

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CARACTERIZACIÓN DE FUENTES SUPERLUMINISCENTES  
IMPLEMENTADAS EN FIBRA ÓPTICA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

P R E S E N T A

ENRIQUE FRANCISCO PINZÓN ESCOBAR

DIRECTOR DE TESIS: DR. G. EDUARDO SANDOVAL ROMERO

GRUPO DE SENSORES ÓPTICOS Y ELÉCTRICOS

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

MEXICO D.F.

2010



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos:

- Al CONACyT por su apoyo a través del proyecto J-50494-Y durante el desarrollo de la Tesis.
- A la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM por su apoyo a través del proyecto PAPIIT IN-115906.
- Al Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico de la UNAM por permitirme ser parte del grupo de Sensores Ópticos y Eléctricos.
- Al Dr. G. Eduardo Sandoval Romero.
- Al Dr. Víctor Argueta Díaz

## Dedicatoria:

- A mis padres quienes me impulsaron a lo largo de mi vida.
- A mi hermano Isaac quien ha crecido conmigo.
- A mis amigos.
- Y a mí.

*Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.*

*Albert Einstein (1879- 1955)*

## Índice

Agradecimientos: .....	1
Dedicatoria: .....	1
INTRODUCCIÓN .....	4
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....	6
1.1 Naturaleza de la luz .....	6
1.1.2 Teoría corpuscular .....	6
1.1.2 Teoría ondulatoria .....	7
1.1.3 Teoría electromagnética .....	7
1.1.4 Teoría cuántica .....	14
1.2 Fuentes de radiación electromagnética (emisión de luz).....	15
1.2.1 Fuentes de radiación térmica .....	16
1.2.2 Diodos emisores de luz (LEDs).....	17
1.2.3 Láseres.....	19
1.2.4 Fuentes superluminiscentes en fibra óptica .....	24
1.3 Detectores de radiación (detección de luz).....	24
1.3.1 Tipos de detectores .....	25
1.4 Propagación de la luz.....	28
Conclusiones al Capítulo 1 .....	29
CAPÍTULO 2. FIBRAS ÓPTICAS.....	30
2.1 Fibras ópticas convencionales .....	30
2.1.1 Caracterización de las fibras ópticas.....	32
2.1.2 Perfiles de las Fibras Ópticas .....	33
2.1.3 Parámetros geométricos de las fibras ópticas.....	34
2.1.4 Parámetros estructurales de las fibras ópticas.....	35
2.2 Fibras ópticas centelladoras .....	37
2.3 Fibras de cristal fotónico .....	38
2.3.1 Fibras de núcleo hueco.....	39
2.3.2 Fibras altamente no lineales .....	40
2.4 Fibras ópticas dopadas con tierras raras .....	40
Conclusiones al capítulo 2 .....	42
CAPÍTULO 3. FUENTES DE RADIACIÓN EN FIBRA ÓPTICA DOPADA CON TIERRAS RARAS.....	43
3.1 Sistemas de cuatro niveles .....	43

3.1.1 Funcionamiento del laser de onda continúa de cuatro niveles .....	45
3.2 Sistemas de tres niveles .....	46
3.2.1 Funcionamiento de onda continúa del láser de tres niveles.....	48
3.3 Fuente superluminiscente en fibra óptica dopada con tierras raras basada en sistemas de tres niveles. ....	49
Conclusiones al capítulo 3 .....	51
CAPÍTULO 4. RESULTADOS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS .....	52
4.1 Resultados teóricos .....	52
4.2 Implementación de la fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en tierras raras .....	58
4.2.1 Características técnicas del equipo .....	59
4.3 Desarrollo y resultados experimentales.....	60
Conclusiones al capítulo 4.....	66
CONCLUSIONES GENERALES.....	67
BIBLIOGRAFÍA.....	69

# INTRODUCCIÓN

---

El objetivo de esta tesis es investigar y utilizar las fuentes superluminiscentes en fibra óptica dopada con tierras raras en sensores en fibra óptica, debido principalmente a su facilidad de implementación y caracterización, además de que poseen características útiles como: un amplio ancho espectral, gran estabilidad térmica y con un valor alto en la potencia de salida.

Este trabajo se divide en cuatro capítulos, en el primero se describen los principios básicos de la naturaleza de la luz, siendo clave en esta tesis la teoría cuántica; continuando aquí, con las fuentes de luz artificiales, en donde se revisan rápidamente las características de trabajo y construcción de los dispositivos más utilizados en la implementación de fuentes de radiación (emisión) de luz, así como los diferentes tipos de detectores de estas emisiones según sus principios de operación y la forma de propagación de la luz, tomando un principal interés en la forma guiada.

Durante mucho tiempo se ha tratado de definir a la luz, siendo hasta el momento la forma más cercana de describirla ha sido con la teoría cuántica en donde la luz es contemplada como una dualidad de onda-partícula. Existen diferentes tipos de fuentes de radiación de luz, entre naturales y artificiales. Entre las naturales tenemos la más conocida y probablemente las más importante que es el Sol. Dentro de las artificiales podemos encontrar diferentes tipos de fuentes de luz con diferentes características de emisión y funcionamiento.

En el segundo capítulo se describen los tipos de fibra óptica que existen, empezando por los mecanismos de propagación de la luz en éstas, las características geométricas, estructurales y los materiales con que son fabricadas; en general se realiza una descripción del tipo de fibras que se producen comercialmente y el campo de aplicación, comenzando por las fibras convencionales, fibras centelladoras, fibras de cristal fotónico y dejando al último las fibras ópticas dopadas con tierras raras que son de primordial utilidad en este trabajo.

La llegada de nuevas estructuras de materiales de fibras ópticas amplió el campo de aplicaciones y en la actualidad es la aplicación de las fibras ópticas define su estructura y material. Por ejemplo, la fibra convencional, además de ser usada para transmitir datos, también es usada en la implementación de diversos sensores; la fibra centelladora se utiliza en la fabricación sensores de radiación; las fibras de cristales fotónicos son usadas para eliminar o aumentar los efectos no lineales de las fibras ópticas según se requiera, las fibras dopadas con tierras raras son usadas principalmente en la implementación de láseres en

fibra óptica, amplificadores de Erblio y en la implementación de fuentes superluminiscentes en fibra.

En el tercer capítulo se describe, principalmente, el funcionamiento de una fuente superluminiscente basada en tres niveles y se realiza una argumentación sobre las ventajas, en algunas aplicaciones, de las fuentes superluminiscentes con respecto otras fuentes de luz, con lo que se justifica su implementación. También se describe los niveles de energía en los cuales funcionan las fuentes láser en general, haciendo referencia a los elementos químicos conocidos como tierras raras.

Para lograr la emisión láser es necesario producir una inversión de población en los niveles de energía atómicos y con esto tener una amplificación de emisión estimulada. Para lograr la inversión se usan medios activos con tres y cuatro niveles de energía. Las fuentes superluminiscentes funcionan con principios similares a un láser, pero no poseen un resonador óptico y únicamente se basan en el fenómeno de amplificación de emisión espontánea. Las fuentes superluminiscentes en fibra óptica dopada con Erblio poseen varias ventajas sobre los láseres en aplicaciones como fuentes de bombeo en sensores de velocidad angular.

En el cuarto y último capítulo se reportan los resultados teóricos y prácticos de la implementación de las fuentes superluminiscentes con fibra óptica dopada con Erblio, comenzando con los cálculos teóricos, seguido de la implementación y al final se muestran los datos experimentales obtenidos.

La construcción de esta fuente superluminiscente en fibra tiene tres elementos fundamentales: la fuente de excitación o bombeo de tipo láser, emitiendo a una longitud de onda de 980 nm; un multiplexor por división de longitud de onda, el cual en este trabajo permite la medición de la señal de salida en dirección de la fuente de bombeo y la medición de la señal de salida en sentido contrario a la fuente de bombeo; por último se tiene a la fibra óptica dopada con Erblio, esta última es el medio activo que genera la señal superluminiscente.

# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

---

## 1.1 Naturaleza de la luz

A lo largo de la historia, el hombre a tratado de explicar el origen y comportamiento de la luz, con este motivo se establecieron múltiples teorías. La primera de ellas, conocida como “teoría corpuscular (Óptica de rayos)”, fue descartada por no poder explicar fenómenos como la interferencia y la difracción. La siguiente teoría que logró explicar estos fenómenos, fue conocida como “teoría ondulatoria (Óptica de ondas)”, pero estaba incompleta, ya que se creía que cualquier fenómeno ondulatorio necesitaba un medio de transmisión el cual se nombre “éter”.

Posteriormente, Maxwell desarrolló la teoría de que las ondas debían de ser ondas de naturaleza electromagnética. La teoría electromagnética describe adecuadamente los fenómenos explicados por la teoría corpuscular y la teoría ondulatoria.

Aunque la teoría electromagnética parecía explicar la naturaleza de la luz, aun no lograba explicar fenómenos como la emisión y la absorción de energía radiante. Max Planck (físico alemán), publicó su hipótesis cuántica, donde postulaba que la energía electromagnética se absorbía o emitía en paquetes discretos, o cuantos [1, 2].

### *1.1.2 Teoría corpuscular*

Isaac Newton fue el primero en establecer una teoría física sobre la naturaleza de la luz, proponiendo que era un flujo de partículas diminutas emitidas a gran velocidad por un cuerpo luminoso, las cuales al llegar al ojo lo estimulaban. En sustancias homogéneas y transparentes no están sujetas a ningún tipo de fuerza, por lo que se propagan en trayectorias rectilíneas.

En aquel momento la teoría supuesta por Newton logro explicar sin problemas el fenómeno de reflexión, pero al intentar explicar la refracción era necesario suponer un aumento muy

grande en la velocidad de las partículas en la dirección normal a la superficie en el momento en el que la luz penetra en el medio refractor, lo cual ahora sabemos es incorrecto [1].

### *1.1.2 Teoría ondulatoria*

Después de la postulación de la teoría de Newton se descubrieron los fenómenos de interferencia y difracción, lo cual acabó desechando la teoría corpuscular. A partir de estos fenómenos, Christian Huygens estableció su teoría ondulatoria, con la cual fue posible explicar los fenómenos de reflexión, refracción, interferencia y difracción.

El principio de Huygens tuvo origen en el conocimiento de que las ondas se propagan gradualmente, de punto a punto de un medio; por consiguiente, si una fuente es rodeada por una superficie cerrada, la perturbación originada en la fuente podrá alcanzar la región exterior a la superficie solamente atravesando dicha superficie. Para esto se supone que en los diferentes puntos de la superficie cerrada, cuando son alcanzados por las ondas, estos se convierten en el origen de ondas secundarias, que al ser observadas más allá de la superficie resulta en la superposición de estas ondas secundarias [2].

El descubrimiento de la luz polarizada permitió establecer que la luz era una onda transversal que se propagaba en un medio desconocido al que se le nombró “éter”.

### *1.1.3 Teoría electromagnética*

Maxwell perfeccionó la teoría ondulatoria suponiendo que una onda luminosa era una onda electromagnética, es decir un campo eléctrico ondulatorio acompañado de un campo magnético el cual es perpendicular al eléctrico.

Maxwell explicó que la energía en una onda electromagnética se divide por igual entre los campos eléctricos y magnéticos que son perpendiculares entre sí. Ambos campos oscilan en forma perpendicular a la dirección de propagación de la onda, como se muestra en la Figura 1.

Hertz logró confirmar experimentalmente la teoría electromagnética, al probar que la radiación de la energía electromagnética puede ocurrir a cualquier frecuencia. Es decir, la luz, la radiación térmica y las ondas de radio son de la misma naturaleza y todas ellas viajan a la velocidad de la luz.

La confirmación de esta teoría despejó el camino para la caída del postulado del éter como medio transportador de la luz [3].

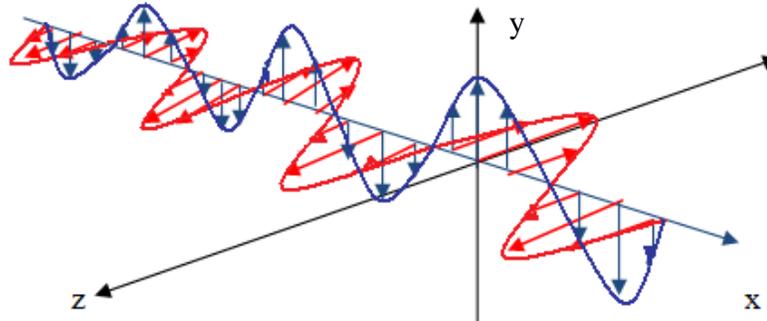


Figura 1. La luz es una onda electromagnética.

Actualmente el espectro electromagnético conocido es enorme. La longitud de onda  $\lambda$  de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia  $f$  mediante la ecuación general.

$$c = f \lambda \quad (1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s aproximadamente). En términos de longitudes de onda, la región visible comprende de 400nm a 700nm, aproximadamente.

En la Figura 2 se muestra un esquema del espectro electromagnético [4].

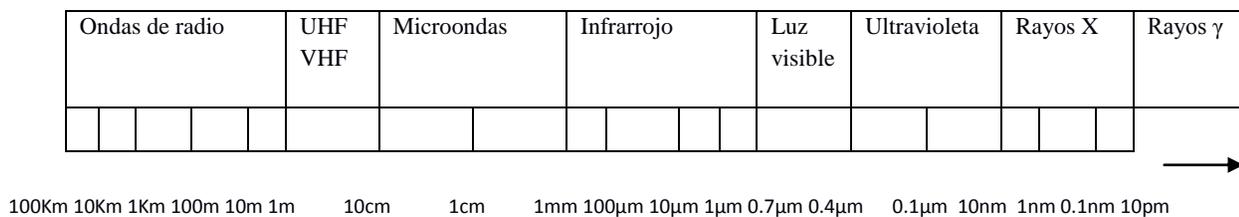


Figura 2. Esquema del espectro electromagnético expresado en longitud de onda

## Leyes del electromagnetismo

Para explicar las leyes del electromagnetismo, existen dos características fundamentales de los campos vectoriales, el flujo y la circulación, por lo que un campo electromagnético debe cumplir las siguientes leyes [3].

### Ley de Gauss

#### a) Campo eléctrico

Esta ley relaciona el flujo de la intensidad de campo eléctrico a través de una superficie cerrada A, con la carga total encerrada, en donde el flujo de campo eléctrico es calculado como:

$$\Phi_E = \oiint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} \quad (2)$$

El vector  $d\mathbf{S}$  está en la dirección de una normal hacia afuera como se muestra en la Figura 3. Si el volumen encerrado por la superficie cerrada A es igual a V y, además, existe una distribución continua de carga  $\rho$ , la ley de Gauss es:

$$\oiint_A \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = \frac{1}{\epsilon} \iiint_V \rho dV \quad (3)$$

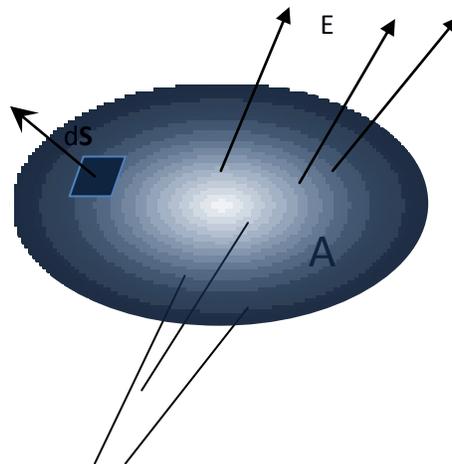


Figura 3. Campo eléctrico E a través de un área cerrada A.

b) Campo magnético

A diferencia del campo eléctrico donde sus líneas no necesariamente son cerradas y es posible la existencia de cargas eléctricas aisladas, las líneas de flujo magnético se cierran en sí mismas, por lo que es imposible que existan polos magnéticos aislados.

Esto quiere decir que el flujo magnético total a través de una superficie cerrada debe ser cero, es decir:

$$\oiint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (4)$$

Esto es, cualquier superficie cerrada en una región de campo magnético tiene igual número de líneas de  $\mathbf{B}$  entrando y saliendo, como se ve en la figura 4.

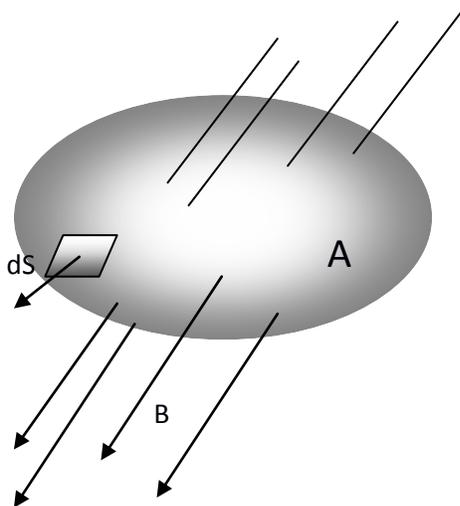


Figura 4. Campo magnético  $B$  a través de un área cerrada  $A$ .

