



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA, OPCIÓN  
INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA**

**Tesis para obtener el grado de:  
MAESTRO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

---

**"Láser pulsado de fibra óptica basado en materiales nanoestructurados"**

---

**Presenta:**

Ing. Geovanni de Jesús Lozano Perera

**Asesores:**

Dra. Luz del Carmen Gómez Pavón

Dr. Plácido Zaca Morán

Dr. Jesús Manuel Muñoz Pacheco

# Resumen

En este trabajo de tesis se realizó el estudio de materiales nanoestructurados fotodepositados sobre el núcleo de una fibra óptica para conocer si presentan propiedades no lineales que tengan un comportamiento típico de un absorbedor saturable y puedan generar pulsos en un láser de fibra óptica en cavidad de anillo. Se realizó la deposición de nanopartículas de zinc y de plata mediante una técnica llamada fotodeposición, la cual es una técnica selectiva de nanopartículas, es decir, se pueden depositar diferentes tamaños de nanopartículas sobre el núcleo de una fibra óptica con solo variar la potencia que se utiliza para la fotodeposición; una vez obtenidas las muestras de fibra con nanopartículas se realizó la caracterización no lineal. La caracterización no lineal de las nanopartículas de zinc y las nanopartículas de plata se realizó a través de un amplificador pulsado dopado con erbio de alta ganancia. Los resultados que se obtuvieron muestran que las nanopartículas de zinc y las nanopartículas de plata presentan propiedades no lineales típicos de un absorbedor saturable y fue posible utilizar ambos materiales como un dispositivo de conmutación en un láser de fibra óptica en cavidad de anillo para la generación de pulsos. Los pulsos generados para ambos materiales están en un rango en el orden de microsegundos y en un rango de frecuencia de  $kHz$  y presentan la característica de ser pulsos estables.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Antecedentes	3
1.2	Justificación	6
1.3	Objetivos	8
1.3.1	Objetivo General	8
1.3.2	Objetivos Particulares	8
1.4	Estructura de la tesis	9
<b>2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>10</b>
2.1	El láser	10
2.1.1	Descripción del medio activo	11
2.2	Láser de fibra óptica	13
2.3	Fenómenos no lineales	17
2.3.1	Efectos no lineales de segundo y tercer orden	18
2.3.2	Absorción saturable	18
2.3.3	Cálculo de la transmisión y la intensidad luminosa	20
2.4	Fotodeposición	20
<b>3</b>	<b>Desarrollo experimental</b>	<b>23</b>
3.1	Proceso de la fotodeposición	23

3.1.1	Caracterización del láser de onda continua .....	26
3.2	Microscopía .....	28
3.3	Amplificador de alta ganancia.....	30
3.4	Caracterización no lineal de las nanopartículas fotodepositadas en la fibra óptica .....	35
3.4.1	Nanopartículas de zinc .....	35
3.4.2	Nanopartículas de plata .....	39
3.5	Láser de fibra óptica en cavidad de anillo .....	40
<b>4</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>48</b>
4.1	Transmisión no lineal de las nanopartículas de zinc con pérdidas inducidas variables.....	48
4.2	Transmisión no lineal de las nanopartículas de zinc con pérdidas inducidas fijas .....	51
4.3	Transmisión no lineal de nanopartículas de plata con pérdida de 3 dB.....	55
4.4	Láser Pulsado con nanopartículas de Zinc.....	56
4.5	Láser pulsado con nanopartículas de plata .....	59
	<b>Conclusiones</b> .....	<b>62</b>
	<b>Referencias</b> .....	<b>64</b>
	<b>Apéndice A Código de MATLAB</b> .....	<b>69</b>
	<b>Apéndice B Producción académica</b> .....	<b>74</b>

# Lista de figuras

1.1	Técnicas de deposición. a) Reflectivo, b) Trasmitivo, c) Férula, d) Microcanal, e) Tipo D, f) Reducido [33]. . . . .	5
2.1	Partes que conforman un láser. . . . .	11
2.2	Procesos básicos para la generación de la radiación láser en un sistema de dos niveles. (a) Absorción, (b) Emisión espontánea y (c) Emisión estimulada. . . . .	12
2.3	Láser de fibra óptica, a) Cavidad Fabry Perot, b) Cavidad de anillo . . . . .	14
2.4	Gráfica del comportamiento de un absorbedor saturable ideal. . . . .	19
2.5	Representación esquemática del proceso de fotodeposición [9]. . . . .	21
2.6	Gráfica del tamaño de las nanopartículas fotodepositadas en función de la potencia del láser [9]. . . . .	22
3.1	Esquema del proceso de fotodeposición. . . . .	25
3.2	Imagen obtenida con un microscopio óptico de la sección transversal de la fibra óptica con fotodeposición de nanopartículas. . . . .	26
3.3	Imagen obtenida con un microscopio óptico de la sección transversal de la fibra óptica sin deposición de nanopartículas. . . . .	26

3.4	Gráfica de la potencia de salida del diodo láser con respecto a la corriente. . . . .	27
3.5	Imágenes de una fibra óptica con nanopartículas de zinc fotodepositadas a 50 <i>mW</i> . a) Imagen obtenida del SEM, b) AFM en 2D y c) AFM en 3D. . . . .	28
3.6	Imágenes de una fibra óptica con nanopartículas de zinc fotodepositadas a 40 <i>mW</i> . a) Imagen obtenida del SEM, b) AFM en 2D y c) AFM en 3D. . . . .	29
3.7	Imágenes de una fibra óptica con nanopartículas de plata fotodepositadas a 20 <i>mW</i> . a) Imagen obtenida del SEM, b) AFM en 2D y AFM en 3D. . . . .	30
3.8	Arreglo experimental del amplificador de alta ganancia [34] . . . . .	32
3.9	Forma de pulsos de entrada y de salida del amplificador de alta ganancia, a) Ancho temporal de 20 <i>ns</i> , b) Ancho temporal de 40 <i>ns</i> . . . . .	33
3.10	a) Diodo láser de bombeo a 980 <i>nm</i> de tipo mariposa. b) Arreglo experimental para la caracterización del amplificador de alta ganancia. . . . .	34
3.11	Gráficas de a caracterización del amplificador de alta ganancia a) frecuencias de 1, 2 3 y 4 <i>kHz</i> y b) frecuencias de 5, 8, 10, 15 y 20 <i>kHz</i> . . . . .	35
3.12	Diagrama a bloques del procedimiento del algoritmo desarrollado en MATLAB. . . . .	37
3.13	Gráfica de la transmisión de una fibra óptica sin fotodeposición de nanopartículas. . . . .	38
3.14	Diagrama del láser en cavidad de anillo. . . . .	40

3.15	Caracterización del láser de bombeo, a) símbolo y punto de la salida, b) Gráfica del comportamiento del láser de bombeo. ....	41
3.16	Caracterización del WDM. a) esquema del punto de medición, b) gráfica del comportamiento del WDM. ....	42
3.17	a) Esquema con los puntos de medición para caracterizar la fibra dopada con erbio. b) Gráfica del comportamiento del erbio. ....	43
3.18	a) Diagrama de los puntos de medición, b) Gráfica de la caracterización del aislador óptico. ....	44
3.19	Esquema de los controladores de polarización en el láser y b) Gráfica de la potencia de salida de los controladores de polarización. ....	45
3.20	a) Diagrama del láser en cavidad de anillo con el acoplador 90/10 y b) Comportamiento de la salida del acoplador. ....	46
3.21	Espectro del láser en configuración de anillo en onda continua. ....	47
4.1	Gráficas de la transmisión de la muestras a) A1, b) A2, c) A3 y d) A4. ....	49
4.2	a) Gráficas de los ajustes de las muestras con pérdidas inducidas variadas. b) Gráfica de la relación entre la profundidad de modulación y las pérdidas inducidas. ....	50
4.3	Gráficas de las muestras con pérdidas de 3 dB. a) muestra B1, b) muestra B2, c) muestras B3 y d) muestra B4. ....	52



4.4	a) Gráficas de los ajustes de las muestras con pérdidas inducidas variables. b) Gráfica de la relación entre la profundidad de modulación y la potencia de fotodeposición.....	54
4.5	Gráfica del comportamiento de la transmisión de las nanopartículas de plata fotodepositadas sobre el núcleo de una fibra óptica. ....	55
4.6	Pulsos obtenidos con nanopartículas de zinc con potencia de bombeo de a) 57.75 mW, b) 98.7 mW c) 130 mW y d) 168.3 mW. ....	56
4.7	a) Gráfica de la variación de la frecuencia y ancho del pulso en función de la potencia de bombeo y b) gráfica de la variación de la energía del pulso y la potencia pico en función de la potencia de bombeo.....	57
4.8	Espectro del láser pulsado con nanopartículas de zinc. ....	58
4.9	Pulsos obtenidos del sistema láser con nanopartículas de zinc con potencia de bombeo de a) 47.3 mW, b) 88.8 mW c) 130 mW y d) 168.3 mW. ....	59
4.10	a) Gráfica de la variación de la frecuencia y ancho del pulso en función de la potencia de bombeo y b) gráfica de la variación de la energía del pulso y la potencia pico en función de la potencia de bombeo.....	60
4.11	Espectro del láser pulsado con nanopartículas de plata.....	61



# Capítulo 1

## Introducción

El láser es un dispositivo fotónico que amplifica la luz intensamente. En la actualidad, una aplicación muy común e importante es en el área de telecomunicaciones, donde el láser es pieza fundamental para la transmisión de datos a través de la fibra óptica y donde esta tecnología se ha estado desarrollando constantemente. Una de las primeras transmisiones que se realizaron en comunicaciones fue utilizando diodos láser de GaAlAs (galio-aluminio-arsénico) para los enlaces de varios kilómetros a las centrales telefónicas sin tantas repetidoras. Posteriormente, se usaron láseres de InGaAsP y actualmente se utilizan otros medios con la incorporación de las fibras ópticas. Los láseres se han desarrollado para transmitir en longitudes de onda para las ventanas en  $1310\text{ nm}$  y  $1550\text{ nm}$  a muy grandes distancias utilizando las fibras ópticas [1].

Actualmente, existe una demanda creciente de láseres pulsados operando en la banda de los  $1550\text{ nm}$  para el usos de varios campos en la industria así como en las comunicaciones de ultra alta velocidad [2, 3], procesamiento de señales [4, 5] y metrología óptica. Los láseres de fibra óptica en amarre de modos están entre las mejores fuentes pulsadas disponibles, ya que estos emiten un tren de pulsos del orden de milisegundos y hasta femtosegundos con una estructura de cavidad simple [6-8]. El descubrimiento de la absorción saturable en materiales nanoestructurados como los basados en nanotubos de carbono para la región infrarroja, han mostrado tiempos de recuperación de saturación ultrarrápida del orden de picosegundos produciendo un nuevo tipo de absorbedor un poco diferente de los SESAMs (Absorbedores Saturables

de Espejos Semiconductores) tanto en la estructura como en el procedimiento de fabricación [9].

Los dispositivos de absorción saturable han sido utilizados en el área de la óptica, principalmente para aplicaciones en láseres pulsados de Q-switch [10-12], amarre de modos [13,14], filtrado de ruido [15], entre otros dispositivos fotónicos. Estos dispositivos han sido implementados a base de colorantes o cristales dopados con  $\text{Cr}^{4+}$  [16], o espejos semiconductores (SESAM) para la generación de pulsos ultracortos [17], sin embargo los SESAM tienen la desventaja de tener un tiempo de recuperación mayor y son más costosos en comparación con los absorbedores saturables a base de materiales nanoestructurados [18].

El desarrollo de la nanotecnología ha permitido la implementación de absorbedores saturables utilizando materiales nanoestructurados en cavidades de fibra óptica para láseres pulsados [19], siendo el grafeno y los nanotubos de carbono los más estudiados. El grafeno se ha utilizado como dispositivo de absorción saturable para aplicaciones de switcheo y generación de pulsos para aplicaciones en las comunicaciones ópticas [20,21]. Los nanotubos de carbono de pared múltiple y pared simple han sido utilizados también como dispositivos de absorción saturable para procesos de generación de pulsos cortos y Q-switch abarcando desde el espectro visible de 532 *nm* hasta 1550 *nm* [22-25].

Por esta razón, el estudio de las nanopartículas ha sido de gran importancia para el desarrollo de los láseres pulsados, ya que estas partículas a escalas nanométricas presentan propiedades ópticas que son muy útiles y las propiedades dependerán del tipo de material, ya que las nanopartículas son muy diferentes dependiendo si son aislantes, metal o semiconductor [26].

## 1.1 Antecedentes

El primer láser, construido por Maiman, utilizó como medio activo cristales sintéticos de rubí, sin embargo, ese mismo año también se construyó el primer láser de gas utilizando una mezcla de helio y de neón construido por Ali Javan [27]. Posteriormente, se desarrollaron otros tipos de láseres como lo son los láseres de estado sólido, que emiten una potencia de salida oscilando entre los 170 *nm* y 3 900 *nm*; también se desarrolló el láser semiconductor que actualmente son empleados en comunicaciones por fibras ópticas, en los sistemas de audio de discos láseres, entre otros [28].

Los láseres pulsados son dispositivos que emiten un haz de luz en forma de pulsos de una cierta duración, a diferencia de los de onda continua. La forma más fácil de generar los pulsos en estos sistemas es colocando un absorbedor saturable en su interior. El primer láser pulsado fue hecho con rubí el cual daba como resultados ráfagas de luz de unos cuantos milisegundos a través de una lámpara de flash [28].

Los absorbedores saturables son materiales que presentan la propiedad de absorber la radiación que se genera en el medio activo hasta que sobrepasan un valor de energía absorbida por encima de la cual el material se vuelve transparente. Una vez saturado el absorbente es necesario interrumpir el bombeo para devolverlo a su estado original [29]. Los primeros láseres pulsados con absorbedores saturables fueron por medio de colorantes orgánicos pero a menudo estos resultaban muy tóxicos y el tiempo de vida no son muy prolongados.

Recientemente, se demostró un láser de fibra dopado con erbio en conmutación en Q incorporando un absorbedor saturable a base de grafeno [30]. La potencia en conmutación en Q es de 18 *mW* y la potencia umbral del láser es de 9 *mW*; en la máxima potencia de bombeo de 100 *mW* es capaz de generar pulsos de repetición de 61 *kHz*, un ancho de pulso de 6.6  $\mu s$ , energía de pulso de 61.3 *nJ* y potencia pico de 9.3 *mW*. H. Ahmad y sus colaboradores utilizaron un método de deposición llamado termoforesis, el cual, se tarda alrededor de 30 minutos en realizar este proceso, sin tomar en cuenta que previamente se tiene que disolver el nanopulvo de óxido de

grafeno en el agua, además que se tiene que hacer una férula de fibra para realizar este método. Este trabajo fue realizado en el año del 2012.

Un año más tarde, se reportó un láser de fibra dopada con erbio en conmutación en Q usando un absorbedor saturable basado en nanotubos de carbono, como resultado se obtuvieron pulsos de salida con energía de  $81.3 \text{ nJ}$  con una frecuencia de  $74.4 \text{ kHz}$  y un ancho de pulso de  $4.5 \text{ }\mu\text{s}$ . Los nanotubos de carbono fueron depositados por un método basado en la interacción de los nanotubos de carbono con un campo evanescente de la propagación de la luz en la fibra [31]. Este trabajo fue demostrado por H. Liu y sus colaboradores.

También se desarrolló un láser de fibra óptica dopada con erbio en conmutación en Q pasivo operando en  $1536.5 \text{ nm}$  utilizando un absorbedor saturable basado en grafeno [32]. Mediante una exfoliación mecánica, Z. Saleh y sus colaboradores obtienen una capa de grafeno y la depositaron al final de la cara de la férula de fibra óptica y obtienen un tren de pulsos estables con un bombeo de  $42.3 \text{ mW}$ . Cuando la potencia de bombeo aumenta, la frecuencia cambia de  $10.3$  a  $32.4 \text{ kHz}$  y el ancho de pulso de  $31$  a  $10.7 \text{ }\mu\text{s}$ . La máxima energía de  $166.2 \text{ nJ}$  se logró con la potencia de bombeo de  $42.3 \text{ mW}$ . Este láser se desarrolló en el año del 2014.

En los trabajos antes mencionados, se realizan diversas técnicas para hacer la interacción de la radiación láser con los absorbedores saturables con el fin de poder generar los pulsos en el sistema láser. Existen diferentes técnicas que se usan en la actualidad y se hace para los nanotubos de carbono de pared simple, como se ve en la figura 1.1. La técnica reflectiva consiste en fabricar una película delgada de las nanopartículas para que cubra un espejo altamente reflejante y así realizar el depósito en la fibra óptica, como se muestra en la figura 1.1 a). En la figura 1.1 b) se muestra la técnica trasmitiva, en donde se alinean los extremos de una fibra óptica y en medio se pone una película de las nanopartículas. En la figura 1.1 c) se observa la tipo férula, que consiste en poner una película de nanopartículas entre dos fibras sujetadas por una férula. En la figura 1.1 d) la película es atravesada en medio de la fibra óptica para realizar la deposición, esta técnica es la de microcanal. La técnica en D, consiste

en realizar una muesca a la fibra para poner ahí una película y por medio de ondas evanescentes realizar el depósito, como se ve en la figura 1.1 e). En la figura 1.1 f), se muestra un proceso el cual consiste en adelgazar la fibra óptica para después interactuar con ondas evanescentes [33].

Las técnicas que se describieron anteriormente, son procesos complicados de realizar, ya que hacer una película con nanopartículas es un proceso químico que lleva un tiempo largo para realizarse, además que se debe tener un buen cuidado para que se pueda realizar exitosamente; las técnicas con férula utilizan otros dispositivos pero que producen pérdidas que no permiten una buena transmisión; otra desventaja es la parte de realizar un desgaste a la fibra óptica, debido a que sus dimensiones son pequeñas y complica el manejo de la fibra óptica, y por último, el proceso de adelgazar una fibra óptica lleva un largo tiempo, además de tener un gran cuidado para poder adelgazarla sin llegar a romperla y también tener un sistema de adelgazamiento de fibras ópticas no son tan comunes.

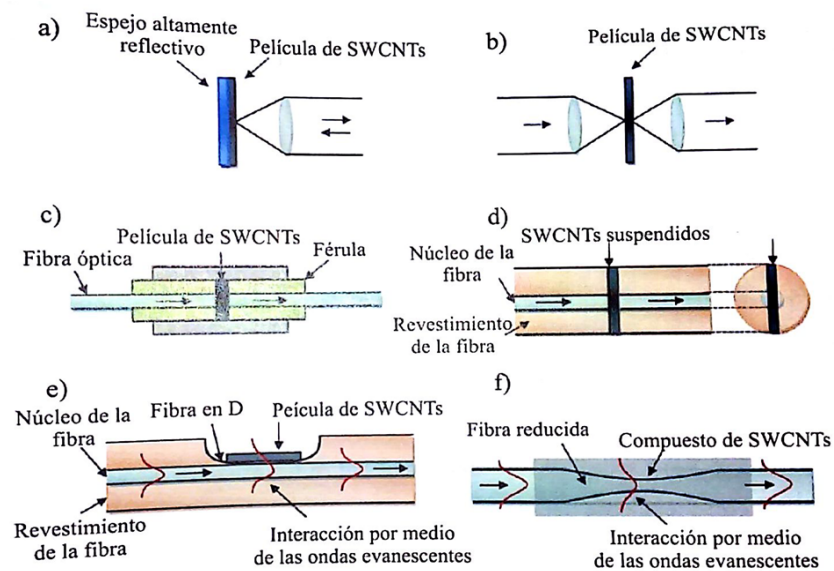


Figura 1.1. Técnicas de deposición. a) Reflectivo, b) Transmisor, c) Férula, d) Microcanal, e) Tipo D, f) Reducido [33].

Actualmente los materiales nanoestructurados metálicos han llamado la atención debido a sus propiedades no lineales basado en el fenómeno de plasmones de superficie los cuales ha demostrado tener una transmisión en función de la intensidad similar al de un absorbedor saturable. En este trabajo de tesis se propone realizar un láser pulsado con materiales nanoestructurados en configuración de conmutación en Q con la finalidad de generar pulsos a través de las propiedades ópticas que presentan los materiales nanoestructurados metálicos. Por otro parte, se llevará a cabo la deposición de los nanomateriales sobre el núcleo de la fibra óptica por medio de una técnica nueva y más sencilla conocida como fotodeposición, el cual tiene la ventaja de ser una técnica fácil de realizar y más rápida que las técnicas descritas anteriormente.

## 1.2 Justificación

Las telecomunicaciones han tenido una gran transformación desde la aparición del láser, principalmente para aplicaciones de multiplexado de voz, video y datos. En este contexto, el láser es la fuente ideal para las comunicaciones, pues su ancho de banda potencial es casi 100 000 veces mayor que el de un transmisor de microondas.

En la actualidad existen diferentes tipos de absorbedores saturables para la generación de pulsos en un sistema láser, entre los que se encuentra los espejos semiconductores SESAM, que tiene la ventaja de absorber en una rango muy amplio de longitudes de onda, aunque estos dispositivos resultan ser muy costosos, sensibles al daño óptico y muy delicados. Por otro lado, también existen absorbedores saturables a base de fibra óptica, pero tienen la desventaja de producir una salida inestable debido a los entornos ambientales.

La relevancia del presente proyecto consiste en el estudio de las propiedades ópticas no lineales de las nanopartículas de zinc y las nanopartículas de plata, particularmente la susceptibilidad no lineal de tercer orden, el cual presenta el fenómeno de absorción saturable [35] para aplicaciones de conmutación para la generación de pulsos en la región de 1550 *nm*. También se utilizará un método de deposición que es



reciente y se ha demostrado que el procedimiento es más rápido que otros métodos que actualmente se utilizan para la deposición de los materiales nanoestructurados. Los resultados obtenidos podrían ofrecer un sistema de bajo costo y mayor estabilidad para la generación de pulsos por medio de láser de fibra óptica en conmutación en Q con materiales nanoestructurados. La originalidad de la propuesta radica en que se abre una nueva posibilidad para combinar directamente las propiedades de una fibra óptica y los materiales nanoestructurados mediante la manipulación óptica y su interacción con estos materiales, además de utilizar materiales que no se ha estudiado tales como las nanopartículas de zinc y las nanopartículas de plata.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo General

Implementación y caracterización de un láser pulsado de fibra óptica basado en la técnica de conmutación en Q por medio de materiales nanoestructurados depositados sobre el núcleo de una fibra óptica.

