



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Instituto de Ciencias

Estudio de los mecanismos de conmutación en láseres pulsados de fibra óptica

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE

Maestría en tecnologías en materiales avanzados

PRESENTA:

César Amaxal Cuatetl

ASESORES:

Dr. Plácido Zaca Morán

Dr. Juan Pablo Padilla Martínez

Resumen

El presente trabajo de investigación, tuvo como propósito el realizar el estudio de los mecanismos de conmutación en láseres pulsados de fibra óptica. Se presentan dos estudios: el primer estudio fue desarrollado empleando un absorbedor saturable, el segundo estudio fue desarrollado utilizando el fenómeno de termocavitación. El absorbedor saturable, fue diseñado a base de una fibra óptica reducida por ataque químico, además, se fotodepositaron ZnNP en la sección reducida de la fibra óptica. La caracterización no lineal de la fibra óptica reducida sin ZnNP y con ZnNP fotodepositadas se realizó empleando un láser pulsado de alta ganancia. Por otra parte, se realizó el estudio de un nuevo mecanismo de conmutación utilizando el fenómeno de termocavitación, donde se empleó un hidrófono de fibra óptica cuyo funcionamiento fue el de medir la amplitud y frecuencia de la generación de los pulsos de luz. Estos mecanismo fueron insertados/empalmados, dentro de la cavidad de un arreglo experimental del láser de fibra óptica en configuración de anillo. Los resultados obtenidos empleando el absorbedor saturable, mostraron un comportamiento característico de amarre de modos, por otro lado, los resultados obtenidos utilizando el fenómeno de termocavitación mostraron un comportamiento similar a la de un láser de Q-switch.

Agradecimientos

Gracias a mi familia por apoyarme en cada decisión y proyecto que tomo, gracias a la vida, porque cada día me demuestra lo hermosa que es y lo justa que puede llegar a ser. No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes, a su amor, a su inmensa bondad y apoyo, lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos.

Quiero agradecerle a mis asesores: al Dr. Plácido y al Dr. Juan Pablo por el tiempo dedicado para aclarar mis dudas que me surgían, agradecerles por la exactitud con la que me instuyeron en cada clase, discurso y lección. Gracias a mis asesores por haberme enseñado tan bien y por haberme permitido el desarrollo de esta tesis.

Gracias al Instituto de Ciencias (ICUAP) y a todas las personas que fueron partícipes en este proceso, ya sea de manera directa o indirecta. Este es un momento muy especial que espero, perdure en el tiempo, no solo en la mente de las personas a quienes agradecí, sino también a quienes invirtieron su tiempo para echarle una hojeada a mi proyecto de tesis.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	5
1.1.1	Objetivo general	5
1.1.2	Objetivos particulares	5
1.2	Estructura de la tesis	5
2	Marco teórico	7
2.1	Sistema láser	7
2.2	Láseres pulsados	10
2.3	Efecto no lineal: Absorbedor saturable	11
2.4	Onda evanescente	12
2.5	Cavitación	14
2.6	Fenómeno de termocavitación	16
2.7	Principio de funcionamiento de un hidrófono de fibra óptica	19
3	Desarrollo experimental	22
3.1	Mecanismo de conmutación por absorbedor saturable	22
3.1.1	Reducción de la fibra óptica	22
3.1.2	Láser de alta ganancia	24

3.1.3	Caracterización de los pulsos generados por el láser de alta ganancia	27
3.1.4	Caracterización no lineal	29
3.2	Implementación del láser pulsado	32
3.3	Mecanismo de conmutación mediante termocavitación	33
3.3.1	Arreglo experimental para generar burbujas de termocavitación .	33
3.3.2	Arreglo experimental para generar pulsos de luz.....	34
4	Resultados.....	36
4.1	Pulsos de luz generados por un absorbedor saturable	37
4.1.1	Fibra óptica reducida	37
4.1.2	Fibra óptica reducida y fotodepositada con nanopartículas de zinc	39
4.2	Pulsos de luz generados mediante termocavitación: amplitud y frecuencia.....	41
	Conclusiones	48
	Participación en congresos.....	49
	Referencias.....	51

Lista de figuras

1.1	Configuración de un láser de fibra óptica propuesto por Cuadrado-Laborde [18].	2
1.2	Base de microfibra Q-switcher totalmente óptica basada en grafito GSA [8].	3
1.3	Esquema del láser de fibra óptica.	4
1.4	a) Arreglo experimental implementando un AS como mecanismo de conmutación en un láser de cavidad de anillo. b) Grafica de la caracterización no lineal [].	4
2.1	a) Láser de cavidad Fabry-Perot, b) Láser de fibra óptica configuración de anillo [29].	8
2.2	Proceso de absorción de energía en un sistema de dos niveles [30].	8
2.3	Proceso de emisión espontánea en un sistema de dos niveles [30].	9
2.4	Proceso de emisión estimulada en un sistema de dos niveles [30].	9
2.5	Procesos de inversión de población en un sistema de dos niveles [30].	10
2.6	Simulación numérica de transmisión contra intensidad.	12
2.7	Diferentes métodos de generación de cavitación [37].	15

2.8	Primer arreglo experimental para obtener burbujas de termocavitación reportado por Rastapov y Sukhodolsky.	16
2.9	Diagrama de los estados de fase del agua [41].	17
2.10	Evolución temporal de una burbuja de termocavitación. a) Crecimiento, b) colapso y c) emisión de la onda de choque [40].	18
2.11	Frecuencia y amplitud de la onda de choque en función de la posición del foco del láser dentro de la solución [40]. La posición 0, indica que el foco del láser está justo en la interfase vidrio-solución.	18
2.12	Frecuencia y amplitud de la onda de choque, generada con un láser de onda continua [41].	19
2.13	Arreglo experimental del hidrófono de fibra óptica [42].	20
2.14	Datos obtenidos con el hidrofono de fibra óptica sumergido en diferentes soluciones.	20
3.1	Arreglo experimental utilizado para llevar a cabo la reducción de la fibra óptica por ataque químico.	23
3.2	Demostración de la reducción de la fibra óptica en función del paso del tiempo.	24
3.3	Sistema de estabilización del láser de alta ganancia. a) Control de temperatura, b) control de corriente y c) generador de pulsos.	25
3.4	Diagrama del aislador óptico de tre puertos.	26
3.5	Estructura de un acoplador.	27
3.6	Perfil de pulsos en tiempos de 10, 20, 50 y 100 ns, emitidos por el generador de funciones.	28

3.7	Perfil de los pulsos obtenidos a la salida del arreglo del láser de alta ganancia en tiempos de 10, 20, 50 y 100 ns.	29
3.8	Comparación del perfil del pulso obtenido a la salida del generador de funciones y a la salida del arreglo del láser de alta ganancia.	30
3.9	Arreglo para caracterizar la fibra óptica reducida.	31
3.10	Respuesta obtenida a la salida de la fibra óptica reducida.	32
3.11	Caracterización no lineal a) fotodeposición en 1 minuto, b) fotodeposición en 5 minutos.	33
3.12	Arreglo experimental de un laser de FO en configuración de anillo.	34
3.13	Arreglo experimental utilizado para generar burbujas de termocavitación.	35
3.14	Arreglo experimental con el que se llevó a cabo la generación de pulsos de luz.	36
3.15	Reflexión del haz de luz incidente, provocado por el cambio de índice de refracción dentro de la solución.	37
4.1	Diagrama de la caracterización realizada con el osciloscopio y el analizador de espectros óptico.	38
4.2	Tren de pulsos obtenidos con el osciloscopio a la salida del arreglo experimental de láser de fibra óptica anular.	39
4.3	Al ir incrementando la potencia de bombeo se generaban picos altos con diferentes longitudes de onda.	40

4.4	Tren de pulsos obtenido con el osciloscopio, empleando la fibra óptica reducida y fotodepositada en un tiempo de 1 minuto.	41
4.5	Espectro de emisión del láser pulsado, empleando la fibra óptica reducida fotodepositada en un minuto.	42
4.6	Tren de pulso obtenido con el osciloscopio.	43
4.7	Espectro obtenido con el analizador de espectros, a la salida de arreglo experimental del láser, utilizando la fibra óptica fotodepositada con nanopartículas de zinc.	44
4.8	a) Tren de pulsos de luz obtenidos a una potencia de 165 mW del láser para generar termocavitación, b) ancho temporal de un pulso de luz ($\sim 75 \mu s$).	45
4.9	Amplitud y frecuencia del pulso de luz en función de la potencia.	46
4.10	a) Tren de pulsos de luz obtenidos cuando el foco del láser fue colocado a una distancia de $160 \mu m$ dentro de la solución. b) ancho temporal de un pulso de luz ($\sim 60 \mu s$).	46
4.11	Amplitud y frecuencia del pulso de luz en función de la posición del foco del láser dentro de la solución.	47

Capítulo 1

Introducción

La generación de los dispositivos láseres es de enorme interés debido a las múltiples aplicaciones que van desde el hogar [1 - 5], en la industria textil [6 - 12], en la medicina [13].

El amplificador de microondas se basó en el estudio por emisión estimulada en 1954 por Charles Hard Townes, cuyo funcionamiento fue enunciada por Albert Einstein.

La primera fuente de radiación óptica coherente lo desarrolló Maiman en 1960. El dispositivo estaba compuesto por tres partes: medio activo (cristal de rubí sintético), bombeo óptico y un resonador [14]. El primer láser de emisión de onda continua se desarrolló en los laboratorios Bell, en Murray Hill Nueva Jersey, por Ali Javan. Este sistema utilizaba un material gaseoso como medio activo compuesto por helio-neón[15]. Con el avance de la tecnología el tamaño de los dispositivos láseres se han sido modificando hasta obtener diseños simples y compactos.

Un láser de Fabry-Perot puede hacerse pulsado mediante un mecanismo que se conecta fuera de la cavidad, este mecanismo puede ser electromecánico, óptico, electrónico, entre otros, que permita pulsar la emisión de luz. En un láser de fibra óptica se utiliza un mecanismo electromecánico, óptico, electrónico, electro-óptico, que se conecta dentro de la cavidad para obtener en la salida una emisión pulsada. Dependiendo del mecanismo de pulsado empleado, se puede dividir en Q-switch y laser de amarre de modos.

Existen láseres de Q-switch que utilizan mecanismos de conmutación activo como: eléctricos, electromecánicos, electro-óptico, etc. Por ejemplo: en los trabajos reportados por los autores Cuadrado-Laborde y colaboradores [16] y G. Ramírez Meléndez y colaboradores [17], reportaron aplicaciones de dispositivos acusto-ópticos en fibra. La figura

1.1, representa una configuración de láser de fibra, cuyos componentes que lo integran son: OC (circulador óptico), EDF (fibra dopada con erbio), PC (controlador de polarización), FBG (fibra de rejilla de Bragg) y WDM (multiplexor de división de longitud de onda). El modulador acústico-óptico, se define por los elementos dentro de la línea punteada. El mecanismo se fijó en una sección de la fibra óptica que conforma la cavidad, una punta muy pequeña y fina golpea la fibra óptica el cual la frecuencia del golpeteo en la fibra óptica es manipulada por un sistema externo, provocando una intermitencia de la luz a la salida del arreglo experimental del láser.

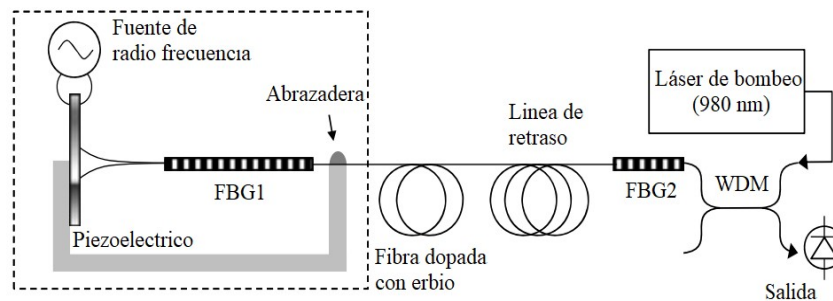


Figura 1.1. Configuración de un láser de fibra óptica propuesto por Cuadrado-Laborde [18].

Existen mecanismos de conmutación pasivos que utilizan materiales semiconductores, un ejemplo es el trabajo reportado por Aibing Ren y colaboradores donde el dispositivo de conmutación es una microfibra, en la parte superior se coloca una delgada lamina de grafeno [18], (ver figura 1.2). En los últimos años se han reportado estudios de láseres de Q-switch pasivo con absorbentes saturables como: los semiconductores saturables (SESAM) [19], nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT)[20, 21], el grafeno [22 - 23], entre otros. En estos trabajos realizados, la dinámica de funcionamiento del mecanismo de conmutación fue el efecto no lineal, donde el uso de distintos materiales nanoestructurados dan como resultado la generación de un láser pulsado.

G. Ramírez Meléndez y colaboradores en el 2017 reportaron el cambio de Q activo de un láser de anillo de fibra óptica que utiliza un nuevo filtro de paso de banda (AOTBF). Las características de transmisión del AOTBF están controladas por la modulación de amplitud

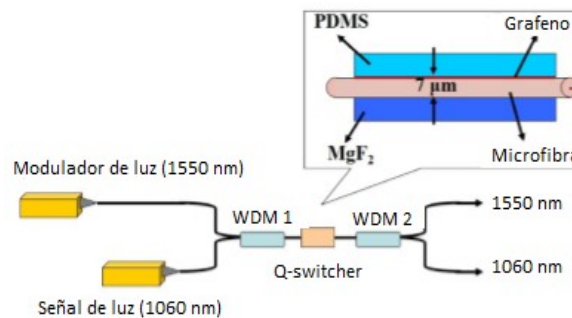


Figura 1.2. Base de microfibra Q-switcher totalmente óptica basada en grafeno GSA [8].

de una onda acústica; el dispositivo presenta una pérdida de inserción de potencia de 3 dB, un ancho de banda óptica de 0.91 nm y una supresión de luz no resonante de 28 dB. La modulación de la pérdida de la cavidad se logra mediante un ciclo de re-acoplamiento modo acústico completo inducido por ondas acústicas en movimiento. Cuando se induce la señal acústica, se reducen las pérdidas de la cavidad, en seguida se genera la emisión del láser. Además, al variar la frecuencia de la onda acústica, se alcanza un amplio rango de sintonización de longitud de onda de 30.7 nm desde 1542 hasta 1572 nm. Los pulsos de conmutación Q se obtuvieron a una velocidad de repetición de 1.1 kHz, con una potencia de bombeo de 242 mW, a la longitud de onda óptica de 1569.4 nm. Se utilizó una energía de bombeo máxima de 8.3 μJ a una potencia de salida promedio con el que se obtuvo una potencia de 9.3 mW, correspondientes a pulsos ópticos de 7.8 W de potencia máxima y un ancho temporal de 1 μs . La figura 1.3, se muestra el diagrama del arreglo experimental del láser de fibra óptica en modo Q-switch [26, 25].