*Ley de inducción de Faraday*

Un flujo magnético variable en el tiempo, pasando a través de un circuito conductor cerrado, da como resultado la generación de una corriente alrededor de ese circuito. La

densidad de flujo magnético a través de un área abierta A, limitada por un circuito conductor (ver figura 5), está dado por:

$$\Phi_B = \iint_A B \cdot dS \quad (5)$$

La fuerza electromotriz inducida alrededor del circuito es igual a:

$$fem = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (6)$$

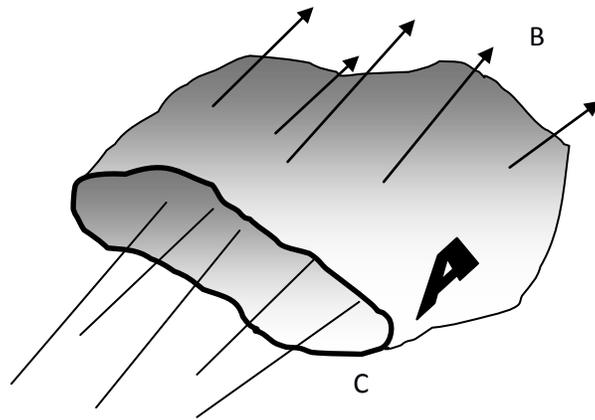


Figura 5. Campo magnético B a través de un área abierta A

La fuerza electromotriz solo existe como resultado de la presencia de un campo eléctrico, la cual se puede escribir como:

$$fem = \oint_C E \cdot dl \quad (7)$$

Igualando las ecuaciones (6) y (7) y haciendo uso de la ecuación (5) obtenemos:

$$\oint_C E \cdot dl = -\frac{d}{dt} \iint_A B \cdot dS \quad (8)$$

De la ecuación anterior podemos ver que C es la única referencia física al circuito, pero como se puede observar la trayectoria se puede escoger arbitrariamente y no necesita estar

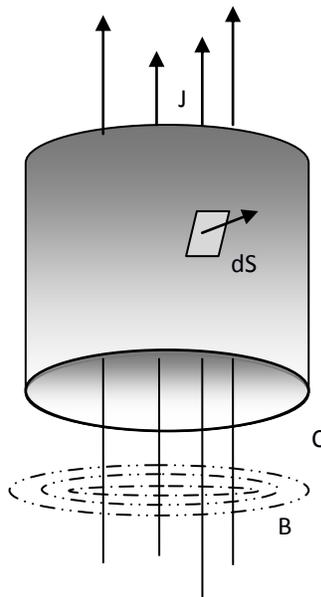
dentro o, cerca de ningún conductor. El campo eléctrico aparece como consecuencia de un campo magnético variable en el tiempo. Sin cargas que actúen como fuentes o sumideros, las líneas de campo se cierran formando circuitos.

### *Ley de Ampere*

A la ecuación que relaciona la circulación del campo magnético  $B$  con la corriente neta concatenada, se le conoce como ley de Ampere y se le representa de la siguiente forma:

$$\oint_C B \cdot dI = \mu \iint_A J \cdot dS = \mu i \quad (9)$$

Esto significa que la circulación de  $B$  a lo largo de  $C$ , resulta el producto de la permeabilidad del medio ( $\mu$ ) por la corriente que cruza la superficie limitada por  $C$ . La superficie  $A$  es abierta y está limitada por la curva  $C$ , donde  $J$  es la corriente por unidad de área, como se muestra en la figura 6.



*Figura 6. Densidad de corriente a través de un área abierta.*

Ahora bien, la ley antes mencionada es aplicable para campos magnéticos estáticos. La aportación de James C. Maxwell fue añadir un término conocido como densidad de corriente de desplazamiento, el cual está definido por:

$$J_D = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (10)$$

Este término proporciona el eslabón faltante para unir la teoría eléctrica con la magnética y, además, explica la propagación de ondas electromagnéticas aun en ausencia de cargas y corrientes. La ley de Ampere para campos magnéticos variables en el tiempo es:

$$\oint_C B \cdot dI = \mu \iint_A (J + J_D) \cdot dS = \mu \cdot \left( i + \epsilon \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} \right) \quad (11)$$

Esto quiere decir que las corrientes eléctricas o campos eléctricos variables en el tiempo, espacio o, ambas darán lugar a un campo magnético tal que satisfaga la ecuación anterior [1].

### *Ecuaciones de Maxwell*

James Clerk Maxwell (1831-1879) es considerado el padre de la teoría electromagnética contemporánea, siendo el primero en dar a conocer la teoría unificada de la electricidad y el magnetismo. Sus estudios lo condujeron al descubrimiento de las ondas electromagnéticas.

Las cuatro leyes antes mencionadas, conocidas como ecuaciones de Maxwell, son importantes porque permiten calificar un campo como electromagnético.

Para el estudio de las ondas electromagnéticas en el vacío vamos a considerar que se observan regiones del espacio donde no existen fuentes de corriente, ni cargas, esto es [4]:

### Ley de Gauss eléctrica

$$\oiint_A E \cdot dS = 0 \quad (12)$$

y en su forma diferencial,

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (13)$$

### Ley de Gauss magnética

$$\oiint_A B \cdot dS = 0 \quad (14)$$

y en su forma diferencial,

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (15)$$

Ley de Faraday

$$\oint_C E \cdot dI = -\frac{d}{dt} \iint_A B \cdot dS \quad (16)$$

y en su forma diferencial,

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (17)$$

Ley de Ampere

$$\oint_C B \cdot dI = \mu \iint_A J_D \cdot dS = \mu \cdot \epsilon \frac{\partial \Phi_E}{\partial t} \quad (18)$$

y en su forma diferencial,

$$\nabla \times B = \mu \cdot \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad (19)$$

#### 1.1.4 Teoría cuántica

Albert Einstein introdujo su teoría especial de la relatividad, en la que rechazó la existencia del éter, y postuló que [3]:

*La luz se propaga en el espacio siempre con la velocidad  $c$ , la cual es independiente del estado de movimiento del cuerpo emisor.*

Gracias a la cinemática relativista, los físicos tuvieron que acostumbrarse a la idea de que las ondas electromagnéticas se podían propagar simplemente en el espacio libre: no había otra alternativa. La luz se visualizó como una onda auto sustentada con un énfasis conceptual al pasar del éter al campo.

Una serie de experimentos sugirió que la luz se propagaba en paquetes de energía y que estos paquetes no se podían dividir en fracciones menores de energía. Este es el postulado de Planck. Esta teoría sugiere la idea de una partícula, ya que el comportamiento en muchos aspectos es idéntico al de una partícula, a la cual se le nombró *fotón* o *cuanto*, dando nacimiento a la teoría cuántica de la luz.

Uno de los dogmas básicos de la mecánica cuántica es que tanto la luz como los objetos materiales tienen propiedades similares de onda-partícula. Erwin C. Schrödinger (1887-1961), estableció [1]:

*En el nuevo arreglo de ideas la distinción (entre partículas y ondas) ha desaparecido, porque se descubrió que todas las partículas tienen también propiedades ondulatorias, y viceversa. Ninguno de los dos conceptos se deben desechar, ellos deben amalgamarse. Qué aspecto sobresalga depende no del objeto físico sino del instrumento experimental usado para examinarlo.*

La naturaleza dual de la luz es evidente por el hecho de que se propaga en el espacio como lo hace una onda y aun así puede mostrar un comportamiento de partículas durante los procesos de emisión y absorción. La energía electromagnética radiante es creada y destruida en cuantos o fotones y no continuamente como una onda clásica. No obstante, su movimiento en lentes, agujeros y rendijas está gobernado por características ondulatorias [1,2].

## **1.2 Fuentes de radiación electromagnética (emisión de luz)**

Las fuentes de radiación son diversas y de diferente naturaleza, las cuales podemos agruparlas en dos tipos, las naturales y las artificiales:

- Las fuentes naturales son diversas, como aquellas que provienen del espacio, por ejemplo los rayos cósmicos, o la radiación que proviene del sol y otras estrellas.
- Fuentes artificiales. Son todas aquellas generadas mediante dispositivos construidos por el hombre, como son: señales de radio frecuencias, microondas, lámparas, LED's, láseres, fuentes superluminiscentes, etc.

Para este trabajo las fuentes de primordial importancia son las artificiales, las cuales serán estudiadas de la siguiente forma:

- Fuentes de radiación térmica
- LED's (Light Emitting Diode)
- Láseres
- Fuentes superluminiscentes en fibra óptica

### 1.2.1 Fuentes de radiación térmica

El principio de funcionamiento de estas lámparas, también llamadas lámparas incandescentes, es pasar una corriente eléctrica por un filamento de tungsteno, el cual se calienta por efecto joule a temperaturas tan elevadas que empieza a emitir luz visible. Para evitar que el filamento se evapore se envuelve en una burbuja de sílice y se sella al vacío o se rellena con un gas inerte (ver figura 7).

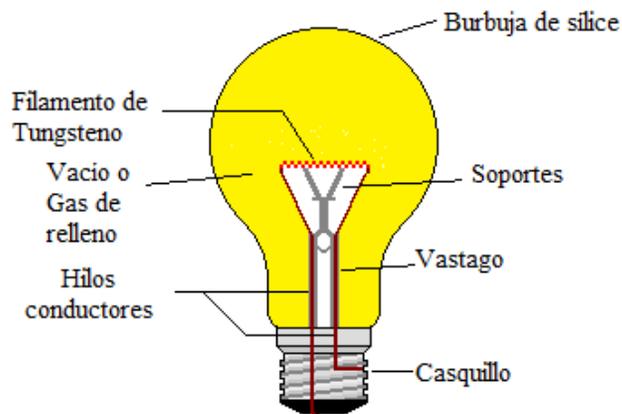


Figura 7. Esquema de una lámpara incandescente.

Un ejemplo de lámparas incandescentes que usan un gas inerte son las lámparas de cuarzo halógeno tungsteno [QTH, por sus siglas en inglés], en donde la burbuja se rellena con halógeno. Este gas causa una reacción química entre los átomos evaporados de tungsteno del filamento y los depositados en la pared de la burbuja generando un ciclo de regeneración, el cual mejora el tiempo de vida y la transparencia de la lámpara.

Una lámpara de QTH es una fuente de radiación de banda ancha: el tungsteno emite en todas las longitudes de onda, pero los límites de la transparencia de la emisión útil es para

visible e infrarrojo cercano (hasta unas 2.5  $\mu\text{m}$ ). También existe disponible en radiación UV, en el intervalo de 200 a 400 nm, aunque es de baja intensidad.

Una radiación más intensa que las de las lámparas QTH es la generada por las lámparas de descarga de gas xenón, mercurio, deuterio u otro gas inerte. Otra característica importante es el gran número de líneas espectrales ultra violeta (UV). Con una lámpara de arco de deuterio se puede obtener longitudes de onda tan cortas como 160nm.

Para emisores de infrarrojo medio o lejano se han utilizado los tubos de Nernst hechos con cerámica de zirconio y los fabricados con carburo de silicio cerámico. Este tipo de lámparas emiten longitudes de onda en el rango de 1 a 28 $\mu\text{m}$ , en el espectro infrarrojo continuo, sin problemas [5].

### 1.2.2 Diodos emisores de luz (LEDs)

Como su nombre lo dice son materiales semiconductores de unión p-n, en los cuales la recombinación de electrones-agujeros resulta en la emisión de luz del material semiconductor. A temperatura ambiente la concentración de electrones y agujeros excitados térmicamente es muy pequeña, así que regularmente el flujo de fotones es muy pequeño. Por otra parte, la emisión de fotones puede ser apreciablemente mayor si se usa un medio externo para producir exceso de electrones- agujeros en pares en el material [6]. Esto puede lograrse, iluminando el material con luz, pero generalmente se obtiene polarizando la juntura p-n, lo cual sirve para inyectar portadores pares dentro de la región de juntura (ver figura 8).

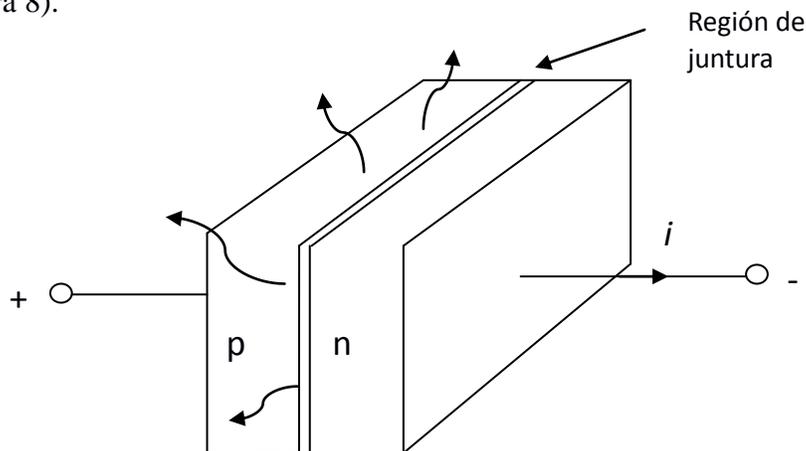


Figura 8. Los fotones son emitidos espontánea de la región de juntura.

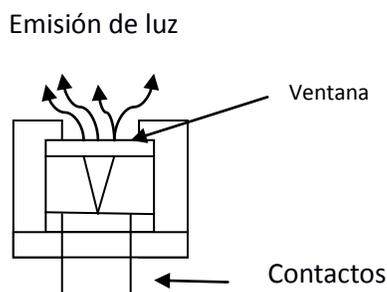
Los LED's tienen características monocromáticas del orden de los 30-150nm (varía según la longitud de onda a la cual trabajen), trabajando regularmente a bajas tensiones (2-5V), bajas corrientes (20-100mA) y la mayoría de ellos trabajan linealmente [5].

Características deseadas:

- Salida con alta irradiación (brillantez).
- Respuesta de emisión rápida
- Alta eficiencia cuántica

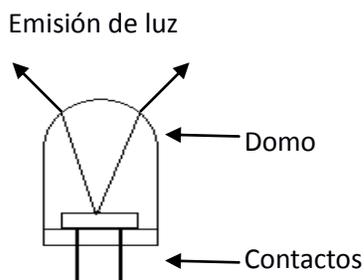
### *Estructuras de LED's*

- a) *LED's planos*: Es la estructura más sencilla, la cual al hacerle circular una corriente emite luz en todas direcciones de toda la superficie, aunque debido a la reflexión interna total son de baja irradiancia (ver figura 9) [7].



*Figura 9. Led plano*

- b) *Domo LED's*: Una semiesfera de material n es formada alrededor del material p, la eficiencia externa del dispositivo es mayor que la de un LED plano, frecuentemente la estructura es como un domo que debe ser mucho más grande que el área de la región activa de recombinación, con lo cual se obtiene una emisión más eficiente (ver figura 10) [7].



*Figura 10. Domo led, es el LED más común*

- c) *LED's emisoras de superficie (SLED's)*: Este tipo de LED tiene un grabado de sustrato de GaAs orientado a prevenir la pesada absorción por radiación emitida y físicamente está preparado para colocar la fibra óptica [7].
- d) *LED's Emisores de borde (ELED's)*: El sustrato activo de este tipo de LED's es muy delgado (alrededor de 50  $\mu\text{m}$  o 100 $\mu\text{m}$ ), lo cual está orientado a reducir las pérdidas por absorción. La luz emitida es guiada desde la región de juntura hacia el exterior por una estrecha guía de onda, lo que permite un mejor acoplamiento a las fibras ópticas [6, 7]
- e) *LED's superluminiscentes (SLD's)*: A diferencia de las otras estructuras de LED's, ésta tiene una potencia de salida mucho mayor, un rayo de luz direccional y un ancho espectral más estrecho (aproximadamente de 30 nm a 100nm), pero mucho más amplio que el de un diodo láser [7].

Este tipo de LED's a diferencia de los convencionales no tiene una salida lineal y su temperatura aumenta dependiendo de la potencia de salida. Además, su salida incoherente es aprovechada para bombeo de láseres, y requieren una densidad de corriente alta.

### 1.2.3 Láseres

La palabra láser es el acrónimo de “Light amplification by stimulated emission of radiation”, lo que significa amplificación de luz por radiación de emisión estimulada. Un láser es un dispositivo que transforma otras formas de energía en radiación electromagnética, dependiendo del medio activo y la fuente de excitación usada, dicha radiación electromagnética es emitida con ciertas características únicas de los láseres.

Los sistemas láseres funcionan con base en tres elementos fundamentales: el medio activo, el resonador óptico y la fuente de excitación.

Todos los sistemas láseres funcionan bajo los procesos de absorción, emisión espontánea y emisión estimulada. El tipo de medio activo determina las frecuencias de operación y el tipo de fuente de excitación para obtener la inversión de población.

Existen muchas formas de generar una fuente láser, sin embargo, los láseres pueden ser distintos en su construcción y funcionamiento, por ello es necesario describir algunas propiedades principales, las cuales nos permiten distinguir a los láseres de las demás fuentes de radiación [8].