### 1.3.2 Objetivos Particulares

1. Analizar el principio de funcionamiento de un láser pulsado
2. Identificar las diferentes técnicas para la generación de pulsos en sistemas láser
3. Investigar las técnicas para depositar materiales nanoestructurados sobre el núcleo de una fibra óptica
4. Fotodepositar materiales nanoestructurados sobre el núcleo de fibra óptica
5. Caracterizar morfológicamente las fibras mediante microscopía
6. Caracterizar las propiedades de absorción no lineal de los materiales nanoestructurados
7. Implementar el láser de fibra óptica utilizando los materiales nanoestructurados como dispositivo de conmutación
8. Caracterizar las propiedades del sistema láser pulsado de fibra óptica, tales como: potencia, intensidad, duración y longitud de onda de emisión de los pulsos ópticos generados

## 1.4 Estructura de la tesis

En este capítulo se presentan los antecedentes de los trabajos realizados por diferentes autores, la descripción de la justificación de este trabajo y se describieron los objetivos, tanto el general como los particulares.

En el capítulo 2 se describe el funcionamiento de un láser, los tipos de láser y su configuración más sencilla, también se describe el medio activo, los fenómenos que suceden en él y por último se describe la técnica de fotodeposición y las fuerzas que actúan en este proceso.

En el capítulo 3 se describe el desarrollo experimental, en donde se explican los procedimientos y los componentes utilizados en la fotodeposición, la caracterización del amplificador pulsado de alta ganancia de fibra dopado con erbio, la caracterización del absorbedor saturable, la caracterización del láser en cavidad de anillo en onda continua y el arreglo experimental del láser pulsado con materiales nanoestructurados para la generación de pulsos.

En el capítulo 4 se presentan los resultados experimentales que se obtuvieron de la caracterización no lineal y los resultados del arreglo del láser pulsado con las nanopartículas fotodepositadas sobre el núcleo de la fibra óptica.

Finalmente, se presentan las conclusiones de este trabajo realizado.

En este trabajo de tesis, se realiza un estudio para la implementación y la caracterización de un láser pulsado de fibra óptica utilizando nanopartículas como un dispositivo absorbedor saturable y de esta manera aprovechar las propiedades ópticas no lineales de las nanopartículas para generar pulsos en este sistema.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1 El láser

El estudio del láser se basa en la concentración de luz en forma de haces muy pequeños e intensos, cuyas características principales es la conversión de energía mediante un medio activo utilizando un mecanismo de bombeo, todo esto dentro de una cavidad [36]. La luz láser tiene como características principales su coherencia, monocromaticidad y direccionalidad. Una luz coherente es aquella donde las ondas o los fotones que la componen están en fase; por otro lado, una luz monocromática está formada por ondas de la misma frecuencia, o, equivalentemente, fotones de la misma energía. Si además las crestas y valles de estas ondas coinciden, esto resultará en un haz de luz muy intenso que transporta una elevada energía.

Un láser está conformado en su forma más simple por un medio activo dentro de una cavidad óptica, un par de espejos y un bombeo, como se muestra en la figura 2.1. El bombeo es una fuente de energía que excita al medio activo para realizar la amplificación de la luz, generalmente es un haz de luz o una corriente eléctrica. Existen dos espejos en los extremos de la cavidad en donde un espejo es 100 % reflejante con la finalidad de que la luz se refleje y pase varias veces por el medio activo. Por otro lado, la salida del láser se obtiene del espejo parcialmente reflejante ya que deja pasar cierta cantidad de luz al exterior, de este modo los espejos funcionan como retroalimentación. El medio activo es un material que amplifica la luz a través de un proceso llamado emisión estimulada el cual será descrito más adelante.

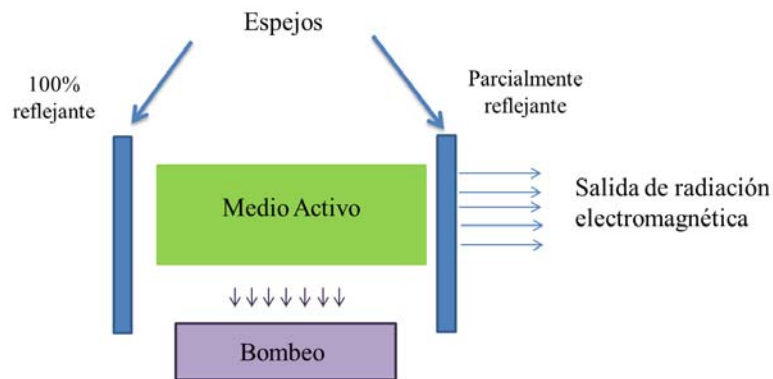


Figura 2.1. Partes que conforman un láser.

### 2.1.1 Descripción del medio activo

El medio activo define el tipo de láser, debido a que este elemento es donde se realiza los procesos para la generación de la luz, el cual puede ser de estado sólido, de gas, de líquido o semiconductor.

El láser funciona mediante la excitación y la emisión de luz entre dos niveles específicos de energía del medio activo. Para lograr el efecto de la luz láser, se debe producir un estado excitado de los átomos del elemento activo. A este proceso se le llama inversión de población entre dos niveles. Si tomamos como valores de energía  $E_1$  y  $E_2$ , con  $E_2 > E_1$ , decimos que hay una inversión de la población si el número de átomos en el estado de energía  $E_2$  es mayor que el número de átomos en el estado con energía  $E_1$  [39]. En este proceso, se lleva a cabo tres fenómenos que generan radiación electromagnética que se obtiene de un láser, estos fenómenos son: absorción, emisión espontánea y emisión estimulada.

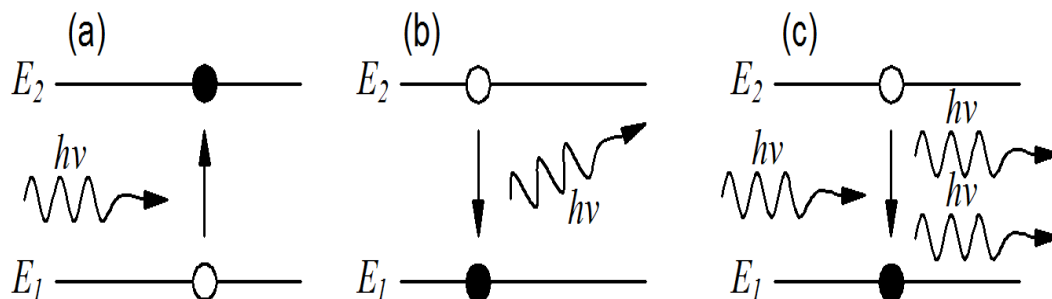


Figura 2.2. Procesos básicos para la generación de la radiación láser en un sistema de dos niveles. (a) Absorción, (b) Emisión espontánea y (c) Emisión estimulada.

En el proceso de absorción figura 2.2 (a), los átomos se encuentran inicialmente en su estado base en el cual poseen una energía  $E_1$ . Si el átomo absorbe un fotón de energía igual a la separación entre dos niveles de energía  $h\nu_f = E_2 - E_1$ , la energía del átomo se incrementa y el electrón pasa de su estado base a un nivel superior de energía  $E_2$ .

Cuando el electrón se encuentra en el nivel de energía  $E_2$ , por relajación del sistema el electrón tiende a volver a su estado base  $E_1$ , provocando que se libere un fotón de energía igual a la diferencia de energía  $E_2 - E_1$ , a este fenómeno se le llama emisión espontánea, figura 2.2 (b).

El tiempo que dura un electrón en estado excitado se define como tiempo de vida de la emisión espontánea. Si el electrón se encuentra en el nivel de energía  $E_2$ , un fotón con energía  $h\nu_f = E_2 - E_1$ , puede estimular el decaimiento del electrón del nivel  $E_2$  al nivel  $E_1$ , liberando un fotón de igual energía, fase, polarización y dirección que el fotón incidente. Este fenómeno se le conoce como emisión estimulada, como se ve en la figura 2.2 (c).

El medio activo en un sistema láser de fibra óptica se puede utilizar como medio de amplificación de una onda guiada monomodo; estos amplificadores consisten en dopar la fibra óptica con elementos químicos del grupo de tierras raras que son el medio de amplificación. Por lo tanto, en los amplificadores de fibras dopadas con tierras raras, la señal y el bombeo son introducidos en la fibra dopada, y dicha señal

se amplifica por medio de la emisión estimulada debido a la transición de electrones a la baja en los iones bombeados. Por esta razón la fibra dopada con erbio es un medio amplificador muy utilizada en sistemas de telecomunicaciones por fibra óptica, debido a que ofrece una alta ganancia independiente de polarización, baja pérdida de inserción, y una amplia transición cerca de los 1550 nm [47].

## 2.2 Láser de fibra óptica

Los láseres de fibra óptica tienen otro tipo de cavidades como lo son la cavidad Fabry-Perot y la cavidad tipo anillo. La cavidad Fabry Perot utiliza un elemento que hace la función de los espejos llamado rejillas de Bragg, además de utilizar un medio activo de fibra dopada con Erblio entre dichas rejillas y por último el bombeo es a través de una fuente de luz con un multiplexor por división de onda (WDM) para introducir la señal de bombeo y la señal de retroalimentación. Este tipo de cavidad se puede observar en la figura 2.3 a).

El láser de fibra en cavidad de anillo utiliza un dispositivo aislador óptico para mantener el sentido de la señal en una sola dirección y de esta forma realiza la función de los espejos. El medio de ganancia es una fibra óptica dopada con erbio. La señal de bombeo está conectada a un WDM para introducir dicha señal y la señal de retroalimentación y por último contiene un acoplador óptico para obtener la señal de salida. En la figura 2.3 b) se observa este tipo de cavidad.

Una fuente de bombeo puede ser un solo diodo, una matriz, o muchos diodos de bombeo separados, cada uno con una fibra en un acoplador. La fibra dopada tiene un espejo de cavidad en cada extremo. En la práctica, estos son rejillas de Bragg, que pueden ser fabricados dentro de la fibra.

Los láseres de fibra tienen la ventaja de ser más eficientes, la producción de un solo modo, una larga vida de funcionamiento sin la necesidad de mantenimiento, por su tamaño hace posible la eliminación de los sistemas de refrigeración, y a su vez tiene excelentes propiedades de bombeo constante [41].

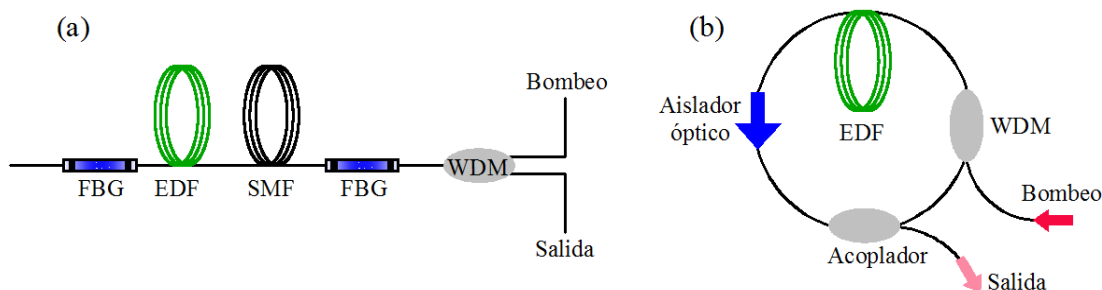


Figura 2.3. Láser de fibra óptica, a) Cavity Fabry Perot, b) Cavity de anillo

### Láser de onda continua

Los láseres de fibra de onda continua son láseres que tienen una configuración sencilla el cual tiene una salida con una señal constante y sin ninguna perturbación. Los láseres de onda continua pueden ser monomodo o multimodo (en términos de modos transversales). Un monomodo produce un haz de alta calidad para los materiales de trabajo o enviando un rayo a través de la atmósfera, mientras que los láseres industriales multimodo pueden generar mayor potencia. Si una aplicación no requiere altas intensidades, la multimodo tiene la ventaja para algunos tipos de corte y soldadura, y en particular, para el tratamiento con calor [42].

### Láser pulsado

En los láseres de onda pulsada la potencia óptica aparece en pulsos de una cierta duración en un periodo de repetición. Muchas aplicaciones se basan en tener una potencia de impulsos muy alto y esto se puede obtener reduciendo la tasa de repeticiones; otras aplicaciones se basan en la potencia del impulso, especialmente con el fin de obtener efectos ópticos no lineales, y es por eso que se requiere la reacción de pulsos de duración más corta.

Los láseres de fibra de pulso largo son esencialmente los láseres cuasi-onda continua, típicamente producen pulsos de tipo milisegundo. Tienen un ciclo de trabajo de 10 % (resultante de la modulación del bombeo de diodo). Esto se hace en poten-



cias de pico más altos que en la operación en onda continua, por lo regular del orden de diez veces mayor.

Las propiedades de la fibra imponen algunas limitaciones en conmutación en Q. Las no linealidades son más severas en un láser de fibra debido a la pequeña área de sección transversal del núcleo, por lo que la potencia de pico tiene que ser algo limitado.

En láseres de fibra en amarre de modos, la tasa de repetición depende de la longitud del material de ganancia. Los pulsos más cortos están en el intervalo de 50 *fs*, con duraciones más comunes en el intervalo de 100 *fs*.

### **Amarre de modo**

El láser en amarre de modos tiene la característica principal de producir pulsos ultracortos del orden de los femtosegundos, aunque cuenta con la desventaja de no tener una gran potencia. Actualmente los láseres en amarre de modo tienen grandes aplicaciones potenciales en sensores de fibra óptica, instrumentación óptica, sistemas de transmisión y procesamiento de señales ópticas.

El amarre de modos se produce combinando en fase distintos modos longitudinales de un láser, teniendo todas ligeramente a distintas frecuencias. Cuando los modos de ondas electromagnéticas de frecuencias diferentes pero fases aleatorias coinciden, se producen una distribución al azar, promediando la salida del campo eléctrico de ambos y la intensidad en el dominio del tiempo [43].

En un sistema laser pulsado de funcionamiento libre, hay muchos pulsos con diferentes modos oscilantes o frecuencias. Los pulsos ultracortos pueden ser generados bajo la condición de que estos son ondas de fase-bloqueo. Existen muchos métodos para fase de bloqueo: amarre de modos activo y amarre de modo pasivo [44].

En el amarre de modos activo se logra a través de poner en fase los modos de oscilación de una cavidad mediante una modulación externa. El amarre de modo pasivo no se necesita ninguna señal periódica, solo se necesita una perturbación que se amplificará al pasar por el medio activo; en el amarre de modo pasivo se utiliza un

absorbedor saturable para generar automodulación de amplitud de intensidad de la luz dentro de la cavidad.

### **Conmutación en Q**

Junto con el amarre de modos, durante décadas, la conmutación en Q ha sido investigado intensamente en el área de la pulsación láser. En esta configuración se controla el factor Q (equilibrar la ganancia y la pérdida) en una cavidad láser para formar pulsos ópticos con mayor pulso de energía y más duración de pulsos que en el amarre de modos, el láser conmutación en Q ha establecido su papel en los campos de aplicación que no requieren velocidad ultrarrápida [45].

La conmutación en Q consiste en introducir pérdidas a la cavidad del láser de tal manera que no pueda oscilar, por lo que la energía de la fuente de bombeo es almacenada en el medio como una inversión de población entre los niveles de la emisión láser. Una vez que se ha almacenado una gran cantidad de energía, de alguna manera las pérdidas de la cavidad son removidas repentinamente, ocasionando la generación de un pulso de radiación grande [46].

La construcción de láseres pulsados con nanotubos de carbono se ha demostrado ampliamente gracias a sus propiedades ópticas intrínseca incluyendo la absorción saturable y el tiempo de recuperación ultrarrápida. Por la inserción dentro de la cavidad láser de un absorbedor saturable a base de nanotubos de carbono, se puede realizar un sistema para lograr pulsos estables y se puede tanto en amarre de modos o conmutación en Q, y son capaces de generar pulsos con diferentes características.

Los materiales nanoestructurados son ampliamente estudiados debido a que presentan propiedades químicas y físicas únicas que difieren de las escalas macroscópicas, las cuales están directamente relacionadas con su tamaño y su morfología. En particular las propiedades ópticas no lineales que presentan estos materiales pueden tener importantes aplicaciones en el área de las comunicaciones ópticas en la región del infrarrojo cercano para la implementación de dispositivos como limitadores ópticos, absorbedores saturables, filtros, etc.

## 2.3 Fenómenos no lineales

Los efectos ópticos no lineales hacen referencia a fenómenos generalmente de conversión de frecuencias de luz. Esto es, cuando un material es excitado con campos electromagnéticos fuertes a cierta frecuencia del espectro electromagnético, el material transmitirá parte de la energía de la misma frecuencia con la que es excitado, y a su vez generará nuevas frecuencias que corresponden a múltiples enteros del valor de la frecuencia inicial.

En la interacción de la luz con la materia se presentan fenómenos no lineales que suceden cuando, en la interacción de la luz con la materia, algunas propiedades características ondulatorias de la luz se ven modificadas, y que se presentan a grandes intensidades de luz.

El campo electromagnético de una onda luminosa que se propaga a través de un medio ejerce unas fuerzas en los electrones débilmente ligados exteriores o de valencias, estas fuerzas resultan ser muy pequeñas y, en un medio lineal isótropo, la polarización eléctrica resultante es paralela y directamente proporcional al campo aplicado. La polarización sigue al campo; si éste es armónico, el campo también será armónica y por lo tanto se puede escribir como se muestra en la ecuación 2.1

$$P = \epsilon_0 \chi E, \quad (2.1)$$

dónde  $\chi$  es una constante sin dimensiones denominadas susceptibilidad eléctrica y una representación gráfica entre  $P$  frente a  $E$  es una línea recta. Pero en campos muy altos,  $P$  no puede aumentar lineal e indefinidamente con  $E$  [28]; entonces se puede anticipar un aumento gradual y la polarización inducida tendrá una respuesta no lineal que se puede expresar como en la ecuación 2.2:

$$P = \epsilon_0(\chi E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots) = P_L + P_{NL}, \quad (2.2)$$

dónde  $P_L$  es la polarización lineal debido a la susceptibilidad de  $\chi$  y  $P_{NL}$  es la polarización no lineal que está en función de las susceptibilidades no lineal. Conforme la

onda armónica luminosa atraviesa el medio, crea una redistribución ondulatoria de la carga dentro del material en respuesta al campo.

### **2.3.1 Efectos no lineales de segundo y tercer orden**

Los efectos no lineales de segundo orden son producidos debido a que la polarización es proporcional al cuadrado del campo óptico y por lo tanto la susceptibilidad de segundo orden define efectos ópticos no lineales como la generación de segundo armónico, la rectificación óptica, generación de suma de frecuencias, generación de diferencias de frecuencias entre otros efectos no lineales.

Por otro lado, los efectos no lineales de tercer orden se producen porque la polarización es proporcional al cubo del campo y por esta razón se genera efectos como la generación del tercer armónico, el efecto óptico de Kerr, la modulación de fase cruzada, mezcla de cuatro ondas y la absorción saturable.

### **2.3.2 Absorción saturable**

Un absorbedor saturable se define como un material en el cual la transmitancia incrementa conforme va incrementando la intensidad [8]. En la gráfica de la figura 2.4 se puede observar la forma típica del comportamiento de un dispositivo absorbedor saturable ideal, en donde la transmisión va aumentando en función de la intensidad hasta llegar a un punto en donde la transmisión llega a un máximo valor y se satura.

La absorción saturable es un proceso no lineal que puede estar asociada con los niveles reales de la energía y los cambios de población en esos niveles. Este es un proceso en el que un material puede ser altamente absorbente de longitud de onda específica con un haz de baja intensidad en incidente sobre el material, sin embargo, un haz muy intenso (en esa misma longitud de onda) pasarán a través del medio con poco cambio en la intensidad. Por lo tanto, una inversión de población no podría realizarse en un sistema de dos niveles. La siguiente expresión, depende de la intensidad de la ganancia de un sistema.

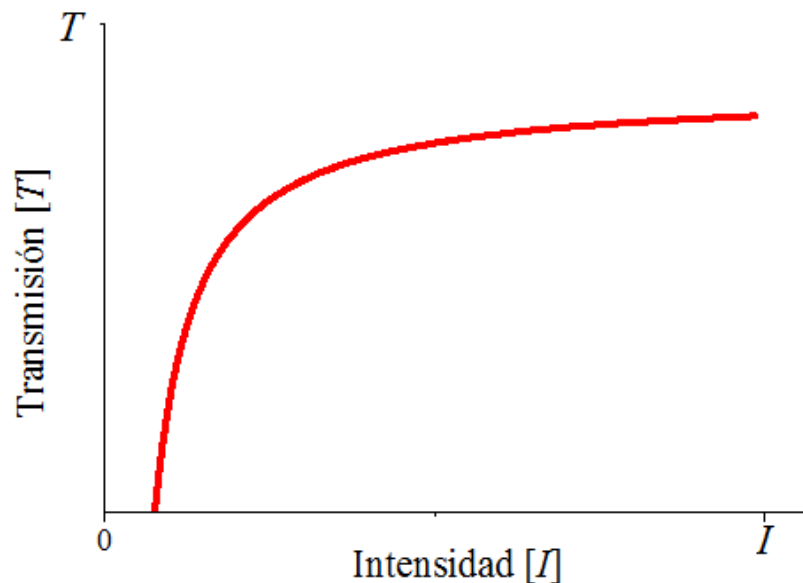


Figura 2.4. Gráfica del comportamiento de un absorbedor saturable ideal.

$$g = \frac{g_0}{1 + \frac{I}{I_{sat}}} = \frac{\sigma_{ul}\Delta N_{ul}^0}{1 + \frac{I}{I_{sat}}}, \quad (2.3)$$

dónde  $\sigma_{ul}(v)$  es la sección transversal de la emisión estimulada,  $\Delta N_{ul}^0$  es la diferencia de la población sin el haz de luz presente, y  $I_{sat}$  es la intensidad a la que se produce un cambio significativo de la población debido a la presencia del haz de luz 2.3. El término  $\Delta N_{ul}^0$  se definió como  $\Delta N_{ul}^0 = [N_u - (\frac{g_u}{g_l})N_l]$  donde  $N_u$  y  $N_l$  denotan las poblaciones de los niveles superior e inferior de las transiciones. Si la población en el nivel inferior L es significativamente mayor que la población del nivel superior U, entonces es conveniente expresar el producto  $\sigma_{ul}(v)\Delta N_{ul}^0$  en términos de un coeficiente de absorción  $\alpha_{ul}(v)$ , así, podemos reescribir como se ve en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I}{I_{sat}}}, \quad (2.4)$$

dónde  $\alpha_0$  es el coeficiente de absorción  $\alpha_{ul}(v)$ , y se asocia con la ley de Beer's 2.4.

