicará que la intensidad óptica circulante cumplirá la condición: $I(t) = I(t+T)$ en donde T es el tiempo de un viaje de ida y vuelta de la onda que se refleja en ambos espejos.

Por la discusión anterior, se explica el porqué una pequeña emisión espontánea que comenzó en un extremo de la cavidad y que viajó hasta el extremo opuesto puede experimentar un factor de crecimiento entre 0.02 (2%) y 10 (1000%) en una sola pasada, dependiendo del tipo de láser.

Se denomina a T_b o tiempo de construcción de la oscilación, como aquel que se requiere para llegar al estado estable de oscilación láser, partiendo desde un “encendido” inicial de

la ganancia láser que comienza con un nivel de ruido I_0 (de pequeña magnitud correspondiente a unos pocos fotones de emisión-espontánea en la cavidad). Es decir, en ese intervalo de tiempo, suponiendo que hay un bombeo de potencia que produce inversión de población, el nivel inicial I_0 será amplificado de forma coherente (la energía la proveen los átomos en el nivel láser superior) hasta un nivel macroscópico de estado estable I_{ss} con un gran número de fotones dentro de la cavidad.

Es conveniente definir una razón de inversión normalizada como la razón de la ganancia sin saturar δ_{m0} con respecto al coeficiente de pérdida de "cavidad fría" (pérdidas óhmicas, más pérdidas por reflectividad parcial de los espejos):

$$r = \frac{\delta_{m0}}{\delta_c} = \frac{\gamma_{m0}}{\gamma_c} = \frac{2\alpha_{m0}P_m}{2\alpha_{0p} + \ln(1/R_{tot})} \quad (1.5)$$

La razón de construcción de la oscilación dada por las ecuaciones (1.2) y (1.3) puede ser entonces escrita en la forma:

$$I(t) = I_0 \exp\left[= \frac{r-1}{\tau_c} t \right] \quad (1.6)$$

De esta manera cuando la construcción de la intensidad total desde un nivel de ruido I_0 hasta el estado estable final de oscilación I_{ss} es entonces dado aproximadamente por:

$$I_{ss} \approx I_0 \exp\left[= \frac{r-1}{\tau_c} T_b \right] \quad (1.7)$$

Y el tiempo de construcción de la oscilación láser es:

$$T_b \approx \frac{\tau_c}{r-1} \ln\left(\frac{I_{ss}}{I_0} \right) \quad (1.8)$$

El tiempo de construcción de la oscilación láser típicamente puede tomar entre 10 a 30 constantes de decaimiento τ_c . Por ejemplo, en un láser de Nd:YAG de largo $p = 0.3m$ ($T = 2ns$), en condiciones de umbral láser, con $\delta_c = 0.5$ y $r = 3$ se tendría $T_b \approx 50ns$.

1.4 LÁSERES DE FIBRAS ÓPTICAS DOPADAS DE TIERRAS RARAS VS LÁSERES DE VIDRIO DOPADO

Entre los láseres de estado sólido existen los denominados como fibras láser. Éstas emplean fibras ópticas dopadas de tierras raras (Erbio, Iterbio, Neodimio, Tulio, etc.) como medio de ganancia. Algunas de las características más atractivas de las fibras láser son que pueden ser bombeadas directamente por diodos láser de estado sólido, que pueden alcanzar altas ganancias en amplios anchos de banda, y que la emisión láser que producen posee una excelente calidad de rayo. En la figura 1.3 (a)-(b) se puede ver que la diferencia entre un láser de fibra óptica y un láser de bulto radica esencialmente en que en el primero el medio de ganancia es una fibra óptica dopada mientras que en el segundo es una pieza de vidrio dopado de átomos láser activos.