## *Propiedades de los rayos láser*

La radiación láser está caracterizada por cuatro propiedades fundamentales: (1) monocromatismo, (2) coherencia, (3) direccionalidad, (4) brillo. A estas cuatro propiedades podemos agregar una quinta, (5) corta duración. Esta última propiedad no es fundamental, pero es importante, y se refiere a la capacidad de producir pulsos de luz muy pequeños [9].

### 1. Monocromatismo

Esta propiedad debe seguir dos circunstancias: (1) sólo una onda electromagnética de frecuencia  $\nu$  puede ser amplificada. (2) Una cavidad de resonancia puede ser formada por un arreglo simple de dos espejos en donde la oscilación solamente debe ocurrir para frecuencias de dicha cavidad. Lo anterior lo podemos traducir en que el ancho espectral de un láser debe ser muy pequeño (máximo 8 nm) [8].

### 2. Coherencia

Vamos a introducir dos conceptos de coherencia, llamados, coherencia espacial y coherencia temporal.

Para definir coherencia espacial consideramos dos puntos  $P_1$  y  $P_2$ , en un tiempo  $t=0$ , ubicados en el mismo frente de onda de una onda electromagnética; además, consideraremos dos campos eléctricos,  $E_1(t)$  y  $E_2(t)$ , correspondientes a estos puntos. Si puntos de estos campos eléctricos están en fase en  $t=0$  y se mantienen así para  $t>0$ , se dice que hay coherencia espacial.

Ahora, para explicar el concepto de coherencia temporal, consideraremos una onda electromagnética en un punto dado  $P$ , en los tiempos  $t$  y  $t+\tau$ . Si para un retraso de tiempo  $\tau$ , la diferencia de fase entre los dos campos permanece igual para cualquier tiempo  $t$ , se dice que existe coherencia temporal sobre un tiempo  $\tau$  [8].

### 3. Direccionalidad

Esta propiedad surge a consecuencia de colocar el material activo en una cavidad de resonancia, en donde, la propagación de la onda electromagnética ocurre a lo largo de la cavidad de resonancia (o muy cercana a ésta).

Básicamente, la cavidad de resonancia produce que la salida del rayo láser sea con una difracción muy limitada [8].

#### 4. Brillo

El brillo de una fuente de ondas electromagnéticas se define como la potencia emitida por unidad de área de superficie por ángulo sólido.

Bajo la definición anterior, un láser incluso de una potencia moderada tiene un brillo mayor que el brillo de las fuentes convencionales. Esta propiedad es una consecuencia directa de la propiedad de direccionalidad [8].

#### 5. Corta duración

La emisión láser está dada por pequeños pulsos, la cual se relaciona con el ancho de la línea de transición de 2 a 1 de los niveles de energía del medio activo. Esta propiedad implica una concentración de energía por tiempo, relacionada con el monocromatismo. En la práctica los láseres que tienen un ancho de pulso de muy corta duración no son los láseres que presentan el mejor comportamiento monocromático, y por otro lado los láseres que presentan un comportamiento muy monocromático son láseres que tienen una duración mayor en el pulso de emisión [8].

### ***Tipos de láseres***

Vamos a considerar los siguientes tipos de láser según su medio activo: láseres de estado sólido (cristal o vidrio), láseres de gas, láseres líquidos (de colorante), láseres químicos, láseres semiconductores, láseres de centro de color, láseres de electrón libre, láser de rayos x [8].

#### *1.- Láseres de estado sólido*

En este tipo de láseres están considerados aquellos, en donde su medio activo es un cristal dieléctrico o vidrio, en donde el bombeo óptico usado es por medio de una fuente de radiación electromagnética. Los láseres semiconductores están considerados por separado, ya que el proceso de bombeo para estos es bastante diferente. Este tipo de láseres regularmente usa iones de impurezas activas dentro de un cristal iónico. Usualmente los

iones pertenecen a los elementos de transición de la tabla periódica, particularmente  $\text{Cr}^{+3}$ , o tierras raras, principalmente  $\text{Nd}^{+3}$  y  $\text{Er}^{+3}$ .

En esta clasificación se encuentra el láser de rubí, los láseres de Neodimio y el láser de Alexandrita [8].

## 2.- Láseres de gas

Estos láseres tienen como medio activo usualmente un gas a baja presión, donde el gas es excitado por medios eléctricos, el bombeo se logra pasando una corriente suficientemente grande a través del gas [8].

Los láseres de gas se pueden agrupar por el tipo de gas mediante el cual funcionan:

- I. *Láseres de átomos neutros:* Estos láseres usan átomos neutros en forma de gas o vapor. Ésta familia está constituida por láseres hechos por gases nobles y por láseres de vapores metálicos. Dentro de estos láseres se encuentran el láser de Helio-Neón, y los láseres de vapor metálico cobre y oro.
- II. *Láseres de gas iónico:* Para este tipo de láseres se ocupa un gas ionizado, frecuentemente gases nobles y vapores metálicos. De estos láseres, los más conocidos son el láser de Argón ( $\text{Ar}^{+}$ ) y el láser de Helio-Cadmio ( $\text{He-Cd}$ ).
- III. *Láseres de gas molecular:* Este tipo de láseres explotan las transiciones entre los niveles de energía de una molécula. Entre estos los principales láseres son, el láser de Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), el láser de Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ ), el láser de nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), y el láser de Excímero.

## 3.- Láseres líquidos (de colorante)

Los láseres líquidos son considerados como aquellos en los cuales el medio activo consiste en soluciones de determinados compuestos orgánicos de tinte en solvente líquido, como alcohol etílico, alcohol metílico, o agua mediante los cuales se puede convertir la radiación electromagnética de una longitud de onda en otra longitud de onda que se puede sintonizar [8].

## 4.- Láseres químicos

Un láser químico usualmente está definido como aquel en donde la inversión de población es producida directamente de una reacción química. Los láseres químicos usualmente

envuelven una reacción química entre gases elementales, y a menudo envuelve tanto asociación o disociación de reacción química exotérmica. De estos láseres los más conocidos son el láser HF (Ácido Fluorhídrico) y el DF (Fluorido de Deuterio) [8].

#### 5.- Láseres semiconductores

También conocidos como diodos láser, los cuales están hechos por una unión p-n, en donde la banda de valencia y la banda de conducción están separadas por una energía de gap.

Al excitar los electrones, estos logran pasar a la banda de conducción, y después de un corto tiempo vuelven a caer a la banda de valencia. Es en este proceso donde se emiten fotones. Una vez alcanzada la inversión de población, entre la banda de valencia y la banda de conducción, el proceso de emisión estimulada de radiación de recombinación producirá oscilación láser siempre y cuando el semiconductor sea colocado en un resonador adecuado [8].

#### 6.- Láseres de centro de color

Este tipo de láseres tiene un funcionamiento similar a los láseres de cristal (estado sólido), solo que las impurezas se presentan en forma de defectos puntuales en cristales de Haluros Alcalinos. Estos defectos puntuales se obtienen al exponerlos a radiación de alta energía, añadiendo más niveles de energía a los átomos y estos niveles de energía producen la absorción de longitudes de onda específicas lo que da color a los Haluros transparentes del cristal y esto le da el nombre de láseres de centro de color [8].

#### 7.- Láseres de electrón libre

En este láser, un haz de electrones se mueve a una velocidad cercana a la velocidad de la luz pasando por un campo magnético generado por una estructura periódica. La estimulación del proceso surge de la interacción del campo electromagnético del rayo láser con esos electrones relativistas en movimiento en una estructura magnética periódica. Esto significa que este dispositivo puede emitir a cualquier longitud de onda según su construcción [8].

#### 8.- Láseres de rayos X

Este tipo de láser aun sigue en investigación, y tiene como medio un plasma ionizado [8].

### 1.2.4 Fuentes superluminiscentes en fibra óptica

Después de la aparición de las fibras ópticas dopadas con tierras raras fue posible usarlas como medio activo para implementarlas como fuentes superluminiscentes. Una fuente superluminiscente se basa en la amplificación de emisión espontánea (Amplified Spontaneous Emission, ASE), y tiene una construcción similar a la de un láser, excepto que carece de un resonador óptico.

La salida de una fuente superluminiscente (Superfluorescent Fiber Sources, SFS) en fibra óptica es una simple superluminiscencia, la cual es una emisión de luz por que se presenta cuando el material activo (la fibra óptica dopada con tierras raras), interactúa con una fuente externa de radiación electromagnética (una fuente láser), dicha luminiscencia presenta una ganancia óptica en el dispositivo de emisión, debido a esto el ancho de banda de estos dispositivos es más estrecho que el emitido por un fenómeno de luminiscencia.

A diferencia de los láseres, una SFS emite una señal de un ancho espectral más amplio, típicamente de 20 a 60 nm. En largas investigaciones se logro desarrollar SFS muy estables y de alta potencia, basadas en fibras ópticas dopadas en tierras raras, usando como fuente de bombeo preferentemente un diodo láser como se verá más adelante [9].

## 1.3 Detectores de radiación (detección de luz)

Los detectores de luz transforman la energía incidente en otras formas de energía, en cambios en las propiedades de los materiales, o simplemente en señales eléctricas, ya sea corriente o voltaje. Existen varios tipos de detectores de radiación con diferentes principios físicos de funcionamiento [5].

### *Clasificación de los detectores*

- a) Proceso físico de generación de señal
  - Detectores optoelectrónicos
    - Celdas simples optoelectrónicas
    - Fotomultiplicadores

- Detectores semiconductores
  - Detectores fotoconductivos (fotoresistencias)
  - Detectores fotovoltaicos (fotodiodos)
  - Detectores térmicos (bolómetros)
- b) Por número de detectores en el mismo encapsulado
  - Detector único
  - Arreglos de detectores
    - Detectores en línea (arreglos unidimensionales)
    - Sensores de área (arreglos bidimensionales)

### *1.3.1 Tipos de detectores*

#### ***Celdas fotoeléctricas***

Una celda fotoeléctrica (o fototubos) consiste en dos electrodos, un ánodo y un cátodo, colocados dentro de un tubo transparente para permitir el paso de la radiación. Una fuente externa de voltaje permite una adecuada caída de voltaje entre los electrodos. Su principio de operación está basado en el efecto fotoeléctrico externo o emisión de fotoelectrones, en el cual la absorción de fotones por algunos materiales resulta directamente en una transición electrónica a niveles más altos de energía y la generación de cargas móviles. Bajo este efecto se produce un campo eléctrico de cargas en movimiento y de esta manera podemos obtener señales eléctricas medibles [5].

#### ***Fotomultiplicadores***

La desventaja de las celdas fotoeléctricas es que producen bajos niveles de fotocorriente. Esta situación puede ser mejorada añadiendo a la celda procesos de multiplicación de electrones. El proceso antes mencionado se basa en la aceleración de fotoelectrones por un ajuste apropiado del campo eléctrico y una conversión del exceso de energía cinética en una emisión secundaria de electrones. Los electrones secundarios son aún más acelerados y

causan que más electrones aparezcan, y este proceso se repite hasta que los niveles salida de corriente son adecuados [5].

### ***Detectores fotoconductores***

Estos detectores al ser iluminados directamente su conductividad eléctrica aumenta, lo cual se puede apreciar en casi todos los materiales semiconductores. La absorción de un fotón por un material intrínseco fotoconductor resulta en la generación de un electrón libre excitado de la banda de valencia a la banda de conducción. Al mismo tiempo un agujero es generado en la banda de valencia. La aplicación de un campo eléctrico en el material resulta en el transporte de ambos, electrones y agujeros a lo largo del material y la producción consecuente de una corriente eléctrica en el circuito eléctrico del detector [5].

### ***Detectores semiconductores***

Este tipo de detectores actúa de forma opuesta a los láseres diodos y a los LED's. Es decir, convierten directamente la radiación en una corriente eléctrica generada en el material semiconductor.

Los detectores semiconductores conocidos como fotodiodos son una estructura de juntura p-n la cual se basa en el foto-efecto interno. Los fotones absorbidos por la capa de agotamiento generan electrones y agujeros con lo cual son sometidos a un campo eléctrico local dentro de esa capa. Los dos portadores de deriva se mueven en direcciones opuestas como un transporte de proceso inducido y una corriente en el circuito externo.

Algunos fotodetectores incorporan mecanismos de ganancia interna tal que la corriente fotoeléctrica pueda ser físicamente amplificada dentro del detector y así hacer la señal más fácilmente detectable.

Estos dispositivos son incluidos en los fotodiodos avalancha los cuales incorporan los siguientes tres principios básicos:

**Generación:** Los fotones absorbidos generan portadores libres.

**Transporte:** Un campo eléctrico aplicado induce que los portadores se muevan, lo que resulta en una corriente en el circuito.

**Amplificación:** En los fotodiodos de avalancha, grandes campos eléctricos imparten la suficiente energía a los portadores de modo que, a su vez, generan portadores libres adicionales por ionización de impacto. Este proceso de amplificación interna mejora la responsividad del detector [5, 6].

### *Detectores Térmicos*

Este tipo de detectores opera convirtiendo la energía de los fotones en calor. Frecuentemente, la mayoría de los detectores térmicos son bastante ineficientes y relativamente lentos como resultado del tiempo que requieren para cambiar de temperatura. A consecuencia este tipo de detectores no son adecuados para la mayoría de las aplicaciones en fotónica [5].

### *Arreglos de detectores*

Existen muchas razones para incrustar un número de sensores en el mismo empaque y son muy útiles para muchas aplicaciones, una de las razones principales es analizar la distribución espacial, por esta razón se han generado arreglos simples de detectores como son arreglos de dos elementos, arreglos de cuadrantes o arreglos lineales de múltiples detectores. Ya que los arreglos simples son fotodiodos mecánicamente separados esto nos genera el problema de la manipulación de los cables principalmente para detectores de área. Este problema es resuelto aplicando tecnología de dispositivos de carga acoplada (Charge, Coupled Devices, CCD).

Hoy en día la tecnología microelectrónica nos permite otro tipo de arreglos que contienen un gran número de semiconductores fotodetectores (llamados píxeles) para ser fabricados. Un CCD es un dispositivo integrado construido en un substrato de silicona sobre el cual un número de electrodos transparentes de polisilicona están localizados. Los dispositivos CCD de área también son conocidos como ACCD (Area Charge Coupled Devices) y con ciertos circuitos electrónicos donde la conversión de pulsos CCD a ondas de vídeo son transportados en tiempo real constituyendo un dispositivo completo llamado cámaras CCD. También existen tecnologías basadas en el arreglo de fotodiodos conocidas como CCPD (Charge Coupled Photo Diode), las cuales son usualmente más rápidas que las CCDs. También se han desarrollado arreglos CMOS que cada vez son más populares y tienen un nivel de integración aun mayor a los CCDs y los CCPDs pero frecuentemente el ruido de los dispositivos CMOS es más alto y su sensibilidad es menor [5, 6].

## 1.4 Propagación de la luz

La luz es un paquete de cuantos o fotones los cuales se propagan como una onda electromagnética, que puede viajar en el espacio libre sin necesidad de un medio para transportarse, en donde su velocidad en el espacio libre es de  $2.99774 \times 10^8$  m/s, sin importar de la fuente de la cual provenga.

La luz puede propagarse en diferentes sustancias o materiales, pero su velocidad será menor que en el espacio libre. La luz a cualquier longitud de onda se propaga con la misma velocidad en el vacío, a diferencia de cuando se propaga en sustancias y materiales su velocidad es diferente para cada longitud de onda, a este efecto se le conoce como dispersión [10]. A la razón de la velocidad de la luz en el vacío con respecto a la velocidad de la luz en un material, a una determinada longitud de onda se llama: “índice de refracción del medio a una determinada longitud de onda”.

$$n = \frac{c}{v} \quad (20)$$

Donde:

$n$  es el índice de refracción del medio.

$c$  es la velocidad de la luz en el espacio libre.

$v$  es la velocidad de la luz en el medio.

En la actualidad la luz es posible guiarla dentro de algunos materiales en estructuras conocidas como guías de onda, una de estas estructuras por su construcción es conocida como fibra óptica, donde la implementación y fabricación de estas, se basa en las leyes de reflexión y refracción para poder guiar en el interior del núcleo de estas estructuras con mínimas pérdidas.

## Conclusiones al Capítulo 1

Para esta tesis, la luz se comporta como partícula, ya que al excitar los iones de Erblio, estos emiten luz en otra longitud de onda, y al propagarse dentro de la fibra óptica se comporta como una onda electromagnética, por lo que en este trabajo, la luz es vista principalmente de forma cuántica.

De las fuentes artificiales podemos resaltar al láser debido a que posee características únicas. La fuente superluminiscente en fibra óptica es semejante en operación e implementación a un láser, a diferencia de este, carece de un resonador óptico en su estructura lo que se manifiesta en una potencia óptica menor y un ancho espectral mayor; para esta tesis es importante el diodo láser ya que es la fuente de bombeo de la fuente superluminiscente en fibra óptica.