### 2.3.3 Cálculo de la transmisión y la intensidad luminosa

La transmisión de la luz ocurre cuando esta atraviesa un objeto o superficie, y en este trabajo es de gran importancia conocer la transmisión de la luz y cómo se comporta cuando interactúa con los materiales nanoestructurados. El cálculo de la transmisión está dada por la ecuación 2.5, en donde la transmisión de la luz se puede expresar como:

$$T = \frac{P_o}{P_i} \quad (2.5)$$

dónde  $P_i$  es la potencia de entrada o potencia inicial y  $P_o$  es la potencia final o de salida, posteriormente, también se calcula la intensidad o irradianción que describe la potencia incidente por unidad de superficie y se representa de la siguiente manera:

$$I = \frac{P}{A} \quad (2.6)$$

dónde  $P$  representa la potencia pico y  $A$  es el área donde se propaga la luz, y las unidades están dadas por  $W/cm^2$ . En este caso el área se toma el núcleo de la fibra óptica monomodo el cual tiene un diámetro aproximadamente de  $8.1 \mu m$ .

## 2.4 Fotodeposición

La técnica de fotodeposición es una técnica basada en pinzas ópticas utilizada para la deposición selectiva de materiales nanoestructurados sobre el núcleo de una fibra óptica. Ésta técnica se basa en la radiación que ejerce un láser, generando presión de radiación obteniendo las fuerzas de esparcimiento, de absorción y de gradiente; adicionalmente, se genera la fuerza de Stokes que se produce por el calentamiento del líquido debido a la absorción de la radiación láser de las partículas. En la figura 2.5 se muestra la fotodeposición y las fuerzas que actúan en este proceso.

Las fuerza ópticas presentes en el proceso de fotodeposición son: la fuerza gradiente ( $F_{grad}$ ), absorción ( $F_{abs}$ ) y scattering ( $F_{scat}$ ) que actúan en la propagación del haz

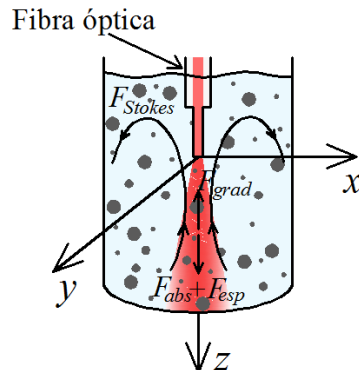


Figura 2.5. Representación esquemática del proceso de fotodeposición [9].

, además de la fuerza de Stokes ( $F_{stokes}$ ) que es la fuerza alcanzada por la partícula debido a las corrientes de convección 2.7. Por lo tanto, la fuerza neta ejercida sobre la partícula está dada por:

$$F_{net} = F_{abs} + F_{scat} + F_{stokes} + F_{grad} \quad (2.7)$$

La expresión para la fuerza scattering y absorción son:

$$\begin{aligned} F_{grad} &= \frac{1}{2} \alpha'(\omega) \nabla E^2, \\ F_{scatt} &= \frac{n}{c} I(r) C_{scatt}, \\ F_{abs} &= \frac{n}{c} I(r) C_{abs}, \end{aligned} \quad (2.8)$$

donde  $\alpha(\omega) = \alpha'(\omega) + I\alpha''(\omega)$  es la polarizabilidad compleja de partículas,  $c$  es la velocidad de la luz,  $I(r)$  es la intensidad del haz,  $n$  el índice de refracción del medio,  $C_{abs}$ , y  $C_{scatt}$ , son la sección transversal de dispersión y absorción, respectivamente.

Por otro lado, con la técnica de fotodeposición, también se puede estimar el tamaño de las nanopartículas que se depositan sobre el núcleo de una fibra óptica, debido a que los tamaños de las nanopartículas fotodepositados dependen de la potencia de la fuente láser con la que se realiza la fotodeposición, lo que indica que este proceso es selectivo con el tamaño de las nanopartículas. En la gráfica de la figura

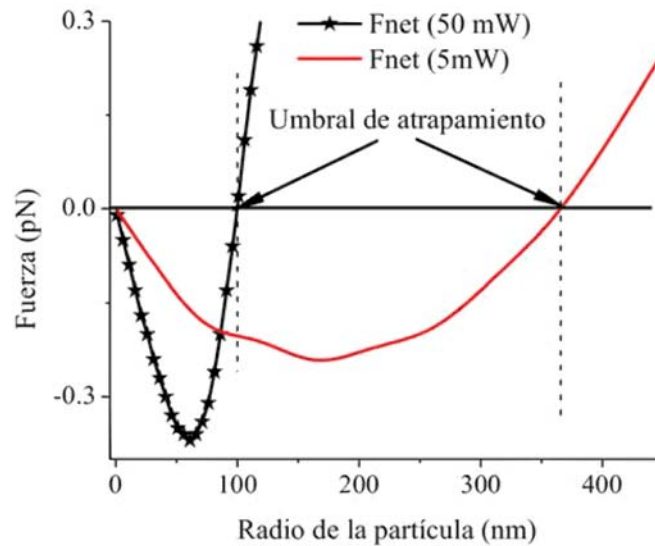


Figura 2.6. Gráfica del tamaño de las nanopartículas fotodepositadas en función de la potencia del láser [9].

2.6 se puede observar una fotodeposición con dos potencias diferentes, una de 50  $mW$  y otra de 5  $mW$ . La fotodeposición con 50  $mW$  de potencia indica que existe una fuerza negativa con radios de partículas menores a 100  $nm$  y las nanopartículas con radios mayores a 100  $nm$  presentan una fuerza positiva. La fuerza negativa indica que las nanopartículas se mueven en sentido contrario a la dirección del haz de la fuente láser, por lo tanto estas nanopartículas se quedarán adheridas al núcleo de la fibra óptica. La fotodeposición de 5  $mW$  indica que existe una fuerza negativa con nanopartículas de radio desde 1 a 400  $nm$ , teniendo su máximo en aproximadamente 200  $nm$ , lo que indica que con esta potencia de fotodeposición se pueden depositar nanopartículas en su mayoría con radios mayores de 100 y menores de 400  $nm$  [9].



# Capítulo 3

## Desarrollo experimental

En este capítulo se describen las técnicas y equipos utilizados para la obtención de los resultados experimentales. Los trabajos experimentales comprenden la técnica de fotodeposición de nanopartículas sobre el núcleo de una fibra óptica, la microscopía de las muestras a través de un microscopio óptico, un microscopio electrónico de barrido (SEM) y un microscopio de fuerza atómica (AFM), el amplificador de alta ganancia, la caracterización no lineal de las nanopartículas de zinc y plata, y finalmente la implementación y caracterización de un láser en configuración de anillo en onda continua usando los materiales fotodepositados como dispositivo de absorción saturable.

### 3.1 Proceso de la fotodeposición

La fotodeposición es una técnica reportada en 2014 que se utiliza para la deposición de materiales nanoestructurados sobre el núcleo de una fibra óptica. Se ha reportado que con esta técnica se puede realizar una deposición de materiales nanoestructurados con distintos tamaños dependiendo de la potencia de deposición [48].

En el proceso de la fotodeposición se utilizaron primero las nanopartículas de zinc mezclados en alcohol isopropílico y posteriormente se utilizaron nanopartículas de plata mezcladas en alcohol isopropílico. El proceso consistió en limpiar el recipiente para quitarle el polvo, grasa, o cualquier residuo de algún material. Posteriormente, se agregó al recipiente 5 *ml* de alcohol isopropílico en 10 *mg* de nanopartículas de zinc. El material utilizado es zinc de la marca Materials research corporation el cual tiene distintos tamaños de partículas con un máximo de hasta 44  $\mu m$  de diámetro. La

cantidad de zinc se midió en una balanza analítica electrónica de la marca Sartorius modelo RC 210 P para posteriormente introducirlo en el recipiente con el alcohol isopropílico y pasarlo por un proceso de ultrasonificación durante 15 minutos. El mismo procedimiento se llevó a cabo para la fotodeposición de nanopartículas de plata, el cual es plata de la marca Sigma-Aldrich con una pureza del metal de 99.5 % con tamaños menores a 100 *nm*.

La fibra óptica monomodo utilizada es de la marca Thorlabs modelo SMF-28 que opera a una longitud de onda desde 1260 *nm* hasta 1650 *nm*. El diámetro del revestimiento es de 125  $\mu\text{m}$  y el diámetro del núcleo es de 8.2  $\mu\text{m}$ . La fibra óptica se preparó quitando el revestimiento con la peladora Micro Strip de la marca Micro electronics, se limpió con alcohol isopropílico para quitarle los residuos del revestimiento y se realizó un corte en el extremo con una cortadora Handy Cleaver modelo FC-7 de la marca Sumimoto para asegurar que el extremo de la fibra no tenga deformidades y provoque pérdidas.

Para el proceso de fotodeposición se utilizó un láser semiconductor de onda continua FPL1009S de la marca Thorlabs, el cual tiene una longitud de onda de 1550 *nm*. En el extremo de la fibra óptica se midió la potencia máxima de salida con un sensor S145C el cual es un detector con InGaAs que opera a una longitud de onda de 800 a 1700 *nm*, detecta a partir de 1  $\mu\text{W}$  hasta 3 *W* de potencia y con un tiempo de respuesta aproximadamente menor a 1  $\mu\text{s}$ , este sensor opera con un medidor de potencia modelo PM100D de la marca Thorlabs que tiene un rango de trabajo desde los 100 *pW* hasta los 200 *W* de potencia, puede soportar hasta 15 *J* de energía óptica y opera en una longitud de onda que va desde los 185 *nm* hasta los 25  $\mu\text{m}$ .

La fotodeposición se realizó colocando el extremo de la fibra óptica dentro del recipiente con la solución de alcohol isopropílico con el nanomaterial, como se muestra en la figura 3.1. El extremo de la fibra óptica se sumergió dentro de la solución a 2 *cm* de profundidad aproximadamente y se verificó las pérdidas inducidas con el medidor de potencia.

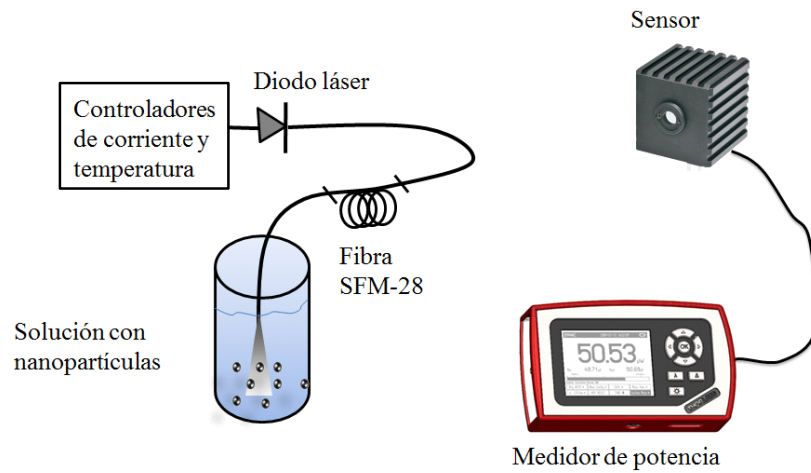


Figura 3.1. Esquema del proceso de fotodeposición.

En la figura 3.2, se muestra la sección transversal de la fibra óptica con nanopartículas de zinc sobre el núcleo de la fibra óptica con una potencia del láser de  $50 \text{ mW}$  produciendo una pérdida de  $3 \text{ dB}$ . Se puede observar que la mayoría del material se concentra en el núcleo de la fibra y pequeñas cantidades aisladas se adhieren en la parte del revestimiento de la fibra óptica.

En la figura 3.3, se muestra la imagen de la sección transversal de una fibra óptica sin depósito de nanopartículas obtenidas a través del microscopio óptico. Se puede observar que no existe deposición de material cuando el láser no está encendido sin importar que la fibra esté sumergida un largo tiempo, esto demuestra que la fotodeposición se realiza por medio de la radiación láser.

Los resultados obtenidos de la técnica de fotodeposición muestran que es una técnica sencilla para realizar deposiciones de materiales nanoestructurados sobre el núcleo de una fibra óptica en comparación con otras técnicas reportadas anteriormente [33]. Por lo anterior, se puede considerar la fotodeposición como una forma de deposición de nanopartículas sobre el núcleo de una fibra óptica recomendable por la sencillez que presenta en un tiempo corto y de bajo costo.

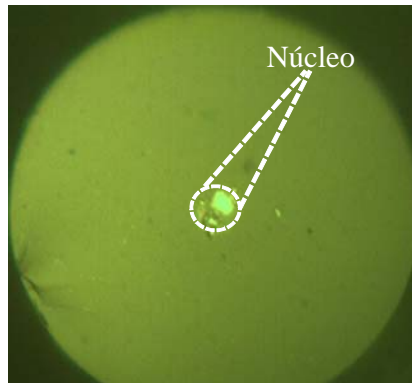


Figura 3.2. Imagen obtenida con un microscopio óptico de la sección transversal de la fibra óptica con fotodeposición de nanopartículas.

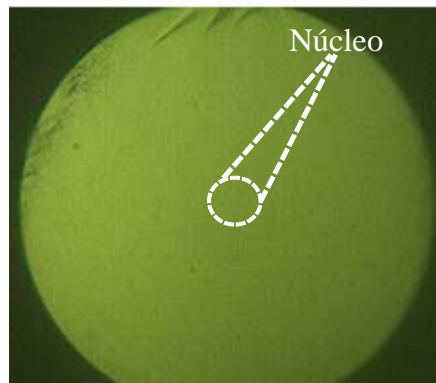


Figura 3.3. Imagen obtenida con un microscopio óptico de la sección transversal de la fibra óptica sin deposición de nanopartículas.

Las muestras obtenidas se utilizaron para llevar a cabo la caracterización no lineal de las nanopartículas las cuales se obtienen por medio de grandes intensidades.

### **3.1.1 Caracterización del láser de onda continua**

El láser de onda continua que se utilizó para el proceso de fotodeposición es del tipo semiconductor modelo FPL1009S de la marca Thorlabs de 14 pines con un acoplador a las salida para fibra óptica monomodo y que trabaja en onda continua emitiendo una longitud de onda típica de 1550 nm. La corriente de operación máxima del

dispositivo es de 500 mA y una temperatura de 25 °C y máximo de 70 °C. Este dispositivo va conectado con un controlador de temperatura y uno de corriente modelo ITC 510 de Thorlabs el cual tiene un rango de trabajo que va desde 0 hasta los 70 °C de temperatura y desde 0 hasta 1 A de corriente. Para caracterizar este dispositivo, se realizó la medición de potencia de salida. En la gráfica de la figura 3.4, se presenta la potencia de salida en función de la corriente, la corriente umbral está aproximadamente en 50 mA, posteriormente, la potencia incrementa de manera lineal hasta llegar a una corriente de 350 mA obteniendo como potencia máxima 54 mW.

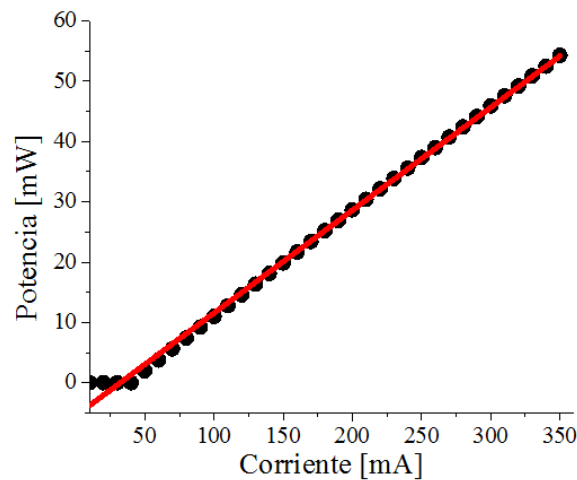


Figura 3.4. Gráfica de la potencia de salida del diodo láser con respecto a la corriente.

El láser de onda continua se utilizó para el proceso de fotodeposición y obtener un absorbedor saturable a base de nanopartículas fotodepositadas sobre el núcleo de una fibra óptica. Las imágenes de las muestras de fibra óptica con nanopartículas se obtuvieron a través de los equipos de microscopía.

## 3.2 Microscopía

Las muestras de fibra óptica con nanopartículas fotodepositadas en el núcleo se observaron a través del SEM de la marca TESCAN modelo VEGA TS 5136SB, el cual permite la caracterización morfológica. Posteriormente, se utilizó el AFM de la marca QUESANT el cual permite obtener una morfología superficial y de perfil de la fibra óptica.

En la figura 3.5 a) se puede ver la imagen de la parte transversal de una fibra óptica con nanopartículas de zinc con una potencia de fotodeposición de  $50\text{ mW}$  obtenida a través del SEM y se puede observar que en el área del núcleo se adhieren la mayoría del material, existe material adherido en otras zonas de la fibra pero son pequeñas cantidades y dispersas en el área del revestimiento. En la figura 3.5 b) se puede ver la imagen obtenida a través del AFM de un área de  $25\ \mu\text{m}$  en donde se ve que existe una concentración de partículas muy pequeñas en el centro donde está el área del núcleo. En la figura 3.5 c) se puede ver la imagen obtenida con el AFM en 3D, en el centro de la imagen se puede ver el núcleo de la fibra con las nanopartículas y en la parte inferior de la imagen se ve nanopartículas aglomeradas de mayor tamaño pero en la zona del revestimiento.

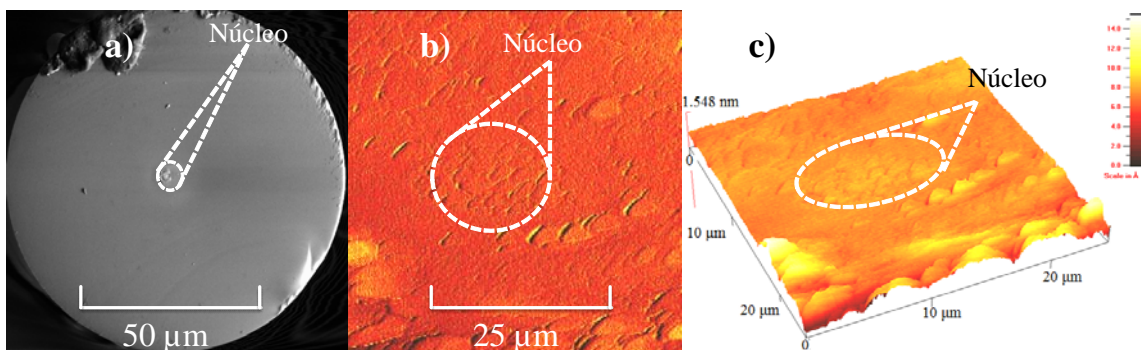


Figura 3.5. Imágenes de una fibra óptica con nanopartículas de zinc fotodepositadas a  $50\text{ mW}$ . a) Imagen obtenida del SEM, b) AFM en 2D y c) AFM en 3D.

En la figura 3.6 a) se puede ver una imagen obtenida del SEM pero ahora con una potencia de  $40\text{ mW}$ , en esta imagen se puede observar que las nanopartículas se adhieren en distintas zonas de la fibra pero existe una mayor concentración de nanopartículas en el centro y debido a que el haz láser pasa por el núcleo de la fibra óptica, las nanopartículas adheridas en el revestimiento no tienen efecto alguno para el estudio realizado. En la figura 3.6 b) se puede ver una imagen de la zona del núcleo de la fibra óptica obtenida del AFM en 2D, las nanopartículas de distintos tamaños se ven aglomeradas en el centro perteneciente al núcleo. En la figura 3.6 c), la imagen presentada es obtenida del AFM en 3D, en dónde se puede ver la concentración de las nanopartículas sobre el núcleo de la fibra óptica ubicada en el centro de la imagen.

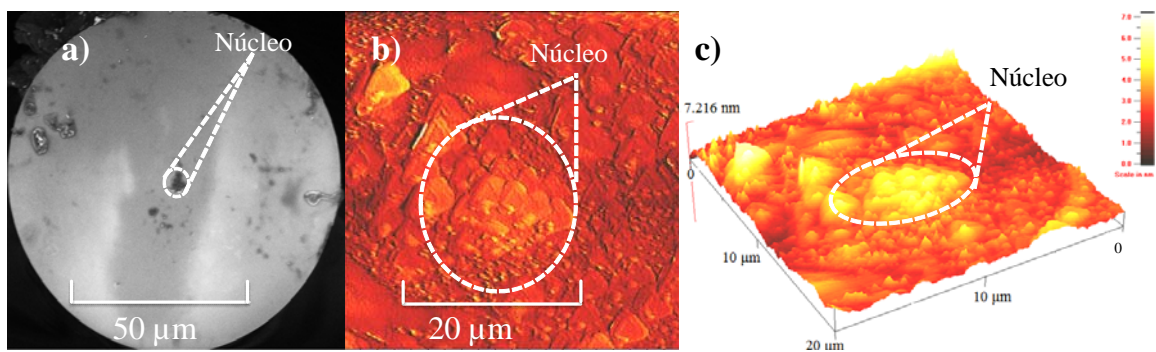


Figura 3.6. Imágenes de una fibra óptica con nanopartículas de zinc fotodepositadas a  $40\text{ mW}$ . a) Imagen obtenida del SEM, b) AFM en 2D y c) AFM en 3D.