P. Zaca Morán y colaboradores, estudiaron y reportaron un láser en configuración de anillo, utilizaron fibra óptica dopada con erbio como medio activo, con el que obtuvieron un láser de Q-switch empleando un mecanismo de conmutación pasivo que usa ZnNP's. Para generar pulsos láser, a partir de un absorbedor saturable a través de una incorporación selectiva de nanopartículas de Zn en el núcleo de una fibra óptica, usando una fuente de luz coherente de un láser infrarrojo a 1550 nm. Posteriormente, el absorbedor saturable fue colocado en una cavidad láser. El láser reportado tiene la energía de pulso más alta de 2.6

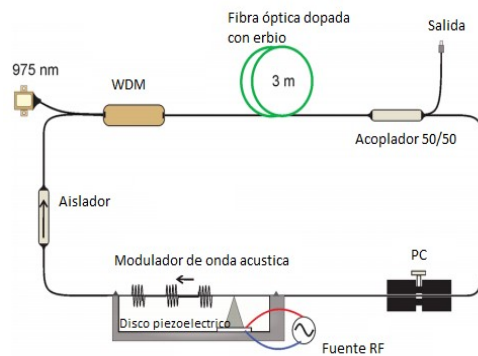


Figura 1.3. Esquema del láser de fibra óptica.

nJ, la cual presentó una frecuencia de repetición de 43 kHz a una longitud de onda de salida de 1565.5 nm. En la figura 1.4 a), se muestra el arreglo experimental de un láser de anillo de fibra óptica donde fue utilizado el absorberdor saturable y, en la figura 1.4 b), se presenta la gráfica reportada del estudio no lineal que presentó la fibra óptica con nanopartículas de Zn [27].

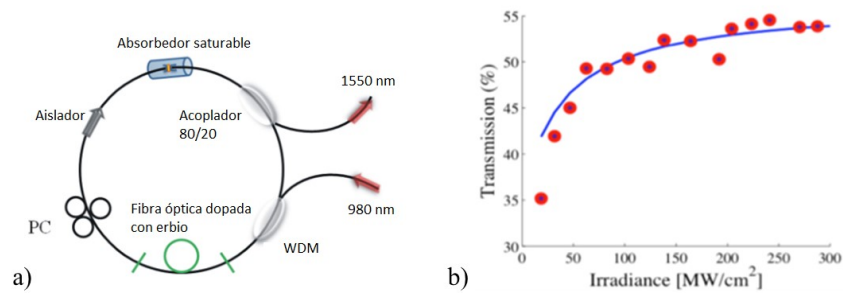


Figura 1.4. a) Arreglo experimental implementando un AS como mecanismo de conmutación en un láser de cavidad de anillo. b) Gráfica de la caracterización no lineal [27].

1.1 Objetivos

Para que este trabajo se pudiera llevar a cabo con éxito, se plantean los siguientes objetivos.

1.1.1 Objetivo general

La generación de pulsos de luz, empleando un absorbedor saturable y el fenómeno de termocavitación como mecanismos de conmutación en un láser de fibra óptica en configuración anular.

1.1.2 Objetivos particulares

Fibra óptica reducida

- Estudiar y comprender el efecto no lineal de absorbedor saturable
- Reducir la fibra óptica mediante la técnica de ataque químico
- Caracterizar el efecto no lineal empleando un láser de alta ganancia
- Fotodepositar las nanopartículas metálicas de zinc en la sección reducida de la fibra

óptica

Fenómeno de termocavitación

- Estudiar y comprender el fenómeno de termocavitación
- Estudiar y comprender el principio de funcionamiento de un hidrófono de fibra

óptica

- Implementar el fenómeno de termocavitación y el hidrófono dentro del sistema del láser de fibra óptica

1.2 Estructura de la tesis

En el capítulo 1, se describen los antecedentes sobre los algunos mecanismos de conmutación con los cuales se pueden generar láseres pulsados de Q-switch y/o de amarre

de modos; además, se describen algunos arreglos experimentales con el que han desarrollado sistemas láser en años recientes.

En el capítulo 2, se describe la teoría básica de las partes que conforman un dispositivo láser así como su principio de funcionamiento. Así mismo, en éste capítulo se da a conocer la teoría básica del fenómeno de termocavitación.

En el capítulo 3, se presenta el arreglo experimental con el que se llevó a cabo la reducción de la fibra óptica por ataque químico y la fotodeposición de las nanopartículas metálicas en la fibra óptica reducida. Se describen los componentes utilizados que conforman el láser de alta ganancia. Se presenta la caracterización no lineal obtenidas de las fibra óptica reducidas. Por otra parte, se presenta el arreglo experimental del láser, empleando el fenómeno de termocavitación como mecanismo de switcheo, donde se empleó un hidrófono de fibra óptica para llevar a cabo la medición de la reflexión de luz producida por los cambios del índice de refracción en el líquido, posteriormente se realizó la caracterización de la amplitud y frecuencia de los pulsos de luz.

Finalmente en el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos del láser implementando el fenómeno de termocavitación como mecanismo de conmutación y el de la fibra óptica reducida con y sin nanopartículas fotodepositadas.

Capítulo 2

En este capítulo se muestran dos esquemas que muestran las partes que integran un láser Fabry-Perot y de fibra óptica anular. Además, se describe la teoría básica del láser en general y las partes que lo conforman. Finalmente se describe el fenómeno de termocavitación y las diferentes técnicas para generar microburbujas.

Marco teórico

2.1 Sistema láser

El láser (por sus siglas en inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es una fuente de radiación cuya distribución del haz emitido tiene un perfil gaussiano, que trabaja en la región visible del espectro y vecinos cercanos (UV, IR). El haz generado por éste tipo de fuente se ha usado como una herramienta que permite estudiar las propiedades de los materiales gracias a las características particulares que posee: monocromaticidad, coherencia y direccionalidad [28].

Un sistema láser está compuesto básicamente por tres partes: la cavidad, el medio activo y un mecanismo de bombeo. La cavidad es un resonador óptico clasificado en dos tipos: Fabry-Perot y en configuración de anillo/circular, cuya función principal es el de contener a los fotones. El medio activo es el medio de ganancia cuya función principal es el de amplificar la luz contenida dentro de la cavidad, éste material puede ser sólido, líquido o gaseoso. Adicionalmente, el mecanismo de bombeo es una fuente de radiación cuya función es el de excitar los átomos del medio activo, mediante energía eléctrica u óptica principalmente.

El láser Fabry-Perot está conformado por dos espejos que se encuentran colocados paralelamente, uno es reflejante y el otro es parcialmente reflejante. La función de ésta cavidad además de contener al medio activo es la de mantener a los fotones confinados entre los espejos, como se muestra en la 2.1 a).

El láser de fibra óptica en configuración de anillo esta conformado principalmente con dispositivos de fibra óptica: un multiplexor, un medio activo y un acoplador de salida. El medio activo es una fibra óptica dopada con tierras raras por ejemplo el erbio, iterbio, entre otro. Éste tipo de arreglo emplea una fuente de bombeo óptico para estimular a los electrones del medio activo generando fotones. Éstos fotones generados se encontrarán confinados a lo largo de la cavidad, como se muestra en la 2.1 b).

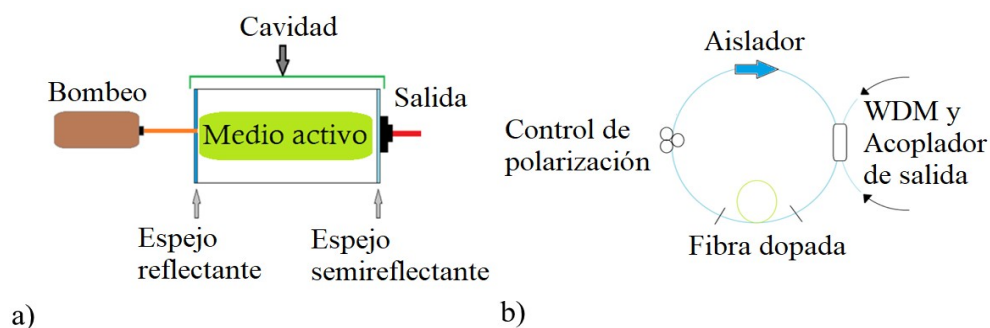


Figura 2.1. a) Láser de cavidad Fabry-Perot, b) Láser de fibra óptica configuración de anillo [29].

El medio activo es un material empleado como medio de amplificación, formado por átomos en cuyos niveles de energía llevan a cabo los procesos de absorción, emisión estimulada y emisión espontánea. El proceso de absorción ocurre cuando un electrón pasa de un nivel base a un nivel excitado, como resultado de la energía suministrada por el mecanismo de bombeo. Como se describe en la figura 2.2.

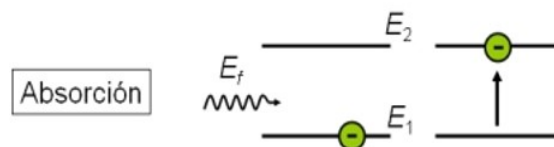


Figura 2.2. Proceso de absorción de energía en un sistema de dos niveles [30].

El tiempo en que el electrón se encuentra en estado excitado es relativamente muy corto, provocando que el electrón pase rápidamente del nivel excitado al nivel base. La energía liberada del electrón puede ser de dos formas: en forma de calor o fotones. En el caso de que la energía liberada sea en forma de fotón, esta energía puede liberarse mediante emisión espontánea o estimulada. La emisión espontánea ocurre cuando el electrón decae del nivel excitado al nivel base, ver figura 2.3.

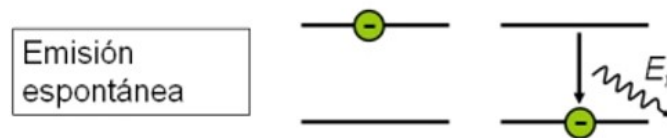


Figura 2.3. Proceso de emisión espontánea en un sistema de dos niveles [30].

Mientras que, la emisión estimulada ocurre cuando el electrón decae del nivel de excitación al nivel base provocado por un fotón incidente, ver figura 2.4.

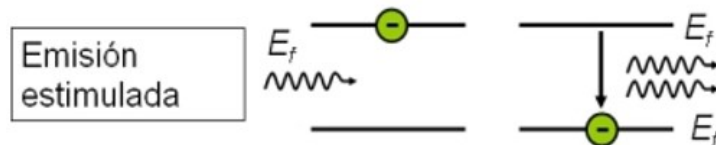


Figura 2.4. Proceso de emisión estimulada en un sistema de dos niveles [30].

Los fotones liberados por los electrones, son confinados en la cavidad óptica, puede ser entre espejos o con fibra óptica. En el caso de confinar los fotones entre dos espejos, los fotones son reflejados totalmente en un espejo, mientras que en el otro espejo la mayoría de los fotones son reflejados y solo una porción de fotones lo atraviesan emitiendo luz. Por otro lado, cuando los fotones se confinan en fibra óptica utilizando un arreglo en configuración circular, la señal se propaga dentro del arreglo y liberada por medio de un acoplador. El haz de luz generado posee características únicas como es la monocromaticidad, donde el haz láser emitido es de un color definido. La coherencia, donde los fotones emitidos tienen

la misma amplitud y periodo del haz incidente suministrado por el bombeo óptico. Finalmente direccionalidad, donde el haz láser no se diverge a medida que se propaga a grandes distancias como ocurre con el resto de los haces luminosos.

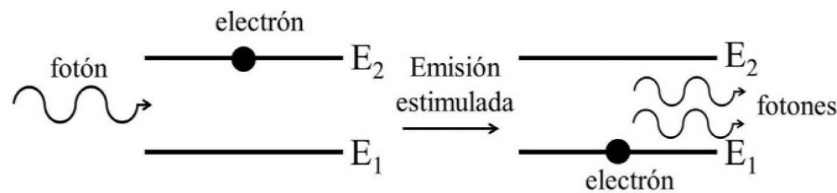


Figura 2.5. Procesos de inversión de población en un sistema de dos niveles [30].

La inversión de población, se presenta al aplicar el bombeo adecuado a un medio activo con niveles de energía metaestables, es decir, con niveles de energía en los cuales los electrones tardan un tiempo relativamente largo en desexcitarse por emisión la espontánea, favoreciendo la acumulación de electrones en el estado de energía excitado.

2.2 Láseres pulsados

El láser está conformado principalmente por 3 partes descritos en la sección 2.1. Este sistema generalmente tiene una emisión continua, mientras se mantenga constante el sistema de bombeo. Por otro lado, existen sistemas láseres que tienen una emisión del haz en forma pulsada, para obtener esta emisión se utiliza un mecanismo de conmutación que es empleado dentro de la cavidad láser, cuya función es bloquear el paso de los fotones en lapsos de tiempos relativamente cortos. Dentro de los mecanismos de conmutación utilizados se encuentran el modulador electroóptico, el cual, es utilizado comúnmente en la salida del láser que posee un obturador que abre y cierra, permitiendo bloquear o dar paso a los fotones que pasan a través del dispositivo. El modulador acustoóptico es otro mecanismo utilizado, que se basa en el control de radio frecuencia (RF) aplicada el cual es colocado dentro de la cavidad del láser de fibra óptica [29].

Por otra parte, existen mecanismos que hacen uso de nano materiales para la generación de pulsos de luz en un láser, estos mecanismos pueden generar pulsos con tiempos de ns, ps e inclusive fs. Se basan en el estudio de los efectos ópticos no lineales.

2.3 Efecto no lineal: Absorbedor saturable

La óptica no lineal (ONL), se encarga del estudio de los efectos que se producen por la interacción entre campos electromagnéticos que pasan a través de un material para producir nuevos efectos, modificando su fase, su amplitud y su frecuencia. Estos efectos no lineales se producen en el momento en que un material es sometido a un haz de luz muy intenso, provocando la modificación de la respuesta del material. Así mismo, los efectos no lineales se encuentran clasificados en segundo y tercer orden. De los efectos de tercer orden, se encuentran: la generación de tercer armónico, mezcla de ondas: suma y diferencias de frecuencias, efecto electroóptico Pockels, entre otros. Por otro lado, el efecto electroóptico pockels se subclasifica en efecto Kerr y absorbedor saturable [31].

El efecto de absorbedor saturable pertenece al grupo de los efectos no lineales de tercer orden, también conocido como conmutador óptico. Es utilizado como un interruptor en comunicaciones ópticas. La ecuación que demuestra el efecto no lineal de absorbedor saturable es la siguiente:

$$\alpha = \alpha_0 / (1 + I/I_s); \quad (2.1)$$

donde α_0 , denota el coeficiente de absorción, I el valor local de la intensidad e I_s la intensidad de saturación.