Hoy en día los detectores de luz más usados transforman los fotones incidentes en una señal eléctrica (corriente o voltaje), esto se debe a muchas razones, de las más importantes son una rápida respuesta a los cambios de intensidad de luz y una alta integración para la fabricación de arreglos; aquí se utilizó un fotodetector de material semiconductor de Indio Arseniuro de Galio (InGaAs), ya que este material es sensible a la longitud de onda pico de emisión del diodo láser utilizado y de la fuente superluminiscente, además otra razón de elegir este detector es que soporta las potencia luminosa del diodo láser y de la fuente superluminiscente.

La propagación de la luz dentro de la fibra óptica, permite guiarla aisladamente de otras fuentes de luz a bajas pérdidas, lo que permite usarla en diferentes aplicaciones como: telecomunicaciones, implementación de láseres, fuentes superluminiscentes, amplificadores y sensores.

# CAPÍTULO 2. FIBRAS ÓPTICAS

---

## 2.1 Fibras ópticas convencionales

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica fabricada en materiales de bajas pérdidas como vidrio de silicio o plásticos, en forma cilíndrica (ver figura 11), la construcción de las fibras ópticas les aporta flexibilidad. En el centro tienen un núcleo en el cual la luz es guiada, integrada en otro recubrimiento con índice de refracción ligeramente más bajo. Los rayos de luz inciden en la frontera del núcleo recubierto en ángulos mayores que el ángulo crítico de reflexión interna total y son guiados a través del núcleo sin refracción.

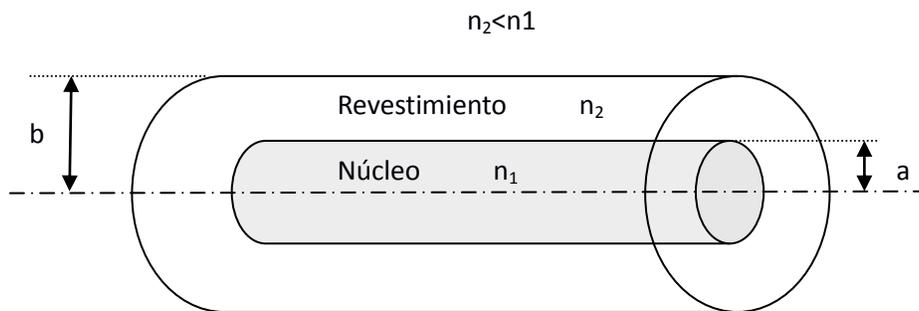


Figura 11. Una fibra óptica es una guía de onda cilíndrica.

Se define el ángulo crítico de reflexión de una onda lumínica que se propaga por un medio isotrópico al incidir sobre otro medio, con un índice de refracción menor, como el mínimo valor necesario del ángulo de incidencia, para que se produzca la reflexión de la onda lumínica incidente.

Para ondas lumínicas con ángulos de incidencia inferiores al ángulo crítico, se producirá una refracción de la onda lumínica incidente en el medio que tenga el menor índice de refracción (ver figura 12).

Llamamos zona de refracción al ángulo delimitado entre la normal y el ángulo crítico de reflexión, y la zona de reflexión está delimitada por la superficie de contacto y el ángulo crítico de reflexión.



La dispersión modal puede ser reducida clasificando el índice de refracción del núcleo de la fibra de un valor máximo en su centro a un valor mínimo en la frontera del núcleo y revestimiento. La fibra es entonces llamada fibra de perfil gradual, considerando las fibras convencionales con índices de refracción constante en núcleo y revestimiento son llamadas fibras de perfil escalonado [1, 6, 11].

### *2.1.1 Caracterización de las fibras ópticas*

La caracterización de las fibras ópticas está basada en la determinación de parámetros característicos de las fibras ópticas en función del tipo específico a caracterizar, los parámetros son de tres tipos:

- Parámetros Geométricos.
- Parámetros Estructurales ópticos.
- Parámetros Fundamentales de Transmisión.

A continuación se enumeran los parámetros en los cuales hay diferencias según el comportamiento de la fibra (Monomodo o Multimodo) [11].

#### *Parámetros geométricos*

- Diámetro del núcleo.
- No circularidad del Núcleo.
- Error de concentricidad del núcleo-revestimiento.
- Diámetro del revestimiento.
- No circularidad del revestimiento.
- Diámetro del recubrimiento primario.
- No circularidad del recubrimiento primario.
- Error de concentricidad revestimiento-recubrimiento primario.

#### *Parámetros Estructurales Ópticos*

- Apertura numérica.
- Perfil de la fibra óptica.
- Longitud de Onda Límite (solo fibras Monomodo).
- Diámetro del Campo Modal (solo fibras Monomodo).
- Error de Concentricidad del Campo Modal (solo fibras Monomodo).

### Parámetros Fundamentales de Transmisión

- Coeficiente de atenuación.
- Dispersión total/Ancho de banda (solo fibras Multimodo).

### 2.1.2 Perfiles de las Fibras Ópticas

El perfil de la fibra óptica se define para la sección transversal mínima, como la distribución de los índices de refracción a lo largo de un diámetro de una fibra óptica.

Ya que el índice de refracción del revestimiento siempre es constante, se puede clasificar las fibras ópticas en función de su perfil de índice de refracción del núcleo en perfil gradual y perfil escalonado (ver figura 13).

Las fibras con perfil escalonado podemos encontrarlas en dos diferentes comportamientos, monomodo o multimodo. En cambio las fibras de perfil gradual solo existen para comportamiento multimodo [6].

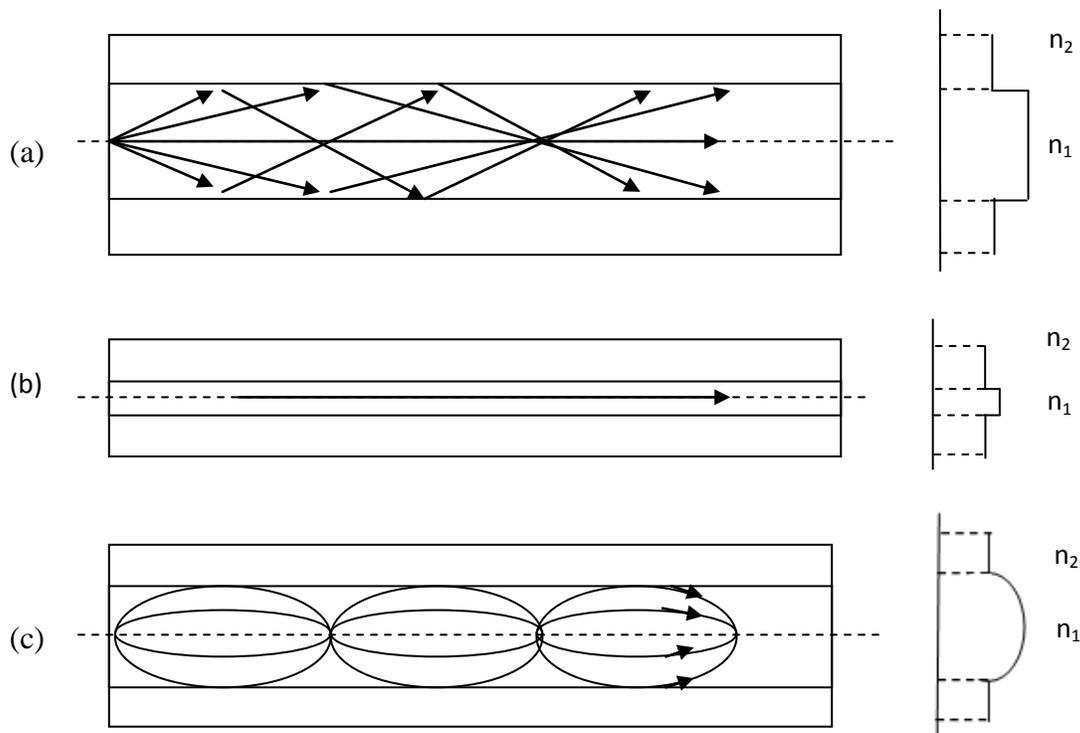


Figura 13. (a) Fibra óptica de perfil escalonado multimodo. (b) Fibra óptica de perfil escalonado monomodo. (c) Fibra óptica de perfil gradual.

### *Perfil gradual*

En este tipo de fibras ópticas, el índice de refracción del núcleo no permanece constante, presentando una sección cóncava con una forma acampanada, de manera que el valor del índice de refracción en el centro del núcleo de la fibra es máximo y decrece a medida que nos aproximamos a su periferia. En la frontera del núcleo y revestimiento se igualan los valores de ambos índices de refracción, a partir de éste punto y a lo largo de toda su sección permanece constante el valor del índice de refracción del revestimiento [6, 11].

### *Perfil escalonado*

En estas fibras ópticas, el valor del índice de refracción del núcleo permanece constante, presenta una sección recta, de manera que el valor del índice de refracción a lo largo de toda la sección del núcleo de la fibra óptica es el mismo.

En la frontera entre el núcleo y el revestimiento el valor del índice de refracción decrece bruscamente y la fibra óptica presenta una sección en escalón con dos secciones rectas. El valor del índice de refracción en el núcleo es siempre mayor al valor del revestimiento.

Este tipo de fibras tiene dos tipos fundamentales de comportamiento monomodo y multimodo. La diferencia entre ambos radica que en las fibras ópticas monomodo se propaga el modo fundamental o modo de orden inferior únicamente por el núcleo, mientras que en las fibras multimodo se propagan siempre varios modos: el fundamental y otros asociados o modos de orden superior [6, 11].

### *2.1.3 Parámetros geométricos de las fibras ópticas*

Para definir el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica lo hacemos en función de la distancia a medida que nos desplazamos desde el centro del núcleo hacia su periferia.

Para el revestimiento puede ser definido en función de la distancia a medida que nos desplazamos desde la frontera entre el núcleo y revestimiento hacia la periferia del revestimiento. Pero a diferencia del núcleo el índice de refracción en el revestimiento es siempre constante.

Los parámetros geométricos y las leyes en base a las cuales se determina la distribución de los índices de refracción de núcleo y revestimiento son la diferencia de índices de refracción conocido como “ $\Delta$ ” y el exponente del perfil “g” [11].

### *Diferencia de índices de refracción $\Delta$*

$\Delta$  Es un parámetro geométrico de las fibras ópticas y se define como la relación existente entre los valores de los índices de refracción del núcleo y del revestimiento conforme a la siguiente expresión [11]:

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (22)$$

### *Exponente del perfil de la fibra ( $g$ )*

Este parámetro geométrico de las fibras ópticas es crítico, ya que es el parámetro adoptado para determinar si la fibra es de perfil gradual o escalonado.

La ley que rige la distribución de los índices de refracción para el núcleo de la fibra óptica, en función de los parámetros geométricos está dada por la siguiente expresión [11]:

$$N_{(R)}^2 = N_1^2 \left[ 1 - 2\Delta \left( \frac{R}{A} \right)^g \right] \quad (23)$$

Donde:

$N_{(R)}^2$  Es el índice de refracción al cuadrado, en función de la distancia centro del núcleo del núcleo-periferia del núcleo.

$N_1^2$  Es el valor máximo del índice de refracción del núcleo al cuadrado, correspondiente al valor en el centro del núcleo.

$g$  Es el exponente del perfil

$R$  Es la distancia medida en el sentido núcleo periferia del núcleo, expresada en micras.

$A$  Es el radio del núcleo de la fibra óptica expresado en micras.

### *2.1.4 Parámetros estructurales de las fibras ópticas*

Estos parámetros son los encargados de determinar el comportamiento de la fibra óptica, a partir de los parámetros geométricos adoptados.

Esto nos permite determinar el número total de modos o haces lumínicos que pueden propagarse simultáneamente por el núcleo de la fibra óptica, así como el rango de longitudes de onda de los mismos [11].

### *Apertura numérica*

Cuando un rayo de luz incide en la fibra óptica, la onda lumínica sufre un cambio en su medio de propagación, el fenómeno que permite esto se conoce como refracción, a su vez el rayo incidente para poder ser propagado en la fibra tiene que incidir con un ángulo menor al ángulo crítico de reflexión.

Al parámetro que conjugado con estos fenómenos físicos, refracción y reflexión, delimita el paso de los pulsos lumínicos capaces de ser propagados por el núcleo de una fibra óptica es conocido como apertura numérica.

La apertura numérica se define como el valor numérico del seno del máximo ángulo que posibilita el acoplamiento de la onda lumínica desde el exterior de la fibra óptica hasta su interior.

$$A. N. = \sin \alpha_{I_{max}} \quad (24)$$

La relación existente entre la diferencia de índices de refracción y la apertura numérica está dada por la siguiente expresión [11]:

$$A. N. = \sqrt{2\Delta n_1^2} \quad (25)$$

### *Parámetro Estructural V*

El parámetro estructural V, es un parámetro utilizado como paso intermedio para el cálculo del número de modos que es posible propagar por el núcleo de una fibra óptica.

En el caso de las fibras ópticas monomodo, en las que sólo se propaga el modo fundamental, es utilizado para determinar el valor de la longitud de onda límite y para la obtención del diámetro del campo modal.

Su cálculo está dado por:

$$V = 2\pi \frac{A}{\lambda} A \cdot N. \quad (26)$$

Donde  $a$  es el radio del núcleo de la fibra óptica, expresado en micras y  $\lambda$  es la longitud de onda del pulso lumínico propagado [11].

*Número de modos propagados ( $M$ )*

Este parámetro indica el número total de modos que pueden ser propagados por el núcleo de la fibra óptica.

Existen diferentes formas para realizar una aproximación de este cálculo, aquí presentamos una de las expresiones [6,11]:

$$M \approx \frac{V^2}{2} \left( \frac{g}{g+2} \right) \quad (27)$$

Donde:

$g$  Es el exponente de perfil

$V$  Es el parámetro antes calculado en la ecuación (26)

## 2.2 Fibras ópticas centelladoras

Las fibras centelladoras son llamadas así porque su núcleo está fabricado con materiales los cuales producen emisión de fotones en un rango visible cuando partículas de alta energía pasan a través del núcleo.

Las fibras centelladoras son fibras plásticas, consisten de un núcleo de poliestireno (PS) dopado y una cubierta de acrílico o polimetilmetacrilato (PMMA), dependiendo del material y la cantidad del dopante pueden emitir radiaciones pico en el rango de 428 nm a 538 nm. Este tipo de fibras es inmune a los campos electromagnéticos y presenta una buena

resistencia física a la radiación, por ambas razones son muy usadas en equipos de pruebas con un gran nivel de energía [12].

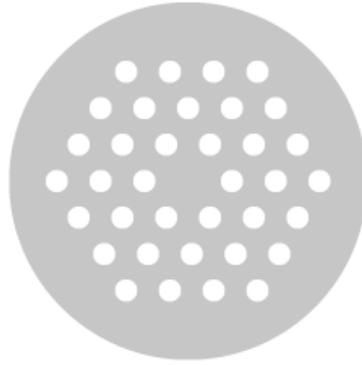
A continuación se muestra una tabla con algunos datos técnicos proporcionados por BICRON

Material centellador en el núcleo.....	Poliestireno
Índice de refracción del núcleo.....	1.6
Densidad.....	1.05g/cm <sup>2</sup>
Recubrimiento.....	Acrílico
Índice de la cubierta.....	1.49
Espesor del recubrimiento, en fibras circulares.....	3% del diámetro del núcleo
Espesor del recubrimiento, en fibras cuadradas.....	4% del espesor de la fibra
Temperatura de operación.....	20 a 50 °C
Número de átomos de H por cm <sup>3</sup> (núcleo).....	4.82x10 <sup>22</sup>
Número de átomos de C por cm <sup>3</sup> (núcleo).....	4.85x10 <sup>22</sup>
Número de átomos-electrones por cm <sup>3</sup> (núcleo).....	3.4x10 <sup>23</sup>

*Tabla 1. Propiedades ópticas y físicas de fibra óptica centelladora de BICRON [13].*

## 2.3 Fibras de cristal fotónico

Las fibras de cristal fotónico (también conocidas como fibra de micro estructura o microestructurada). La estructura más simple y la más usada de este tipo de fibra es construida en un arreglo hexagonal periódico o circular, con un núcleo sólido de sílice recubierto con un revestimiento microestructurado de sílice-aire, como podemos ver en la figura 14.



*Figura 14. Configuración más usada en las fibras de cristal fotónico [14]*

Este tipo de fibras pueden presentar un comportamiento monomodal universal, lo que significa que puede transmitir desde infrarrojo hasta ultravioleta, también pueden tener un área efectiva modal muy grande o muy pequeña, según si se desea transmitir alta potencia o acrecentar la respuesta no lineal respectivamente. Este tipo de fibras puede tener una apertura numérica muy grande, y mediante el diseño adecuado de su geometría es posible controlar la dispersión cromática.