También se obtuvieron las imágenes de la fibra óptica con nanopartículas de plata con potencia de fotodeposición de  $20\text{ mW}$ . En la figura 3.7 a) se observa la imagen obtenida a través del SEM, en donde se puede apreciar que las nanopartículas se acumulan en su mayoría en el centro de la fibra óptica y otras están dispersas en el área del revestimiento. En la figura 3.7 b), se puede ver la imagen obtenida del AFM en 2D dónde se aprecia la aglomeración de muchas partículas en el centro de la fibra óptica con tamaños más grandes, esto debido a que la potencia de fotodeposición de esta muestra fue más baja que las anteriores. En la figura 3.7 c) se ve la imagen

obtenida del AFM en 3D, en donde se puede ver las nanopartículas aglomeradas en el centro de la fibra óptica.

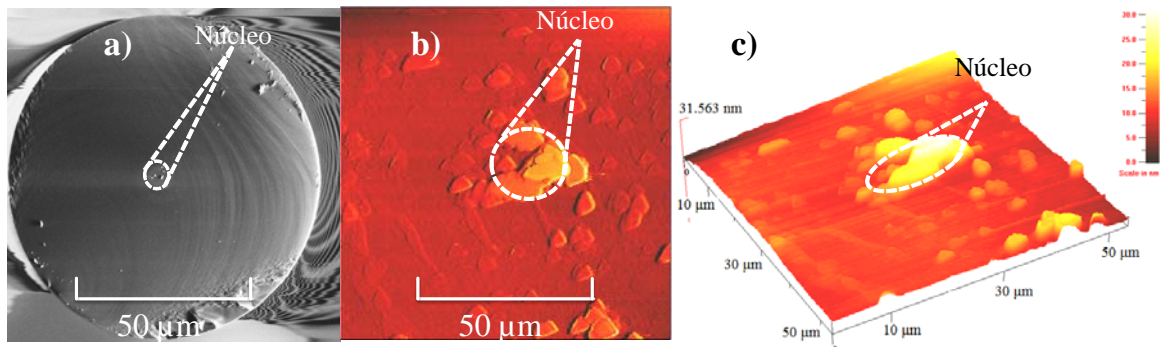


Figura 3.7. Imágenes de una fibra óptica con nanopartículas de plata fotodepositadas a  $20\text{ mW}$ . a) Imagen obtenida del SEM, b) AFM en 2D y AFM en 3D.

### 3.3 Amplificador de alta ganancia

El estudio de las propiedades ópticas no lineales de las nanopartículas fotodepositadas sobre el núcleo de una fibra óptica se llevó a cabo con un amplificador pulsado de alta ganancia de fibra dopado con erbio que puede producir hasta  $900\text{ W}$  de potencia pico.

El amplificador de alta ganancia está compuesto por un diodo láser de retroalimentación distribuida (DFB) modelo DL-5335-VXS de la compañía Optoway el cual opera con una corriente de  $9.8\text{ mA}$  con una potencia máxima de salida de  $2\text{ mW}$ , su longitud de onda típica es de  $1550\text{ nm}$ . Este dispositivo tiene un sistema de enfriamiento controlado por un controlador de temperatura modelo TEC 2000 de Thorlabs que cuenta con un rango de corriente de  $0$  a  $2\text{ A}$  y con una temperatura de  $0$  a  $40\text{ }^\circ\text{C}$  y que a su vez tiene un sensor de temperatura con un tiempo de estabilización de aproximadamente 10 minutos. También cuenta con un controlador de corriente para tener una potencia estable; el controlador de corriente es modelo LDC 500 de



Thorlabs con un rango de operación programable desde 0 hasta  $\pm 500$  *mA* teniendo un rango de operación óptima entre 0 a 40 °C.

El amplificador de alta ganancia cuenta con dos etapas de amplificación como se muestra en la figura 3.8. La primera etapa consiste en un circulador óptico de tres puertos modelo 6015-3 de Thorlabs que opera en un rango de 1525 a 1610 *nm* de longitud de onda con una pérdida de 1 *dB* máximo y una potencia máxima de operación de 500 *mW*, en donde la señal pulsada se conecta al puerto 1 y el puerto 2 está conectado a 12 *m* de fibra dopado con erbio que a su vez está conectado a un WDM modelo WPN052407 de Thorlabs. Este dispositivo WDM opera en un rango de 980 a 1550 *nm* de longitud de onda con una pérdida por inserción de 0.55 *dB*. Posteriormente el WDM se conecta en uno de sus puertos con una rejilla de Bragg modelo FOSS2CX6166 de Avensys cuya característica principal es que tiene una reflectividad entre 95 y 100 % a una longitud de onda de 1550 *nm*. El otro puerto del WDM está conectado con un acoplador óptico 70/30 modelo CWD07080917 y dicho acoplador está conectado a la fuente de bombeo.

La segunda etapa comienza en el puerto 3 del primer circulador que se conecta a un segundo circulador de las mismas características del primero circulador mencionado anteriormente y esta segunda etapa tiene los mismos elementos de la primera etapa.

En la figura 3.9 a) se muestra la forma del pulso de la señal de entrada con un tiempo de 20 ns en donde se puede apreciar una forma cuadrada y la señal de salida pulsada muestra un decaimiento. En la figura 3.9 b) se observa la señal pulsada de entrada a 40 ns y nuevamente se observa una señal cuadrada pero la señal de salida muestra un decaimiento más pronunciado. Comparando las dos señales de salida se puede observar que la señal de entrada de 20 ns se deforma menos que el de 40 ns, lo que significa que el decaimiento del pulso de salida es mayor cuando el ancho temporal aumenta, esto se debe a que el amplificador de alta ganancia trabaja en la región de saturación y la intensidad de los pulsos es muy alta para generar una gran emisión

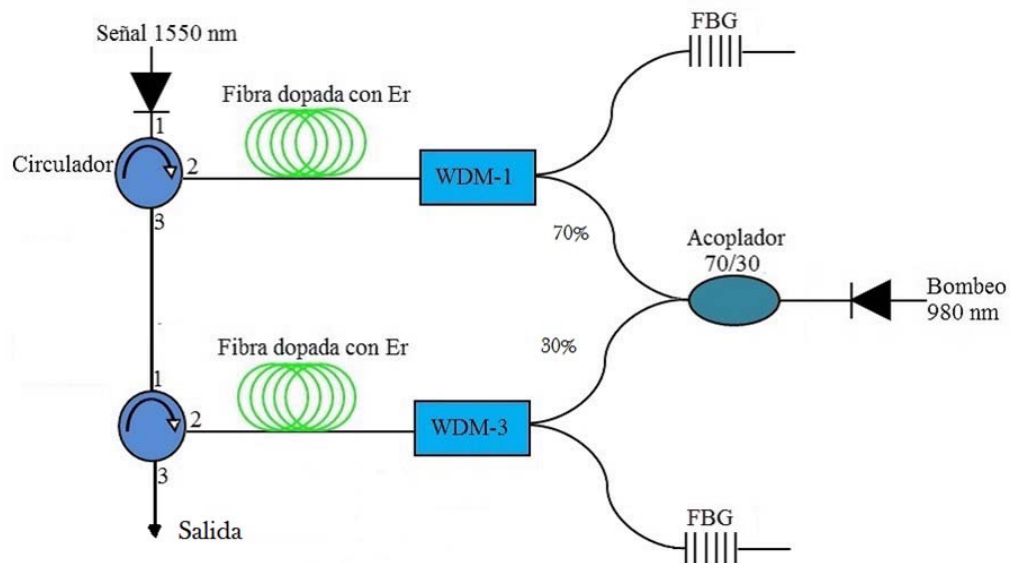


Figura 3.8. Arreglo experimental del amplificador de alta ganancia [34]

estimulada en el amplificador de alta ganancia y por lo tanto el bombeo no mantiene una inversión de población para estas altas intensidades [34].

El láser de bombeo que se utilizó es un modelo PL980P330J de la compañía Thorlabs, este modelo es de tipo mariposa de 14 pines, su longitud de onda de emisión es de  $975\text{ nm}$ , cuenta con una potencia de salida de máxima de  $330\text{ mW}$  y la corriente umbral típica es de  $75\text{ mA}$  y la máxima de  $90\text{ mA}$ . En la figura 3.10 a) se muestra un diodo láser de bombeo utilizado.

En la figura 3.10 b) se muestra el arreglo experimental para realizar la caracterización del amplificador de alta ganancia, en donde se aprecia el amplificador conectado por medio de fusión con la fibra óptica, posteriormente se mide la potencia de salida que existe en la salida de la fibra óptica a través de un conector temporal que se conecta al medidor de potencia y posteriormente se realiza el procesamiento de los datos por medio de un ordenador.

En la figura 3.11 a) se muestra el resultado de las mediciones realizadas de la potencia pico en función del tiempo con frecuencias de 1, 2, 3 y 4  $\text{kHz}$ . En esta gráfica se puede apreciar que la frecuencia de 1  $\text{kHz}$  tiene la mayor potencia pico con

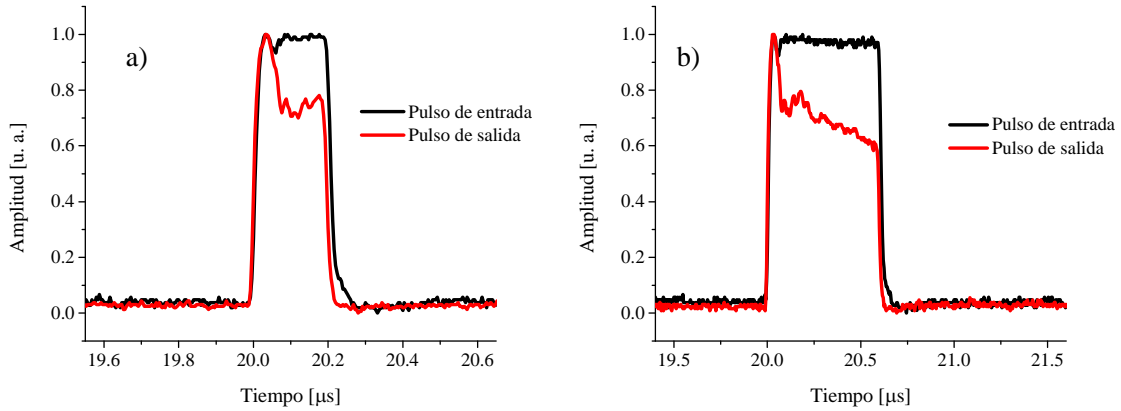


Figura 3.9. Forma de pulsos de entrada y de salida del amplificador de alta ganancia, a) Ancho temporal de 20  $ns$ , b) Ancho temporal de 40  $ns$ .

un ancho temporal de 10  $ns$ , obteniendo aproximadamente los 900  $W$ , esta potencia pico va disminuyendo cuando aumenta el ancho de pulso y de esta forma llega a un mínimo de 100  $W$  de potencia pico con un ancho de pulso de 60  $ns$ . Para el caso de la frecuencia de 2  $kHz$ , presenta una menor potencia pico máxima con el ancho temporal de 10  $ns$  en comparación con la muestra anterior, teniendo así una potencia pico máxima de aproximadamente 480  $W$  con el ancho temporal de 10  $ns$ , y de la misma forma, disminuye la potencia pico hasta 80  $W$  con el ancho temporal de 60  $ns$ . La frecuencia de 3  $kHz$ , presenta un comportamiento similar a las anteriores con una potencia pico máxima de 350  $W$  con el ancho temporal de 10  $ns$  y una potencia pico mínima de 50  $W$  aproximadamente con un ancho temporal de 60  $ns$ . La frecuencia de 4  $kHz$  tiene un máximo valor de potencia pico de 230  $W$  y un valor mínimo de 40  $W$  con los mismos valores del ancho temporal de los anteriores.

En la figura 3.11 b) se muestran un segundo grupo de mediciones en donde se observa que a la frecuencia de 5  $kHz$  tiene una potencia pico máxima de 180  $W$  con un ancho temporal de 10  $ns$  el cual disminuye su valor hasta 30  $W$  de potencia pico aproximadamente con un ancho temporal de 60  $ns$ ; también se observa que la frecuencia con potencia pico más baja es la de 20  $kHz$  alcanzando aproximadamente

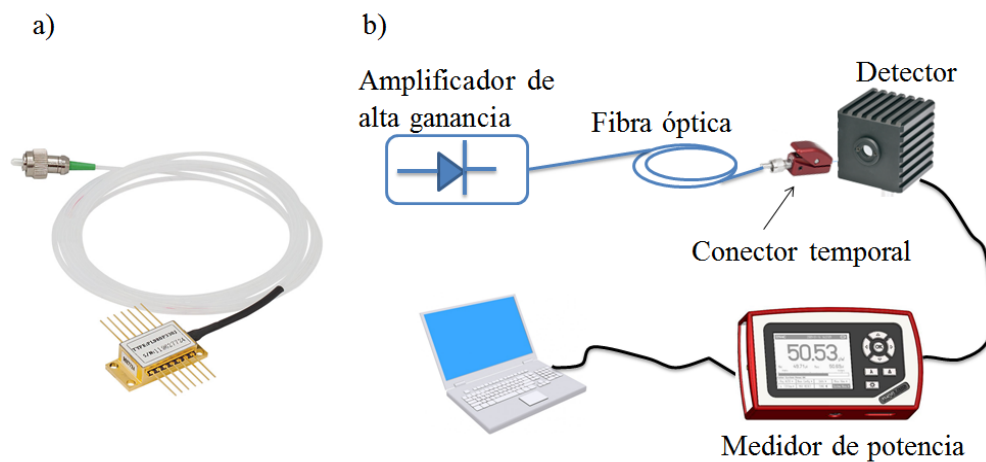


Figura 3.10. a) Diodo láser de bombeo a  $980 \text{ nm}$  de tipo mariposa. b) Arreglo experimental para la caracterización del amplificador de alta ganancia.

$50 \text{ W}$  con un ancho de pulso de  $10 \text{ ns}$  y dicha potencia pico disminuye hasta llegar a los  $10 \text{ W}$  con un ancho de pulso de  $60 \text{ ns}$ . La frecuencia de  $8 \text{ kHz}$  tiene potencia pico de  $120 \text{ W}$  con  $10 \text{ ns}$  y una potencia pico de  $25 \text{ W}$  con el ancho temporal de  $60 \text{ ns}$ . Las frecuencias de  $10$  y  $15 \text{ kHz}$  tienen potencia pico máxima de aproximadamente  $95$  y  $75 \text{ W}$  respectivamente con un ancho temporal de  $10 \text{ ns}$  y una potencia pico mínima de  $18$  y  $15 \text{ W}$  respectivamente con un ancho temporal para ambos de  $60 \text{ ns}$ .

Los resultados obtenidos en esta sección muestran que el arreglo experimental puede ser usado para llevar a cabo el estudio de las propiedades no lineales en fibras ópticas debido a que para hacer este estudio se necesita altas intensidades y el arreglo es capaz de suministrar hasta  $900 \text{ W}$  de potencia pico con los parámetros programados en el generador de pulsos de  $1 \text{ kHz}$  de frecuencia y un ancho de temporal de  $10 \text{ ns}$ . La ventaja que tiene el arreglo se debe a que se puede cambiar la potencia pico mediante la variación del ancho temporal y la frecuencia.

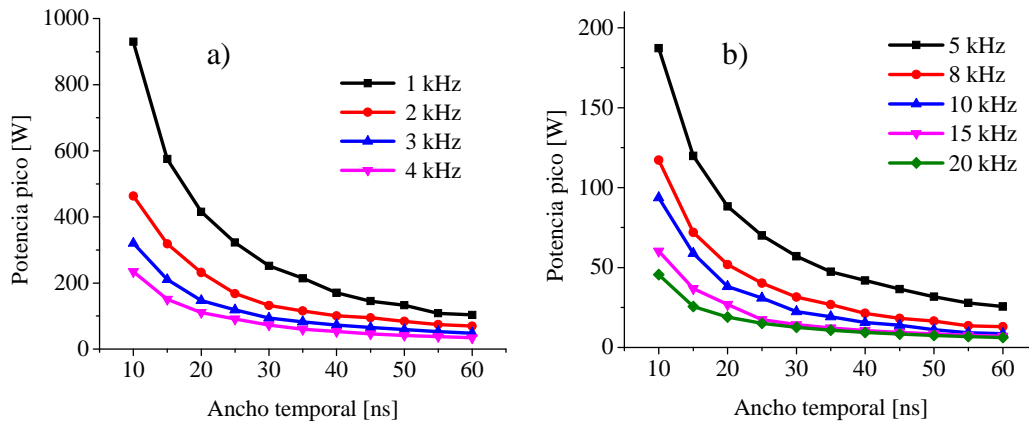


Figura 3.11. Gráficas de a) caracterización del amplificador de alta ganancia a) frecuencias de 1, 2, 3 y 4  $kHz$  y b) frecuencias de 5, 8, 10, 15 y 20  $kHz$ .

### 3.4 Caracterización no lineal de las nanopartículas fotodepositadas en la fibra óptica

#### 3.4.1 Nanopartículas de zinc

La caracterización no lineal de las nanopartículas fotodepositadas sobre el núcleo de una fibra óptica se llevó a cabo haciendo un conjunto de 4 muestras con una entrada de potencia fija de 50  $mW$  y potencias de salida a 45, 35, 25 y 15  $mW$ , obteniendo diferentes pérdidas inducidas en cada muestra, como se observa en la Tabla 3.1.

Por otro lado, también se realizó la caracterización no lineal de otro conjunto de 4 muestras de fibra con nanopartículas de zinc en el núcleo, pero en esta ocasión realizando la fotodeposición para diferentes potencias de entrada y con pérdidas inducidas fijas a de 3  $dB$ ; las muestras quedaron con potencias de entrada de 50, 40, 30 y 20  $mW$  y con potencias de salida de 25, 20, 15 y 10  $mW$  respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.2

La medición de la transmisión en función de la intensidad de las 8 muestras se realizó con un ancho temporal de 20  $ns$  y una frecuencia de 2  $kHz$ . Se determinó

utilizar estos valores ya que con estos valores la forma del pulso en la salida es cuadrada sin decaimiento además de ser más estable que a otros anchos temporales.

Una vez ajustado los parámetros de frecuencia y ancho de pulso para la medición, se prosiguió a la obtención de los datos medidos de la potencia de salida de las muestras que se obtienen variando la corriente del láser de bombeo a partir de los 200 hasta los 400 *mA* guardando datos cada 10 *mA*. Para procesar los datos de cada medición fue necesario desarrollar un algoritmo en el lenguaje de programación de MATLAB con el objetivo de obtener los datos de una forma más rápida y sencilla. En la figura 3.12 se muestra el procedimiento que se realiza en el algoritmo para obtener el valor de la potencia de salida en cada medición.

Tabla 3.1: Tabla de los valores de potencia en el proceso de fotodeposición con pérdidas inducidas variables.

No. de muestra	$P_{ent}$ (mW)	$P_{sal}$ (mW)	Pérdidas (dB)	Pérdidas (%)
A1	50	45	0.5	10
A2	50	35	1.5	30
A3	50	25	3	50
A4	50	15	5.2	70

Tabla 3.2: Tabla de los valores de potencia en el proceso de fotodeposición con pérdidas inducidas fijas.

No de muestra	$P_{ent}$ (mW)	$P_{sal}$ (mW)	Pérdidas (dB)	Pérdidas (%)
B1	50	25	3	50
B2	40	20	3	50
B3	30	15	3	50
B4	20	10	3	50

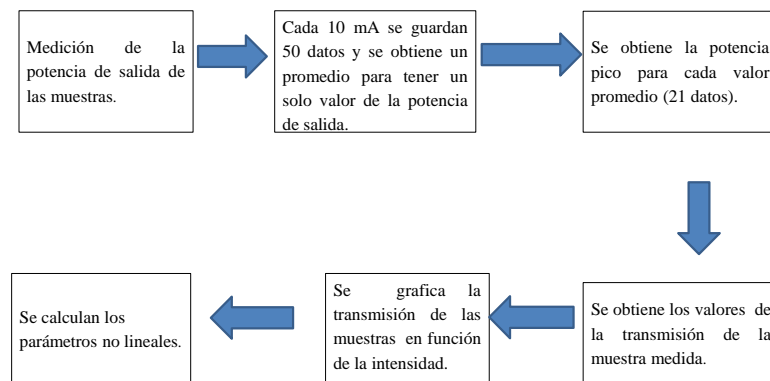


Figura 3.12. Diagrama a bloques del procedimiento del algoritmo desarrollado en MATLAB

Se realizó la medición de la transmisión entre dos fibras ópticas sin nanopartículas fotodepositadas, las cuales se midieron en las mismas condiciones y por lo tanto se debe comportar idealmente de manera lineal con una transmisión del 100 %, por lo tanto se realizó la comparación entre dos fibras sin nanopartículas fotodepositadas para asegurar que el comportamiento de la transmisión de la fibra no presente efectos no lineales que se le pueda atribuir. En la figura 3.13 se muestra el resultado de dos fibras sin nanopartículas fotodepositadas a 2  $kHz$  con un ancho de pulso de 20

*ns.* Se puede observar que los resultados obtenidos de estas muestras son confiables ya que tienen una transmisión del 100 %.

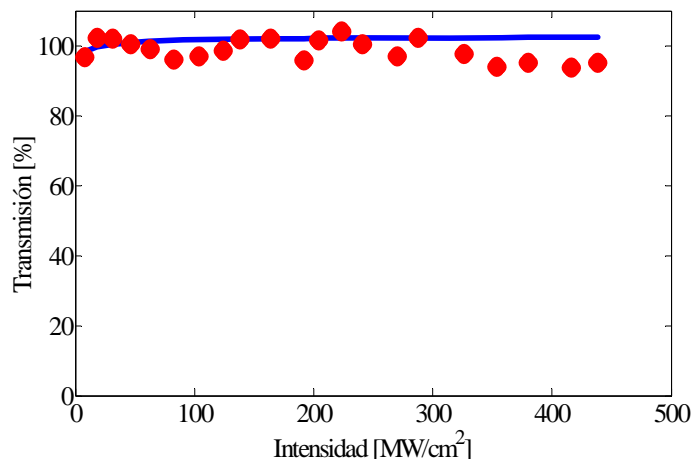


Figura 3.13. Gráfica de la transmisión de una fibra óptica sin fotodeposición de nanopartículas.