La figura 2.6 muestra una señal de salida que muestra la dependencia de la intensidad en función de la transmisión, presentando una curva que va incrementando exponencialmente hasta llegar a un punto donde se mantiene constante.

La intensidad es calculada por la siguiente ecuación:

$$I = I_s / I_E; \quad (2.2)$$

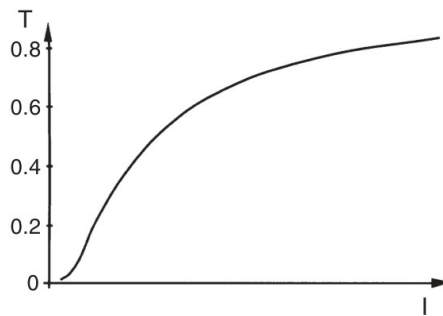


Figura 2.6. Simulación numérica de transmisión contra intensidad.

donde I_E es la intensidad de entrada e I_S es la intensidad de salida.

La transmisión es calculada empleando la siguiente ecuación:

$$T = \frac{P}{Af\Delta t}; \quad (2.3)$$

donde P , es la potencia máxima obtenida a la salida de la muestra, A corresponde al área en que el haz láser atraviesa a la misma, f y Δt son variables de frecuencia y tiempo en que el haz de luz pasa por la muestra.

2.4 Onda evanescente

La onda evanescente es un fenómeno que ha sido utilizado en la investigación, principalmente en el área de la óptica y biológica. Este fenómeno se genera en el límite de la interfase entre dos medios donde la luz es reflejada, la onda electromagnética que se propaga dentro del núcleo, de manera acotada se extiende una parte al revestimiento. Matemáticamente, las onda evanescente puede ser caracterizada por un vector de onda, donde uno o más de los componentes del vector tienen valores imaginarios. El hecho de que este vector posea componentes imaginarios, implica que puede tener una magnitud menor que sus componentes reales. Si el ángulo de incidencia excede el ángulo crítico, entonces el vector de onda de la onda transmitida tiene la forma:

$$k = k_y y + k_x x = i\alpha y + \beta x, \quad (2.4)$$

Que representa una onda evanescente, donde el componente y es imaginario. Si la polarización de la luz es perpendicular al plano de incidencia, el campo eléctrico de las ondas incidente, reflejada o transmitida puede expresarse como:

$$E(r, t) = \text{Re} \{ E(r) e^{i\omega T} \} z, \quad (2.5)$$

Donde el vector z es unitario. Sustituyendo, el vector k es para la onda transmitida:

$$E(r) = E_0 e^{-i(i\alpha y + \beta x)} = E_0 e^{\alpha y - i\beta x}, \quad (2.6)$$

Donde α es la atenuación constante y β es la propagación constante.

En el estudio realizado por V. Romero-García y colaboradores reportaron de forma teórica y experimental la conexión evanescente que se presentan entre bandas de propagación en materiales acústicos periódicos. Las complejas estructuras de banda obtenidas al resolver el problema revelaron una interpretación completa de las propiedades de propagación de estos sistemas [32]. Otro estudio realizado utilizando las ondas evanescentes fue por D. Voigt y colaboradores, quienes reportaron una observación que realizaron de la presión de radiación, efectuada sobre átomos fríos de rubidio mientras rebotan en un espejo atómico de onda evanescente. Los autores analizaron la presión de radiación mediante la imagen del movimiento de los átomos después del rebote [33]. Por otro lado, dentro del área biológica se han realizado biosensores a base de fibra óptica cónica, haciendo uso del fenómeno de onda evanescente han reportado trabajos interesantes, por ejemplo: MI Zibaii y colaboradores reportaron un biosensor realizado con fibra óptica, el cual posee las propiedades de ser sensible y selectivo para la detección *in vitro* de la DA (dopamina) en presencia de otros NT. El principio de funcionamiento del biosensor fue que al haber un cambio de aptámero de unión a dopamina de (DBA) conduce al cambio del índice de refracción alrededor de la superficie de fibra cónica [34]. Algunos investigadores tratan de diseñar nuevos biosensores, tal es el caso de Ranjeet Dwivedi y colaboradores, donde ellos proponen realizar un biosensor compacto y altamente sensible basado en el acoplamiento

direccional entre dos guías de onda de cresta debajo de la cubierta metálica [35]. También se han realizado sensores plasmónicos a base de fibra de vidrio altamente sensible, donde el campo evanescente interactúa con el medio que rodea al sensor, obteniendo una respuesta muy alta debido a la propiedad de la fibra de vidrio.

2.5 Cavitación

La cavitación puede ser definida como la formación, crecimiento y colapso de una burbuja de vapor dentro de un líquido. En 1893 Barnaby reportó la formación de burbujas producidas por el lanzamiento de los torpedos de un barco [38]. En 1954 Reynolds, quien fue el primer científico en estudiar la cavitación experimentalmente, realizó el estudio de la cavitación formada por un flujo de agua a través de tubos reducidos [39].

De acuerdo a Lautherborn, la cavitación puede ser clasificada en cuatro tipos dependiendo del mecanismo de generación (ver figura 2.7): 1) Cavitación hidrodinámica, la cual es producida por las variaciones de velocidad del flujo del líquido debido al sistema hidráulico, 2) Cavitación acústica, la cual es generada por la propagación y enfocamiento de ondas de presión dentro de resonadores acústicos, los cuales contienen agua, 3) Cavitación por partículas, la cual es generada por el flujo de partículas muy energéticas a través de un líquido, provocando el rompimiento para formar burbujas de vapor y por último 4) cavitación óptica, la cual es generalmente producida por láseres pulsados dentro de una cubeta llena con agua. La cavitación inducida por láser es producida debido a que la intensidad en el foco es tan alta, que la absorción no lineal conduce a la formación de plasma, la cual puede ser rápidamente calentada por el haz láser produciendo la vaporización explosiva del agua, generando una burbuja de vapor la cual se expande y posteriormente colapsa, emitiendo una fuerte onda de choque [40]. En la figura 2.8, se muestra un arreglo típico para generar cavitación óptica, donde se utiliza un láser pulsado Nd:YAG a una longitud de onda de 1064 nm. La formación y evolución de la burbuja fue grabada empleando dos cámaras de alta velocidad para obtener imágenes de la parte baja y lateral del recipiente.

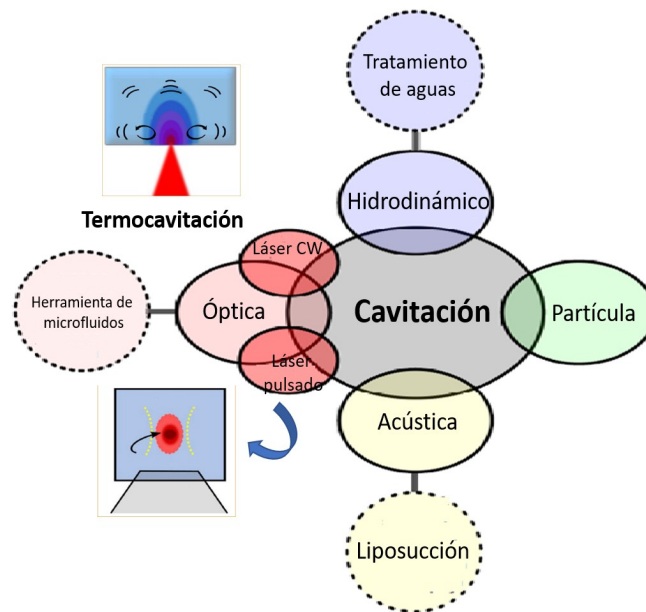


Figura 2.7. Diferentes métodos de generación de cavitación [37].

Cabe mencionar que la formación de burbujas de vapor se puede presentar a partir de la transición de fase de líquido a gaseoso, pasando por el punto de ebullición ($T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=101\text{ KPa}$), el cual ocurre al incrementar la temperatura (ver figura 2.9). Sin embargo, se puede formar una burbuja de vapor cuando la presión baja y la temperatura se mantiene constante, este cambio de fase de líquido a vapor es menos común y se denomina cavitación [42]. En la figura 2.9, se muestra el diagrama de fase del agua con presión P en función de la temperatura T . El punto amarillo indica la temperatura a presión ambiente ($T=25$ y $P_a=101\text{ KPa}$); el punto A representa el punto triplete del agua, donde se presenta el equilibrio del estado del agua sólido, líquido y gaseoso. La línea AC, se le conoce como segmento binodal y es la que divide la fase líquida de la fase gaseosa. El segmento BCD, es nombrado espinodal y se divide en dos segmentos más, el primer segmento CD se conoce como espinodal y representa el límite metaestable en el que el vapor puede ser sub-enfriado y por último, el segmento BC el cual se conoce como línea del líquido espinodal y representa el límite del líquido metaestable donde el agua puede ser súper calentada. En la figura 2.9, se

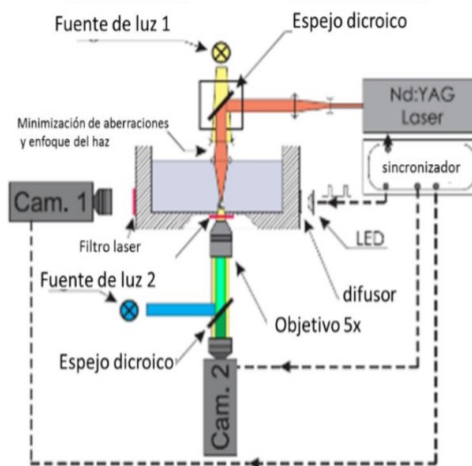


Figura 2.8. Primer arreglo experimental para obtener burbujas de termocavitación reportado por Rastapov y Sukhodolsky.

puede observar que los dos segmentos espinodales terminan en el punto crítico C, donde no hay distinción termodinámica entre las dos fases [43].

2.6 Fenómeno de termocavitación

El láser pulsado no es la única manera de producir cavitación óptica. Este también puede ser producido mediante un láser de onda continua y mediana potencia enfocado dentro de una solución altamente absorbente a la longitud de onda de operación. Este método de generación ha sido llamado termocavitación. En este proyecto de tesis, para generar burbujas termocavitación, el haz emitido debe ser fuertemente enfocado dentro de una cubeta la cual contiene nitrato de cobre disuelto en metanol, con el propósito de obtener una solución con un alto coeficiente de absorción a la longitud de onda utilizada (975 nm). El haz láser es fuertemente absorbido en los primeros 100 μm de espesor, calentando una pequeña porción del líquido (cerca de la interfase vidrio-solución) hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente 300 °C en un tiempo corto y sin pasar por el punto de ebullición [44]. Este proceso se le conoce como supercalentamiento, donde el líquido puede alcanzar su punto

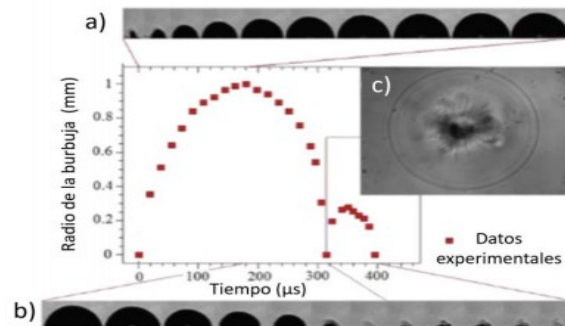


Figura 2.10. Evolución temporal de una burbuja de termocavitación. a) Crecimiento, b) colapso y c) emisión de la onda de choque [40].

amplitud, pero de menor frecuencia, contrario a esto, burbujas de menor tamaño generan ondas de choque de menor amplitud, pero con mayor frecuencia de generación.

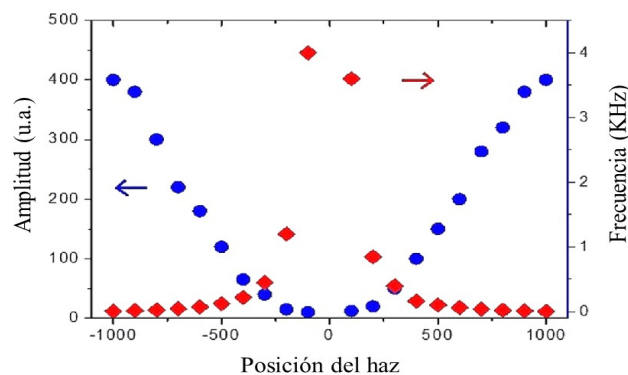


Figura 2.11. Frecuencia y amplitud de la onda de choque en función de la posición del foco del láser dentro de la solución [40]. La posición 0, indica que el foco del láser está justo en la interfase vidrio-solución.

La figura 2.12, muestra el promedio de la presión y el radio de la burbuja en función de la potencia del haz láser (dejando fija la posición del foco). En esta figura, es posible observar que ambas señales muestran dependencias similares con la potencia, es decir, entre mayor sea la potencia del haz láser menor es el tamaño de la burbuja y la amplitud de la onda de choque [46].

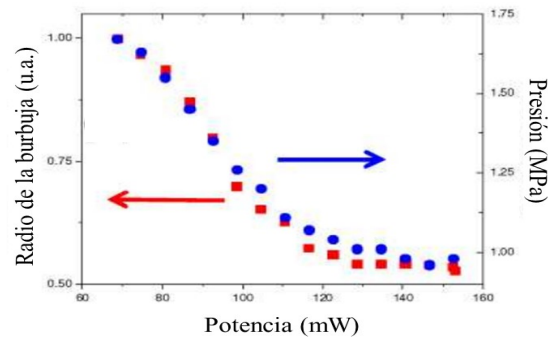


Figura 2.12. Frecuencia y amplitud de la onda de choque, generada con un láser de onda continua [41].

2.7 Principio de funcionamiento de un hidrófono de fibra óptica

Arnaud Arvengas y colaboradores implementaron un hidrófono de fibra óptica, el cual es ilustrado en la figura 2.13 [47]. En este arreglo experimental, ellos emplearon un diodo láser de pigtail (LD), con una potencia máxima de 400 mW y una longitud de onda de 808 nm. El diodo láser (LD) de onda continua fue conectado en una de las entradas de un acoplador de fibra óptica (FC) de 2x2 (AFS50 125Y). Un puerto fue sumergido en un recipiente con agua destilada (BD), para reducir la reflexión de la luz en éste puerto. La otra salida del acoplador es sumergido en un líquido, el cual puede ser cambiado por otro con el propósito de variar el índice de refracción de la solución. Estas variaciones del índice de refracción provocan una mayor o menor reflexión de la luz en la interfase vidrio-líquido (punta de la fibra óptica). La luz reflejada se propaga nuevamente dentro de la fibra óptica y pasa por el acoplador, hasta llegar al puerto donde está conectado un fotodetector (PD). La señal registrada por el fotodetector cuando la punta de la fibra óptica (OF) es sumergida en diferentes soluciones (figura 2.14).