También hay fibras llamadas de banda prohibida (band gap), las cuales tienen un mecanismo de guiado totalmente diferente, basada en una región fotónica de banda prohibida en el recubrimiento. Este mecanismo permite guiar una onda lumínica por un núcleo hueco (un bajo índice), y es imposible que la luz sea propagada por el recubrimiento. Este tipo de fibras puede fabricarse para ser altamente no lineales o de dispersión anómala [14].

### *2.3.1 Fibras de núcleo hueco*

En estas fibras la luz es confinada por un núcleo de aire, de tal forma que el recubrimiento microestructurado impide la propagación de la luz a lo largo de él (conocido como efecto “band gap”), dado que sólo una pequeña fracción de luz es propagada por el cristal, las no linealidades son minimizadas y además se logra limitar las pérdidas en comparación con las fibras convencionales [15].

### 2.3.2 Fibras altamente no lineales

Este tipo de fibras es posible construirlas con núcleos muy reducidos (del orden de hasta  $1\mu\text{m}$ ), y además también una alta relación de contraste entre los índices del núcleo y el recubrimiento, esto permite construir fibras con valores extremadamente pequeños de área efectiva y un alto coeficiente no lineal. Adicionalmente, los perfiles de dispersión pueden ser diseñados para obtener ciertos efectos no lineales. Es así como pueden construirse diferentes efectos no lineales para aplicaciones como: efecto Raman, mezclado de cuatro ondas electromagnéticas, amplificación paramétrica, generación de supercontinuo, tomografía de coherencia óptica, espectroscopia entre otras [15].

## 2.4 Fibras ópticas dopadas con tierras raras

Este tipo de fibras utilizan vidrio dopado con iones de tierras raras, normalmente solo en su núcleo. Las fibras dopadas en tierras raras, generalmente son usadas como el medio activo de un sistema láser, en donde la fuente de bombeo usada es un láser el cual excita los iones generando un pulso de luz a diferente longitud de onda de su fuente de bombeo. Estas fibras también son conocidas como fibras activas y son medios de comunicación con un aumento de ganancia gracias a su confinamiento óptico en la estructura de la guía de onda.

Aquí se presenta una tabla de las longitudes de onda de las emisiones importantes de las fibras dopadas en tierras raras más comunes [14].

Ion	Vidrios anfitriones comunes	Emisiones importantes de longitudes de onda
Neodimio ( $\text{Nd}^{3+}$ )	Vidrio de silicato y fosfato	1.03–1.1 $\mu\text{m}$ , 0.9–0.95 $\mu\text{m}$ , 1.32–1.35 $\mu\text{m}$
Iterbio ( $\text{Yb}^{3+}$ )	Vidrio de silicato	1.0–1.1 $\mu\text{m}$
Erbio ( $\text{Er}^{3+}$ )	Vidrio de silicato y fosfato, vidrio de fluoruro	1.5–1.6 $\mu\text{m}$ , 2.7 $\mu\text{m}$ , 0.55 $\mu\text{m}$

Tulio (Tm <sup>3+</sup> )	Vidrio de silicato y germanio, vidrio de fluoruro	1.7–2.1 μm, 1.45–1.53 μm, 0.48 μm, 0.8 μm
Praseodimio (Pr <sup>3+</sup> )	Vidrio de silicato y fluoruro	1.3 μm, 0.635 μm, 0.6 μm, 0.52 μm, 0.49 μm

*Tabla 2. Principales dopajes en tierras raras y sus principales emisiones.*

Las fibras dopadas son caracterizadas de igual forma que las fibras comunes pero además es importante conocer otros datos como:

- Concentración del dopaje de tierras raras, a menudo este dato es presentado en partes por millón por peso.
- La sección transversal en la que funcionan los mecanismos de emisión y absorción

Este tipo de fibras ópticas, dopadas con tierras raras principalmente son utilizados en la fabricación en implementación, de láseres, conocidos como láseres en fibra óptica como el laser de onda continua en fibra óptica de sílice, láseres visibles de fibra de fluoruro, láseres en fibra de ancho de espectral estrecho, láseres en fibra conmutados, láseres en fibra en modo amarre, además de los láseres existen amplificadores ópticos en fibra, como los amplificadores de bajo ruido en fibra dopada con Erblio a 1540 nm, amplificadores laser en fibra óptica dopada con Erblio, amplificadores de alta ganancia de amplio ancho de banda espectral en fibra dopada con Erblio, entre otros, pero también son utilizadas en la implementación de fuentes superluminiscentes, las cuales se diferencian de los láseres por una menor potencia pero con un ancho espectral mayor; una de las aplicaciones más difundida es en la utilización de sensores de velocidad angular [9, 16, 17, 18, 19].

## Conclusiones al capítulo 2

La fibra óptica es una guía de onda cilíndrica y flexible, la cual es usada en telecomunicaciones para transmitir información por modulación de la luz, en donde la luz puede viajar grandes distancias con bajas pérdidas; hoy en día existen diferentes tipos de fibras ópticas basadas no solo en la estructura de la fibra, sino también en la estructura de los materiales.

Al hacer modificaciones en la estructura interna de los materiales y dopajes con otros elementos, se hizo posible que las fibras ópticas adquirieran nuevas características para diferentes aplicaciones, en el caso de la fibra óptica dopada con tierras raras las cuales conservan la gran mayoría de las características que las fibras convencionales, tienen aplicaciones como: amplificadores ópticos, medios activos para láseres y fuentes superluminiscentes.

La fibra óptica dopada con Erblio, en este trabajo fue usada como medio activo para implementar una fuente superluminiscente en fibra óptica, con una emisión pico a 1550 nm cuando es excitada por una fuente láser a 980 nm, la emisión del Erblio ofrece varias ventajas las cuales serán explicadas en el siguiente capítulo.

# CAPÍTULO 3. FUENTES DE RADIACIÓN EN FIBRA ÓPTICA DOPADA CON TIERRAS RARAS

---

Las tierras raras también conocidas como Lantánidos son elementos del grupo IIIB, la característica principal de estos elementos es que ocupan el nivel subatómico 4f, estos iones están muy protegidos de la influencia de fuerzas externas en las capas  $5s^2$  y  $5p^6$ , por lo que prácticamente el ion permanece invariable en todos sus compuestos.

Una de las características principales de algunas tierras raras es la fluorescencia o luminiscencia cuando son usados como activadores de redes cristalinas de los óxidos lantánidos, silicatos u óxidos de los metales de transición, por esta razón son usadas en fibras de sílice.

Existen varias aplicaciones para las fibras ópticas dopadas con tierras raras, como el uso del Erblio como amplificador, conocido más comúnmente como EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), láseres de barrido de longitud de onda, láseres de fibra de resonancia y fuentes superluminiscentes en fibra.

La inversión de población puede ser producida en un material dado, tomando en cuenta los niveles energéticos atómicos, desde un equilibrio térmico, el nivel 1 es más poblado que el nivel 2, esto quiere decir que la absorción será predominante sobre la emisión. Introduciendo una onda podríamos producir transiciones de  $1 \rightarrow 2$  y  $2 \rightarrow 1$  y podríamos esperar una inversión de población. Haciendo esto podríamos ver que este sistema de 2 niveles no funciona, para solucionar esto se trabaja en niveles más altos de energía, en tres y cuatro niveles [9].

## 3.1 Sistemas de cuatro niveles

En un sistema de cuatro niveles, los átomos son levantados desde el nivel base (siendo este el nivel 0) hasta el nivel 3. Si el átomo cae rápidamente al nivel 2, la inversión de población será obtenida entre los niveles 2 y 1, una vez iniciada la oscilación en el laser de cuatro niveles los átomos serán transferidos al nivel uno por emisión estimulada. Para generar una

onda continua la operación de un láser de cuatro niveles necesariamente tiene que tener una transición muy rápida del nivel 1 al 0, aún más rápida a la transición de 3 a 2 como se observa en la figura 15.

El funcionamiento de un láser de cuatro niveles se ha modelado y descrito por las siguientes ecuaciones, en donde se nombra  $N_g$  a la población del sistema base o 0,  $N_1$ ,  $N_2$  y  $N_3$  a población de los siguientes niveles.

Para conocer la cantidad total de población de átomos activos o moléculas “ $N_t$ ” se hace la siguiente operación:

$$N_g + N_2 = N_t \quad (28)$$

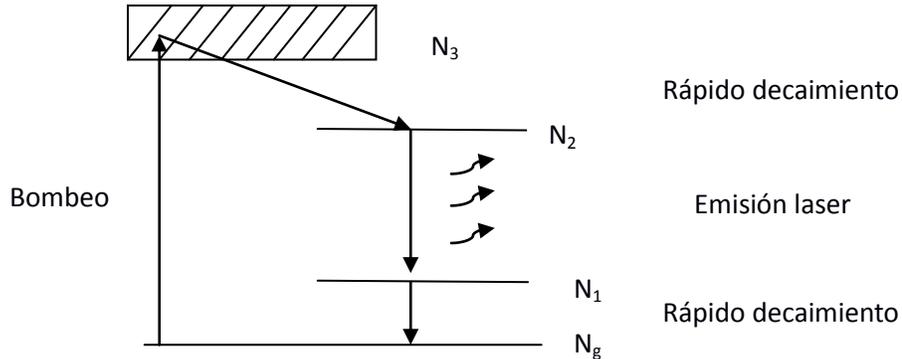


Figura 15. Esquema de un sistema láser de 4º nivel.

Para calcular la velocidad con la cual el segundo nivel se comienza a poblar después del bombeo y del rápido decaimiento del tercer al segundo nivel se usa la siguiente expresión:

$$\dot{N}_2 = W_p N_g - BqN_2 - \left( N_2 / \tau \right) \quad (29)$$

En esta ecuación  $W_p$  es un coeficiente conocido como “velocidad de bombeo”, el término  $W_p N_g$  representa las cuentas del bombeo,  $BqN_2$  representa las cuentas de la emisión estimulada, en donde el coeficiente B se refiere a la velocidad de transición estimulada por fotón y por modo,  $q$  corresponde al número total de fotones en la cavidad.  $\tau$  Representa el tiempo de vida del láser en el nivel superior.

Esta ecuación puede ser simplificada expresando la en términos de inversión de población “ $N$ ” en donde se puede obtener de la siguiente forma:

$$N = N_2 - N_1 \quad (30)$$

Y podemos aproximar  $N \approx N_2$ , de esta forma podemos reducir la ecuación (28) y (29) de la siguiente forma:

$$\dot{N} = W_p(N_t - N) - BqN - (N/\tau) \quad (31)$$

La última ecuación se refiere a los fotones emitidos y se expresa de la siguiente forma:

$$\dot{q} = V_a BqN_2 - (q/\tau_c) \quad (32)$$

Esta ecuación también puede ser simplificada de la siguiente forma

$$\dot{q} = [V_a B N - (1/\tau_c)]q \quad (33)$$

En donde el término  $V_a BqN_2$  representa la velocidad de crecimiento de la población de fotones debido a la emisión estimulada.  $V_a$  Es el volumen de modo el cual se puede calcular de la siguiente forma:

$$V_a = A_e l \quad (34)$$

En donde  $A_e$  es el área efectiva de la sección transversal del medio laser y  $l$  es la longitud del material activo y depende si la oscilación del laser es en uno o en varios modos.

Finalmente el término  $q/\tau_c$  representa las cuentas de la disipación de los fotones debido a las pérdidas de la cavidad, en donde  $\tau_c$  es el tiempo de vida del fotón [8].

### *3.1.1 Funcionamiento del laser de onda continua de cuatro niveles*

Existe una condición necesaria para una oscilación de onda continua en un laser de cuatro niveles. El estado estable de la población del nivel 1 debe cumplir la siguiente ecuación de balance entre poblaciones entrando y saliendo del mismo nivel:  $N_1/\tau_1 = N_2/\tau_{21}$ , en donde  $\tau_{21}$  es el tiempo de vida de la transición de 2->1. Para conseguir la oscilación láser requerimos que  $N_2 > N_1$ , lo cual implica que  $\tau_1 < \tau_{21}$ .

Si estas condiciones no son satisfechas, entonces la acción laser solo es posible basada en impulsos con un pulso de bombeo que es más pequeño comparado con el tiempo de vida del nivel superior.

Si  $W_p$  es constante u suficientemente fuerte y satisface  $\tau_1 < \tau_{21}$ , entonces la oscilación en estado estable entonces podrá ser alcanzable. En una emisión espontanea es necesario que las condiciones  $\dot{q} > 0$  y  $V_a B N > 1/\tau_c$  sean satisfechas. La acción láser, por tanto, se produce cuando la inversión de población  $N$  alcanza un valor  $N_c$  crítico el cual puede calcularse como:

$$N_c = \frac{1}{V_a B \tau_c} \quad (35)$$

La velocidad crítica de bombeo  $W_p$  es obtenida haciendo  $\dot{N} = 0, N = N_c$  y  $q = 0$  en la ecuación (31). La velocidad crítica de bombeo corresponde a la situación donde la velocidad total de las transiciones de bombeo,  $W_{cp} (N_t - N_c)$  es igual a la velocidad de transición espontanea del nivel 2:

$$W_{cp} = N_c / (N_t - N_c) \tau \quad (36)$$

Si  $W_p > W_{cp}$ , el número de fotones  $q$  emitirá una emisión espontanea, y, si  $W_p$  es independiente del tiempo, alcanzara un valor  $q_0$  constante. Este valor corresponde a el valor en estado estable de  $N_0$  donde la inversión es obtenida de  $\dot{N}_0 = \dot{q} = 0$ . Esto nos da:

$$N_0 = 1 / V_a B \tau_c = N_c \quad (37)$$

$$q_0 = V_a \tau_c [W_p (N_t - N_0) - (N_0 / \tau)] \quad (38)$$

Estas ecuaciones describen el comportamiento de un laser de onda continua de cuarto nivel. Aunque cabe aclarar que existen casos donde  $N_0 \neq N_c$  [9].

El ejemplo más común de estos láseres en fibra óptica dopada con tierras raras es el láser de fibra óptica dopada con Neodimio con la cual se implementan láseres con una emisión pico que puede variar de 905 nm a los 1363 nm de longitud de onda, dependiendo de la longitud de onda de la fuente laser de bombeo, la concentración de iones de Neodimio en la fibra óptica y su longitud [9].

### 3.2 Sistemas de tres niveles

En un láser de tres niveles los átomos son elevados desde el nivel base 1 al nivel 3, después de ser elevados al nivel 3 rápidamente caen al nivel 2, entonces es cuando la inversión de población es obtenida entre los niveles 2 y 1 (ver la figura 16).

Refiriéndonos al esquema de la figura 16, se asume un bombeo desde la banda base, y si la transición de 3->2 es lo suficientemente rápida, podemos decir que  $N_3 \approx 0$ . Así que las ecuaciones de velocidad son:

$$N_1 + N_2 = N_t \quad (39)$$

Donde  $N_1$  es la población del nivel más bajo en un láser de tres niveles,  $N_2$  es la población del segundo nivel, y  $N_t$  es la población total.

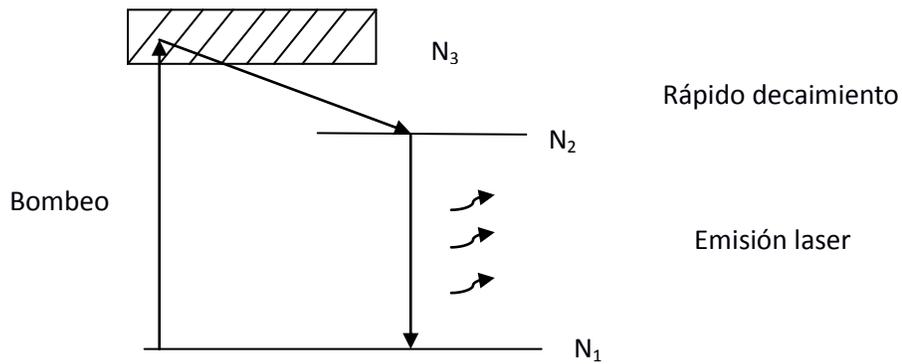


Figura 16. Esquema de un sistema laser de 3<sup>er</sup> nivel

Para calcular la velocidad con la cual la población se mueve en el nivel 2 se usa la siguiente expresión:

$$\dot{N}_2 = W_p N_1 - Bq(N_2 - N_1) - (N_2/\tau) \quad (40)$$

Y por último la ecuación que describe el comportamiento de los fotones emitidos:

$$\dot{q} = V_a Bq(N_2 - N_1) - q/\tau_c \quad (41)$$

Estas tres ecuaciones pueden ser reducidas de la misma forma que para un láser de cuatro niveles por medio de  $N$  la cual representa la inversión de población y las ecuaciones simplificadas quedan de la siguiente forma:

$$\dot{N} = W_p(N_t - N) - 2BqN - (N_t + N)/\tau \quad (42)$$

$$\dot{q} = [V_a BN - (1/\tau_c)]q \quad (43)$$

Un hecho muy notable es que la ecuación de velocidad del fotón para un láser de tres y cuatro niveles es la misma pero la ecuación de inversión de población es algo diferente, en particular la emisión estimulada para un sistema de tres niveles está dada por  $2BqN$  la cual tiene un factor de 2, esta diferencia surge del hecho de que la emisión de un fotón en un sistema implica un cambio de 2, uno que tiene un decremento de  $N_2$  y otro que incrementa de  $N_1$ , mientras que en un sistema de cuatro niveles solo existe un decremento de  $N_1$  y un rápido decaimiento de  $1 \rightarrow 0$  [8].