La medición anterior también permite asegurar que las muestras de fibra sin nanopartículas fotodepositadas puedan ser usadas para obtener la transmisión de las muestras de fibra con nanopartículas fotodepositadas de una manera confiable.

Por otro lado, la transmisión de cada muestra se le agregó un ajuste para poder observar de su comportamiento y fue analizada aplicando la ecuación de Beer-Lambert dada por

$$T = e^{\alpha(I)L}, \quad (3.9)$$

dónde  $\alpha(I)$  es el coeficiente de absorción total y  $L$  es el espesor de la muestra. Cuando el absorbente saturable está presente, la eq.3.9 puede ser expresada como

$$T = e^{\left(\frac{\alpha_0}{1 + I/I_{sat}}\right)L}, \quad (3.10)$$



dónde  $I_{sat}$  es la intensidad de saturación definida como la intensidad en donde el cambio de transmitancia alcanza el 50 % de la profundidad de modulación y es  $\alpha_0$  el coeficiente de absorción no lineal.

El cálculo de la susceptibilidad no lineal del material tiene la siguiente expresión en el sistema internacional (SI)

$$lm(x^{(3)}) = \frac{\lambda \epsilon_0 n_0^2 c \alpha_0}{4\pi}, \quad (3.11)$$

dónde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $\epsilon_0$  es la permitividad en el espacio libre y  $n_0$  es el índice de refracción de las nanopartículas de zinc.

### 3.4.2 Nanopartículas de plata

Se realizó también la caracterización no lineal de otro material metálico, en este caso fueron nanopartículas de plata para conocer si presenta efectos no lineales, principalmente el fenómeno de absorción saturable para poder utilizarlo como un dispositivo de conmutación dentro de la cavidad de anillo.

El procedimiento para la caracterización no lineal de las nanopartículas de plata fue la misma que se utilizó con las nanopartículas de zinc, con la diferencia que en esta ocasión solo se realizó una muestra para identificar si existen dichos efectos no lineales. La muestra se realizó con una fotodeposición de 10 *mW* de potencia de entrada con una pérdida de 3 *dB*. Esta muestra también se midió con el amplificador de alta ganancia para conocer el comportamiento de la transmisión en función de la intensidad. Los resultados obtenidos se describen en el capítulo 4.

### 3.5 Láser de fibra óptica en cavidad de anillo

La configuración de anillo permite la retroalimentación necesaria de la señal estimulada, y de esta forma puede alcanzar mayores potencias de emisión en la salida láser [49]. Esta configuración es de la más sencilla para realizar pruebas experimentales para la generación de pulsos.

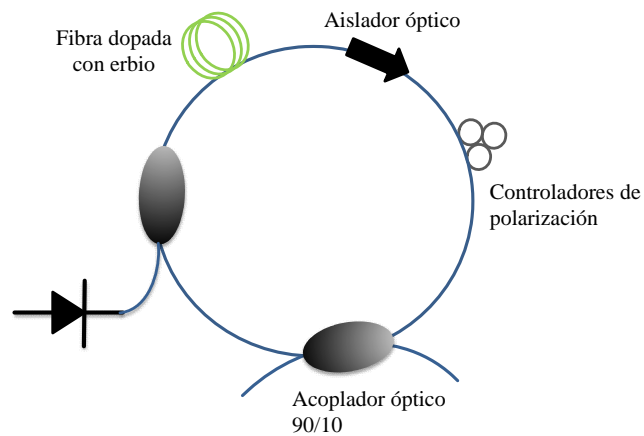


Figura 3.14. Diagrama del láser en cavidad de anillo.

En la figura 3.14 se muestra el esquema del sistema láser en cavidad de anillo que se utilizó para la implementación del láser pulsado. El láser en cavidad de anillo está conformado por un láser de bombeo, un WDM, fibra dopada con erbio, un aislador óptico, controladores de polarización y un acoplador 90/10.

#### Láser de bombeo

El láser de bombeo que se utilizó es un diodo láser semiconductor modelo PL980P330J de la marca Thorlabs, es de tipo mariposa que cuenta con 14 pines, la corriente máxima en la que puede operar es de  $720\text{ mA}$  con una potencia máxima de salida de  $330\text{ mW}$ , trabaja en la longitud de onda típico de  $975\text{ nm}$ . Este dispositivo se fija a una base modelo LM14S2 de la marca Thorlabs el cual tiene puertos de

salida DB9 para los controladores de temperatura y corriente modelo ITC 510 de la marca Thorlabs.

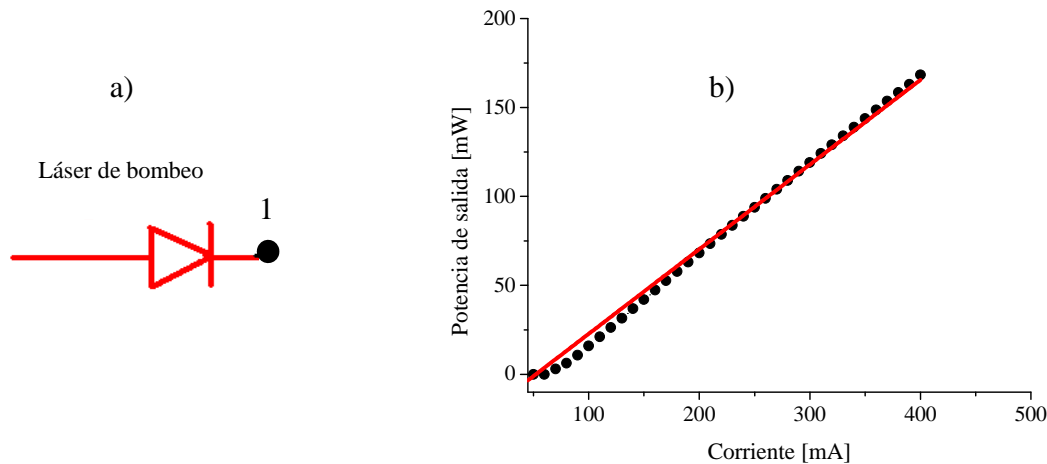


Figura 3.15. Caracterización del láser de bombeo, a) símbolo y punto de la salida, b) Gráfica del comportamiento del láser de bombeo.

La caracterización del láser de bombeo se muestra en la figura 3.15. En el inciso a), se muestra el punto de la salida del láser y en el inciso b) se observa la gráfica de su comportamiento en donde se puede observar que comienza a transmitir una señal a través de la fibra óptica a partir de una corriente de  $70 \text{ mA}$  y con la corriente máxima de  $400 \text{ mA}$  se obtiene la máxima potencia de salida de aproximadamente  $170 \text{ mW}$  obteniendo un comportamiento lineal. En la salida del láser de bombeo se conecta un WDM para combinar las señales de bombeo y la de retroalimentación.

### Multiplexor por longitud de onda (WDM)

El WDM es un dispositivo que se utiliza para transmisiones múltiples en las fibras ópticas enviando señales de diferentes longitudes de onda sobre la misma fibra lo que permite agrandar el ancho de banda de la fibra y permite una comunicación bidireccional.

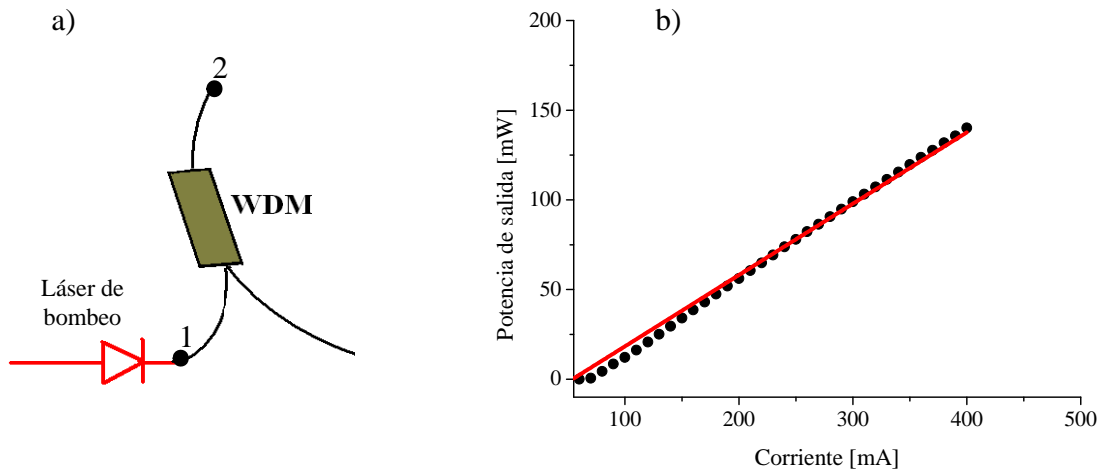


Figura 3.16. Caracterización del WDM. a) esquema del punto de medición, b) gráfica del comportamiento del WDM.

El dispositivo que se utilizó en este arreglo fue el modelo WD202A-FC de la marca Thorlabs que opera con una potencia de bombeo máxima de  $300 \text{ mW}$ , trabaja en un rango de longitud de onda entre  $980$  y  $1550 \text{ nm}$  el cual está conectado una de sus entradas con el láser de bombeo y posteriormente a su salida se empalmó con la fibra dopada con erbio. En la figura 3.16 a), se observa el esquema en donde en el punto 2 se midió la salida de la señal del WDM y en la figura 3.16 b), se puede ver la gráfica del comportamiento de la señal de salida después de haberse conectado al diodo láser de bombeo en donde se observa que tiene un comportamiento lineal que empieza a transmitir a una corriente de  $80 \text{ mA}$  y la potencia máxima en la salida es de  $140 \text{ mW}$ , lo que indica que existen pérdidas al conectarse este dispositivo de  $0.8 \text{ dB}$ .

### Fibra dopada con Erblio

La fibra dopada con erbio es una fibra estándar que contiene en el núcleo iones de erbio con la finalidad de que este elemento sea el medio activo que proporcione la amplificación de la señal a una longitud de onda de  $1550 \text{ nm}$ . La fibra dopada con

erbio utilizada en el arreglo es modelo M12-980-125 de 10 m de longitud de la marca Thorlabs con un dopaje de 100 ppm.

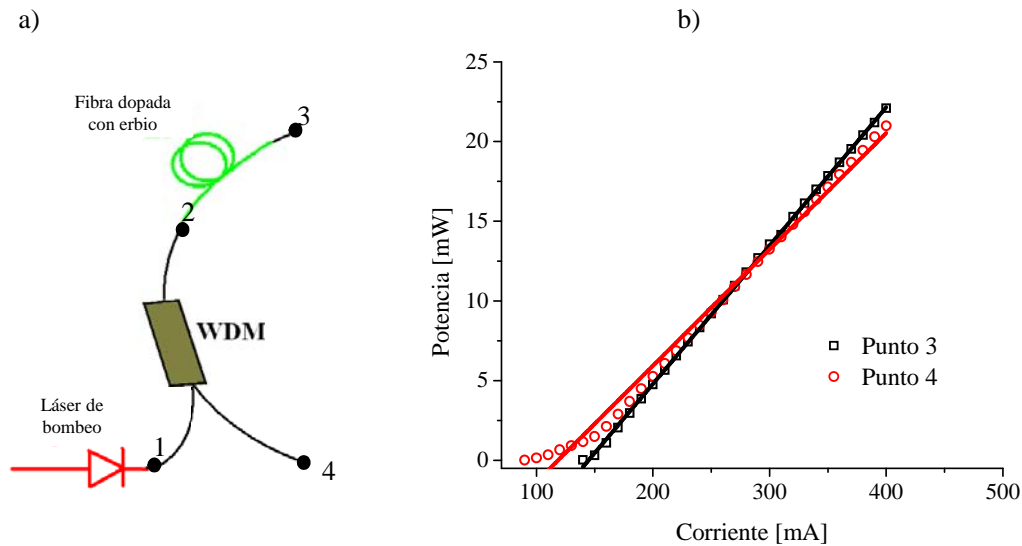


Figura 3.17. a) Esquema con los puntos de medición para caracterizar la fibra dopada con erbio. b) Gráfica del comportamiento del erbio.

En la figura 3.17 a) se muestra el diagrama con los puertos donde se realizaron las mediciones. En el puerto 3 se midió la salida después de conectar la fibra dopada con erbio y en el puerto 4 se midió la entrada del WDM para la caracterización. En la figura 3.17 b), se muestra la gráfica de la potencia de salida después de conectar el WDM con la fibra dopada con erbio, así como la potencia de salida en la entrada del WDM. En la gráfica se observa que en la salida en la fibra dopada con erbio (puerto 3) la potencia se obtiene a partir de una corriente de 160 mA y va en aumento de forma lineal hasta llegar a una potencia máxima de 22 mW a la máxima corriente de bombeo, lo que indica que la potencia máxima de salida disminuyó considerablemente. Por otro lado, en la entrada del WDM (puerto 4) existe una señal de reflexión que se comporta de una forma muy similar. La fibra dopada con erbio se conectará posteriormente a un aislador óptico para hacer circular en un solo sentido la señal.

## Aislador óptico

El aislador óptico es un dispositivo que se caracteriza por que permite que la radiación láser se propague en un solo sentido y evita el paso en sentido contrario. El aislador óptico que se utilizó es el modelo IO-H-1550 de la marca Thorlabs, este dispositivo tiene pérdidas típicas entre 0.3 y 0.7  $dB$ , trabaja a una potencia máxima de 300  $mW$  y opera a una longitud de onda desde 1530 hasta 1570  $nm$ .

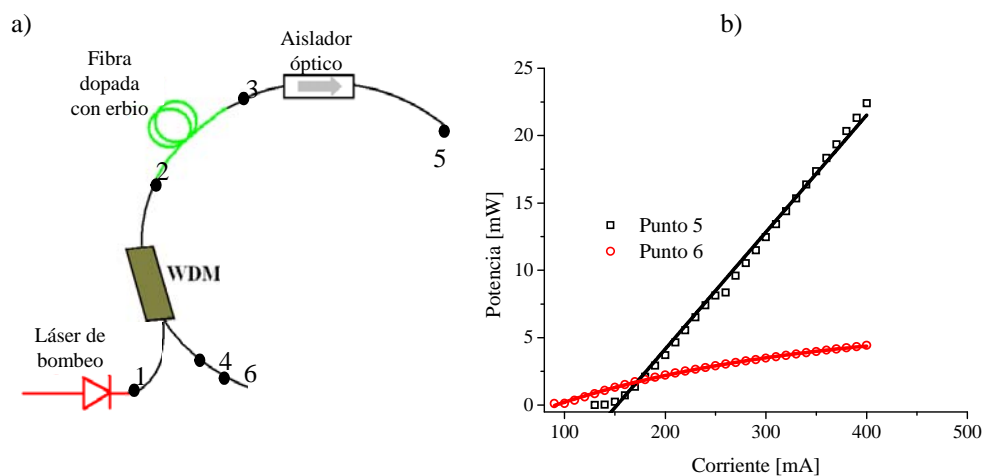


Figura 3.18. a) Diagrama de los puntos de medición, b) Gráfica de la caracterización del aislador óptico.

En la figura 3.18 a) se muestra el diagrama de los puntos de medición y en la figura 3.18 b) se muestra la gráfica de las mediciones en la salida del aislador (puerto 5) y se obtiene la potencia mínima con una corriente de 160  $mA$  aumentando de forma lineal hasta llegar a la potencia máxima de 22  $mW$  con la corriente máxima, manteniendo la misma potencia que se tenía a la salida de la fibra dopada con erbio. En la entrada del WDM (puerto 6), la potencia descendió considerablemente, debido a que el aislador óptico permite la circulación de la señal en un solo sentido evitando que la señal retorne al WDM, por lo que su potencia máxima solo llegó a 4  $mW$  aproximadamente.

El aislador óptico se conecta posteriormente a los controladores de polarización con el fin de poder optimizar la señal que va hacia el acoplador.

### Controladores de polarización

Los controladores de polarización que se utilizaron en el arreglo experimental fue el modelo FPC560 de la marca Thorlabs que contienen 3 placas para el enrollamiento de la fibra óptica con un diámetro de  $56\text{ mm}$ . En la figura 3.19 a) se muestra el esquema de los controladores de polarización en el láser en cavidad de anillo. En la figura 3.19 b), se muestra la potencia de salida del sistema láser después de pasar por los controladores de polarización (puerto 7), en donde se puede observar que existe una transmisión de la señal a partir de los  $160\text{ mA}$  aproximadamente con una potencia de  $1.5\text{ mW}$  y va en aumento de forma lineal hasta llegar a la potencia máxima de  $20.1\text{ mW}$  con la corriente máxima de  $400\text{ mA}$ . Después de medir la salida del controlador de polarización, se conectó el acoplador óptico en la entrada del WDM y se midió la señal que existía en la entrada del acoplador (puerto 8). En la gráfica se observa el comportamiento de dicha señal.

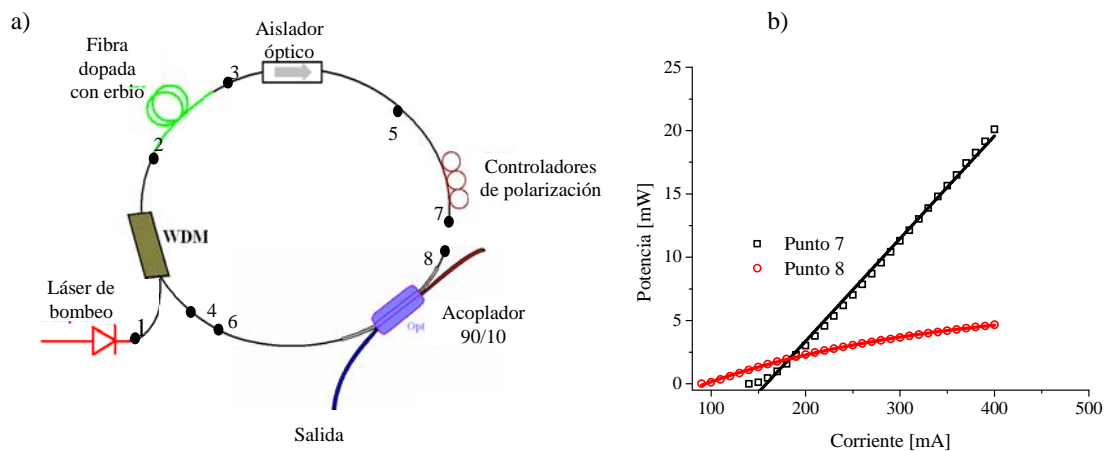


Figura 3.19. Esquema de los controladores de polarización en el láser y b) Gráfica de la potencia de salida de los controladores de polarización.

## Acoplador óptico

Un acoplador de fibra óptica es un dispositivo que tiene la capacidad de distribuir la señal óptica de una fibra entre dos o más fibras, además, puede ser utilizado para acoplar dos señales ópticas, tiene como característica principal las bajas pérdidas de inserción, buen comportamiento en longitud de onda selectiva o banda ancha, alta sensibilidad térmica, mecánica y tienen altas pérdidas de retorno.

El acoplador que se utilizó en el arreglo experimental fue un acoplador óptico 90/10 modelo CWD07014557 de la marca Thorlabs en donde el 90 % de la señal servirá para retroalimentar el sistema y el 10 % será la salida del sistema láser en cavidad de anillo. En la figura 3.20 a) se presenta el diagrama del sistema láser en cavidad de anillo con el acoplador óptico incluido. En la figura 3.20 b) se muestra el comportamiento de la salida del acoplador (punto 9) después de conectarse a la salida de los controladores de polarización; se observa que existe una señal a partir de los 160 mA aproximadamente, y dicha señal va en aumento hasta alcanzar 4.86 mW de potencia con la máxima corriente.

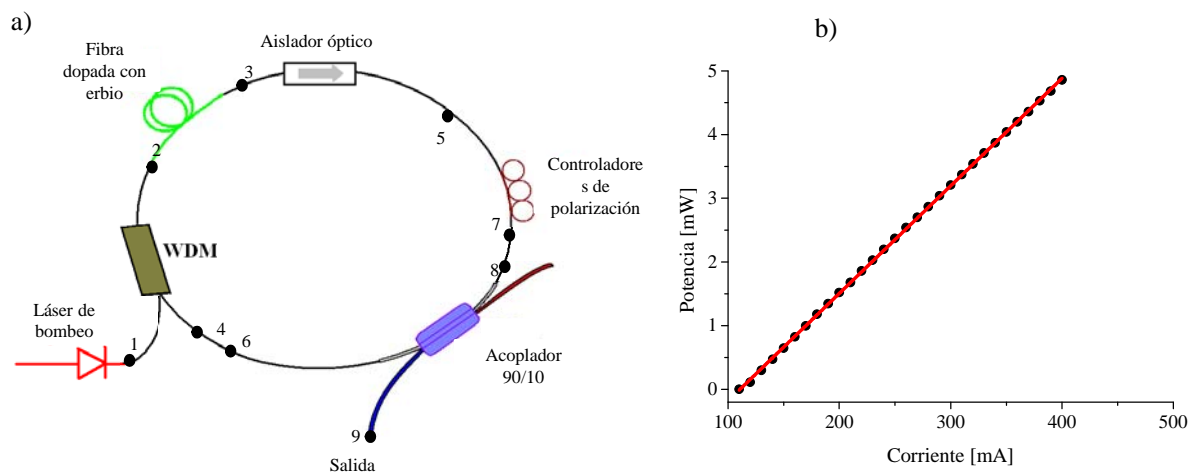


Figura 3.20. a) Diagrama del láser en cavidad de anillo con el acoplador 90/10 y b) Comportamiento de la salida del acoplador.



En la figura 3.21 se muestra el espectro del láser en configuración de anillo en onda continua obtenida con un analizador de espectros óptico (OSA) modelo MS9740A, en dónde se puede observar que tiene un rango entre 1560 *nm* aproximadamente hasta 1640 *nm* con un pico máximo de aproximadamente 1603 *nm*.