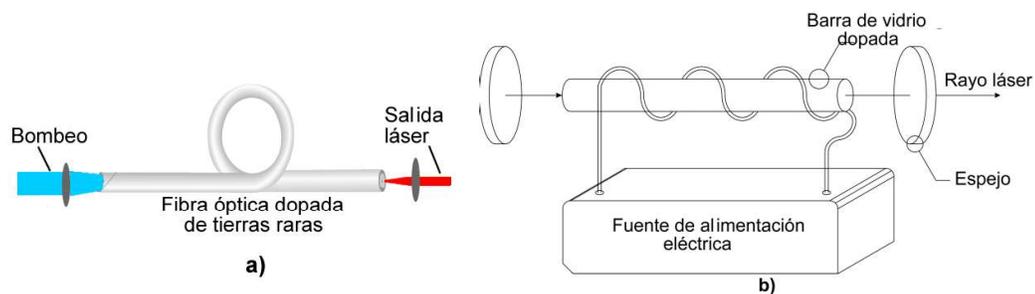


Figura 1.3 (a) Esquema básico de un láser de fibra, en ésta el medio de ganancia es una fibra óptica. El bombeo (óptico) lo provee por lo general un diodo láser semiconductor que se introduce a la guía de onda y conforme se propaga es absorbido por los iones de tierras raras con los que está dopado el núcleo de la fibra, permitiendo así producir inversión de población y por lo tanto ganancia láser. (b) Esquema de un láser de bulto, en donde el medio de ganancia es un vidrio o cristal dopado de volumen. La fuente de alimentación eléctrica activa una lámpara cuyo flujo luminoso se hace pasar a través de la pieza cilíndrica dopada con iones láser activos los cuales absorben dicho bombeo proveyendo así el medio de ganancia de dicha cavidad láser.

Las fibras laser dopadas de tierras raras han encontrado una diversidad de aplicaciones en áreas donde antes eran dominio de los láseres de bulto. El nicho principal de aplicaciones sin duda pertenece al de redes de telecomunicaciones WDM y SDM, las fibras láser y amplificadores de fibras dopados de tierras raras se han vuelto esenciales constituyendo el medio principal de transporte de las comunicaciones digitales y el internet.

El concepto de las fibras laser se puso en práctica cuando se inventaron las fibras ópticas dopadas de tierras raras, la primer fibra láser fue demostrada en 1964 por Snitzer et al. [2]. Inicialmente las fibras láser podían generar niveles de potencia de pocas decenas de mili-watts, pero su desempeño y versatilidad mejoró sustancialmente cuando las técnicas

de fabricación de las fibras dopadas se volvieron más sofisticadas a la par de que los diodos láser de bombeo disponible contaban con mayor potencia y brillo. De esta manera se fueron demostrando esquemas de fibras láser y amplificadores de fibras ópticas dopadas de tierras raras los cuales contaban con características de potencia, longitud de onda y ancho de línea apropiados para transmisión de datos en grandes distancias a través de redes de fibra óptica por lo cual encontraron utilidad comercial en redes de telecomunicaciones WDM. El desarrollo de nuevas fibras láser se vio acompañado de avances importantes en componentes pasivos de alta potencia como combinadores de rayos (*beam combiners*), rejillas de Bragg en fibra (*Fiber Bragg Gratings*), aisladores ópticos, des-forradoras de modos de revestimiento (*cladding mode strippers*), cubiertas de terminación para fibra (*end-caps*) y módulos de diodos laser de alto brillo para bombeo. Esto en su conjunto llevo al desarrollo de láseres de fibra permitían niveles de desempeño y escalabilidad de potencia en el rango de las centenas de Watts hasta que en el año 2004 Jeong et al demostraron la primer fibra láser dopada de Iterbio que alcanzó 1 kW de potencia en onda continua [3]. Desde entonces a la fecha se han logrado mejoras aún mayores en dichos componentes de potencia para los láseres de fibra, lo cual ha permitido que se llegue a alcanzar niveles multikilowatt en onda continua [4], [5], [6], [7], [8].

En la actualidad tanto las fibras láser como los láseres de bulto pueden alcanzar potencias de salida multi-kilowatt y la comparación entre estos láseres surgió de forma natural desde el momento en que las fibras láser empezaron a ser utilizados en aplicaciones que en antes fueron propias de los láseres de bulto, en particular la industria del procesamiento de materiales fue la que experimento esta evolución de los láseres. Las fibras láser de potencias de > 1 kW se han vuelto estándares de potencia ordinarios, habiendo comercialmente fibras láser mono-modales de hasta 10 kW en onda continua [8], y han comenzado a encontrar lugar en aplicaciones de muy alta potencia como soldadura, corte y perforación de metales. La figura 1.4 muestra las potencias láser requeridas para los diferentes aplicaciones de procesado de materiales [4].

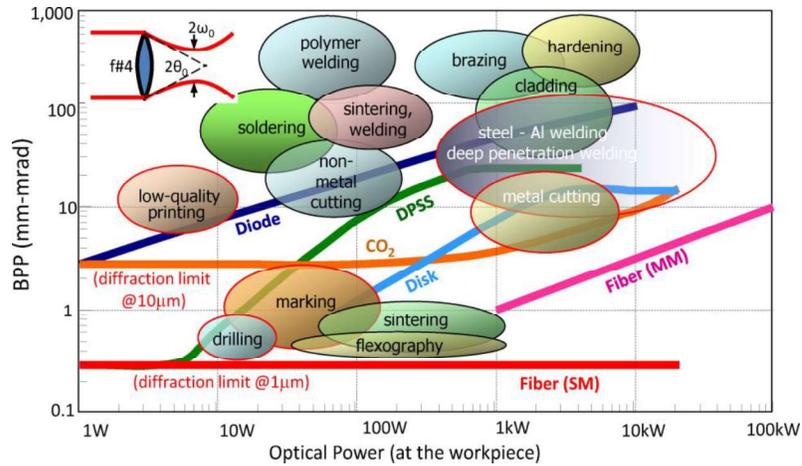


Figura 1.4 Clasificación de las aplicaciones de las fibras láser de onda continua en función de la potencia requerida [4].