El principio de funcionamiento del hidrófono de fibra óptica, se basa en la reflexión de la luz que se presenta en la interfase entre dos medios con índices de refracción diferentes. Lo cual puede ser explicado por el coeficiente de reflexión de Fresnel 47, dada por la siguiente ecuación:

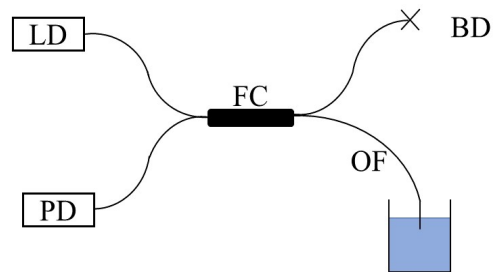


Figura 2.13. Arreglo experimental del hidrófono de fibra óptica [42].

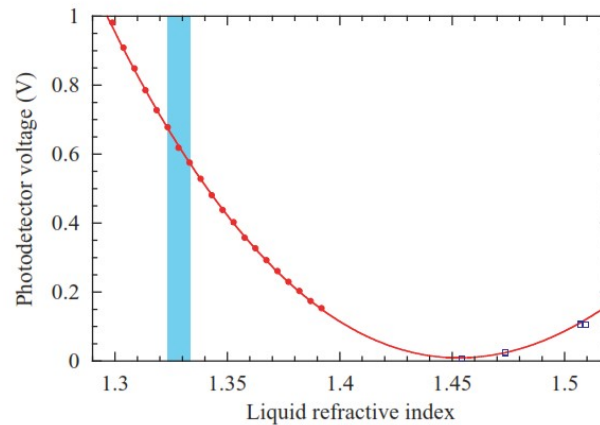


Figura 2.14. Datos obtenidos con el hidrófono de fibra óptica sumergido en diferentes soluciones.

$$R = \left(\frac{n_f - n_l}{n_f + n_l} \right)^2, \quad (2.7)$$

donde n_f es el índice de refracción de la fibra óptica y n_l es el índice de refracción del líquido. La potencia medida a la salida por el fotodetector está dada por la siguiente ecuación:

$$V = G \frac{I_0}{4} (R + S), \quad (2.8)$$

donde G es la capacidad de respuesta del fotodetector (PD), I_0 la intensidad diodo led (LD) y el factor 4 representa las veces que el haz láser pasa a través del acoplador. El

termino S , representa una señal parásita que puede originarse por defectos del acoplador, o por la terminal que no es utilizada. Cuando una onda acústica llega a la interfase líquido-vidrio, el índice de refracción del líquido (n_l) cambia ligeramente provocando cambios en la reflexión (R). Tanto n_l como R se modulan en el tiempo, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$n_l(t) = n_1^0 + \delta n_l(t), \quad (2.9)$$

$$R(t) = R_0 + S + \delta R(t), \quad (2.10)$$

donde n_1^0 es el índice de refracción del líquido y R_0 es la reflexión estática (sin perturbación).

Hasta el momento, en la literatura no se ha encontrado el uso del fenómeno de termocavitación (en especial la onda de choque), como un mecanismo de conmutación para la generación de pulsos de luz empleando un hidrófono de fibra óptica. Por lo cual, en este proyecto de tesis se propone implementar un láser pulsado de fibra óptica utilizando las ondas de choque generadas por el colapso de la burbuja de termocavitación.

Capítulo 3

Es este capítulo se presentan los arreglos experimentales y métodos utilizados para llevar a cabo el desarrollo de un láser pulsado empleando los dos diferentes mecanismos de conmutación mencionados anteriormente (absorbedor saturable y termocavitación).

Desarrollo experimental

3.1 Mecanismo de conmutación por absorbedor saturable

3.1.1 Reducción de la fibra óptica

El arreglo experimental utilizado con el que se llevó a cabo la reducción de la fibra óptica (taper), se muestra en la figura 3.1. Este arreglo está conformado por un diodo láser de onda continua (LDC205C) con una longitud de onda de operación de $\lambda = 1550$ nm y una potencia máxima de 50 mW, la salida del diodo láser fue empalmado a una de las puntas del taper, la otra punta del taper fue cortada, limpiada y colocada fijamente en la entrada que posee el medidor de potencia (PM100), fue utilizada una computadora con la que se capturaron datos. El ácido utilizado en este proyecto fue ácido fluorhídrico (HF) con una concentración 48-50%, por su característica principal de que corroe el vidrio. Posteriormente, un recipiente de plástico fue llenado lo suficiente con el HF hasta su totalidad.

El arreglo experimental se le suministró la máxima potencia del láser (50 mW) y fue sumergido el taper dentro del HF. Posteriormente, fue retirado en un tiempo de 41 minutos. Para este trabajo se manejó un taper con una reducción de $\sim 8 \mu m$ de diámetro, en la gráfica de la figura 3.2 muestra la dependencia que tiene el diámetro de la fibra óptica en función del tiempo. El tiempo se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$y = mx + b, \tag{3.11}$$

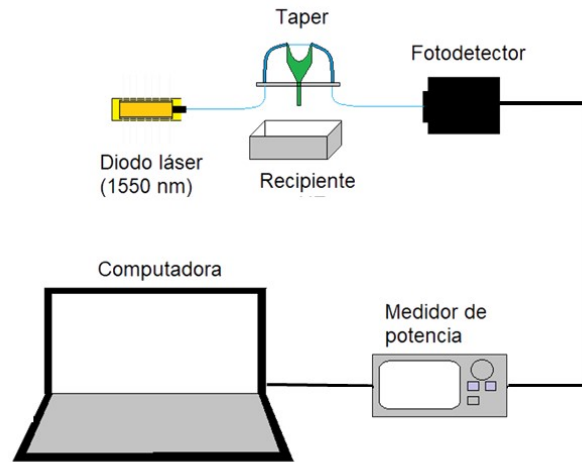


Figura 3.1. Arreglo experimental utilizado para llevar a cabo la reducción de la fibra óptica por ataque químico.

donde m es la pendiente, b es el valor del eje de las ordenadas y x es el valor de las abscisas, se sustituyeron las variables de la ecuación anterior quedando de la siguiente manera:

$$\Phi = mt + b, \quad (3.12)$$

donde Φ es el diámetro de la fibra óptica, t es el tiempo y b es el diámetro total de la fibra óptica.

Se utilizó agua tridestilada y solución piraña para enjuagar el taper después de retirarlo del HF. La solución piraña fue compuesto con 20 ml de ácido sulfúrico y 10 ml de peróxido cuya función fue el de remover los residuos adheridos en la fibra óptica. El taper fue sumergido en la solución piraña seguidamente de haber sido retirado del HF por ~ 3 s, finalmente, se sumergió en el agua tridestilada para terminar el enjuague.

La fotodeposición de las nanopartículas de zinc sobre la fibra óptica reducida se llevó a cabo utilizando el arreglo experimental con el que se realizó la reducción de la fibra óptica, cambiando el recipiente del HF por un recipiente con la solución de nanopartículas metálicas. La preparación de la solución de nanopartículas metálicas se llevó a cabo pesando 10 mg de nanopartículas de zinc disuelto en 8 ml de alcohol isopropílico.

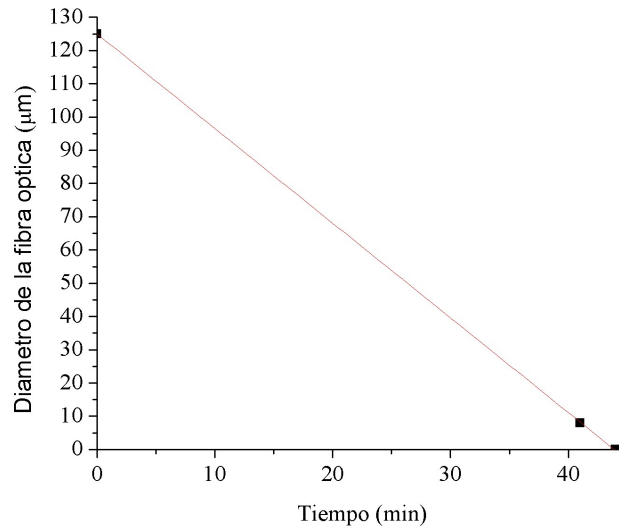


Figura 3.2. Demostración de la reducción de la fibra óptica en función del paso del tiempo.

Se le suministro una potencia de 50 mW del láser al arreglo experimental, posteriormente, se sumergió la fibra óptica reducida a la solución con nanopartículas. La fotodeposición de las nanopartículas en la fibra óptica reducida se realizó en tiempos de 1, 5 y 10 minutos. En cada tiempo de fotodeposición se llevó a cabo la caracterización no lineal.

3.1.2 Láser de alta ganancia

La caracterización no lineal se llevó a cabo utilizando un arreglo experimental de un láser de alta ganancia, este sistema está compuesto por EDFs, WDMs, circuladores ópticos, acopladores y rejillas de Bragg. Se utilizó un diodo láser modelo DFB DL-5335-VXS de la compañía OPTOWAY con una potencia de salida de 2 mW y una longitud de onda de 1550 nm. Este láser cuenta con una etapa de enfriamiento, el cual, es el medio por el que se lleva a cabo la selección de la longitud de onda. El controlador de corriente utilizado es un modelo LDC (Laser Diode Controller) 500 de la compañía THORLABS, se programó a 7 mA correspondientes a la corriente de operación del láser de señal. Este equipo permite proteger y limitar la corriente para descartar una posible sobrecarga. El controlador de tem-

peratura es un modelo TEC (Thermoelectric Temperature Controller) 2000 de la compañía THORLABS. Este controlador se programó a 5 °C, ya que en este rango de temperatura el láser emite a 1550 nm. Se utilizó un generador de pulsos modelo 6040 marca Universal Pulse Generator de la compañía BNC, opera en un rango de frecuencia comprendido entre 0.01 Hz a 100 MHz en el que se pueda operar la frecuencia y la amplitud. Los equipos con los que se estabilizó el láser de alta ganancia se muestran en la figura 3.3.



Figura 3.3. Sistema de estabilización del láser de alta ganancia. a) Control de temperatura, b) control de corriente y c) generador de pulsos.

El sistema de amplificación consiste en una EDF y un láser de bombeo de 980 nm. En este arreglo experimental se utiliza un diodo láser modelo PL980P330J de THORLABS, emite a una longitud de onda de 975 nm con una potencia de salida máxima de 330 mW, empleado como bombeo óptico para excitar las dos secciones de la fibra dopada con erbio que se usan como medio de amplificación. Se utiliza un láser de 980 nm modelo ITC 510 (Laser Diode Combi Controller) de la compañía THORLABS, cuya función es el de excitar las dos secciones del medio de ganancia. El medio de ganancia empleado en este arreglo fue fibra óptica monomodo dopada con erbio, utiliza dos secciones de 10 m de la compañía THORLABS y cada una está dopada en una proporción de 1000 ppm [46]. Esta fibra óptica es de silicio, en el núcleo se introdujeron iones de erbio en su fabricación, el medio activo que proporcionará la amplificación serán precisamente iones Er^{3+} . Las longitudes de onda de bombeo pueden ser de 980 o 1480 nm.

La señal de 1550 nm es introducida a las dos etapas de amplificación a través de un circulador óptico de tres puertos modelo 6015-3 de la compañía THORLABS, cuya función es el de guiar y dar paso a la señal que entra por uno de los puertos hacia el puerto siguiente, siguiendo el sentido de las manecillas del reloj. En el esquema de la figura 3.4 muestra como viaja la señal en este componente. Cuando la señal entra por el puerto 1 se direcciona al puerto 2, una vez que pasó por ese puerto es dirigida ahora al puerto 3, esta señal nunca puede regresar por el puerto anterior para evitar posibles reflexiones.

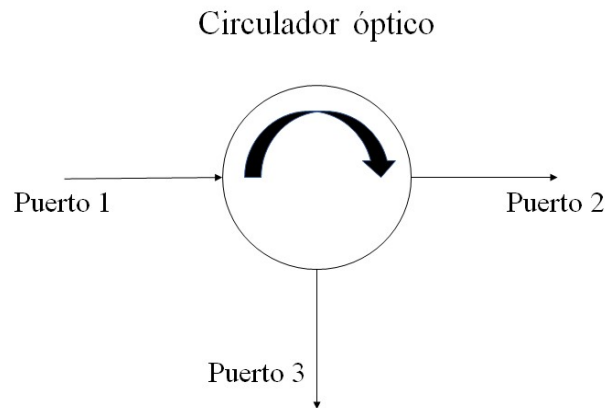


Figura 3.4. Diagrama del aislador óptico de tre puertos.

El multiplexor utilizado en el arreglo del láser de alta ganancia es un modelo WPN052407 de la compañía THORLABS, cuya función es el de combinar señales de diferentes longitudes de onda. Se utiliza una rejilla de Bragg modelo FOSS2CX6166 de la compañía AVENSYS, cuya función es el de llevar a cabo el filtrado y la reflexión de la longitud de onda de 1550 nm, en caso de que la longitud de onda sea distinta a la de reflexión de la rejilla, no habrá ninguna reflexión. Se utiliza un acoplador que puede distribuir la señal óptica de una fibra entre dos o más fibras, el acoplador utilizado es un 50/50 modelo CWD07080917 THORLABS. El acoplador 50/50 es usado para introducir el bombeo a ambas etapas de amplificación. En la figura 3.5 muestra la estructura interna de un acoplador.

La detección y visualización de los pulsos generados por el láser de alta ganancia se llevó a cabo utilizando un medidor de potencia y un osciloscopio. Se utilizó un medidor

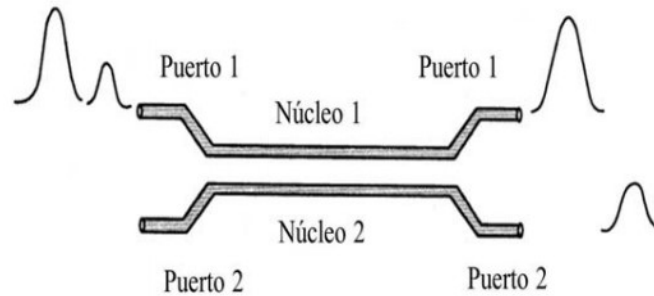


Figura 3.5. Estructura de un acoplador.

de potencia modelo PM100D de la compañía THORLABS que tiene un rango de medición en potencia es de 100 pW a 200 W. Este equipo utiliza un fotodetector modelo S145C de la compañía THORLABS que permite medir la potencia óptica a base de un detector de InGaAs que mide en un rango de longitud de onda de 800 a 1700 nm y mide la potencia desde 1 μ W hasta 3 W.

El osciloscopio modelo DPO3014 de la compañía TEKTRONIX, se utilizó para monitorear la señal de salida del láser cuando se lleve a cabo la caracterización. Se conecta al osciloscopio un fotodetector modelo DET01CFC de la compañía THORLABS, el cual, lleva a cabo la conversión de una señal óptica a señal eléctrica.