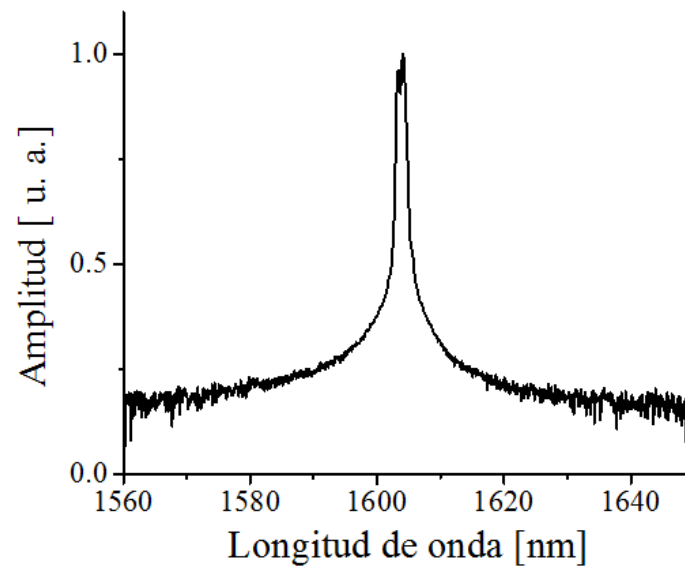


Figura 3.21. Espectro del láser en configuración de anillo en onda continua.

# Capítulo 4

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados experimentales de la transmisión de las nanopartículas de zinc y las nanopartículas de plata a bajas potencias que fueron fotodepositadas sobre el núcleo de una fibra óptica y la caracterización no lineal utilizando el amplificador de alta ganancia pulsado dopado con erbio. De igual manera, se presentan los pulsos obtenidos utilizando las muestras de fibra con nanopartículas de zinc y las muestras de fibra con nanopartículas de plata como un absorbedor saturable en un láser en cavidad de anillo, y por último se muestra el espectro de operación obtenido de los dos materiales antes mencionados.

### 4.1 Transmisión no lineal de las nanopartículas de zinc con pérdidas inducidas variables

La transmisión de las muestras con nanopartículas de zinc fotodepositadas sobre el núcleo de la fibra óptica con potencia de fotodeposición fija a  $50 \text{ mW}$  y con distintas pérdidas inducidas se muestran a continuación en la figura 4.1. Los resultados experimentales de la muestra A1 se presentan en la gráfica de la figura 4.1 a) en donde la muestra presenta una transmisión inicial de 60 % a bajas intensidades que incrementa hasta alcanzar el nivel de saturación a una transmisión del 90 % en una intensidad aproximadamente de  $130 \text{ MW/cm}^2$ , lo que da como resultado una profundidad de modulación del 30 %. La muestra A2 presenta una transmisión del 50 % que va incrementando hasta saturarse al 70 % en una intensidad aproximada de  $120 \text{ MW/cm}^2$  obteniendo una profundidad de modulación de 20 %, como se muestra en la figura 4.1 b). El cálculo de los coeficientes de absorción no lineal para A1 y A2 fueron  $\alpha \approx -7.574x^{-7} \text{ m/W}$  y  $\alpha \approx -7.078x^{-7} \text{ m/W}$ , respectivamente. Los cál-

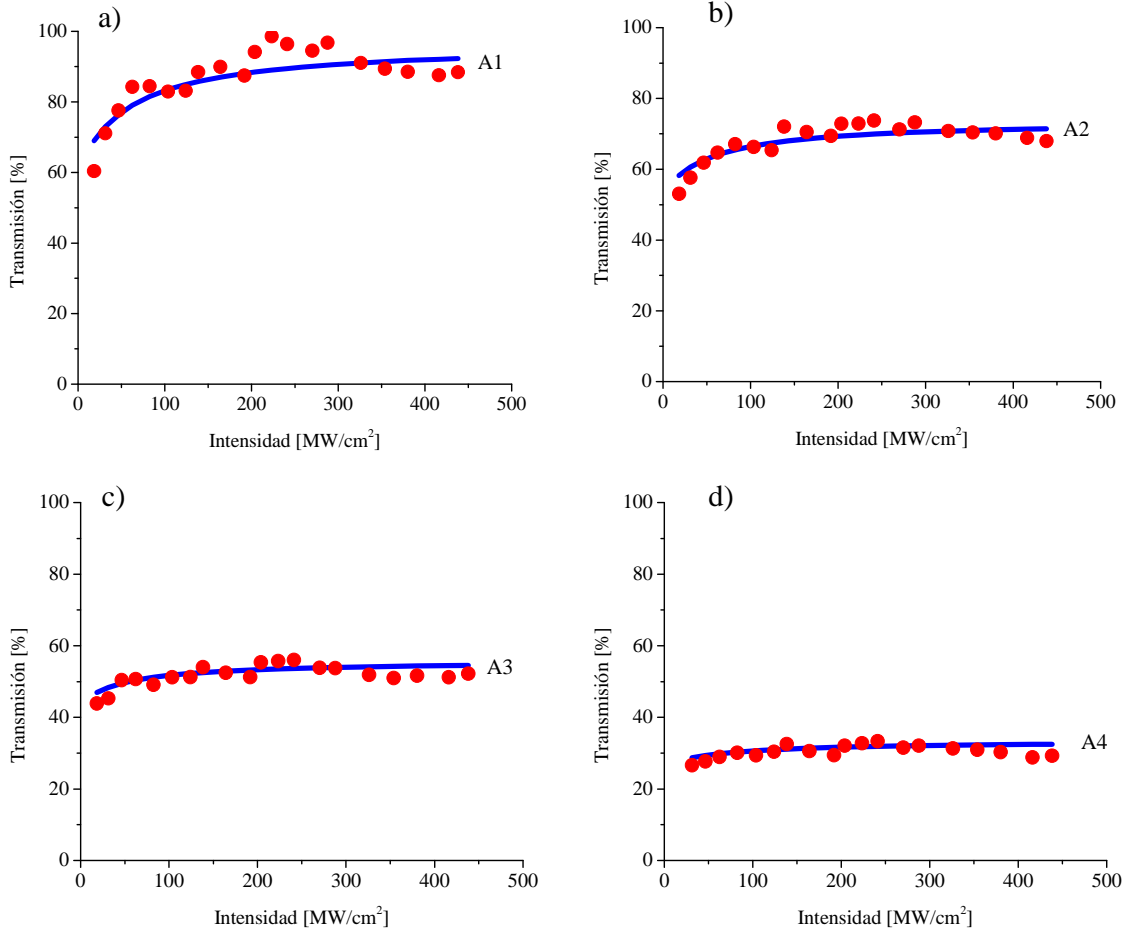


Figura 4.1. Gráficas de la transmisión de la muestras a) A1, b) A2, c) A3 y d) A4.

culos de la susceptibilidad no lineal de tercer orden obtenidas para ambos casos fue de  $lm(x^{(3)}) \approx -3.789x10^{-7}esu$  y  $lm(x^{(3)}) \approx -3.540x10^{-7}esu$ , respectivamente. En la figura 4.1 c) se puede ver el comportamiento de la muestra A3, en donde la transmisión a bajas intensidades es del 42 % saturándose con una intensidad de  $70 MW/cm^2$  con un nivel de saturación del 50 % aproximadamente, obteniendo una profundidad de modulación de 8 %. El coeficiente de absorción no lineal es de  $\alpha \approx -6.488x10^{-7}m/W$  y la susceptibilidad no lineal de tercer orden es de  $lm(x^{(3)}) \approx -3.246x10^{-7}esu$ . En la figura 4.1 d) se puede observar que la muestra A4 presenta una transmisión a bajas intensidades del 25 % alcanzando la saturación a una transmisión del 30 % con

una intensidad de  $80 \text{ MW/cm}^2$  obteniendo una profundidad de modulación del 5 % y los cálculos del coeficiente de absorción no lineal es de  $\alpha \approx -6.086 \times 10^{-7} \text{ m/W}$  y la susceptibilidad no lineal de tercer orden es de  $lm(x^{(3)}) \approx -3.044 \times 10^{-7} \text{ esu}$ .

En la Tabla 4.3 se muestran los parámetros obtenidos de los coeficientes de absorción no lineal y la susceptibilidad no lineal de tercer orden para cada muestra con diferentes pérdidas inducidas.

En la figura 4.2 se presentan los ajustes obtenidos de las muestras con pérdidas inducidas variables y su dependencia con la profundidad de modulación. En la figura 4.2 a), se puede observar que la transmisión a bajas potencias disminuye cuando las pérdidas inducidas incrementan y por lo tanto se saturan a diferentes niveles de transmisión.

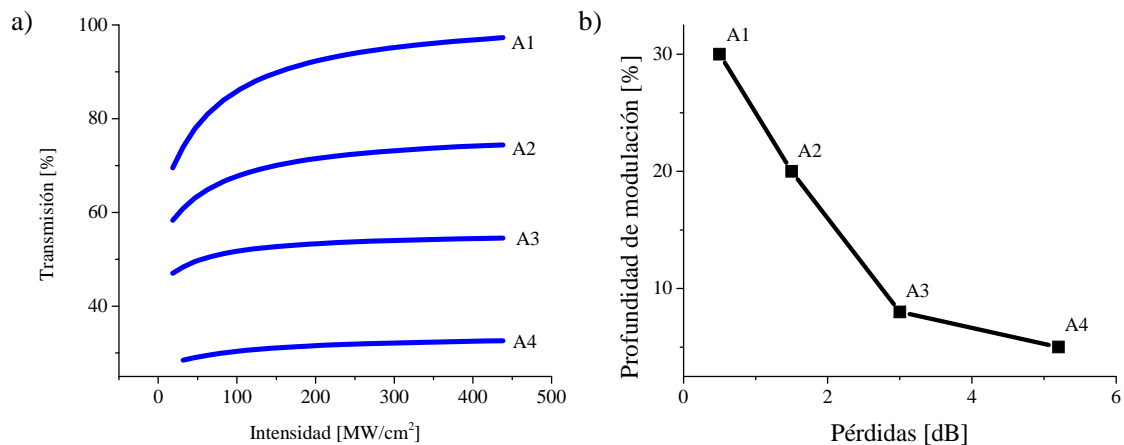


Figura 4.2. a) Gráficas de los ajustes de las muestras con pérdidas inducidas variadas. b) Gráfica de la relación entre la profundidad de modulación y las pérdidas inducidas.

En la figura 4.2 b), se puede observar que cuando las pérdidas inducidas son más grandes, la profundidad de modulación es menor. Por ejemplo para la muestra A4 que se presenta pérdidas de 70 % de transmisión presenta una profundidad de modulación de aproximadamente 5 %. En contraste, cuando las pérdidas inducidas son mínimas la profundidad de modulación aumenta. Por ejemplo para la muestra

Tabla 4.3: Tabla de valores de los coeficientes de absorción no lineal y susceptibilidad no lineal de tercer orden para las muestras con pérdidas inducidas variables

Número de muestra	$\alpha[m/W]$	$lm(x^{(3)})[m^2/V^2]$	$lm(x^{(3)})[esu]$
A1	$-7.574x10^{-7}$	$-4.210x10^{-16}$	$-3.789x10^{-7}$
A2	$-7.078x10^{-7}$	$-3.934x10^{-16}$	$-3.540x10^{-7}$
A3	$-6.488x10^{-7}$	$-3.608x10^{-16}$	$-3.246x10^{-7}$
A4	$-6.969x10^{-7}$	$-3.038x10^{-16}$	$-3.044x10^{-7}$

A1 en donde las pérdidas inducidas fueron del 10 % presenta una profundidad de modulación del 30 %.

En este grupo de muestras de fibra con nanopartículas de zinc, se puede apreciar que la transmisión es diferente en cada una de las muestras debido a que en el proceso de la fotodeposición las pérdidas inducidas fueron distintas para cada una de las muestras y por eso presentan diferentes niveles de transmisión. Los valores de la susceptibilidad no lineal de tercer orden cambian ligeramente teniendo una disminución desde  $-3.789x10^{-7}esu$  hasta  $-3.044x10^{-7}esu$ , lo cual varía muy poco, esto se puede atribuir a que las muestras tienen diferentes pérdidas inducidas pero mantuvieron una potencia en el proceso de fotodeposición fija a 50 mW, lo que indica que las nanopartículas son aproximadamente de tamaños similares de acuerdo a lo que se ha reportado con esta técnica de deposición [9], obteniendo similares intensidades de saturación y de esta manera mantener el valor de la susceptibilidad no lineal muy parecidas.

## 4.2 Transmisión no lineal de las nanopartículas de zinc con pérdidas inducidas fijas

En la gráfica de la figura 4.3 se muestran los resultados experimentales de las fibras con nanopartículas de zinc sobre el núcleo, en donde las pérdidas inducidas para cada muestra se mantuvieron fijas a 3 dB pero con distintas potencias de fotodeposición. En la gráfica de la figura 4.3 a) se puede observar la respuesta de la muestra B1 la cual presenta una transmisión a bajas potencias de 42 % incrementándose hasta alcanzar su

nivel de saturación al 53 % a una intensidad de  $110 \text{ MW/cm}^2$  aproximadamente, estos resultados producen una profundidad de modulación del 11 %. En la figura 4.3 b) la muestra B2 tiene una transmisión a bajas potencias del 35 % incrementando hasta un nivel de saturación del 53 % con una intensidad de aproximadamente  $150 \text{ MW/cm}^2$ , lo que da como resultado una profundidad de modulación del 18 %. Los valores de los coeficientes de absorción no lineal para B1 y B2 fueron de  $\alpha \approx -6.079 \times 10^{-7} \text{ m/W}$  y  $\alpha \approx -1.109 \times 10^{-7} \text{ m/W}$ , respectivamente, y los valores de la susceptibilidad no lineal de tercer orden de  $lm(x^{(3)}) \approx -3.041 \times 10^{-7} \text{ esu}$  y  $lm(x^{(3)}) \approx -5.548 \times 10^{-7} \text{ esu}$ , respectivamente.

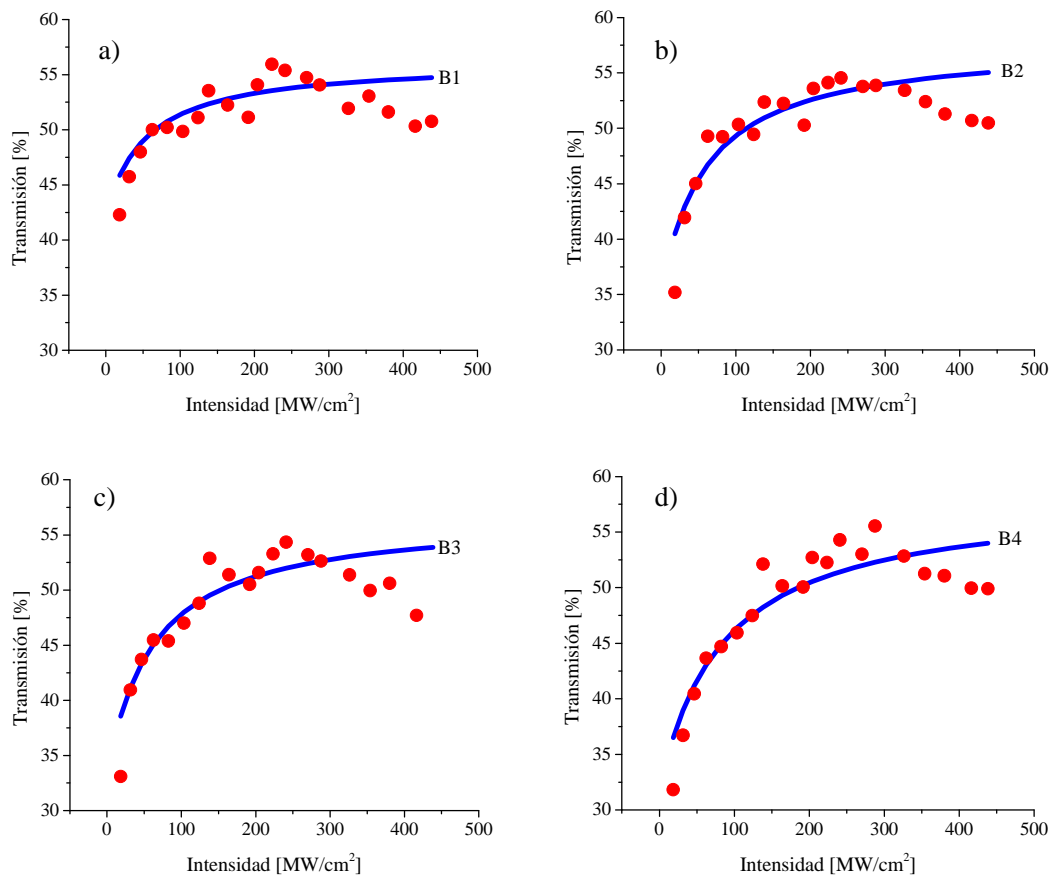


Figura 4.3. Gráficas de las muestras con pérdidas de 3 dB. a) muestra B1, b) muestra B2, c) muestras B3 y d) muestra B4.

Tabla 4.4: Tabla de valores de los coeficientes de absorción no lineal y susceptibilidad no lineal de tercer orden para las muestras con pérdidas inducidas fijas a 3 dB

Numero de muestra	$\alpha[m/W]$	$lm(x^{(3)})[m^2/V^2]$	$lm(x^{(3)})[esu]$
B1	$-6.079x10^{-7}$	$-3.379x10^{-16}$	$-3.041x10^{-7}$
B2	$-1.109x10^{-6}$	$-6.164x10^{-16}$	$-5.548x10^{-7}$
B3	$-1.243x10^{-6}$	$-6.912x10^{-16}$	$-6.220x10^{-7}$
B4	$-1.354x10^{-6}$	$-7.527x10^{-16}$	$-6.774x10^{-7}$

En la figura 4.3 c) se presentan los resultados para la muestra B3, en donde se puede observar que tiene una transmisión a bajas potencias del 32 % que va incrementando alcanzando su nivel de saturación al 52 % en una intensidad de 160  $MW/cm^2$  obteniendo una profundidad de modulación del 20 %. La muestra B4 tiene una transmisión a bajas intensidades del 31 % saturándose al 52 % a una intensidad de 170  $MW/cm^2$  aproximadamente, lo que da como resultado una profundidad de modulación del 21 %, como se ve en la figura 4.3 d). Los valores de los coeficientes de absorción no lineal para B3 y B4 son de  $\alpha \approx -1.243x10^{-7}m/W$  y  $\alpha \approx -1.354x10^{-7}m/W$ , respectivamente, y la susceptibilidad no lineal de tercer orden de  $lm(x^{(3)}) \approx -6.220x10^{-7}esu$  y  $lm(x^{(3)}) \approx -6.774x10^{-7}esu$ , respectivamente. En la tabla 4.4 se muestran los parámetros obtenidos para cada muestra de la figura 4.

En la figura 4.4 a), se pueden ver los ajustes de las muestras con pérdidas inducidas fijas a 3 dB, ahí se observa que la transmisión a bajas potencias disminuye para potencias de entrada menores durante el proceso de fotodeposición y la intensidad de saturación muestra un corrimiento que va desde los 100 hasta los 200  $MW/cm^2$  aproximadamente. Debido a que la intensidad de saturación depende de la potencia de la fuente para el proceso de la fotodeposición, los parámetros no lineales muestran un incremento inversamente proporcional a la potencia.

En la figura 4.4 b), se puede observar la profundidad de modulación en relación a la potencia utilizada en la fotodeposición, cuando las pérdidas inducidas se mantienen constantes la profundidad de modulación puede ser modificado mediante la potencia utilizada para el proceso de la fotodeposición. Por ejemplo, para la muestra B1 se utilizó una potencia para la fotodeposición de 50  $mW$  y una transmisión de salida

a  $25 \text{ mW}$ , bajo estas condiciones ésta muestra presentó una profundidad de modulación de aproximadamente  $11 \%$ . En contraste, la profundidad de modulación puede incrementarse si la potencia utilizada para la fotodeposición es de  $20 \text{ mW}$  y una transmisión de salida de  $10 \text{ mW}$ . Por ejemplo para la muestra B4 en donde la profundidad de modulación fue de aproximadamente  $21 \%$ .

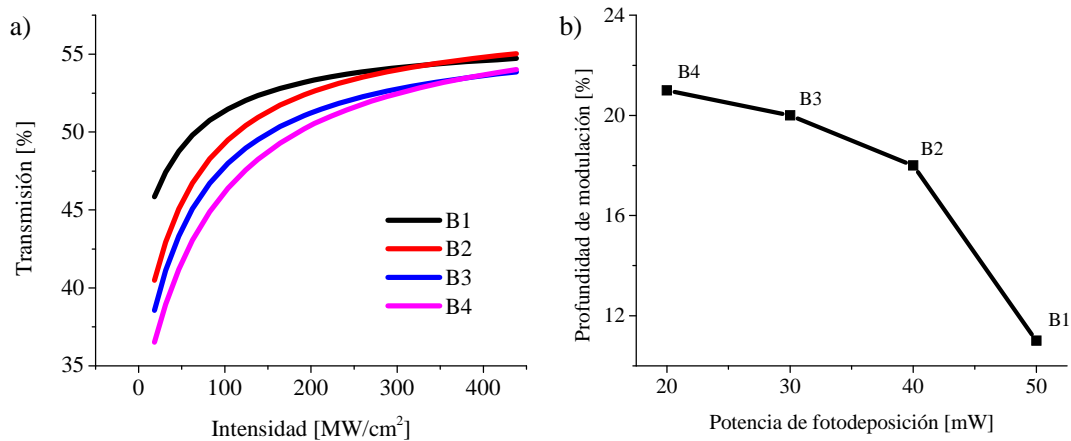


Figura 4.4. a) Gráficas de los ajustes de las muestras con pérdidas inducidas variables. b) Gráfica de la relación entre la profundidad de modulación y la potencia de fotodeposición.