Las fibras láser son esencialmente guías de onda, por esto tienen versatilidad de manipulación, así mismo se pueden lograr altos niveles de potencia, eficiencia, y dada su geometría permiten alcanzar alto brillo con gran capacidad de enfocamiento, así como facilitar el manejo del calentamiento de la cavidad láser [4]. En diversas situaciones los parámetros de las fibras láser son mejores que los láseres de bulto y gradualmente han comenzado a desplazarlos, principalmente en aplicaciones de marcado y *engraving* en donde compiten con láseres de CO₂. En la última década,

Un caso bastante general de las fibras láser, en aquel en donde la salida del láser se puede conectar sin dificultad a una fibra de entrega empleando una óptica simple, ya que las características geométricas de las fibras simplifican la óptica necesaria para lograrlo. De este modo la fibra de entrega puede ir montada en un brazo de robot para posicionar la salida láser en donde se requiere. Adicionalmente, las fibras láser dopadas de tierras raras también se pueden operar para que emitan pulsos láser de alta energía y muy corta duración. Este tipo de fibras láser pulsadas encuentran lugar en aplicaciones de micro-maquinado de materiales. En general los esquemas de láseres pulsados de potencia emplean una configuración la que se inyecta una señal láser semilla pulsada de baja potencia a un amplificador de fibra dopada de tierra rara. El bombeo puede ser acoplado mediante elementos externos como lentes y diodos láser semiconductores de potencia [9],[10] aunque ya existen propuestas de láseres pulsados de potencia tipo "todo-fibra" [11]. La figura 1.5 muestra un esquema típico de un láser de fibra dopada de Iterbio que opera en onda pulsada.

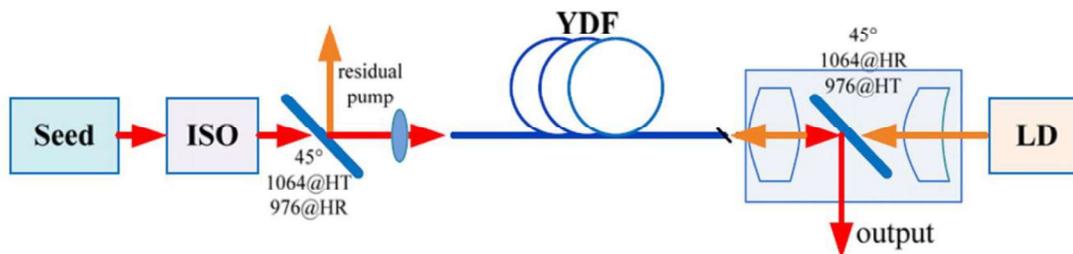


Figura 1.5 Esquema típico de una fibra láser pulsada.

1.5 ENFOQUE Y MOTIVACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS

En la actualidad la ciencia de los láseres de fibras dopadas de tierras raras y de los láseres en general ha llegado a un grado de madurez en el sentido de las múltiples ramas de estudio de los diferentes tipos de láser (según su desempeño y características) se han ido especializando cada vez más, llegando a lograr mayor potencia de onda continua o pulsada, mejor pureza espectral, operación láser en más y mayores rangos de frecuencias, de sintonización en longitud de onda, mayor versatilidad, innovación en los materiales, etc.

El conocimiento generado ha contribuido a mejorar sustancialmente la ingeniería de diseño y a la generación de nuevos materiales y herramientas de análisis dando como resultado una gran cantidad de tecnologías y técnicas que permiten construir dispositivos láser optimizados para una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo; un grado de madurez en el campo de estudio, implica que en la frontera de cada caso particular se encontrarán nuevos problemas que resolver para incrementar el conocimiento de los láseres y que en algunas ocasiones significará profundizar en el análisis físico de los procesos de oscilación láser y en los modelos que los describen [12]. Adicionalmente, la investigación y desarrollo de los láseres, presentan la tendencia de que además de buscar mejores desempeños, empiezan a converger con otras áreas de la óptica y de la física en general, con finalidad de poder ofrecer novedosas propuestas en disciplinas y/o soluciones emergentes como los son el biosensado y sensado en general, pinzas ópticas (*optical trapping*), metrología, iluminación láser, ignición láser (*laser ignition*) para motores de combustión interna, etc. Esto ha dado lugar a toda una nueva clase de dispositivos que gradualmente encontrarán lugar en una amplia variedad de situaciones.