### 3.2.1 Funcionamiento de onda continua del láser de tres niveles

El cálculo del funcionamiento del láser de tres niveles es similar al caso del láser de cuatro niveles. El umbral de inversión de población se obtiene de hacer  $\dot{q} = 0$  en la ecuación (43)

$$N_c = \frac{1}{BV_a\tau_c} \quad (44)$$

La cual como podemos notar es la misma que para un laser de 4° nivel. La velocidad de bombeo crítico es obtenida de la ecuación (40) haciendo  $\dot{N} = 0, q = 0, y N = N_c$  así tenemos que:

$$W_{cp} = (N_t + N_c)/(N_t - N_c)\tau \quad (45)$$

En la práctica podemos ver que para ambos tipos de láser (de 3° y 4° nivel)  $N_c$  es mucho menor a  $N_t$ . Así podemos reducir la ecuación (45) y tenemos que:

$$W_{cp} \approx 1/\tau \quad (46)$$

Si comparamos las ecuaciones de la velocidad de bombeo critico de ambos sistemas láser podemos ver que el bombeo láser del sistema de cuatro niveles es más pequeño por un factor de  $(N_c/N_t)$  que el láser de tres niveles. Esto es la base del desempeño superior del láser de cuatro niveles.

Justo como en el laser de cuatro niveles la inversión de onda continua  $N_0$  y el número de fotones  $q_0$  de onda continua, se obtiene el umbral haciendo  $\dot{N} = \dot{q} = 0$ , entonces obtenemos:

$$N_c = N_0 \quad (47)$$

$$q_0 = \frac{V_a(N_t + N_0)\tau_c}{2\tau} \left( \frac{W_p}{W_{cp}} - 1 \right) \quad (48)$$

Estas ecuaciones son las que describen el comportamiento niveles en onda continua de un laser de tres niveles [8].

El láser en fibra óptica dopada con tierras raras más común en tres niveles es el láser en fibra dopada con Erblio, el cual tiene una emisión pico que varía su emisión pico desde 1550 nm hasta 1620 nm de longitud de onda, dependiendo de la emisión pico de la fuente de excitación usada, la concentración de iones en la fibra y la longitud de esta [9].

### 3.3 Fuente superluminiscente en fibra óptica dopada con tierras raras basada en sistemas de tres niveles.

Para el estudio de una fuente superluminiscente vamos a considerar la figura 17 en donde se realiza un bombeo láser unidireccional a una fibra dopada por ejemplo con Erblio, y con un bombeo a partir de  $z=0$  y propagándose en una dirección  $+z$ . El bombeo induce a lo largo de la fibra una ganancia por unidad de longitud (también conocido como factor de ganancia) que depende de  $z$ . Los fotones generados por emisión espontanea en la fibra son amplificados en dirección delantera ( $+z$ ) y trasera ( $-z$ ), lo que da a lugar a dos ondas de emisión de amplificación espontanea, una en cada dirección. Estas ondas agotan la población del estado excitado de los iones de tierras raras los cuales, a su vez, afectan al mismo tiempo la absorción del bombeo y el factor de ganancia [9].

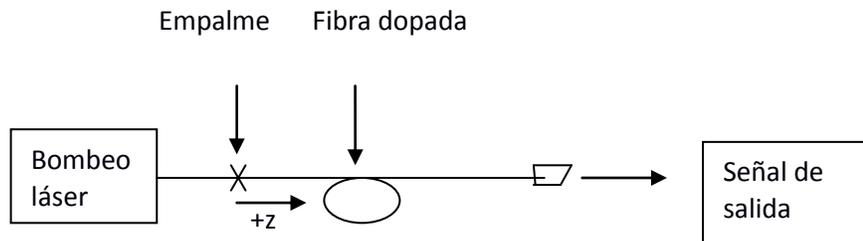


Figura 17. Esquema de una fuente superluminiscente

Una representación de las ecuaciones de razón para una fuente superluminiscente basada en tres niveles que describen la evolución de la potencia de la señal de amplificación y la potencia de la señal bombeada a través de la fibra activada son las ecuaciones [17].

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_z(z), \quad (49)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z, \lambda_i)}{dz} = \pm G_e(z, \lambda_i)[P_s^\pm(z, \lambda_i) + P_0] - G_a(z, \lambda_i)P_s^\pm(z, \lambda_i), \quad (50)$$

Las fuente superluminiscentes son usadas principalmente para mejorar la sensibilidad de sensores como el giroscopio basado en efecto Sagnac, debido a la disminución de la componente de la señal de ruido, debido a que poseen un mayor ancho espectral que las fuentes tradicionales de bombeo basadas en semiconductores (diodos láser), además de que poseen una mayor estabilidad térmica en el dispositivo completo que las fuentes superluminiscentes semiconductoras.

Como se sabe el Erblio es un ion el cual pertenece a un elemento con energía de tres niveles para láseres, el cual tiene una emisión pico a 1550 nm de longitud de onda cuando es bombeado por una fuente láser a 980 nm de longitud de onda, esto se menciona debido a que la utilización de láseres y dispositivos que trabajan alrededor de la longitud de onda conocida como la tercera ventana de las telecomunicaciones (1550 nm), la cual es una longitud de onda en la cual existen bajas pérdidas, además tiene como ventaja que a medida que la longitud de onda aumenta la vida útil de estos dispositivos también lo hace.

Las fuentes superluminiscentes en fibra óptica usan una fibra óptica monomodal activada con iones de tierras raras, este tipo de fuentes coinciden casi al cien por ciento con la fibra óptica monomodal usada en el embobinado sensible de un giroscopio [17].

## Conclusiones al capítulo 3

Los elementos conocidos como tierras raras, forman parte del grupo IIIB de la tabla periódica, estos elementos son usados para dopar fibras ópticas de vidrio, debido a que presentan fluorescencia o luminiscencia cuando están en redes cristalinas de sílice y otros compuestos.

Para producir una emisión láser es necesario obtener una inversión de población en los niveles de energía del material, debido a que este fenómeno no es posible realizarlo con materiales con dos niveles de energía se trabaja en niveles superiores (tres y cuatro niveles). A pesar de que el funcionamiento en onda continua de un láser de cuatro niveles posee una eficiencia mayor a un láser de tres niveles, es importante trabajar el sistema de tres niveles de fibras dopadas con Erblio ya que su emisión a 1550 nm coincide con la región de la tercera ventana en telecomunicaciones, que es una región de bajas pérdidas de transmisión; otra ventaja de trabajar en esta longitud de onda es la mayor vida útil comparando con dispositivos que trabajan a longitud de onda menores.

Las fuentes superluminiscentes en fibra óptica dopada con tierras raras, son dispositivos que tienen una excelente estabilidad térmica y un amplio ancho espectral, estas cualidades en aplicaciones como en giroscopios en fibra óptica basados en efecto Sagnac, dotan al dispositivo de una mejor relación señal a ruido, además de que se acoplan casi al 100% con fibra óptica monomodal usada en los embobinados sensibles para la fabricación de giroscopios.

# CAPÍTULO 4. RESULTADOS TEÓRICOS Y PRÁCTICOS

---

## 4.1 Resultados teóricos

Usando las ecuaciones de razón de una fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en tierras raras, las cuales describen el comportamiento de la potencia de la señal de amplificación y la potencia de la señal bombeada a través de la fibra dopada [17]:

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z), \quad (49)$$

$$\frac{dP_s^\pm(z, \lambda_i)}{dz} = \pm G_e(z, \lambda_i)[P_s^\pm(z, \lambda_i) + P_0] - G_a(z, \lambda_i)P_s^\pm(z, \lambda_i), \quad (50)$$

En donde:

$z$  -> Es la coordenada longitudinal

$P_p(z)$ -> Es la potencia de bombeo de la fibra óptica dopada

$\gamma_p(z)$ -> Es el coeficiente de absorción del bombeo dependiente del cambio de la coordenada  $z$ .

$P_s^\pm(z, \lambda_i)$ -> Es la densidad espectral de la potencia de la señal dependiente de la longitud de onda ( $\lambda$ ) y de la fibra óptica ( $z$ ); en donde  $P_s^+$  corresponde a la dirección coincidente de la señal de radiación con la señal de bombeo;  $P_s^-$  Corresponde a la dirección cuando la señal de radiación es contraria a la señal de bombeo.

$G_e(z, \lambda_i)$ -> es el coeficiente de amplificación en potencia para la radiación espontánea.

$G_a(z, \lambda_i)$ -> es el coeficiente de absorción en potencia para la radiación espontánea.

$P_0$  -> es el equivalente del espectro de la densidad de potencia de entrada de la radiación espontánea amplificada.

$\lambda_i$  -> es la densidad espectral de la potencia de la señal dependiente de la longitud de onda  $\lambda$ .

La ecuación (49) nos indica la evolución de la potencia de bombeo de la fibra dopada, esta ecuación es muy importante ya que  $P_p(z)$  es un valor que no podemos medir con nuestra implementación solo es posible calcularlo, esta ecuación fue resuelta para las condiciones de frontera  $P_p(z=0)=P_{IN}$ , y además suponiendo por simplicidad  $\gamma_p$  como constante en donde  $P_{IN}$  es la potencia de entrada, donde la solución es:

$$P_p(z) = P_{IN} e^{-z\gamma_p} \quad (51)$$

Como podemos observar la solución de esta ecuación para estas condiciones particulares en la frontera es una exponencial decreciente lo cual indica, en términos de la longitud, que entre mayor sea el largo de la fibra dopada, la potencia de bombeo de la fibra dopada decrecerá de forma exponencial.

La ecuación (49) puede ser descrita de la siguiente forma [16]:

Cuando  $P_p(z) < P_p^{th}$ ,

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -\gamma_p(z)P_p(z),$$

en donde  $\gamma_p$  es constante si  $P_p(z) > P_p^{th}$

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = -N_T \pi a^2 \left( \frac{h\nu_p}{\tau} \right) \quad (52)$$

En donde  $P_p^{th}$  es la potencia de umbral. Dependiendo de los parámetros de la fibra óptica dopada, se describe de la siguiente forma:

$$P_p^{th} = \pi a^2 \left( \frac{h\nu_p}{\sigma_p \tau} \right) \quad (53)$$

Donde  $\sigma_p$  es la sección transversal de transición de la absorción del bombeo la cual se supone como:  $2.58 \times 10^{-25} \text{m}^2$ ,  $a$  es el radio del núcleo de la fibra óptica:  $2 \times 10^{-6} \text{m}$ ,  $\nu_p$  es la frecuencia de bombeo:  $3.071 \times 10^{14} \text{Hz}$ ,  $h$  es la constante de Planck,  $\tau$  es el tiempo de vida del nivel de trabajo superior para la radiación espontánea:  $10 \times 10^{-3} \text{s}$  y  $N_T$  es la concentración de iones de Erbium:  $1.9 \times 10^{25} \text{iones/m}^3$ .

Entonces la solución de la ecuación diferencial (52) con la condición  $P_p(z) > P_p^{th}$ , debido a que hay una parte de saturación en la ecuación (49) se describe como:

$$P_p(z) = P_{in} - \left( N_T \pi a^2 \left( \frac{h\nu_p}{\tau} \right) \right) z \quad (54)$$

Al igual que la ecuación (51) podemos observar que a medida que  $z$  aumenta,  $P_p(z)$  decrece linealmente, con la limitación física de que no podemos tener un  $P_p(z)$  menor a 0, por lo que con esta ecuación dichos valores no son válidos, la ecuación (54) será la expresión utilizada en simulaciones debido a que nos ofrece simplicidad en los cálculos.

En la ecuación (52) podemos ver que tiene dos soluciones, una de ellas indica la señal de la amplificación de la emisión espontánea en la misma dirección de nuestra fuente de bombeo, la cual se escribe como [20]:

$$P_s^+(z, \lambda_i) = \frac{G_e(z, \lambda_i)}{G_b(z, \lambda_i)} P_0 e^{z G_b(z, \lambda_i)} - \frac{G_e(z, \lambda_i)}{G_b(z, \lambda_i)} P_0, \quad (55)$$

En dicha solución podemos observar que la potencia de salida cuando es coincidente con la dirección de la fuente de bombeo, tendrá un valor mínimo cuando la coordenada longitudinal a través del eje de la fibra dopada sea  $z=0$  y se incrementará a medida que la longitud de la fibra aumente.

La segunda solución representa la potencia de salida cuando su dirección es contraria a la dirección de la fuente de bombeo [20]:

$$P_s^-(z, \lambda_i) = \frac{G_e(z, \lambda_i)}{G_b(z, \lambda_i)} P_0 e^{(L-z) G_b(z, \lambda_i)} - \frac{G_e(z, \lambda_i)}{G_b(z, \lambda_i)} P_0, \quad (56)$$

Ahora podemos observar que la potencia de salida de la señal será mínima, cuando la coordenada longitudinal sea  $z=L$ , donde  $L$  es la longitud de la fibra óptica dopada y será máxima su potencia cuando  $z=0$ .

Los factores  $G_e(z, \lambda_i)$  y  $G_a(z, \lambda_i)$  pueden definirse de la siguiente forma:

$$G_e = N_T \sigma_e(\lambda_i) (1 - \eta) \left[ \frac{\frac{P_p(z)}{P_p^{th}}}{\frac{P_p(z)}{P_p^{th}} + 1} \right] \quad (57)$$

$$G_a = N_T \sigma_a (\lambda_i) (1 - \eta) \left[ \frac{1}{\frac{P_p(z)}{P_p^{th}} + 1} \right] \quad (58)$$

En donde los valores de los siguientes coeficientes fueron supuestos,  $\sigma_e$  es la sección transversal de transición de emisión con un valor de  $8.129 \times 10^{-25} \text{m}^2$ ,  $\sigma_a$  la sección transversal de transición de absorción con un valor de  $2.105 \times 10^{-25} \text{m}^2$ ,  $\eta$  es el factor de encubrimiento con un valor de 0.685 y  $G_b(z, \lambda_i) = G_e(z, \lambda_i) - G_a(z, \lambda_i)$ .

En la figura 18, se muestran los resultados de la simulación de la ecuación 54, que es el comportamiento de  $Pp(z)$  el cual es un valor que no podemos medir con nuestra implementación, solo es posible calcularlo, como se puede observar se ha simulado para  $z$  desde 0 a 5 metros, para diferentes valores del bombeo inicial  $P_{in}$ , lo cual como se menciona en el análisis de la solución tiene un comportamiento decreciente lineal.

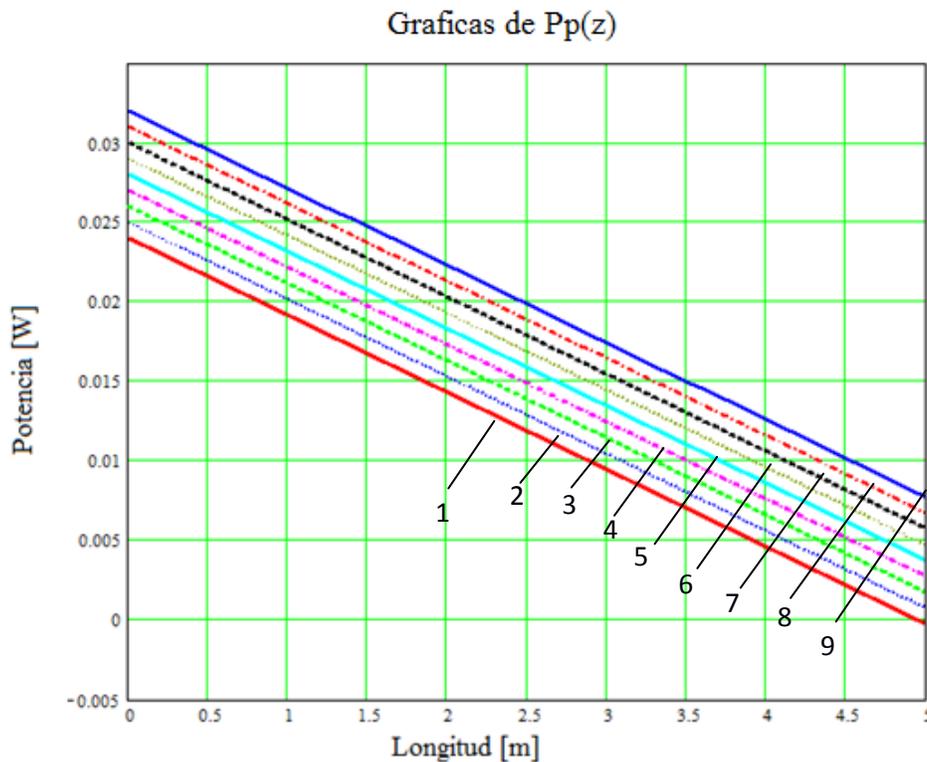


Figura 18. Simulación de la señal de bombeo  $Pp(z)$ , con  $z$  desde 0 hasta 5 metros.