Las muestras de con nanopartículas de zinc fotodepositadas sobre el núcleo de una fibra óptica con pérdidas inducidas fijas a  $3 \text{ dB}$  mostraron que mantienen un nivel de saturación alrededor de los  $50$  y  $55 \%$  de trasmisión debido a que las pérdidas inducidas son iguales. Los valores de la susceptibilidad o lineal de tercer orden aumentaron desde  $-3.041 \times 10^{-7} \text{ esu}$  hasta  $-6.774 \times 10^{-7} \text{ esu}$  teniendo un cambio mayor en comparación con el grupo de muestras anteriores con diferentes pérdidas. Esto se puede atribuir a que se mantuvieron los  $3 \text{ dB}$  de pérdidas en todas las muestras pero cambiando la potencia en el proceso de la fotodeposición y por lo tanto los tamaños de las nanopartículas de zinc que se fotodepositaron fueron diferentes para cada muestra ya que las potencias de fotodeposición fueron de  $50$ ,  $40$   $30$  y  $20 \text{ mW}$ ,



lo que causa el corrimiento en la intensidad de saturación para cada tamaño de las nanopartículas y de esta manera cambiar los valores de la susceptibilidad no lineal.

### 4.3 Transmisión no lineal de nanopartículas de plata con pérdida de 3 dB.

Los resultados del comportamiento de la transmisión en función de la intensidad de las nanopartículas de plata fotodepositadas sobre el núcleo de una fibra óptica con pérdidas de 3 dB se presentan a continuación. En la figura 4.5 se puede ver la gráfica del comportamiento de la transmisión de las nanopartículas de plata, en donde se puede apreciar que existen efectos no lineales, y al igual que las nanopartículas de zinc, también presentan el comportamiento típico de un absorbedor saturable.

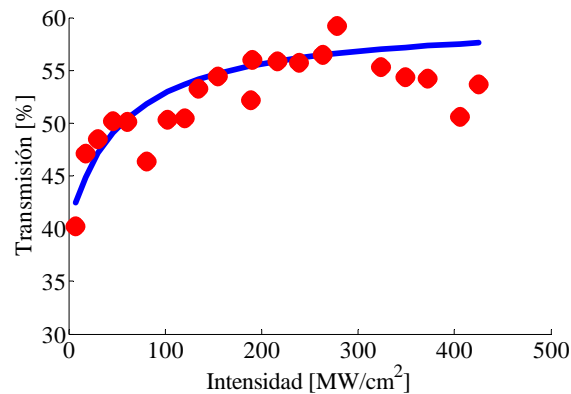


Figura 4.5. Gráfica del comportamiento de la transmisión de las nanopartículas de plata fotodepositadas sobre el núcleo de una fibra óptica.

La gráfica muestra que la transmisión comienza en un 40% a bajas potencias y que va incrementando hasta llegar a la saturación de aproximadamente 55 % a una intensidad aproximadamente de 150  $MW/cm^2$ , obteniendo una profundidad de modulación de 15 %. De igual manera, se obtuvieron los coeficientes de absorción no lineal de las nanopartículas de plata que es de  $\alpha = -8.678 \times 10^{-7} m/W$ , también

se obtuvo la susceptibilidad no lineal de tercer orden de la muestra, en donde el valor fue de  $lm(x^{(3)}) \approx -4.341x10^{-7} esu$ . El comportamiento de la transmisión de las nanopartículas de plata indica que este material también se puede utilizar como un dispositivo de absorción saturable para una cavidad láser para la generación de pulsos.

## 4.4 Láser Pulsado con nanopartículas de Zinc

Los resultados obtenidos de las muestras de fibra óptica con nanopartículas fotodepositadas en el núcleo resultaron tener un comportamiento típico de un absorbedor saturable, por esta razón se utilizó una muestra de fibra con nanopartículas para agregarlo al sistema láser en cavidad de anillo y así obtener un láser pulsado.

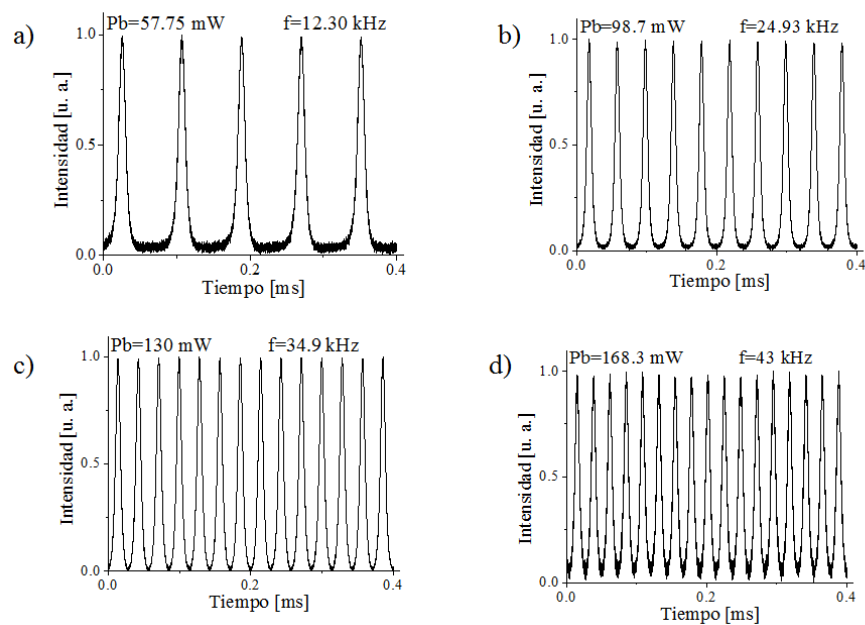


Figura 4.6. Pulsos obtenidos con nanopartículas de zinc con potencia de bombeo de a) 57.75 mW, b) 98.7 mW c) 130 mW y d) 168.3 mW.

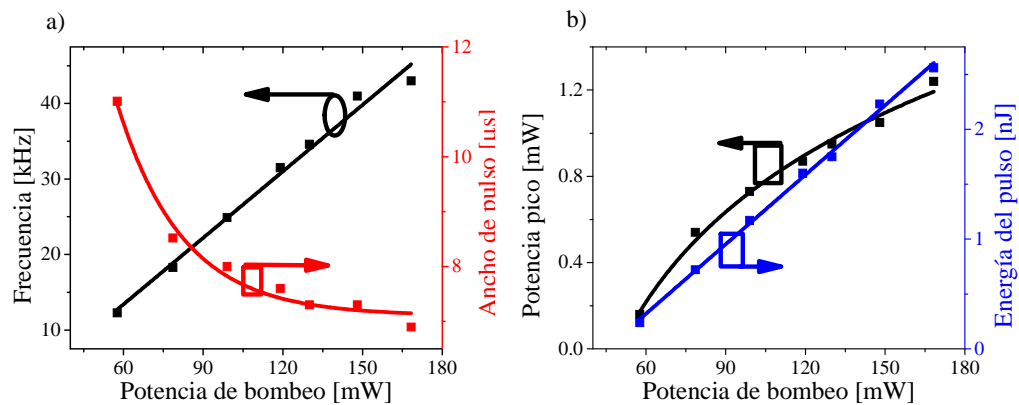


Figura 4.7. a) Gráfica de la variación de la frecuencia y ancho del pulso en función de la potencia de bombeo y b) gráfica de la variación de la energía del pulso y la potencia pico en función de la potencia de bombeo.

En la figura 4.6, se puede observar los pulsos obtenidos al introducir un absorbedor saturable a base de nanopartículas de zinc en el láser con cavidad de anillo. Estas señales se obtuvieron a través de un fotodetector modelo DET01CFC de la compañía Thorlabs conectado a un osciloscopio modelo DPO3014 de la compañía Tektronix.

La frecuencia del pulso pueden ser variados entre 12 hasta 43  $kHz$  variando la potencia de bombeo desde 56  $mW$  hasta 170  $mW$ .

En la figura 4.7 a), se puede observar la frecuencia y el ancho del pulso en función de la potencia de bombeo, la gráfica muestra que la frecuencia aumenta cuando la potencia de bombeo incrementa y el ancho del pulso aumenta conforme la potencia de bombeo disminuye. En la figura 4.7 b), se muestra el incremento de la potencia pico y de la energía en función de la potencia de bombeo en donde ambos valores aumentan cuando la potencia de bombeo incrementa. La máxima energía del pulso es de 2.56  $nJ$  con una potencia de bombeo de 170  $mW$ , la frecuencia máxima es de 43  $kHz$  y la potencia pico máxima es de 1.26  $mW$ . El láser emite pulsos estables en un rango de 56 a 170  $mW$  de potencia de bombeo.

En la figura 4.8 se puede ver el espectro del láser pulsado, en dónde se puede observar que tiene un espectro que está en un rango que abarca desde los 1520 *nm* hasta los 1600 *nm* de longitud de onda con una pico máximo en 1562 *nm* aproximadamente.

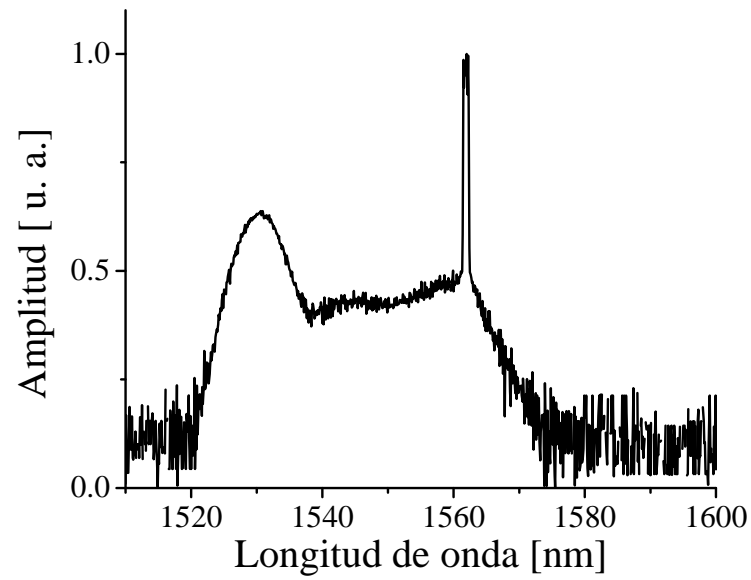


Figura 4.8. Espectro del láser pulsado con nanopartículas de zinc.

## 4.5 Láser pulsado con nanopartículas de plata

Los resultados de las nanopartículas de plata se obtuvieron utilizándolo como un absorbedor saturable en el sistema láser en cavidad de anillo. En la figura 4.9 a) se puede observar los pulsos obtenidos con una potencia de bombeo de  $47.30 \text{ mW}$  obteniendo una frecuencia de  $9.24 \text{ kHz}$ ; en la figura 4.9 b) corresponde a una frecuencia de  $18.17 \text{ kHz}$  aumentando la potencia de bombeo hasta  $88.8 \text{ mW}$ ; en la figura 4.9 c) la frecuencia aumenta hasta  $23.03 \text{ kHz}$  con una potencia de bombeo de  $120 \text{ mW}$ ; y por último, en la figura 4.9 d) se obtienen pulsos con una frecuencia de  $5.97 \text{ kHz}$  con  $168.3 \text{ mW}$  de potencia de bombeo. Se puede observar que la frecuencia aumenta conforme la potencia de bombeo aumenta, así como también se puede observar en las gráficas que el ancho del pulso disminuye al incrementar la potencia de bombeo, este comportamiento es típico de un láser de Q-switch.

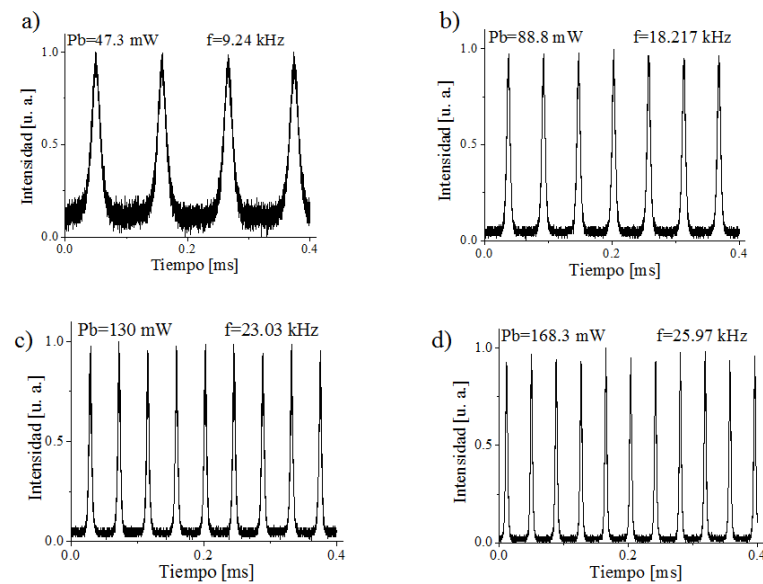


Figura 4.9. Pulsos obtenidos del sistema láser con nanopartículas de zinc con potencia de bombeo de a)  $47.3 \text{ mW}$ , b)  $88.8 \text{ mW}$  c)  $130 \text{ mW}$  y d)  $168.3 \text{ mW}$ .

En la figura 4.10 a) se puede ver una gráfica de la frecuencia en función de la potencia de bombeo en donde se puede observar que la frecuencia aumenta cuando la potencia de bombeo incrementa, y por el contrario, el ancho del pulso disminuye cuando la potencia de bombeo aumenta. En la figura 4.10 b) se puede ver la energía y la potencia pico en función de la potencia de bombeo en donde la energía del pulso aumenta hasta un valor máximo de  $1.7 \text{ nJ}$  y también la potencia pico aumenta hasta un máximo de  $2.7 \text{ mW}$  de potencia pico.

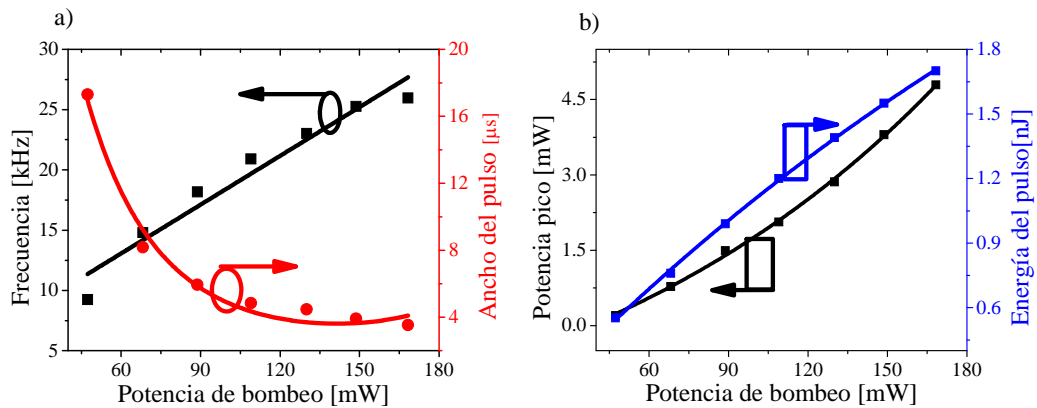


Figura 4.10. a) Gráfica de la variación de la frecuencia y ancho del pulso en función de la potencia de bombeo y b) gráfica de la variación de la energía del pulso y la potencia pico en función de la potencia de bombeo.

En la figura 4.11, se puede observar el espectro que se obtuvo del láser pulsado en cavidad de anillo con nanopartículas de plata, en donde se tiene un rango de operación aproximadamente en  $1510 \text{ nm}$  hasta  $1600 \text{ nm}$  teniendo un pico en  $1563 \text{ nm}$  aproximadamente.

Se puede destacar que ambos materiales metálicos que se utilizaron como un dispositivo absorbente saturable dentro de la cavidad láser, permitieron obtener pulsos de autoarranque y estables. Las nanopartículas de plata presentaron un mayor rango de trabajo, pulsos más cortos y potencia pico más grandes en comparación con las nanopartículas de zinc, sin embargo, las nanopartículas de zinc muestran un mayor rango de frecuencias y mayor energía del pulso en comparación con las nanopartículas de plata.

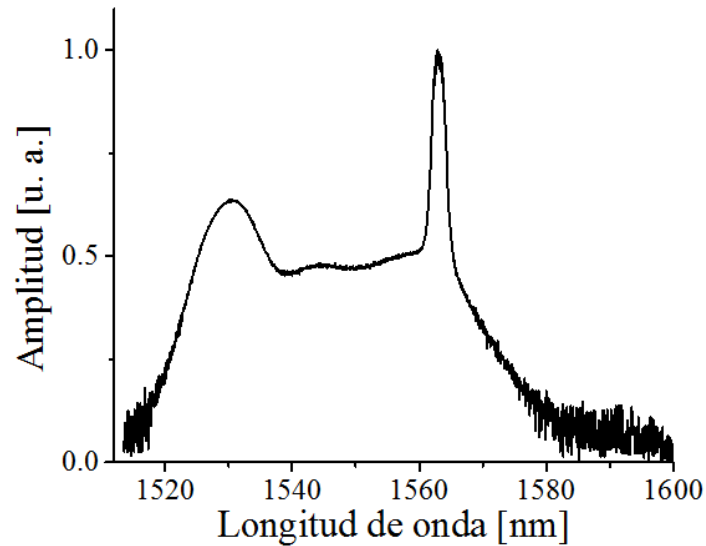


Figura 4.11. Espectro del láser pulsado con nanopartículas de plata.

las de plata. Los resultados obtenidos son parecidos al trabajo ya reportados en [52], en donde las nanopartículas de zinc tienen mejores resultados al obtener una mayor frecuencia y un ancho de pulso más corto; las nanopartículas de plata tienen frecuencias más bajas pero tiene la ventaja de tener un ancho de pulso aún más corto. Los dos materiales nanoestructurados presentan un aumento de frecuencias cuando la potencia de bombeo incrementa, lo contrario de lo que pasa con el ancho del pulso que en ambos casos disminuye cuando la potencia de bombeo aumenta, este fenómeno se produce debido a que la fuente de bombeo al aumentar la potencia proporciona más ganancia para saturar a las nanopartículas y esto aumenta las repeticiones haciendo que los pulsos sean más cortos; esta es una característica típica de un láser en Q-Switch pasivo [50, 51]. También se puede observar que ambos materiales nanoestructurados tienen un espectro electromagnético muy similar que se encuentra dentro de la tercera ventana de las comunicaciones ópticas.

# Conclusiones

En este trabajo de tesis se demostró que usando materiales nanoestructurados y la fibra óptica como un absorbedor saturable, se genera la conmutación en Q para obtener un láser pulsado con emisión de pulsos cortos. La fabricación del absorbedor saturable se llevó a cabo mediante una técnica llamada fotodeposición, el cual consiste en fotodepositar el nanomaterial sobre el núcleo de una fibra óptica. Los materiales nanoestructurados utilizados en esta tesis fueron las nanopartículas de zinc y las nanopartículas de plata.

Se realizó la caracterización no lineal de los absorbedores saturables obtenidos por medio de la fotodeposición. Los resultados obtenidos demostraron que la transmisión en función de la intensidad presenta efectos no lineales típicos de un absorbedor saturable, además se observó que la potencia en el proceso de fotodeposición influye en los valores de la susceptibilidad no lineal de tercer orden. Los resultados pueden ser utilizados para distintas aplicaciones en las comunicaciones ópticas.

Los absorbedores saturables obtenidos a base de los materiales nanoestructurados de zinc y plata se introdujeron en un láser de fibra en cavidad de anillo como un dispositivo de conmutación para la generación de pulsos en modo Q-switch. Los resultados muestran que ambos materiales pueden ser utilizados como un dispositivo absorbedor saturable que generan pulsos en el sistema láser.

Los pulsos obtenidos fueron a partir de una potencia de bombeo de  $57\text{ mW}$  para las nanopartículas de zinc y se obtuvieron potencia pico máxima de  $1.24\text{ mW}$  y energía máxima de  $2.55\text{ nJ}$ ; en el caso de las nanopartículas de plata, los pulsos se generaron a partir de  $47\text{ mW}$  y se obtuvo una potencia pico máxima de  $4.8\text{ mW}$  y energía máxima de  $1.55\text{ nJ}$ . Una característica de los pulsos con ambos materiales es que son estables y cambian de frecuencia y ancho temporal variando la potencia de bombeo, por lo tanto, con base a las características de los pulsos obtenidos se puede concluir que se obtiene la conmutación en Q utilizando materiales nanoestructurados



fotodepositados sobre el núcleo de una fibra óptica como un dispositivo absorbedor saturable.

Estos resultados pueden ser utilizados para aplicaciones en las comunicaciones ópticas, sensores, procesamiento láser, marcado por láser, dispositivos médicos entre otros.

Es importante recalcar que se utilizó materiales nanoestructurados metálicos que no se habían estudiado al inicio de este trabajo de tesis, teniendo así otra alternativa diferente a los nanotubos de carbono o las nanopelículas de grafeno para utilizarlos como dispositivos absorbedores saturables para la conmutación en láseres de fibra en modo Q-switch.

# Referencias

- [1] O. Szymanczyk, "Historia de las telecomunicaciones", (Dunken, 2013) Cap. 13.
- [2] S. Li, K. T. Chan, H. Ding and Z. Fang, "*Electrical Wavelength Switching of Ultrashort Pulses in a Mode-Locked Er-Doped Fiber Ring Laser with Fiber Gratings*" *Fiber and Integrated Optics*, 17, 113-118, (1997).
- [3] A. Labruyere, P. Tchofo Dinda and K. Nakkeeran, "*Transmission performance of NT160 Gbit s 1 densely dispersion-managed optical fibre systems*", *Journal of Modern Optics* 52 (18), (2005).
- [4] J. hebling, A. G. Stepanov, G. Almasi, B. Bartal and J. Kuhl, "*Tunable THz pulse generation by optical rectification of ultrashort laser pulses with tilted pulse fronts*", *Appl. Phys. B* 78, 593—599, (2004).
- [5] Y. Ukai, N. Nishizawa and T. Goto, "*Ultrafast All-Optical Switching Using Pulse Trapping by Ultrashort Soliton Pulse in Birefringent Optical Fiber*", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 158, No. 3, (2007).
- [6] J. M. Sierra-Hernandez, R. Rojas-Laguna, E. Vargas-Rodriguez, J. M. Estudillo-Ayala, D. Jauregui-Vazquez, A. D. Guzmán-Chávez and P. Zaca-Moran, "*A tunable multiwavelength erbium doped fiber laser based on a Mach-Zehnder interferometer and photonic crystal fiber*", *Láser Phys.*, 23, 1-6, (2013)
- [7] E. Ibarra-Escamilla, O. Pottiez, E. A. Kuzin, J. W. Haus, R. Grajales-Coutiño, P. Zaca-Moran, Experimental investigation on self-starting operation in a F8L based on a symmetrical NOLM, *Optics Communication*, 281 No. Vol 5, 1226-1232, (2008).
- [8] R. Grajales-Coutiño, B. Ibarra-Escamilla, E.A. Kuzin, J. Gutiérrez-Gutiérrez, O. Pottiez y P. Zaca-Moran. "*Láser de fibra de amarre de modos de figura ocho basado en un espejo de lazo óptico no lineal simétrico*", *Revista Mexicana de Física*, 53 (5), 380-385, (2007)
- [9] J. G. Ortega-Mendoza, F. Chávez, P. Zaca-Morán, C. Felipe, G. F. Pérez-Sánchez, G. Beltran-Pérez, O. Goiz, and R. Ramos-García, "*Selective photodeposition of zinc nanoparticles on the core of a single-mode optical fiber*", *Optics Express*, 21, 5, 6509-6518, (2013).