Todas estas innovaciones ofrecen atractivas áreas de oportunidad que motivan la realización de investigación encaminada a resolver las nuevas problemáticas que plantea el desarrollo de estos dispositivos y en general para incrementar el conocimiento de los láseres.

En lo que respecta a la investigación presentada en este trabajo de tesis, se exploran dos escenarios diferentes del control de pérdidas en cavidades de láseres de fibras dopadas de tierras raras para:

- **Estudiar el efecto de auto-pulsado en láser de fibra dopada de Iterbio de gran área modal**
- **Diseñar un sensor de temperatura de gran sensibilidad basado en sintonización de una fibra láser dopada de Erblio.**

Para el primer caso la motivación del desarrollo de la investigación es provista por el gran atractivo que ofrecen los láseres pulsados de potencia para aplicaciones de procesamiento de materiales como los son el micromaquinado de precisión y perforación de materiales, por ejemplo un mercado creciente para estas aplicaciones es el de micrograbado en películas delgadas. Los pulsos láser rápidos (ns) de inclusive pocos mJ de energía son capaces de generar potencias ópticas pico de varias decenas de KW, y que enfocados en áreas muy reducidas del orden de unos pocos μm^2 pueden producir una vaporización súbita de la pequeña porción de material que se encuentre expuesta al pulso de energía, debido la duración extremadamente corta del pulso, el material circundante a la zona tratada, no experimenta un proceso de calentamiento ni degradación térmica proveyendo un alto nivel de precisión en el micro-maquinado.

En el segundo caso la motivación para la realización de un sensor de temperatura basado en un láser de fibra dopada de Erblio radica en la factibilidad de diseñar dispositivos de sensado de alta precisión y cuyas características permitan llevarlo la mesa de laboratorio a aplicaciones reales. Con este propósito se propone un concepto de sensor en el que un láser de fibra en anillo dopada de Erblio es sintonizada para una longitud de onda específica por temperatura.

1.6 HIPÓTESIS DEL TRABAJO 1: AUTO-PULSADO EN LÁSER DE FIBRA DOPADA DE ITERBIO DE GRAN ÁREA MODAL

Se propone analizar el mecanismo de auto-pulsado que se obtiene cuando las pérdidas de cavidad se deben a lo que se denomina una mala cavidad (baja retroalimentación) en un láser de fibra cuyo medio de ganancia es una fibra dopada de Iterbio de doble revestimiento de gran área modal. Esto ocurre, cuando los espejos de la cavidad lo constituyen la reflectividad de Fresnel de los extremos de la fibra, que tiene terminaciones con cortes rectos.

Adicionalmente, se espera que dado que la fibra es de gran área modal, la aparición de los efectos no lineales tenga un umbral elevado bajo valores relativamente altos de potencia de bombeo de modo que en el estudio de auto-pulsado no haya contribuciones por esparcimiento Brillouin ni esparcimiento Raman estimulados cuyo efecto es producir emisiones en longitudes de onda más largas y que se encuentran fuera de la banda de ganancia del Iterbio.

Como hipótesis de esta investigación se propone que el mecanismo de auto-pulsado es producido por absorción saturable en secciones sin bombear de la fibra dopada, para ello se realiza una revisión de las ecuaciones de razón atómicas en donde se incluye el efecto de absorción en secciones cortas de la fibra dopada, posteriormente se plantea una expresión para determinar la frecuencia de las oscilaciones de relajación en términos de la potencia de bombeo y determinar cómo afecta la razón de repetición de los pulsos ante diferentes valores de bombeo por encima del umbral de emisión láser.

1.7 HIPÓTESIS DEL TRABAJO 2: SENSOR DE TEMPERATURA BASADO EN SINTONIZACIÓN DE UNA FIBRA LÁSER DOPADA DE ERBIO

Dado que se desea demostrar un sensor de temperatura basado en la sintonización de una fibra láser en anillo dopada de Erblio, se propone para este fin emplear un filtro de intracavidad el cual se mantiene sumergido en diferentes soluciones de glicerina/agua con índice de refracción parecido al del revestimiento y que varían linealmente con la temperatura. Dicho filtro sumergido es el elemento de sensado y se conforma por dos