En la tabla 3 que se muestra a continuación se indica la potencia de entrada con la cual fue excitada la fibra óptica dopada con Erblio para cada gráfica.

Numero indicado	$P_{in}$ (mW)	Numero indicado	$P_{in}$ (mW)
1	24	6	29
2	25	7	30
3	26	8	31
4	27	9	32
5	28		

Tabla 3

La siguiente simulación (ver figura 19) nos muestra el comportamiento de la potencia de la emisión espontánea a diferentes longitudes de la fibra óptica.

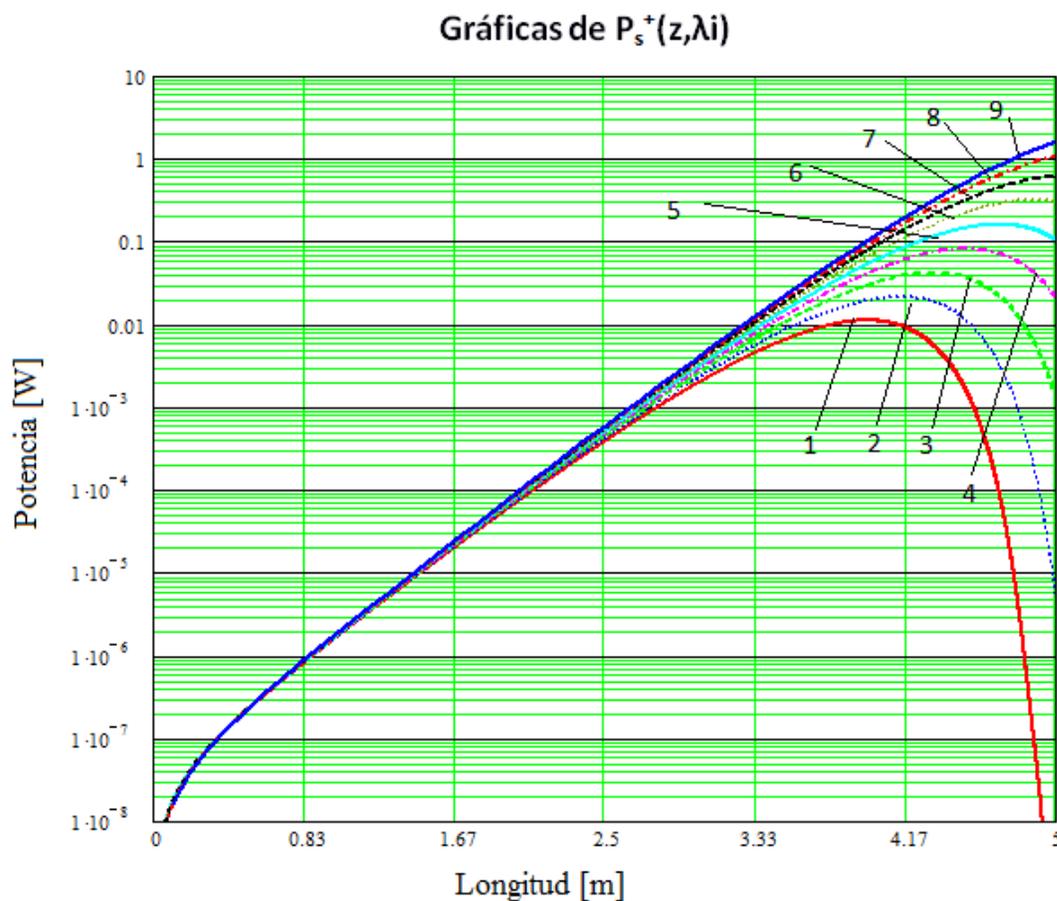


Figura 19. Simulación de  $P_s^+(z, \lambda_i)$  en función de la longitud.

En la tabla 3 encontramos para cada gráfica a que potencia de entrada  $P_{in}$  corresponde. En las gráficas de la figura 19, se observa los resultados de la potencia de la señal de salida coincidente con la dirección de la señal de bombeo, esta se denota como  $P_s^+(z, \lambda_i)$ , la cual aumenta a medida que la longitud de la fibra dopada aumenta, también podemos observar que hace una curva en la cual la potencia de salida empieza a decrecer, esto quiere decir que para cada potencia de bombeo existe una longitud en la cual la emisión será máxima y la absorción mínima, después de este punto la emisión comenzara a decrecer y la absorción aumentara con la longitud de la fibra, es de esperarse este resultado aunque al ver las ecuaciones no es un resultado a la vista como sabemos tanto  $Ga(z, \lambda_i)$  como  $Ge(z, \lambda_i)$  están en función de  $Pp(z)$ , si observamos la imagen en donde se simula  $Pp(z)$ , vemos que a medida que la longitud aumenta la potencia de bombeo decrece, es por esta razón el coeficiente  $Ga(z, \lambda_i)$  para ciertos valores es mayor que  $Ge(z, \lambda_i)$ .

Continuando con nuestro análisis se muestra la simulación obtenida para el sentido, en que la señal obtenida va en dirección de contrapropagación a la de bombeo, se denomina como  $P_s^-(z, \lambda_i)$ , estos resultados son obtenidos de forma similar que cuando la señal coincide con la dirección de bombeo, así como para los valores desde  $z=0$  hasta  $z=5$ .

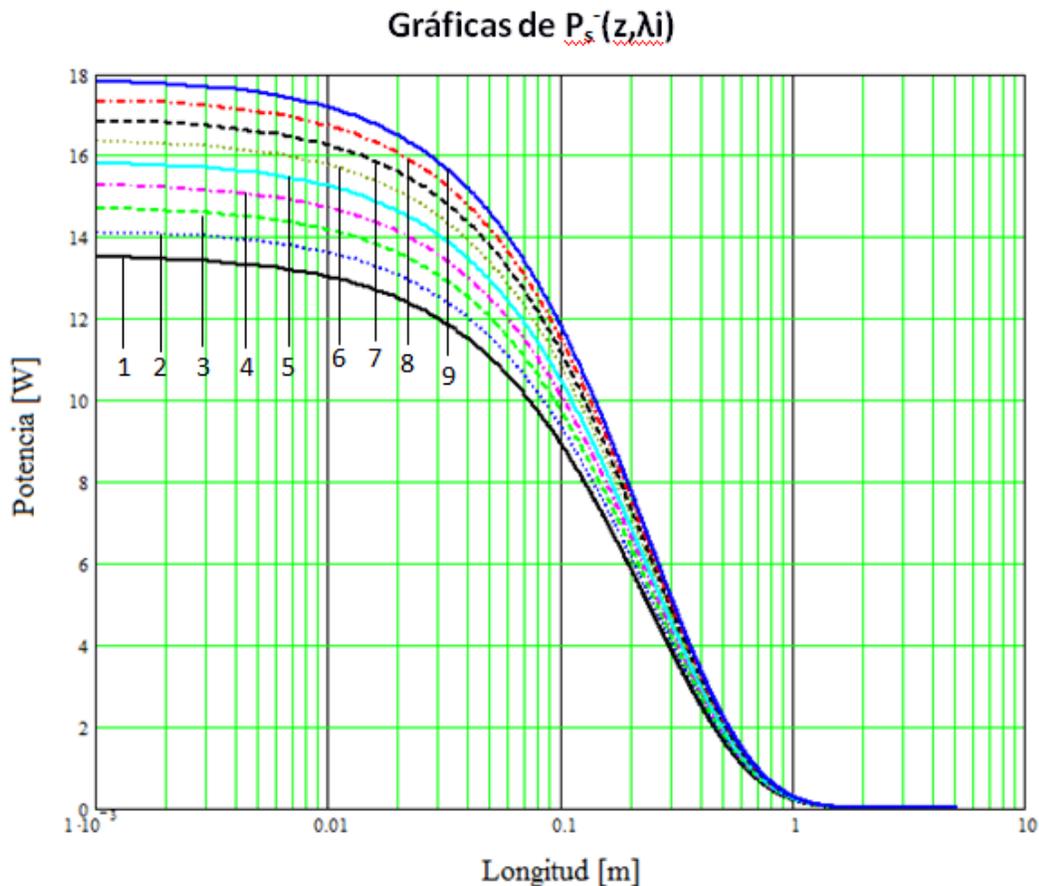


Figura 20. Simulación de  $P_s^-(z, \lambda_i)$  en función de la longitud.

En la tabla 3 se puede ver a que para cada grafica a que potencia  $P_{in}$  corresponde. En esta gráfico de la figura 20 se observa lo que se predice en el análisis de la ecuación que rige el comportamiento de la señal en sentido contrario a la potencia de bombeo  $P_s^-(z, \lambda_i)$ , aquí podemos ver que la potencia de salida decrece con la longitud de la fibra, a diferencia de  $P_s^+(z, \lambda_i)$  aquí siempre vemos el decremento de la potencia por el factor  $(L-z)$  en la exponencial,  $L$  es un valor fijo  $L=5$  y conforme aumenta  $z$  el valor de esta operación tiende a cero.

## 4.2 Implementación de la fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en tierras raras

Se usó un diodo laser con fibra óptica como fuente de bombeo a 980 nm, un multiplexor por división de longitud de onda (Wavelength Divisor Multiplexor, WDM, por sus siglas en inglés), y 5 metros de fibra óptica dopada en Erblio, los empalmes realizados fueron empalmes por fusión y la medición de la potencia fue realizada por un multímetro óptico de la marca ILX lighthwave con una cabeza de medición de InGaAs.

Existen diferentes configuraciones para implementar una fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en tierras raras, en este trabajo utilizamos configuración mostrada en la figura 21, la cual es usada en giroscopios:

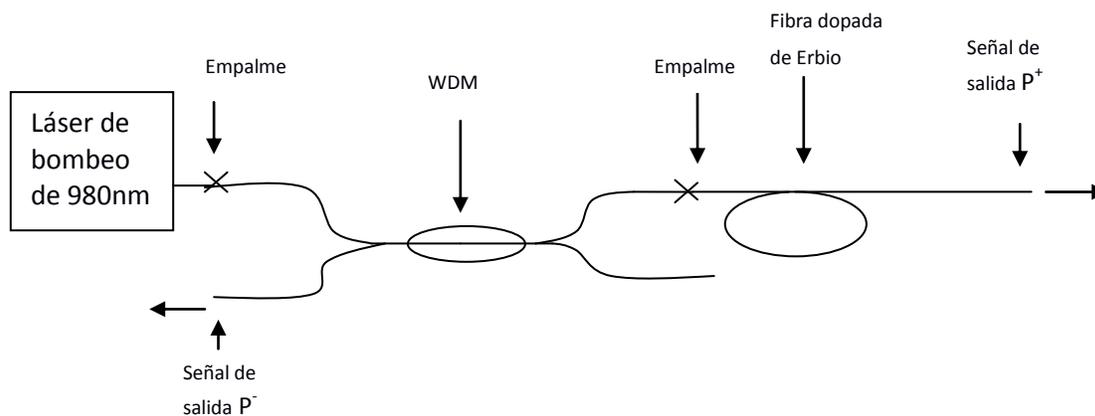


Figura 21. Esquema de fuente superluminiscente

#### 4.2.1 Características técnicas del equipo

##### *Laser*

El láser usado es de la marca JDSU en configuración de mariposa de 14 pines, este diodo láser está equipado con un termistor para sensar la temperatura, un enfriador termoeléctrico.

Las características proporcionadas por el proveedor son las siguientes:

Modelo 29-7702-360-FL

Voltaje del Control de temperatura a 950mA----- 2.37V a 75°C  
 Corriente del Controlador de temperatura de 950mA a 1.85A a 75°C  
 Temperatura de operación del diodo Láser----- 25°C  
 Resistencia del termistor a 25°C----- 9.96HOhms  
 Corriente de umbral Ith(mA)----- 19  
 Corriente de operación Iop(mA)----- 565.9 a 325mW de salida  
 Corriente máxima Imax(mA)----- 630.2  
 Longitud de onda Pico----- 976.2nm

##### *Multiplexor por división de longitud de onda*

Estas son las características proporcionadas por el proveedor Opto-Link Corporation LTD

Modelo OLWDM-F-22-985-25-NC

Longitudes de onda de operación----- 980nm y 1550nm  
 Configuración----- 2X2  
 Longitud de la fibra----- 1m  
 Dimensiones del empaque-----  $\Phi$  3.0mm x 40mm  
 Temperatura de operación----- -40 a 85°C

Longitud de onda (nm)	980	1550
Aislamiento (dB)	24.0	34.3
Pérdidas por inserción (dB)	0.12	0.05
PDL(dB)	0.01	0.01
Directividad (dB)	>60	>60

*Tabla 4. Características del WDM*

##### *Fibra óptica dopada con Erblio*

La fibra óptica es de la marca Liekki la cual proporciona los siguientes datos [21]:

Modelo: Er30-4/125

Especificaciones ópticas

Diámetro del campo modal a 1550nm	6.5±0.5µm
Absorción pico del núcleo a 1530nm	30±3dB/m
Apertura numérica del núcleo	0.2
Longitud de onda de corte	800-980nm

Tabla 5. Especificaciones ópticas de la fibra dopada

Especificaciones geométricas y mecánicas

Error de concentricidad del núcleo	< 0.7 µm
Diámetro del revestimiento	125 ± 2 µm
Geometría del revestimiento	Circular

Tabla 6 Especificaciones ópticas de la fibra dopada

Concentración de Erblio en la fibra.....1.9x10<sup>25</sup> [iones/m<sup>3</sup>]

### 4.3 Desarrollo y resultados experimentales

En el inicio de nuestro trabajo experimental fue necesario caracterizar nuestro diodo laser con nuestro equipo de medición, para corroborar que el funcionamiento de nuestro laser sea el adecuado, esto lo hacemos con la curva característica que provee el fabricante de cada laser (ver figura 22).

La medición fue realizada controlando la corriente suministrada al diodo láser comenzando desde 0 mA e incrementando en 10 mA cada medición, midiendo a la salida su potencia óptica con el multímetro óptico y una cabeza de medición mencionada al inicio, de estas mediciones la curva característica obtenida fue la mostrada en la figura 23.

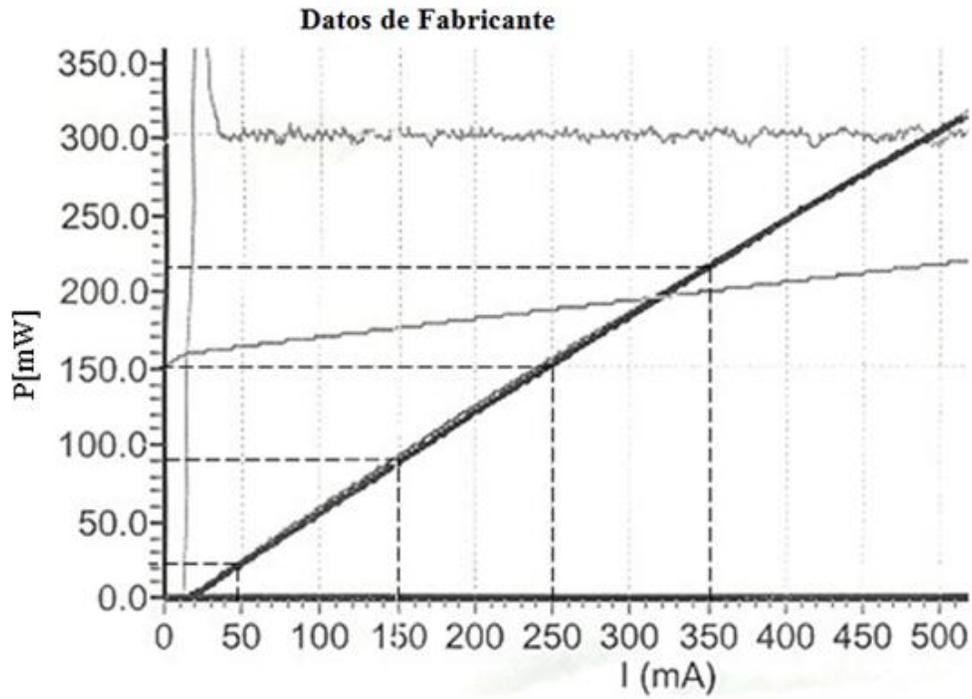


Figura 22. Curva característica del diodo láser proporcionada por el fabricante

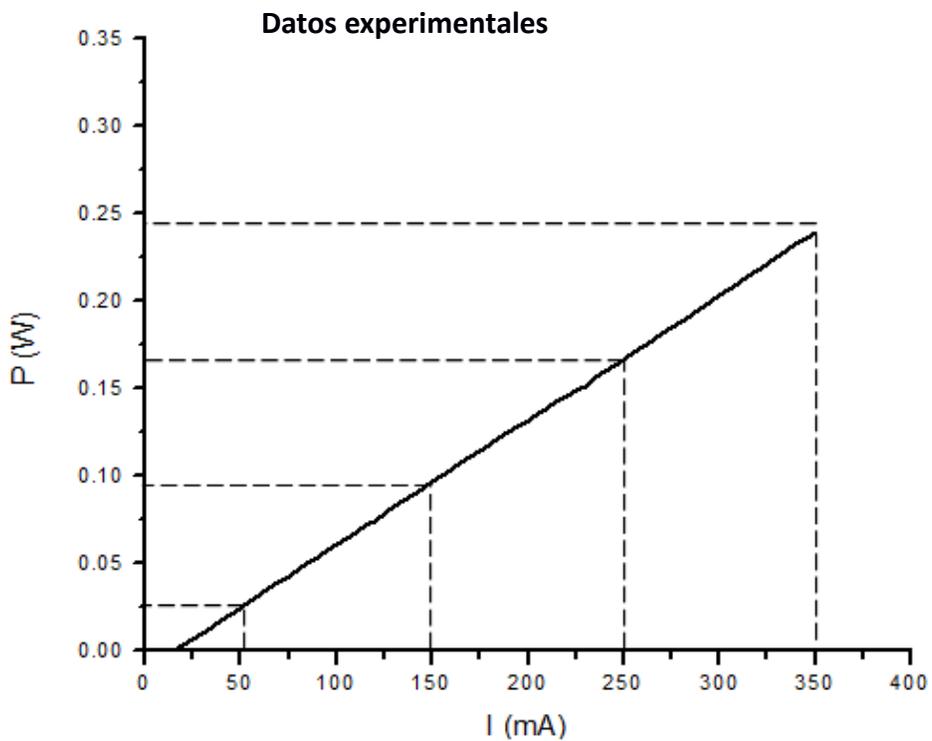


Figura 23. Curva característica del diodo láser obtenida experimentalmente.