3.1.3 Caracterización de los pulsos generados por el láser de alta ganancia

En el laboratorio, se llevó a cabo la caracterización de la señal pulsada emitida por el generador de pulsos en tiempos de 10, 20, 50 y 100 ns. En la figura 3.6, muestra el perfil de los pulsos de salida generados por el generador de funciones en tiempos de 10, 20, 50 y 100 ns.

Posteriormente, el generador de funciones se conectó al láser de alta ganancia.

En la figura 3.7, se muestra el perfil del pulso obtenido a la salida del láser de alta ganancia en diferentes tiempos.

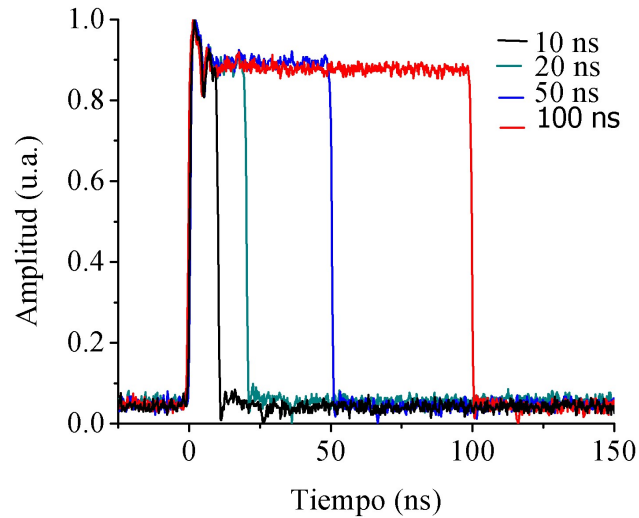


Figura 3.6. Perfil de pulsos en tiempos de 10, 20, 50 y 100 ns, emitidos por el generador de funciones.

En la figura 3.8, se muestra la comparación de los pulsos obtenidos a la salida del generador de funciones (línea en negro) y a la salida del arreglo del láser pulsado de alta ganancia (línea en rojo). En la gráfica a), se presenta la comparación del pulso en un tiempo de 10 ns, el perfil de la señal no presenta un gran cambio, conservaron la misma amplitud y el mismo ancho de pulso. En la gráfica b), la salida del pulso al inicio igualó la amplitud al de la señal de entrada pero bajó la amplitud a los 7 ns, las dos señales presentaron el mismo ancho temporal de 20 ns. En la gráfica c), el pulso de salida del arreglo presentó una inestabilidad en su amplitud, en el tiempo de 22 ns la continuación del pulso fue continuo. En la gráfica d), el pulso de salida se presentó más inestable, donde en el tiempo de 48 ns la continuación del pulso decayó en su amplitud de 0.85 a 0.6.

La inestabilidad de los pulsos obtenidos a la salida del láser pulsado de alta ganancia, es debido al empalme de los dispositivos ópticos que conforman al arreglo experimental [48].

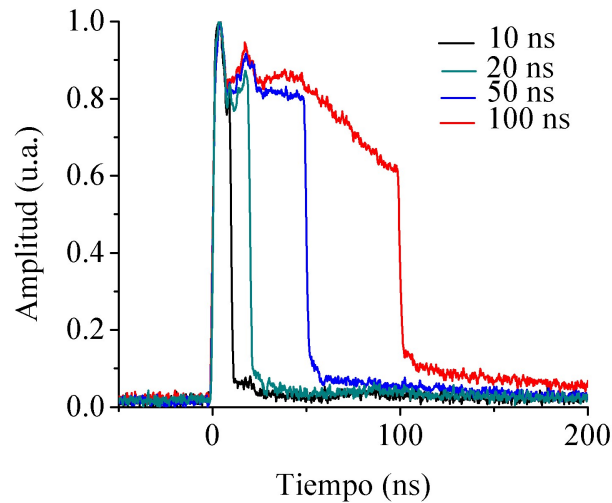


Figura 3.7. Perfil de los pulsos obtenidos a la salida del arreglo del láser de alta ganancia en tiempos de 10, 20, 50 y 100 ns.

3.1.4 Caracterización no lineal

La caracterización no lineal de la fibra óptica reducida y la fibra óptica reducida y fotodepositada con nanopartículas de zinc, se realizaron utilizando un láser pulsado de alta ganancia. El láser fue estabilizado introduciendo una frecuencia de 1 KHz con un ancho temporal de 10 ns por medio de los equipos antes mencionados. La caracterización no lineal se llevó a cabo empleando la técnica P-scan. Se empalmó la fibra óptica reducida a la salida del arreglo experimental del láser de alta ganancia, descrito en la sección 3.1.2, como se muestra en la figura 3.9, se estabilizó el equipo de control del láser de alta ganancia introduciendo una frecuencia de 1 KHz con un ancho temporal de 10 ns. con el que se obtuvo la siguiente respuesta. En la figura 3.10, muestra una transmisión a partir de 76 % a bajas intensidades y una saturación a 84 % para una irradiancia máxima de 1 GW/cm².

De igual forma, aplicando la técnica de caracterización anterior se fue caracterizando la fibra óptica reducida y fotodepositada con nanopartículas de zinc. La caracterización no lineal se realizó por cada tiempo de fotodeposición de las nanopartículas de zinc. Los tiempos de fotodeposición en la fibra óptica reducida fueron en 1, y 10 minutos.

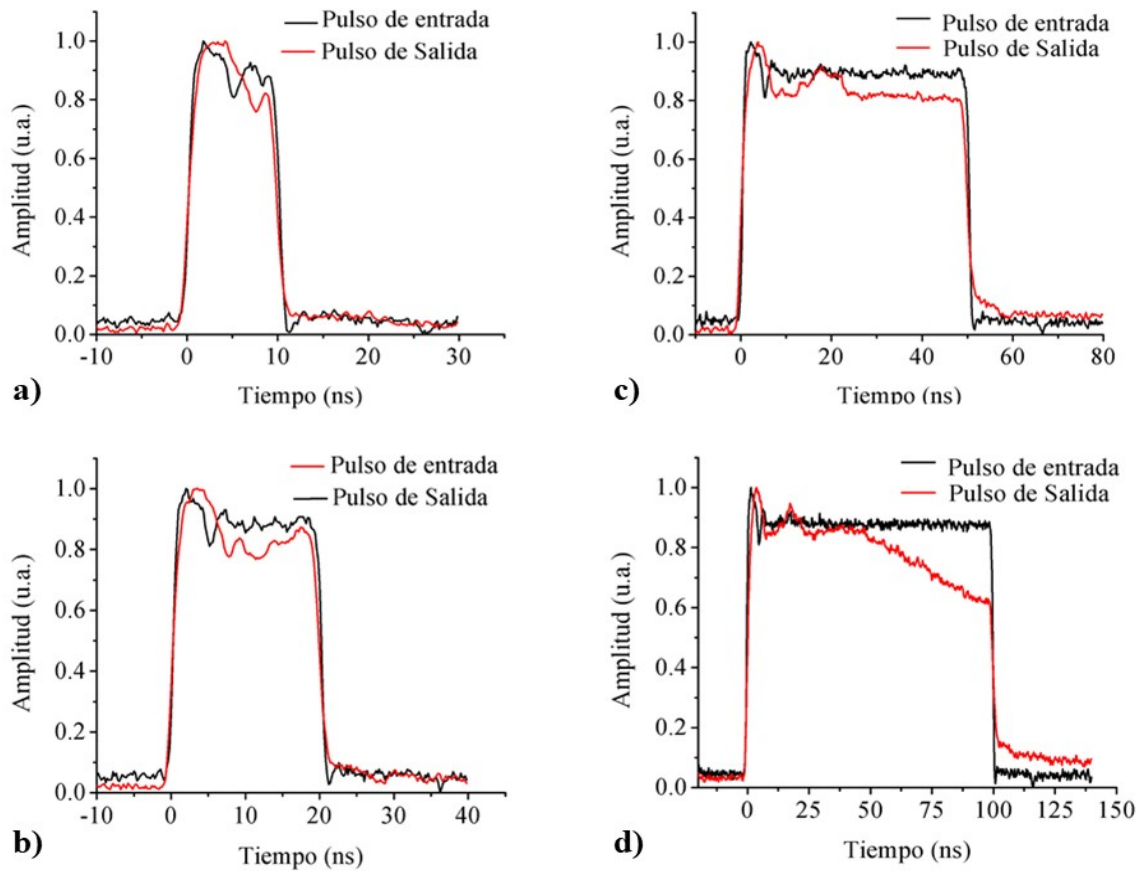


Figura 3.8. Comparación del perfil del pulso obtenido a la salida del generador de funciones y a la salida del arreglo del láser de alta ganancia.

El resultado de la caracterización no lineal reveló diferentes respuestas para cada tiempo de fotodeposición en la sección reducida de la fibra óptica. En la figura 3.11, se muestran las gráficas con los resultados donde se presenta la dependencia de la transmisión en función de la irradiancia. En la gráficas de la figura 3.11, se observó que se presentaron dos efectos no lineales diferentes, el primer efecto no lineal, se presenta a bajas intensidades, donde la transmisión tiende a disminuir a medida que la irradiancia aumenta, el cual es conocido como absorcion de dos fotones (TPA). El segundo efecto no lineal se hace presente al ir aumentando la intensidad, la transmisión tiende a incrementar a medida que la irradiancia aumenta, el cual es conocido como absorbedor saturable.

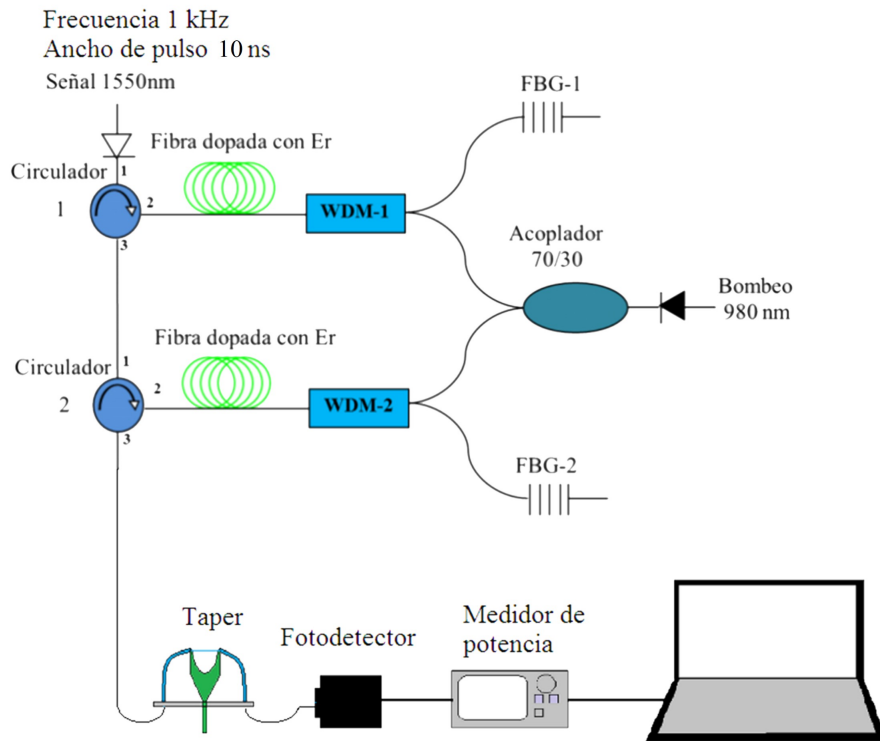


Figura 3.9. Arreglo para caracterizar la fibra óptica reducida.

En este caso, este trabajo es enfocado en el efecto no lineal de absorción saturable. En la gráfica a) de la figura 3.11, que corresponde a 1 minuto de fotodeposición de ZnNP's en la sección reducida de la fibra óptica, el efecto no lineal de absorción saturable comienza a hacerse presente a una irradiancia de $\sim 237 \text{ MW/cm}^2$, el dispositivo presentó una irradiancia de saturación de $\sim 780 \text{ MW/cm}^2$.

En la gráfica b), se observó que el efecto no lineal de absorción saturable para el taper fotodepositado con ZnNP's en un tiempo de 5 minutos, inicia a partir de una irradiancia de $\sim 310 \text{ MW/cm}^2$, este dispositivo presentó una irradiancia de saturación de $\sim 900 \text{ MW/cm}^2$. Por último, en la gráfica c) se presenta el resultado obtenido del

Los resultados de la caracterización no lineal del taper con una fotodeposición de 10 minutos, el efecto de absorción saturable comienza a presentarse con una irradiancia de $\sim 390 \text{ MW/cm}^2$ y una irradiancia de saturación de $\sim 790 \text{ MW/cm}^2$.

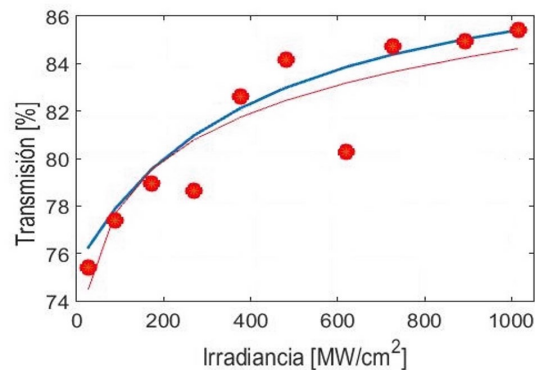


Figura 3.10. Respuesta obtenida a la salida de la fibra óptica reducida.

De estos resultados se observó que hay un desplazamiento del punto en que la irradiancia indica el comienzo el efecto no lineal de absorción saturable a medida que incrementa el tiempo de la fotodeposición de las ZnNP's en la sección reducida de la fibra óptica.

3.2 Implementación del láser pulsado

Se utilizó el arreglo experimental de un láser de fibra óptica. Este sistema fue bombeado con un diodo láser (LD) (LDC 205C) de 980 nm a través de un multiplexor de división de onda (WDM) (NPM07000165). Se utilizó 12 m de fibra óptica monomodo dopada con erbio como medio de ganancia, obteniendo a la salida un haz con emisión a 1550 nm. Para ajustar la polarización del láser de bombeo se utilizó un control de polarización (FPC030). Posteriormente, un aislador (M-11/81202003) fue utilizado para hacer unidireccional la propagación del haz láser y evitar alguna reflexión de regreso. La salida del aislador fue empalmada a una de las puntas de la fibra óptica reducida y fotodepositada con nanopartículas de zinc, la otra punta fue emplamada al acoplador (CWD07014557) para cerrar el sistema láser. El acoplador utilizado fue un 90/10, lo cual significa que el 10 % de la potencia contenida sale del sistema láser y el 90 % de la potencia se queda confinada en la cavidad láser (ver figura 3.12).