- [10] I. M. Babar, M.B.S. Sabran, S. W. Harun, H. Ahmad, M.C. Paul, A. Halder, S. Das, and S.K. Bhadra, "*Q-switched thulium–ytterbium co-doped fibre laser using newly developed octagonal shaped inner cladding double-clad active fibre and multi-walled carbon nanotubes passive saturable absorber,*" IET Optoelectron. 9(3), 131-135 (2014).
- [11] G. Li, S. Zhao, K. Yang, and J. Liu, "*Control of the pulse width in a diode-pumped passively Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP green laser with GaAs saturable absorber,*" Opt. Quantum Electron. 37, 635-647, (2005).
- [12] Y. J. Chen, X. H. Gong, Y. F. Lin, Z. D. Luo, Q. G. Tan, and Y. D. Huang, "*Laser performance of Nd:LaB<sub>3</sub>O<sub>6</sub> cleavage microchips passively Q-switched with a Cr<sup>4+</sup>:YAG saturable absorber,*" Appl. Phys. B 83, 195-201, (2006).
- [13] R. I. Woodward, R. C. T. Howe, T. H. Runcorn, G. Hu, F. Torrisi, E. J. R. Kelleher, and T. Hasan, "*Wideband saturable absorption in few-layer molybdenum diselenide (MoSe<sub>2</sub>) for Q-switching Yb-, Er- and Tm-doped fiber lasers,*" Opt. Express 23(15), 20052-20061 (2015).
- [14] S. B. Cho, H. Song, S. Gee, C. S. Park, and D. Y. Kim, "*Pulse width and peak power optimization in a mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror,*" Microw. Opt. Technol. Lett. 54(10), 2256-2261, (2012).
- [15] M. Yüksek, U. Kürüm, H. G. Yaglioglu, A. Elmali, and A. Ateş, "*Nonlinear and saturable absorption characteristics of amorphous InSe thin films,*" J. Appl. Phys. 107(3), 1-6 (2010).
- [16] W. B. Cho, S. Y. Choi, J. W. Kim, D. Yeom, K. Kim, and F. Rotermund, "*Solid-state laser mode-locking near 1.25  $\mu$ m employing a carbon nanotube saturable absorber mirror,*" J. Opt. Soc. Korea 15(1), 56-60 (2011).
- [17] A. Jasik, J. Muszalski, K. Pierściński M. Bugajski, V. G. Talalaev, and M. Kosmala, "*Low-temperature grown near surface semiconductor saturable absorber mirror: Design, growth conditions, characterization, and mode-locked operation,*" J. Appl. Phys. 106(5), 1-8 (2009).
- [18] C. C. Lee, J. M. Miller, and T. R. Schibli, "*Doping-induced changes in the saturable absorption of monolayer,*" Appl. Phys. B 108, 129-135 (2012).
- [19] A. Martinez and Z. Sun, "*Nanotube and graphene saturable absorbers for fibre lasers,*" Nat. Photonics 7, 842-845 (2015).

- [20] M. Oya, H. Kishikawa, N. Goto, and S. Yanagiya, "All-optical switch consisting of two-stage interferometers controlled by using saturable absorption of monolayer graphene," *Opt. Express* 20(24), 27322-27330 (2012).
- [21] H. Kuo and S. Hong, "Nanographene-based saturable absorbers for ultrafast fiber lasers," *J. Nanomater.* 2014, 1-6 (2014).
- [22] U. Gurudas, E. Brooks, D. M. Bubb, S. Heiroth, T. Lippert, and A. Wokaun, "Saturable and reverse saturable absorption in silver nanodots at 532 nm using picosecond laser pulses," *J. Appl. Phys.* 104(7), 1-8 (2008).
- [23] A. Zarei, Z. C. Tiu, F. Ahmad, H. Ahmad, and S. Harun, "Q-switched Brillouin fibre laser with multi-wall carbon nanotube saturable absorber," *IET Optoelectron.* 9(2), 96-100 (2015).
- [24] M. Pokrass, Z. Burshtein, R. Gvishi, and M. Natham, "Saturable absorption of multi-walled carbon nanotubes/hybrid-glass composites," *Opt. Mater. Express* 2(6), 825-838 (2012).
- [25] A. H. H. Al-Masoodi, M. F. Ismail, F. Ahmad, N. Kasim, Y. Munajat, H. Ahmad, and S. W. Harun, "Q-switched yb-doped fiber laser operating at 1073 nm using a carbon nanotubes saturable absorber," *Microw. Opt. Technol. Lett.* 56(8), 1770-1773 (2014).
- [26] M. Hosokawa, K. Nogi, M. Naito, T. Yokoyama, "Nanoparticles technology handbook", Elsevier,seguda edicion, pp 1-7, (2012).
- [27] V. Aboites, "Un poco de historia" en " *El láser*", Fondo de cultura económica, pp 36,37 (2002).
- [28] E. Hetch, "óptica", (Pearson Addison Wesley, 2000), Cap.13.
- [29] L. Bachs, J. Cuesta, N. Careles, "Aplicaciones industriales del láser", (Marcombo, 1988) Cap. 2.
- [30] H. Ahmad, F. D. Muhammad, M. Z. Zulkifli, S. W. Harun, "Graphene-Oxide-Based saturable absorber for all-fiber Q-switching with a simple optical deposition technique", *IEEE Photonic journal*, Vol, 4, pp. 2205, (2012).
- [31] H.H Liu, K.K Chow, S. Yamashita, S.Y. Set, "Carbon-nanotube-based passively Q-switched fiber laser for high energy pulse generation", *Optics & Laser Technology*, Vol. 45, pp 1-4 (2013).

- [32] Z. S. Saleh, C. L. Anyi, A. A. Rahman, N. m. Ali, S. W. Manaf, H. Arof, "*Q-switched erbium-doped fibre laser using graphene-based saturable absorber obtained by mechanical exfoliation*", Physical Optics, Vol. 15, ppt 24,25, (2014).
- [33] J. Wang, Y. Chen, W. J. Blau, "*Carbon nanotubes and nanotube composites for nonlinear optical devices*," journal of materials Chemistry, 2009, Vol. 19, pp. 7425-7443.
- [34] P. Zaca-Morán, E. Kuzin, J. Torres-Turiján, J.G. Mendoza. F. Chávez. G.F. Pérez Sánchez, and L.C. Gómez-Pavón, "High gain pulsed erbium-doped fiber amplifier for the nonlinear characterization of SWCNTs photodeposited on optical fibers," Opt. Laser Technol. 52, pp 15-20 (2013).
- [35] P. Zaca-Morán, R. Ramos-Garcia, J. G. Ortega-Mendoza, F. Chávez, G. F. Pérez-Sánchez, and C. Felipe, "Saturable and two-photon absorption in zinc nanoparticles photodeposited onto the core of an optical fiber," Opts. Express, 23(14), pp 18721-18729, (2015).
- [36] W. Tomasi, *sistemas de comunicaciones electrónicas*,(Prentice-Hall, 2002) Cap. 3.
- [37] Z. Sun, A. G. Rozhin, F. Wang, V. Scardaci, W. I. Milne, I. H. White, F. Henrich, y A. C. Ferraril, "*L-band ultrafast fiber laser mode locked by carbon nanotubes*", Applied Physics Letters, Vol. 93, pp 1-4, (2008).
- [38] B. Dong., J. Hao, J. Hu, C. Liaw, "*Short linear-cavity Q-switched fiber laser with a compact short carbon nanotube based saturable absorber*", optical fiber technology, Vol. 17, pp.105-107, (2011).
- [39] J. R. Morrones Ibarra, "*Láser: 50 años*", Ingenierías, Vol. 13, No 49, pp 13 (2010)
- [40] C. Sifuentes, "*Lasers de fibra óptica*", Primer encuentro participación de la mujer en la ciencia, pp1, (2004).
- [41] B. N. Upadhyaya, "*high-power Yb-doped continuos-wave and pulsed fibre lasers*", Journals of physics, Vol.82, No.1, pp. 15,16, (2014).
- [42] J. Hecht, *the estate of the art*, Laser Focus World, Vol. 48, (2012).
- [43] W. T. Silvast, "Special laser cavities and cavity effects", en *Láser fundamentals*, Cmbridge University press, pp. 369, (2000).

- [44] L. Zhang, X. Wang, X. Li, H. Liu, "Output pulse width of mode-locked ring laser based on  $Er^{3+}$ -doped fibre amplifier and semiconductor optical amplifier", IET Optoelectronics, Vol. 9, pp. 10, (2015).
- [45] Y. W. Song, "Q-switched fiber lasers with carbon nanotubes hosted in ceramics", Applied Optics, Vol. 51, No. 3, pp 1, (2012).
- [46] N. A. Barboza, L. A. Ríosy R. S. Cydney, "Láser de alta potencia y alta eficiencia bombeado por diodo", Revista mexicana de física, Vol. 56, 492 (2010).
- [47] B. E. A. Saleh, M. C. Teich, Fundamentals of photonics, wiley intercience, cap 14 pag 551, 552, (2007).
- [48] J. G. Ortega Mendoza, F. Chávez, P. Zaca Morán, C. Felipe, G. F. Pérez Sánchez, G. Beltran Pérez, O. Goiz, R. Ramos-García, "Selective photodeposition of zinc nanoparticles on the core of a single-mode optical fiber", Optic express, Vol. 21, Num. 5, pp 6509-6518 (2013).
- [49] N. D. Gómez-Cardona, J. D. Causado-Buelvas, P-Torres, "Diseño y construcción de un láser de fibra óptica sintonizable", RCF, Vol. 43, pp 921-924 (2011)
- [50] M. A. Ismail, F. Ahmad, S. W. Harun, H. Ahmad, "A Q-switched erbium-doped fiber laser with a graphene saturable absorber", Laser Phys. Lett., Vol. 10, pp 1-4 (2013).
- [51] T. Jiang, Y. Xu, Q. Tian, L. Liu, Z. Kang, R. Yang, G. Qin, W. Qin, "Passively Q-Switching by gold nanocrystals", Appl. Phys. Lett., Vol. 74, pp 1-4 (2012)
- [52] z. T. Wang, Y. H. Zou, Y. Chen, M. Wu, C. J. Zhao, H. Zhang, S. C. Wen, "Graphene sheet stacks for Q-switching operation of an erbium-doped fiber laser", Laser Phys. Lett., Vol. 10, pp 1-4 (2013).

# Apéndice A

## Código de MATLAB

```
2 -   clc;
3 -   clear all;
4 -   %[archivo,ruta]=uigetfile('*.txt','ABRIR AR
5 -   %id =fopen([ruta archivo], 'r');
6 -   id=fopen('fibra_limpia20ns2khz_2.txt','rt')
7 -   c=textscan(id,'%s %s %s'); %encuentra y
8 -   fclose(id);
9 -   r=c{1,2}; %se elige la columna de los v
10 -  rtrans=r';
11 -  new_rtrans = strrep(rtrans, 'E', 'e'); %sus
12 -  new_rtrans2 = strrep(new_rtrans, ',', '.');
13 -  y=new_rtrans2(3:1052); %dejando solo los va
14 -  a=zeros(1,1050); %matriz de ceros
15
16 -  f=2000
17 -  t=20e-9
18 -  tiempo=t
19 -  frec=f
20
21
22 -  N D=10;
23 -  for i=1:1050
24 -      u=y(1,i);
25 -      w=str2num(u);
26 -      a(1,i)=w;
27 -  end
28
29 -  a_1=a(1:50)
30 -  c1=sort(a_1,'descend')
31 -  Prom=mean(c1(1:N_D))
32 -  a1=Prom
33
34 -  a_2=a(51:100);
35 -  c2=sort(a_2,'descend')
36 -  Prom=mean(c2(1:N_D))
37 -  a2=Prom
38
39 -  a_3=a(101:150);
40 -  c3=sort(a_3,'descend')
41 -  Prom=mean(c3(1:N_D))
42 -  a3=Prom
```

```

50 - c4=sort(a_4, 'descend')
51 - Prom=mean(c4(1:N_D))
52 - a4=Prom
53
54 - a_5=a(201:250);
55 - c5=sort(a_5, 'descend')
56 - Prom=mean(c5(1:N_D))
57 - a5=Prom
58
59 - a_6=a(251:300);
60 - c6=sort(a_6, 'descend')
61 - Prom=mean(c6(1:N_D))
62 - a6=Prom
63
64 - a_7=a(301:350);
65 - c7=sort(a_7, 'descend')
66 - Prom=mean(c7(1:N_D))
67 - a7=Prom
68
69 - a_8=a(351:400);
70 - c8=sort(a_8, 'descend')
71 - Prom=mean(c8(1:N_D))
72 - a8=Prom


---


114 - a_17=a(801:850);
115 - c17=sort(a_17, 'descend')
116 - Prom=mean(c17(1:N_D))
117 - a17=Prom
118
119 - a_18=a(851:900);
120 - c18=sort(a_18, 'descend')
121 - Prom=mean(c18(1:N_D))
122 - a18=Prom
123
124 - a_19=a(901:950);
125 - c19=sort(a_19, 'descend')
126 - Prom=mean(c19(1:N_D))
127 - a19=Prom
128
129 - a_20=a(951:1000);
130 - c20=sort(a_20, 'descend')
131 - Prom=mean(c20(1:N_D))
132 - a20=Prom
133
134 - a_21=a(1001:1050);
135 - c21=sort(a_21, 'descend')
136 - Prom=mean(c21(1:N_D));
137 - a21=Prom

```



```

147 -     p_FL1=[a21 a20 a19 a18 a17 a16 a15 a14 a13 ;
148 -     R=(p_FL1*1000)
149 -
150 -     pot_in=zeros(1,21)
151 -     % end
152 -     for i=1:21
153 -         un=p_FL1(1,i)
154 -         pot_picol=un/(f*t)
155 -         pot_in(1,i)=pot_picol;
156 -     end
157 -
158 -     id=fopen('Zn_50_45_1.txt','rt');
159 -     c=textscan(id,'%s %s %s'); %encuentra y
160 -     fclose(id);
161 -     r=c(1,2); %se elige la columna de los va
162 -     rtrans=r';
163 -     new_rtrans = strrep(rtrans, 'E', 'e'); %sust
164 -     new_rtrans2 = strrep(new_rtrans, ',', '.');
165 -     y=new_rtrans2(3:1052); %dejando solo los val
166 -     a=zeros(1,1050); %matriz de ceros
167 -     for i=1:1050
168 -         u=y(1,i);
169 -         w=str2num(u);
170 -         a(1,i)=w;
171 -     end
172 -
173 -     a_1=a(1:50)
174 -     c1=sort(a_1,'descend')
175 -     Prom=mean(c1(1:N_D))
176 -     a1=Prom
177 -
178 -
179 -     a_2=a(51:100);
180 -     c2=sort(a_2,'descend')
181 -     Prom=mean(c2(1:N_D))
182 -     a2=Prom
183 -
184 -     a_3=a(101:150);
185 -     c3=sort(a_3,'descend')
186 -     Prom=mean(c3(1:N_D))
187 -     a3=Prom
188 -
189 -
190 -     a_4=a(151:200);
191 -     c4=sort(a_4,'descend')
192 -     Prom=mean(c4(1:N_D))
193 -     a4=Prom
194 -
195 -     a_5=a(201:250);
196 -     c5=sort(a_5,'descend')
197 -     Prom=mean(c5(1:N_D))
198 -     a5=Prom
199 -
200 -
201 -     a_6=a(251:300);
202 -     c6=sort(a_6,'descend')
203 -     Prom=mean(c6(1:N_D))
204 -     a6=Prom
205 -
206 -     a_7=a(301:350);
207 -     c7=sort(a_7,'descend')
208 -     Prom=mean(c7(1:N_D))
209 -     a7=Prom

```

```

265 -     a_17=a(801:850);
266 -     c17=sort(a_17,'descend')
267 -     Prom=mean(c17(1:N_D))
268 -     a17=Prom
269 -
270 -     a_18=a(851:900);
271 -     c18=sort(a_18,'descend')
272 -     Prom=mean(c18(1:N_D))
273 -     a18=Prom
274 -
275 -     a_19=a(901:950);
276 -     c19=sort(a_19,'descend')
277 -     Prom=mean(c19(1:N_D))
278 -     a19=Prom
279 -
280 -     a_20=a(951:1000);
281 -     c20=sort(a_20,'descend')
282 -     Prom=mean(c20(1:N_D))
283 -     a20=Prom
284 -
285 -     a_21=a(1001:1050);
286 -     c21=sort(a_21,'descend')
287 -     Prom=mean(c21(1:N_D))
288 -     a21=Prom
289 -
290 -     p_FM=[a21 a20 a19 a18 a17 a16 a15 a14 a13 a
291 -
292 -     R1=(p_FM*1000)
293 -     %Pot_pico=max_sal/(f*t)
294 -     pot_out=zeros(1,21);
295 -     for i=1:21
296 -         s=p_FM(1,i);
297 -         pot_pico2=s/(f*t);
298 -         pot_out(1,i)=pot_pico2;
299 -
300 -     end
301 -
302 -
303 -     trans=zeros(1,21);
304 -     for i=1:21
305 -         relacion=pot_out(1,i)/pot_in(1,i);
306 -         trans(1,i)=relacion
307 -     end
308 -
309 -     potMWcm2=pot_in/0.000000528;
310 -     potMW=potMWcm2/1000000;
311 -     plot(potMW, trans,'*')
312 -     xlabel('Potencia [Mw/cm2]')
313 -     ylabel('Transmisión')
314 -     grid

```

```

324 -
325 - Transmitancia=[trans;]
326 - IMWcm2=[potMWcm2;]
327 - LogTrasmitancia = log(Transmitancia); %%Logaritmo de la ma
328 - L = 1e-4;
329 - alpha0 = -(LogTrasmitancia(1,1)/L)
330
331 - IsatMWcm2= IMWcm2(1,4);
332
333 - logT=LogTrasmitancia(1,15)
334
335 - num1=(LogTrasmitancia+(alpha0*L))
336 - numerador = -( (IsatMWcm2+IMWcm2) * (logT+(alpha0*L)) )
337 - denominador = (L.*IsatMWcm2*IMWcm2)
338 - beta0 = numerador./denominador;
339
340 - betaF=beta0(1,15);
341
342 - T=(exp(-(alpha0+(betaF.*IMWcm2)./(1+IMWcm2/IsatMWcm2))*L))
343
344 - Transmitancia1=Transmitancia
345 - plot(IMWcm2/1e6,Transmitancia1*100,'*',IMWcm2/1e6,T*100)
346 - xlabel('Intensidad [MW/cm^2]')
347 - ylabel('Transmisión [%]')
348 - grid
349 - arriba=2.33e-17*(299792458*betametrowatts);
350
351 - abajo=3.1416*4;
352
353 - xi=(arriba/abajo);
354 - susceptibilidad= xi;
355 - susceptibilidad_en_esu=xi*9e8
356
357 - hold on
358 - c = polyfit(log(IMWcm2), log(Transmitancia), 1);
359 - b=exp(c(2));
360 - g=b*IMWcm2.^c(1);
361 - plot(IMWcm2/1000000,g*100,'x-')
362 - grid
363
364 - plot(IMWcm2/1000000,Transmitancia *100,'*')
365 - grid
366
367 - fprintf ('Tiempo [ns]= %2.1f\n',tiempo/1e-9)
368 - fprintf ('Frecuencia [KHz]= %2.1f\n',frec/1e3)
369 - fprintf ('Beta [cm/w]= %2.6f\n',betacmwatts)
370 - fprintf ('Beta [m/w]= %2.5e\n',betametrowatts)
371 - fprintf ('xi[m2/v2]= %2.5e\n',xi)
372 - fprintf ('Suceptibilidad [esu]= %2.3e\n',susceptibilidad_en

```

# Apéndice B

## Producción académica

G.J. Lozano-Pereraa, L.C. Gómez-Pavóna, J.M. Muñoz-Pacheco, P. Zaca-Morán, A. Luis-Ramos, F. Chavez, y G.F. Pérez-Sánchez, "Dependencia no lineal de nanopartículas de zinc sobre el núcleo de una fibra óptica", participación en el VI Encuentro Nacional de Ciencias "Ing. Luis Rivera Terrazas" en septiembre del 2015.

G.J. Lozano-Perera\*; L.C. Gómez-Pavón1; J.M. Muñoz-Pacheco; A. Luis-Ramos; G. F. Pérez-Sánchez; F. Chávez; P. Zaca-Morán, "Propiedades no lineales de nanomateriales en fibras ópticas mediante la generación de pulsos de gran intensidad", participación en congreso I-CILCA, en noviembre del 2015.

G.J. Lozano-Perera, L.C. Gómez-Pavón, P. Zaca-Morán, J.M. Muñoz-Pacheco, A. Luis-Ramos, F. Chavez, G.F. Pérez-Sánchez, "Comparative study of nonlinear absorption of ZnNPs and AgNPs photodeposited onto the core of an optical fiber", Participación en congreso LAOP ( Latin American Optics and Photonics) en agosto 2016.

L. C. Gómez-Pavón, G. J. Lozano-Perera, P. Zaca-Morán, J. M. Muñoz Pacheco, "Influencia de las pérdidas inducidas de las nanopartículas de Zn fotodepositadas en una fibra óptica sobre la absorción saturable.