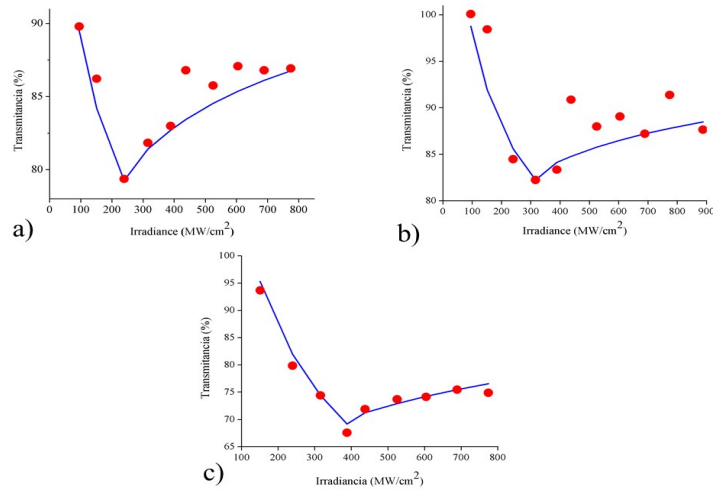


Figura 3.11. Caracterización no lineal a) fotodeposición en 1 minuto, b) fotodeposición en 5 minutos.

3.3 Mecanismo de conmutación mediante termocavitación

3.3.1 Arreglo experimental para generar burbujas de termocavitación

El arreglo experimental utilizado para la generación de burbujas de termocavitación se muestra en la figura 3.13. Este arreglo está armado con un láser de onda continua (BWF1-975-450-E) con una longitud de onda de operación de $\lambda = 975 \text{ nm}$. El haz láser fue colimado y enfocado empleando un objetivo de microscopio ($f = 5 \text{ mm}$) dentro de una cubeta con una solución altamente absorbente. La solución utilizada en este proyecto fue una solución saturada de nitrato de cobre (CuNO_4) disuelto en 10 ml de agua tridestilada, obteniendo un coeficiente de absorción ($\alpha = \sim 135 \text{ cm}^{-1}$) para 975 nm. Posteriormente, esta solución fue diluida en metanol a una proporción 50/50. La física involucrada en la generación de burbujas de termocavitación empleando este arreglo experimental, fue descrito anteriormente en la sección 2.6.

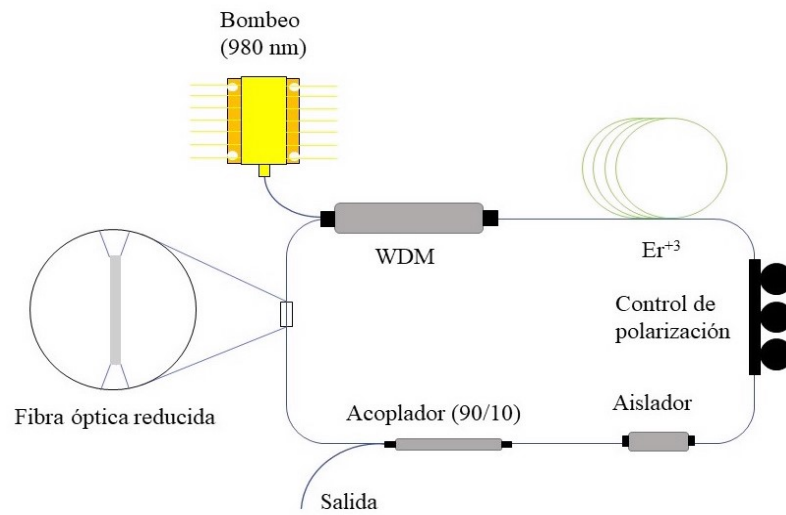


Figura 3.12. Arreglo experimental de un láser de FO en configuración de anillo.

3.3.2 Arreglo experimental para generar pulsos de luz

Para llevar a cabo la generación de pulsos de luz, se utilizó el arreglo experimental de un láser de fibra óptica en configuración anular. Este sistema fue bombeado con un diodo láser (LDC 205C) de 980 nm a través de un multiplexor de división de onda (WDM) (NPM07000165). Se utilizó 12 m de fibra óptica monomodo dopada con erbio como medio de ganancia, obteniendo a la salida un haz de emisión a 1550 nm. Para ajustar la polarización del láser de bombeo, se utilizó un control de polarización (FPC030). Posteriormente, un aislador (M-11/81202003) fue utilizado para hacer unidireccional la propagación del haz láser y evitar alguna reflexión de regreso. El arreglo experimental para generar burbujas de termocavitación (figura 3.13), fue acoplado al sistema láser de fibra óptica empleando un circulador de tres puertos (S/N:A8038188). La salida del aislador fue empalmado al puerto 1 del acoplador; la punta de la fibra óptica (previamente cortada y limpia) del puerto 2 fue sumergido a la cubeta que contiene la solución de nitrato de cobre; el puerto 3, fue conectado a un acoplador (CWD07014557) para cerrar el sistema láser. El acoplador utilizado fue un 90/10, lo cual significa que el 10 % de la potencia contenida sale

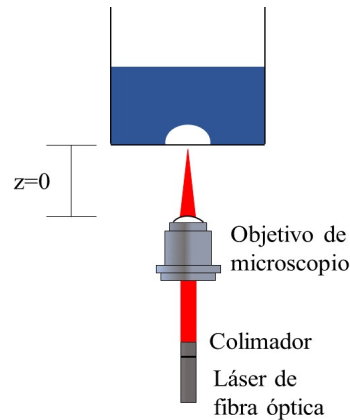


Figura 3.13. Arreglo experimental utilizado para generar burbujas de termocavitación.

del sistema láser y el 90 % de la potencia se queda confinada en la cavidad láser (ver figura 3.14).

En el arreglo experimental (figura 3.14), el haz láser entra por el puerto 1 y pasa a través del acoplador para salir por el puerto 2. En este puerto, la punta de la fibra óptica es sumergida dentro de la cubeta que contiene la solución de nitrato de cobre. Cuando la burbuja de termocavitación colapsa, emite una onda acústica que se propaga a través de la solución hasta llegar a la punta de la fibra óptica, como se observa en la figura 3.15. Cada vez que la onda acústica llega a la interfase vidrio-solución, provoca que una pequeña cantidad de luz sea reflejada debido a un ligero cambio en el índice de refracción de la solución, provocado por la alta amplitud de la onda acústica (cambio de la densidad de la solución), como fue descrito en la sección 2.7. La luz reflejada en el interior de la fibra óptica entra de nuevo al circulador por el puerto 2 y sale por el puerto 3, el cual fue conectado a un fotodetector para detectar los pulsos de luz y ser medidos en un osciloscopio. En la siguiente sección, se presentan los pulsos obtenidos con este arreglo experimental.

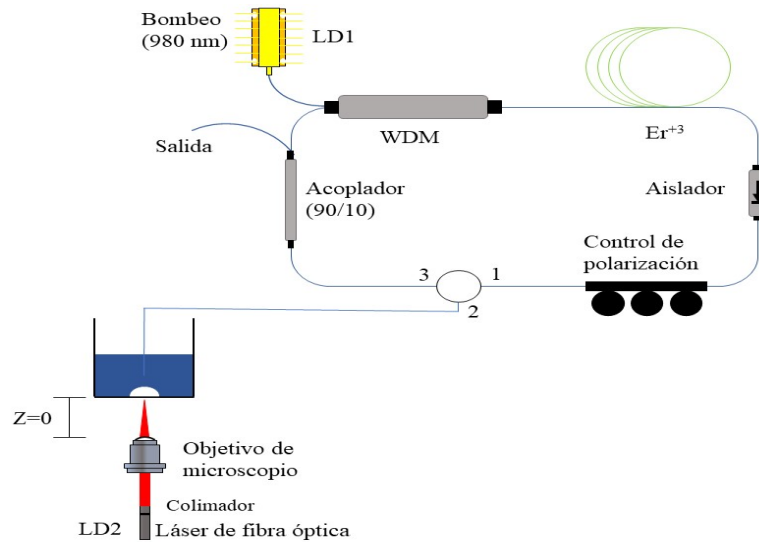


Figura 3.14. Arreglo experimental con el que se llevó a cabo la generación de pulsos de luz.

Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos de la generación de pulsos de luz empleando dos diferentes mecanismos de switcheo. En la sección 4.1.1, se presentan los resultados de la generación de pulsos de luz incorporando la fibra óptica reducida en el arreglo del láser de fibra óptica en configuración circular. En la sección 4.1.2, se presentan los resultados obtenidos de la generación de pulsos de luz empleando la fibra óptica reducida y fotodepositada con nanopartículas de zinc sobre la superficie de la fibra óptica (sólo en la sección reducida). Por último, en la sección 4.2 se muestran los resultados obtenidos empleando el fenómeno de termocavitación en láser de fibra óptica en configuración circular.

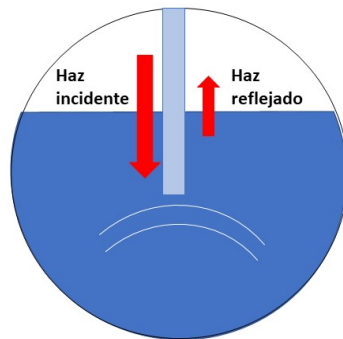


Figura 3.15. Reflexión del haz de luz incidente, provocado por el cambio de índice de refracción dentro de la solución.

4.1 Pulsos de luz generados por un absorbedor saturable

4.1.1 Fibra óptica reducida

La generación de pulso de luz se logró empleando una fibra óptica reducida como mecanismos de conmutación, fue conectado dentro de la cavidad del arreglo experimental del láser de fibra óptica en configuración de anillo, como se muestra en la figura 3.12. La caracterización de los pulsos de luz a la salida del láser se llevó a cabo utilizando un osciloscopio con el que se obtuvo el tren de pulsos como se muestra en la figura 4.1, así también se utilizó el analizador de espectros ópticos con el que se obtuvo el espectro de emisión.

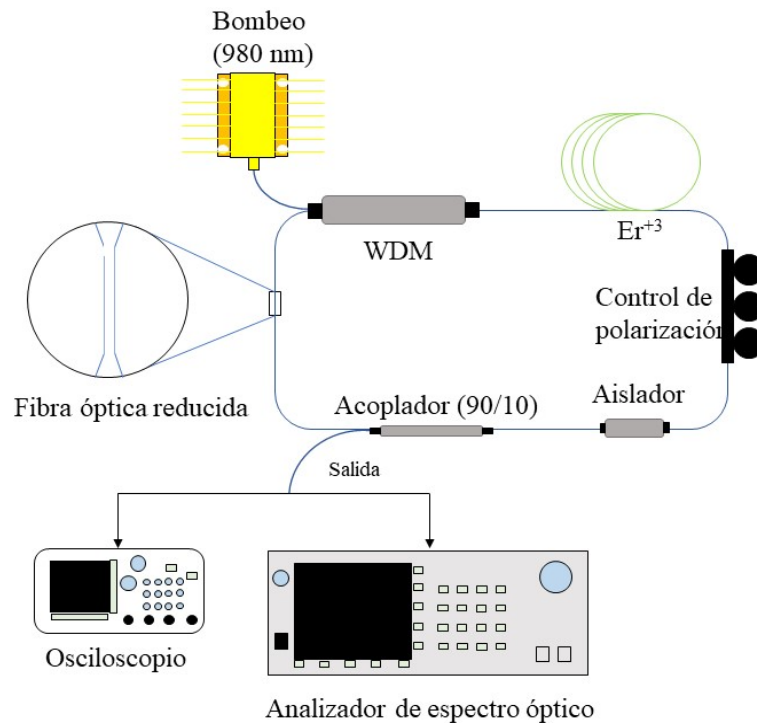


Figura 4.1. Diagrama de la caracterización realizada con el osciloscopio y el analizador de espectros óptico.

La salida del láser de fibra óptica se conectó al osciloscopio por medio de un fotodetector, se aumentó la potencia del láser de bombeo hasta 399 mW, obteniendo un tren de pulsos como se muestra en la figura 4.2, cuyo ancho de pulso fue de 4 ns, se obtuvo una frecuencia de repetición de 8.3 MHz y una potencia de salida de 1.5 mW.

La caracterización del espectro del láser se llevó a cabo utilizando el analizador de espectros óptico. Se observó que al ir incrementando la potencia de bombeo se presentaron espectros con picos altos que correspondían a diferentes longitudes de onda. La gráfica de la figura 4.3, muestra los espectros obtenidos al ir incrementando la potencia de bombeo. Con una potencia de 40 mW de bombeo se obtuvo un espectro con un ancho espectral de va de 1588 a 1598, donde sobre salen tres picos, observandolo de izquierda a derecha, el primer pico corresponde a una $\lambda = 1592 \text{ nm}$, el segundo pico corresponde a una $\lambda = 1592.8 \text{ nm}$ y el pico mas alto corresponde a una $\lambda = 1593 \text{ nm}$. Después, se incrementó la

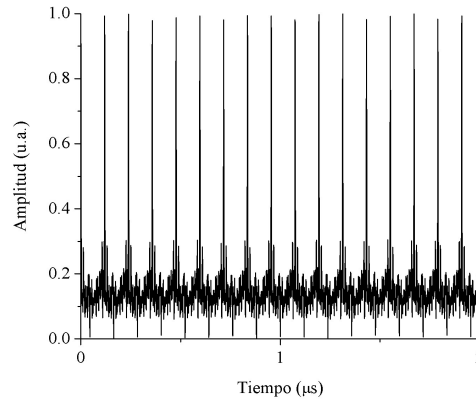


Figura 4.2. Tren de pulsos obtenidos con el osciloscopio a la salida del arreglo experimental de láser de fibra óptica anular.

potencia de bombeo a 49 mW, nuevamente se presentaron tres picos altos, observandolos de izquierda a derecha, el primer pico corresponde a una $\lambda = 1592 \text{ nm}$, el segundo pico con menor amplitud corresponde a una $\lambda = 1592.7 \text{ nm}$ y el tercer pico corresponde a una $\lambda = 1593 \text{ nm}$. Por otra parte, se observó que al incrementar la potencia de bombeo de 62 mW a 87 mW, se presentaron cuatro picos correspondientes a una $\lambda = 1591 \text{ nm}$, $\lambda = 1592 \text{ nm}$, $\lambda = 1592.8 \text{ nm}$ y $\lambda = 1593 \text{ nm}$, sólo el tercer pico varió en amplitud.

4.1.2 Fibra óptica reducida y fotodepositada con nanopartículas de zinc

Ademas, se implementó un láser pulsado utilizando la fibra óptica reducida y fotodepositada con ZnNP como mecanismo de conmutación. El mecanismo fue empalmado dentro de la cavidad del arreglo del láser de fibra óptica en configuración de anillo. La fibra óptica reducida fue fotodepositada con las nanopartículas metálicas en un tiempo de 1 minuto, la salida del arreglo del láser se conectó al osciloscopio con el que se obtuvo el tren de pulsos, como se muestra en la figura 4.4, se obtuvo una frecuencia de generación de pulsos de 8.5 MHz.

Utilizando el analizador de espectros óptico se obtuvo el espectro de emisión del láser pulsado, como se muestra en la gráfica de la figura 4.5.

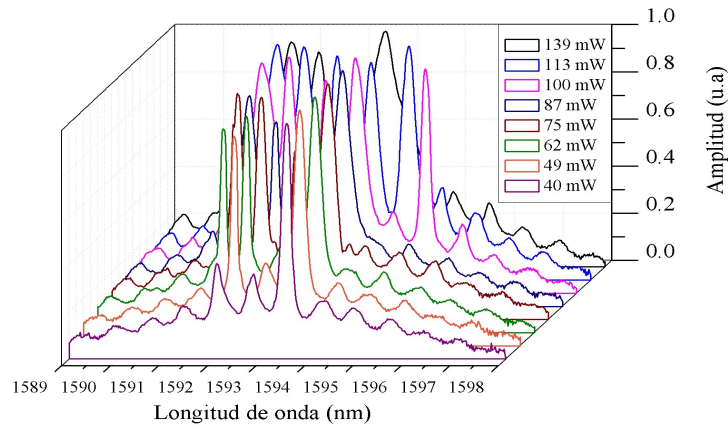


Figura 4.3. Al ir incrementando la potencia de bombeo se generaban picos altos con diferentes longitudes de onda.

En esta gráfica, el espectro presenta un ancho espectral de 1590 a 1600 nm, donde se observaron seis picos altos que pertenecen a cada uno una longitud de onda diferente, teniendo un pico central que sobre sale de los demás perteneciente a 1596 nm, el láser tuvo una potencia de salida de 2 mW.

Por último, empleando la fibra óptica fotodepositada con ZnNP's en un tiempo de 10 minutos, se obtuvo un tren de pulsos que muestra en la figura 4.6, cuya frecuencia de generación de pulsos fue de 8.57 MHz y una potencia de salida de 3.5 mW. Se realizó la caracterización del espectro por medio del analizador de espectros óptico, en la figura 4.7, se presenta el espectro obtenido a la salida del arreglo del láser de fibra óptica, mostrando un ancho espectral que va desde 1575nm a 1625 nm, con un pico central alto que corresponde a una longitud de onda de 1603 nm,.

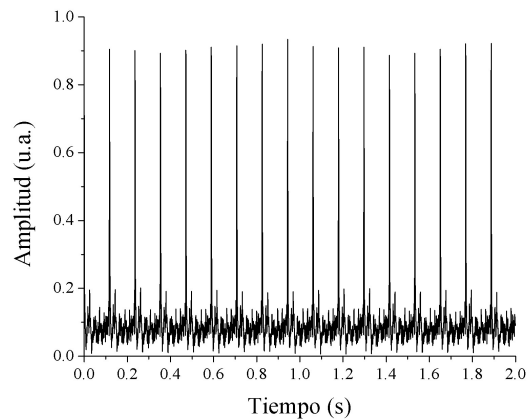


Figura 4.4. Tren de pulsos obtenido con el osciloscopio, empleando la fibra óptica reducida y fotodepositada en un tiempo de 1 minuto.

4.2 Pulsos de luz generados mediante termocavitación: amplitud y frecuencia

En esta sección, se muestra una caracterización de los pulsos de luz generados por el fenómeno de termocavitación empleando el arreglo experimental descrito en la figura 3.2. En este arreglo experimental la amplitud y la frecuencia de los pulsos de luz pueden ser controlados variando dos parámetros importantes: i) la potencia del láser para generar termocavitación y ii) la posición del foco del láser dentro de la solución. Para el primer parámetro, el foco del láser fue colocado a $70 \mu m$ por arriba de la interfase vidrio-solución y el láser de bombeo (LD2) se fijó a una potencia de $4.5 mW$. En la figura 4.8 a), se muestra un tren de pulsos de luz obtenidos cuando la potencia del láser para generar termocavitación fue de $165 mW$. En esta figura se puede observar cinco pulsos de luz con una amplitud promedio de $7 V$ y una frecuencia de generación de $\sim 29 Hz$. En la figura 4.8 b), se muestra el perfil de uno de los pulsos mostrados en la figura 4.8 a) con un ancho temporal de $\sim 75 \mu s$. En esta figura se puede observar que el pulso obtenido tiene una subida muy drástica y después decae en un tiempo aproximado de $250 \mu s$, obteniendo así un perfil de pulso asimétrico en contraste con los pulsos reportados típicamente en un láser pulsado (pulsos simétricos) por ejemplo, los pulsos que se presentarán en la sección 4.2 y 4.3.

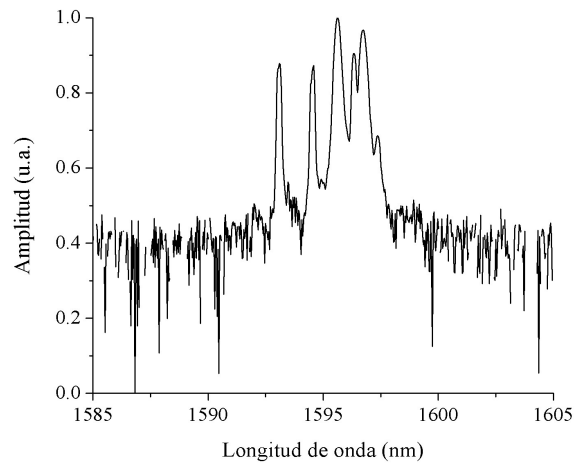


Figura 4.5. Espectro de emisión del láser pulsado, empleando la fibra óptica reducida fotodepositada en un minuto.

La figura 4.9, muestra la amplitud y frecuencia de los pulsos de luz obtenidos en función de la potencia del láser para generar termocavitación (LD1). En esta figura es posible observar una tendencia, es decir, conforme la potencia del láser para generar termocavitación aumenta, la amplitud de los pulsos de luz disminuye, sin embargo, la frecuencia de generación aumenta. Lo anterior es debido a que la temperatura espínondal del agua ($\sim 300^{\circ}C$) se alcanza mas rapidamente conforme la potencia del láser aumenta, en cambio, la difusión de calor es cada vez menor supercalentando volumenes pequeños de agua, obteniendo así burbujas de vapor de menor tamaño pero con mayor frecuencia de generación. Como se habia explicado en la sección 2.6, burbujas de menor tamaño emiten ondas acústicas de menor amplitud y burbujas de vapor de mayor tamaño emiten ondas acústicas de mayor amplitud. De acuerdo al funcionamiento de un hidrófono de fibra óptica, el comportamiento anterior provoca pulsos de luz de menor amplitud conforme la potencia del láser (LD1) aumenta. Los resultados obtenidos concuerdan con el comportamiento de la amplitud y frecuencia de las ondas acústicas generadas por termocavitación reportados (citas) y presentados en la sección 2.6.

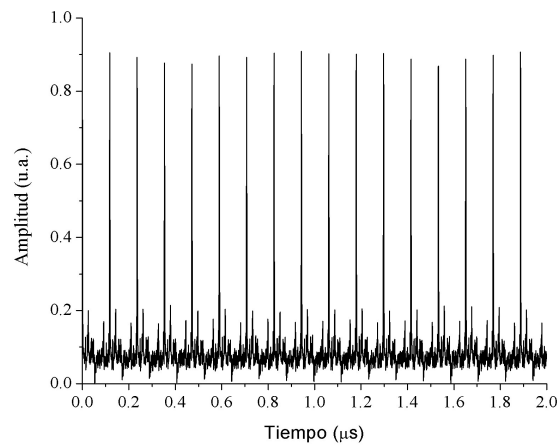


Figura 4.6. Tren de pulso obtenido con el osciloscopio.

Para el segundo parámetro, la potencia del láser de bombeo (LD2) y del láser para generar termocavitación (LD1) permanecieron constantes a una potencia de 4.5 mW y 310.7 mW , respectivamente. La figura 4.10 a), muestra un tren de pulsos obtenidos al colocar el foco del haz láser a $160 \mu\text{m}$ arriba de la interfase vidrio-solución. En ésta figura se puede observar cinco pulsos de luz con una amplitud promedio de 3 V y una frecuencia de $\sim 50 \text{ Hz}$. En la figura 4.10 b), se muestra el perfil de uno de los pulsos mostrados en la figura 4.10 a) con un ancho temporal de $\sim 60 \mu\text{s}$. En esta figura se puede observar un perfil del pulso similar al de la figura 4.8 b), con un tiempo de decaimiento de aproximadamente $300 \mu\text{s}$.

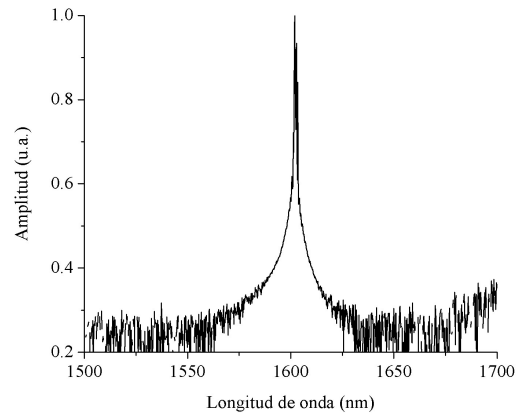


Figura 4.7. Espectro obtenido con el analizador de espectros, a la salida de arreglo experimental del láser, utilizando la fibra óptica fotodepositada con nanopartículas de zinc.

La gráfica 4.11, muestra la amplitud y frecuencia de los pulsos de luz obtenidos en función de la posición del foco del haz láser dentro de la solución. En esta figura es posible observar nuevamente una tendencia, es decir, conforme la posición del foco esta cada vez mas adentro de la solución, la amplitud de los pulsos aumenta, sin embargo la frecuencia de generación disminuyen. Lo anterior es debido a que conforme la posición del foco del láser esta cada vez mas adentro de la solución, hay una mayor difusión de calor y mas tiempo le toma al agua alcanzar su límite espinodal ($\sim 300^{\circ}C$). Lo anterior provoca que un volumen de agua sea supercalentado generando una burbuja de termocavitación de mayor tamaño pero con baja frecuencia de generación. Como se habia explicado en la sección 2.6, burbujas de mayor tamaño emiten ondas acústicas de mayor amplitud y burbujas de vapor de menor tamaño emiten ondas acústicas de menor amplitud, generando pulsos de luz de mayor amplitud. Nuevamente los resultados obtenidos, concuerdan con los resultados reportados en (45, 46). Es importante mencionar que los resultados presentados en esta sección son preliminares y un mayor estudio es requerido para entender como estos pulsos de luz se estan generando y que es lo que esta pasando en cada elemento que conforma el láser de fibra óptica.

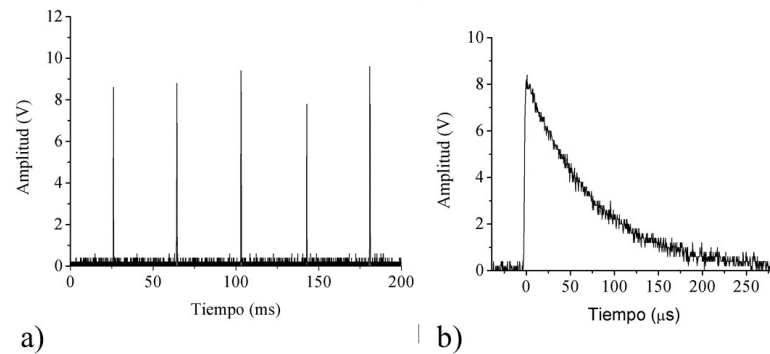


Figura 4.8. a) Tren de pulsos de luz obtenidos a una potencia de 165 mW del láser para generar termocavitación, b) ancho temporal de un pulso de luz ($\sim 75 \mu s$).

Empleando solo la fibra óptica reducida, la fibra reducida y fotodepositada con ZnNP y el fenómeno de termoacavitación se obtuvo un láser pulsado en los tres casos diferentes. Los resultados obtenidos empleando la fibra óptica reducida y la fibra óptica fotodepositada con las ZnNP mostraron un láser con un comportamiento de amarre de modos pasivo. El láser de amarre de modos pasivo, se obtiene cuando las pérdidas se modulan por medio de un absorbente saturable implementado dentro de la cavidad del láser. La generación de los pulsos de luz comienza cuando el láser opera en forma continua pero con fluctuaciones de potencia provocado que los modos interfieran entre sí. Durante el trayecto de la luz de ida y vuelta en el resonador, el absorbente saturable transmite las intensidades altas e ignora las intensidades bajas. Después de que la luz ha pasado varias veces de ida y vuelta en el resonador, un pulso es generado y se mantiene [49].

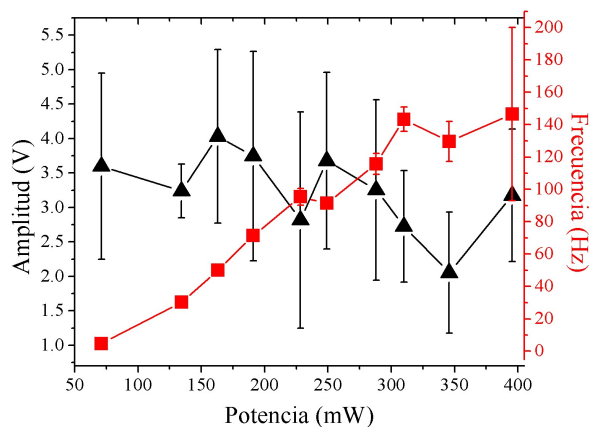


Figura 4.9. Amplitud y frecuencia del pulso de luz en función de la potencia.

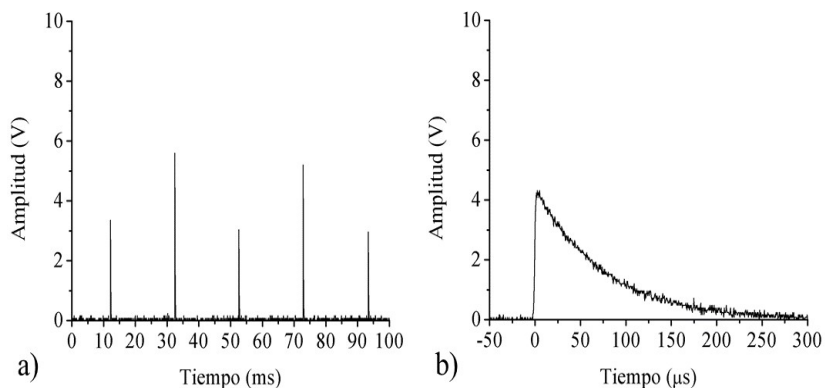


Figura 4.10. a) Tren de pulsos de luz obtenidos cuando el foco del láser fue colocado a una distancia de $160 \mu m$ dentro de la solución. b) ancho temporal de un pulso de luz ($\sim 60 \mu s$).

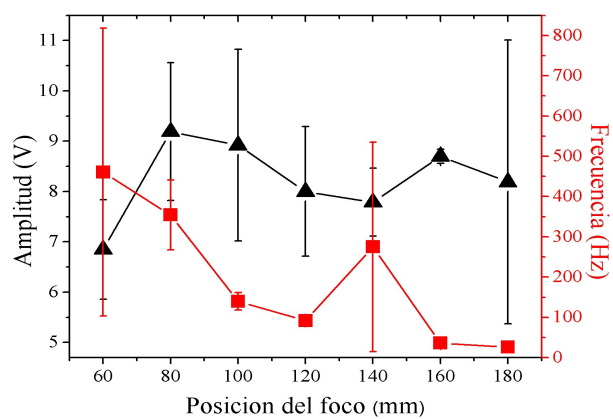


Figura 4.11. Amplitud y frecuencia del pulso de luz en función de la posición del foco del láser dentro de la solución.

Conclusiones

En esta tesis se realizó el estudio de los mecanismos de conmutación implementados en un láser de fibra óptica. Los pulsos de luz fueron generados utilizando dos diferentes mecanismos de switcheo: i) por termocavitación y ii) absorbedor saturable.

Empleando el taper sin ZnNP, se obtuvo un láser de amarre de modos multifrecuencias al ir incrementando la potencia de bombeo.

Además, utilizando el taper con ZnNP, de la misma manera se obtuvo una láser de amarre de modos, al emplear este mecanismo mostró tener sólo una longitud de onda definida en cada tiempo en que fue fotodepositado las ZnNP.

La generación de los pulsos utilizando el fenómeno de termocavitación se obtuvieron mejor con una posición del foco del láser a 160 μm dentro de la solución y una potencia medida del láser para generar termocavitación. Al incrementar la potencia, se obtuvieron pulsos con amplitudes inestables debido a las múltiples reflexiones de luz que hay dentro de las paredes de la cavidad.

Participación en congresos

1. César Amaxal Cuatetl, Jesús Manuel Cuvas Limón, Rafael Zaca Morán, Juan Pablo Padilla Martínez, Plácido Zaca Morán, *Estudio de la susceptibilidad no lineal de tercer orden en fibra óptica reducida por ataque químico*, División de Óptica del LXI Congreso Nacional de Física, 7-12 de Octubre 2018, Puebla, Puebla.

2. Jesús Manuel Cuvas Limón, César Amaxal Cuatetl, Rafael Zaca Morán, Juan Pablo Padilla Martínez, Plácido Zaca Morán, *Estudio teórico experimental de los coeficientes de extinción de nanopartículas de oro*, División de Óptica del LXI Congreso Nacional de Física, 7-12 de Octubre 2018, Puebla, Puebla.

3. César Amaxal Cuatetl, Jesús Manuel Cuvas Limón, Rafael Zaca Morán, Alberto Lozada Zanes, Juan Pablo Padilla Martínez, Plácido Zaca Morán, *Las nanopartículas aplicadas en láseres pulsados*, División de óptica del II Congreso Internacional de Luz, Ciencia y Arte, 13-17 Mayo 2019, Puebla, Puebla.

4. Jesús Manuel Cuvas Limón, César Amaxal Cuatetl, Rafael Zaca Morán, Alberto Lozada Zanes, Juan Pablo Padilla Martínez, Plácido Zaca Morán, *Las nanopartículas bajo la influencia de luz intensa*, División de óptica del II Congreso Internacional de Luz, Ciencia y Arte, 13-17 Mayo 2019, Puebla, Puebla.

5. Alberto Lozada Zanes, Jesús Manuel Cuvas Limón, César Amaxal Cuatetl, Rafael Zaca Morán, Juan Pablo Padilla Martínez, Plácido Zaca Morán, *La fibra óptica como dispositivo de comunicación*, División de óptica del II Congreso Internacional de Luz, Ciencia y Arte, 13-17 Mayo 2019, Puebla, Puebla.

6. César Amaxal Cuatetl, Jesús Manuel Cuvas Limón, Rafael Zaca Morán, Alberto Lozada Zanes, Juan Pablo Padilla Martínez, Plácido Zaca Morán, *Láser pulsado de fibra óptica reducida y fotodepositada con nanopartículas metálicas como absorbedor saturable*, División de Óptica del LXII Congreso Nacional de Física, 7-11 de Octubre 2019, Viillahermosa, Tabasco.

7. Jesús Manuel Cuvas Limón, César Amaxal Cuatetl, Rafael Zaca Morán, Juan Pablo Padilla Martínez, Plácido Zaca Morán, *Caracterización no lineal de nanopartículas*

de zinc fotodepositadas sobre una fibra reducida por ataque químico, División de Óptica del LXII Congreso Nacional de Física, 7-11 de Octubre 2019, Viellahermosa, Tabasco.

Referencias

- [1] Aldred, John, Manual de grabación de sonido, Londres: Fountain Press, 1972
- [2] "Am I Too Loud?", Jour Audio Engineering Soc, V25, p126, Mar 1977.
- [3] Coltman, John W., "Sounding Mechanism of the Flute and Organ Pipe", J. Acoust. Soc. Am. 44 (1968)
- [4] DeBonis, D.A. and Donohue, C. L., Survey of Audiology: Fundamentals for Audiologists and Health Professionals, Boston: Pearson Education, Inc., 2004.
- [5] Helmholtz, Hermann, On the Sensations of Tone, trans. Alexander Ellis from 4th German ed. of 1877, with material added by translator (reprint edition, New York: Dover, 1954.
- [6] Ackerman, Eugene, Biophysical Science, Prentice-Hall, 1962. Considerable material on vision from a medical point of view.
- [7] Boraiko, Allen A, A Splendid Light: Lasers, National Geographic 165, March 1984, p335
- [8] Delacerda, Fred, Collision Avoidance, Flight Training, May 1991. Some interesting details about accommodation of the eye.
- [9] Electro-Optics Handbook, Waynant, R.W. and Ediger, M.N., Editors, Optical and Electro-Optical Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [10] Garmire, Elsa, Applications of Lasers, essay in Fundamentals of Physics, 4th Ed, Halliday, Resnick and Walker, Wiley, 1993.
- [11] Halliday & Resnick, Fundamentals of Physics, 3E, Wiley 1988
- [12] Hecht, Eugene, Optics, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill ,1975
- [13] Lynch, David K and Livingston, William, Color and Light in Nature, Cambridge University Press, 1995.
- [14] A. Javan, "Possibility of Production of Negative Temperature in Gas Discharges," Phys. Rev. Lett. 3, 87 (1959)

- [15] Guano H., Molina P., Jiménez M. Study and Simulation of Nonlinear Effects Brillouin Stimulated Scattering (SBS) and Raman Stimulated Scattering (SRS) in a Single Mode Optical Fiber, REVISTA EPN, VOL. 33, NO. 3, ENERO 2014.
- [16] C. Cuadrado-Laborde, A. Díez, M. V. Andrés, J. L. Cruz, M. Bello-Jimenez, I. L. Villegas, A. Martínez-Gámez and Y. O. Barmenkov. Applications of In-Fiber Acousto-Optic Devices. Researchgate. Noviembre 2011.
- [17] Aibing Ren, Ming Feng, Feng Song, Yangyang Ren, Shuai Yang, Zhenguo Yang, Yigang Li, Zhibo Liu and Jianguo Tian. "Actively Q-switched ytterbium-doped fiber laser by an all-optical Q-switch based on graphene saturable absorber". ©2015 Optical Society of America.
- [18] S. Kivistö, R. Koskinen, J. Paajaste, S. D. Jackson, M. Guina, and O. G. Okhotnikov, "Passively Q-switched Tm³⁺, Ho³⁺-doped silica fiber laser using a highly nonlinear saturable absorber and dynamic gain pulse compression," *Opt. Express* 16(26), 22058–22063 (2008).
- [19] A. Martinez, K. Zhou, I. Bennion, and S. Yamashita, "Passive mode-locked lasing by injecting a carbon nanotube-solution in the core of an optical fiber," *Opt. Express* 18(11), 11008–11014 (2010).
- [20] T. Schibli, K. Minoshima, H. Kataura, E. Itoga, N. Minami, S. Kazaoui, K. Miyashita, M. Tokumoto, and Y. Sakakibara, "Ultrashort pulse-generation by saturable absorber mirrors based on polymer-embedded carbon nanotubes," *Opt. Express* 13(20), 8025–8031 (2005).
- [21] J. Liu, S. Wu, Q. H. Yang, and P. Wang, "Stable nanosecond pulse generation from a graphene-based passively Q-switched Yb-doped fiber laser," *Opt. Lett.* 36(20), 4008–4010 (2011).
- [22] Q. Sheng, M. Feng, W. Xin, T. Han, Y. Liu, Z. Liu, and J. Tian, "Active manipulation of operation states in passively pulsed fiber lasers by using graphene saturable absorber on microfiber," *Opt. Express* 21(12), 14859–14866 (2013).
- [23] Z. Luo, M. Zhou, J. Weng, G. Huang, H. Xu, C. Ye, and Z. Cai, "Graphene-based passively Q-switched dualwavelength erbium-doped fiber laser," *Opt. Lett.* 35(21), 3709–3711 (2010).
- [24] Z. Luo, Y. Huang, J. Weng, H. Cheng, Z. Lin, B. Xu, Z. Cai, and H. Xu, "1.06 μ m Q-switched ytterbium-doped fiber laser using few-layer topological insulator Bi₂Se₃ as a saturable absorber," *Opt. Express* 21(24), 29516–29522 (2013).

- [25] Sasaki Y, Yokoyama H, and Ito H “Dual-wavelength optical-pulse source based on diode lasers for high-repetition-rate, narrow-bandwidth terahertz-wave generation,” *Optics Express*, 12, 14, (2004) 3066-3071.
- [26] G. Ramírez Meléndez, M. Bello Jiménez, O. Pottiez, L. Escalante Zarate, R. López Estopier, B. Ibarra Escamilla, M. Durán Sánchez, E. A. Kuzin, M. V. Andrés. Q-switching of an all fiber ring laser based on in fiber acousto optic bandpass modulator. *Applied Physics B13* September 2017
- [27] P Zaca-Morán, J G Ortega-Mendoza, G J Lozano-Perera, L C Gómez-Pavón, G F Pérez-Sánchez, J P Padilla-Martínez and C Felipe. Passively Q-switched erbium-doped fiber laser based on Zn nanoparticles as a saturable absorber. *Laser Physics*. 1 September 2017.
- [28] Carlos G. Treviño Palacios, *Curso de Laseres*, INAOE. 2003.
- [29] F. Träger, “*Springer handbook of lasers and optics*”, Springer (2007).
- [30] Tesis que para obtener el título de: Licenciada en Electrónica. Amplificador de señal pulsada de alta potencia de fibra dopada con erbio de dos etapas en configuración reflectiva Facultad de Ciencias de la Electrónica . Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Septiembre 2012 .
- [31] G. P. Agrawal, *Applications of Nonlinear Fiber Optics*, Ed. Academic Press, Cap. 5, (2001).
- [32] V. Romero-García, J. O. Vasseur, A. C. Hladky-Hennion, L. M. Garcia-Raffi, and J. V. Sánchez-Pérez *Phys. Rev. B* 84, 212302 – Published 19 December 2011. Level repulsion and evanescent waves in sonic crystals. ©2011 American Physical Society.
- [33] D. Voigt, B. T. Wolschrijn, R. Jansen, N. Bhattacharya, R. J. C. Spreeuw, and H. B. van Linden van den Heuvell *Phys. Rev. A* 61, 063412 – Published 16 May 2000. Observation of radiation pressure exerted by evanescent waves. ©2000 American Physical Society.
- [34] M. I. Zibaii, Hamid Latifi, Amir Asadollahi, Amir Hossein Bayat, Leila Dargahi, and Abbas Haghparast. Label Free Fiber Optic Apta-Biosensor for In-Vitro Detection of Dopamine. © 2016 IEEE.
- [35] Ranjeet Dwivedi y Arun Kumar. A Compact and Highly Sensitive Bio-sensor using Directional Coupling between Metal Clad Ridge Waveguides. © 2016 Optical Society of America.

- [36] Hecht, Óptica, (Addison Wesley 2000).
- [37] G.P. Agrawal, "Application of Nonlinear Fiber Optics", Elsevier Science Primera edición, California, Estados Unidos, (2001).
- [38] Marijana R. Gavrilovic, "Interplay of cavitation bubble and plasma emission during single pulse laser induced breakdown on submerget target", Belgrade, 2017.
- [39] J. R. Blake, "cavitation bubbles near boundaries". 1987.
- [40] Davis C. Christopher, Laser and Electro-Optics. Fundamentals and Engineering.(Cambridg University Press, Reino Unido 1996).
- [41] Tesis Carla José Berrospe Rodríguez. "Towards Needle-Free Injection by Thermocavitation in Microfluidic Devices". 2017.
- [42] C. E. Brennen, "Cavitation and bubble dynamics". Oxford University Press, 1995.
- [43] J. Ramírez Ramírez "Generación de Chorros de Agua Mediante Termocavitación". INAOE Puebla. México. 2015.
- [44] J.C. Ramirez-San-Juan, E. Rodriguez-Aboytes, A. E. Martinez-Canton, O. Baldovino-Pantaleon, A. Robledo-Martinez, N. Korneev, and R. Ramos-Garcia, "Time-Resolved Analysis Of Cavitation Induced By Cw Lasers In Absorbing Liquids", vol. 18, n° 8735, 2010.
- [45] J. P. Padilla-Martinez, C. Berrospe-Rodriguez, G. Aguilar, J. C. Ramirez-San-Juan, and R. Ramos-Garcia, "Optic cavitation with CW lasers: A review", Physics of Fluids 26, 2014. 24.-
- [46] J. P. Padilla-Martinez, J. C. Ramirez-San-Juan, N. Korneev, D. Banks, G. Aguilar & R. Ramos-Garcia, "Breaking the Reyleigh-Plateau instability limit using thermocavitation within a droplet", Atomization and Sprays, 23, 2013.
- [47] Arnaud Arvengas, Kristina Davitt, and Frédéric Caupina. Fiber optic probe hydrophone for the study of acoustic cavitation in water. REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS 82, 034904 (2011).
- [48] Jazmín Torres Turiján, Tesis de licenciatura "Amplificador de señal pulsada de alta potencia de fibra dopada con erbio de dos etapas en configuración reflectiva", Facultad de Ciencias de la Electrónica BUAP.

- [49] Rudiger Paschotta. Laser Pulse Generation. s.l. : SPIE Press, 2008. Vol. FG14, SPIE Field Guides.