Podemos ver que el comportamiento experimental del láser es similar el medido en el laboratorio con pequeñas diferencias a partir de los 250 mA, pero podemos decir que tenemos un detector confiable, además nuestras mediciones para la fuente superluminiscente serán máximo apenas unos pocos mW.

El siguiente paso antes de armar la fuente superluminiscente, es necesario caracterizar la fuente laser a la salida del multiplexor por división de longitud de onda, la potencia de esta señal de salida es con la cual se bombea la fibra dopada en Erbio.

La curva obtenida de la caracterización a la salida del multiplexor por división de longitud se muestra a continuación en la figura 24:

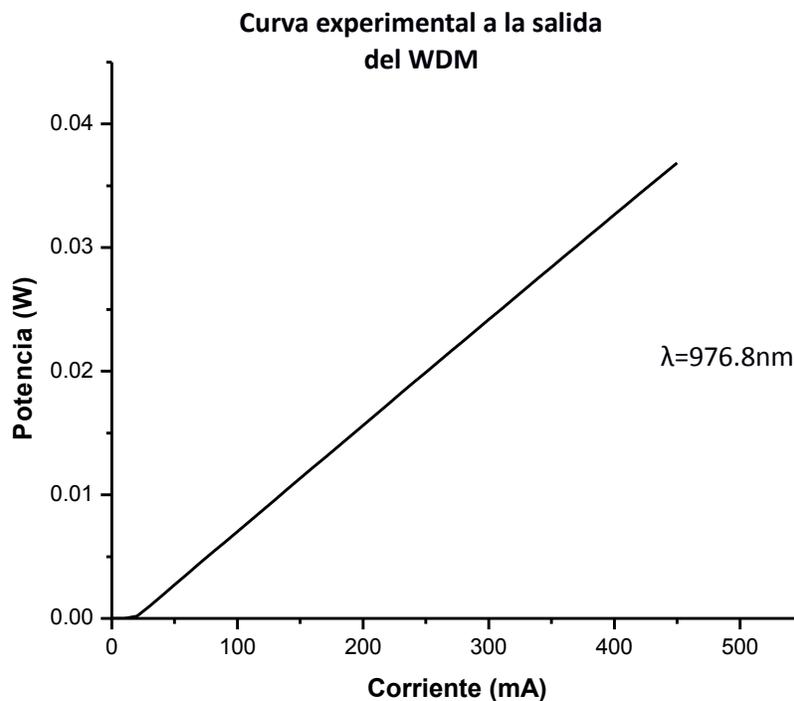


Figura 24. Curva obtenida experimentalmente a una longitud de onda pico de 976.8 nm en donde el medidor de potencia obtuvo la mayor potencia de salida de la fuente de bombeo.

Esta potencia de salida obtenida es la que más adelante conoceremos como  $P_{in}$ , la cual es la fuente de excitación de nuestra fibra activa.

Una vez conocida la respuesta de la fuente de bombeo se implemento nuestra fuente superluminiscente en fibra óptica dopada en Erblio, para caracterizar la fuente superluminiscente fue necesario realizar la medición en dos puntos, el primero de ellos es al final de la fibra dopada en Erblio la cual nombramos  $P^+$  (ver figura 25) y la otra es la salida es la de retorno del WDM a la cual llamamos  $P^-$  (ver figura 26).

La curva obtenida para  $P^+$  se muestra a continuación en la figura 25:

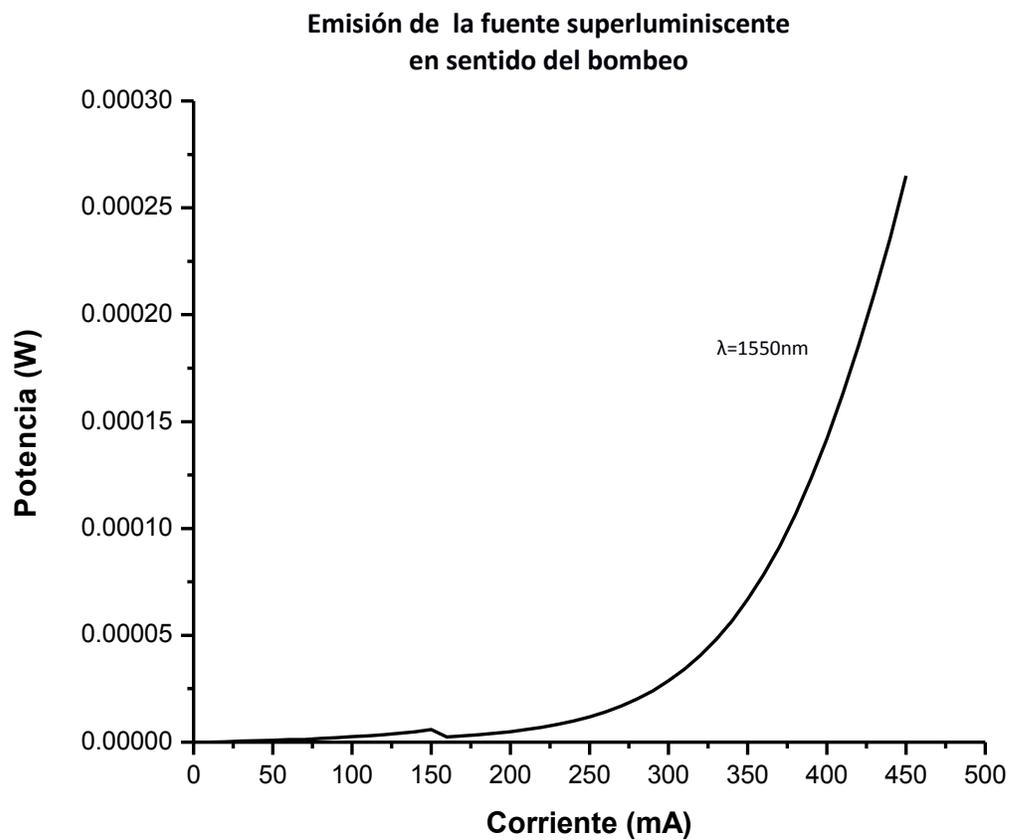


Figura 25. Curva característica de  $P^+$  con una longitud pico a  $\lambda=1550\text{nm}$

A continuación en la figura 26 se muestra la curva obtenida para la potencia de salida  $P$  :

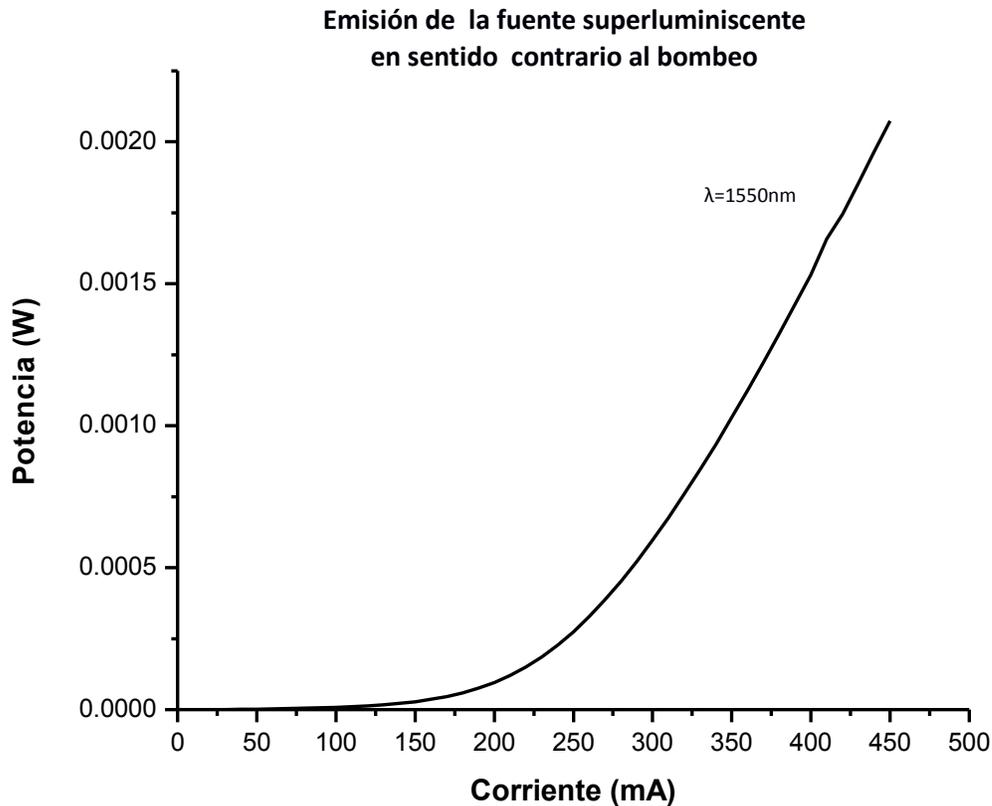


Figura 26. Curva característica de  $P$  con una longitud pico a  $\lambda=1550\text{nm}$

Estas curvas son el resultado de la excitación de los iones de Erblio en la fibra dopada, los cuales producen una emisión espontánea, estas dos curvas fueron fijadas a 1550 nm, aunque cabe aclarar que el pico de nuestra fuente superluminiscente no es fijo conforme la potencia de bombeo se varia, la decisión de fijarla en 1550 nm es que este valor fue el más repetido dentro de nuestras mediciones.

Para asegurarnos de la longitud de onda fijada en el detector, usamos un Analizador de Espectros Óptico y realizamos una medida de la longitud de onda pico la cual se muestra en la figura 27.

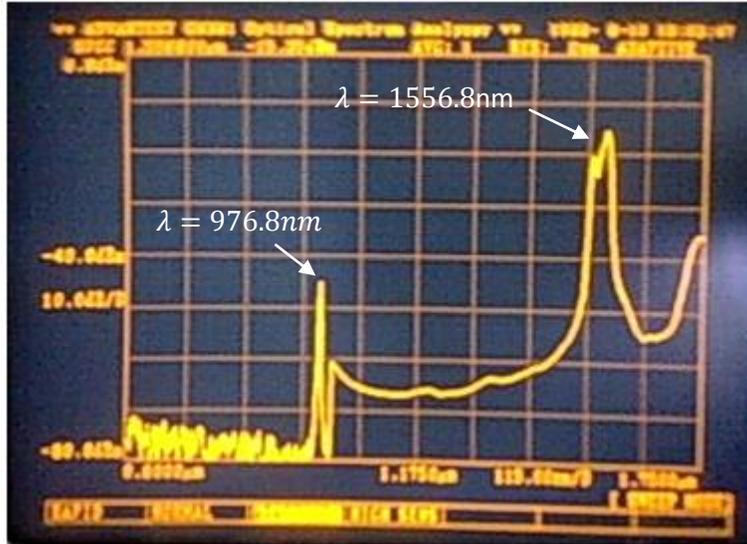


Figura 27 Espectro óptico a la salida de la fibra óptica dopada.

En la figura 27, vemos dos emisiones, la emisión a 976.8 nm corresponde a la fuente de bombeo, la cual es un diodo láser, la emisión con mayor magnitud que tiene una longitud de onda pico de 1556.8 nm, ésta señal es la emisión de amplificación espontánea producida por nuestra fuente superluminiscente.

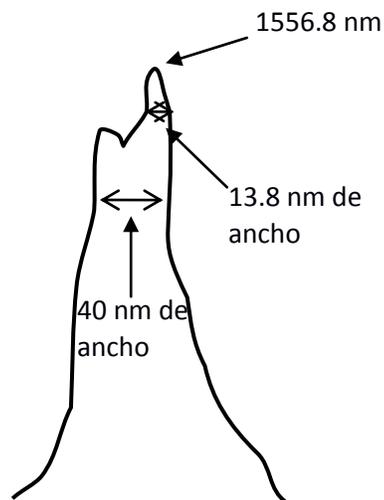


Figura 28. Esquema del espectro de la fuente superluminiscente

De la figura 28, podemos ver tenemos una pequeña fluctuación láser, la cual no afecta el funcionamiento de nuestra fuente superluminiscente, es claro que nuestra fuente de luz es simplemente una amplificación por emisión estimulada, ya que tiene un amplio ancho espectral característico de las fuentes superluminiscentes, la fluctuación láser puede deberse a que el WDM, este actuando como un resonador óptico en esa longitud de onda.

## Conclusiones al capítulo 4

Los cálculos realizados para predecir la potencia de la fuente superluminiscente, simulan la potencia a diferentes longitudes de fibra óptica dopada y para diferentes potencias de entrada  $P_{in}$ , con estos cálculos además de esperar un valor de la potencia, podríamos predecir la longitud óptima para cada potencia de entrada.

Si observamos las figuras 19 y 20, las cuales corresponden a las potencias de salida de la fuente superluminiscente en sentido del bombeo y en sentido contrario respectivamente, se aprecia que la potencia  $P_s^-(z, \lambda_i)$  es mayor a la potencia  $P_s^+(z, \lambda_i)$ , esto sucede porque, parte de la potencia que se dirige a la salida  $P_s^+(z, \lambda_i)$  es reflejada y excita los iones activos de la fibra que producen una amplificación de emisión espontánea en sentido contrario a la fuente de bombeo.

Antes de implementar la fuente superluminiscente, fue necesario aprender a realizar empalmes de fusión, para asegurar un mejor desempeño del dispositivo. Después de realizar el empalme entre el diodo láser y el WDM, se verificó la potencia a su salida, donde las mediciones mostraron pérdidas más grandes de las esperadas, aunque la potencia obtenida era suficiente para excitar la fibra dopada con Erblio, así que no fue necesario realizar nuevamente el empalme. Una vez caracterizada la fuente de excitación la cual llamamos  $P_{in}$ , realizamos el empalme del WDM con la fibra óptica dopada con Erblio, la primera prueba para asegurarnos de que el empalme era funcionaba, fue bombear la fibra dopada ya que si ésta presenta una fluorescencia de color verde a lo largo de toda la fibra, esto significa que existe el fenómeno de emisión espontánea, lo cual así sucedió.

Ya implementada la fuente superluminiscente, se realizaron las mediciones de las potencias  $P_s^+(z, \lambda_i)$  y  $P_s^-(z, \lambda_i)$ , una vez obtenidas las curvas, pude observar que la potencia de regreso  $P_s^-(z, \lambda_i)$  es mayor en un orden de magnitud que  $P_s^+(z, \lambda_i)$ , que también se observa en la parte teórica, por otro lado las magnitudes calculadas en la parte teórica y las obtenidas experimentalmente son diferentes, esto se adjudica principalmente a pérdidas por empalme, las cuales resultaron ser grandes a la salida del WDM y seguramente son similares en el empalme entre el WDM y la fibra dopada con Erblio; otra razón posiblemente importante es que se hicieron suposiciones en varios datos de la fibra dopada con Erblio, aunque al intentar obtener estos valores no se obtuvo una magnitud similar a la experimental, pero, suponiendo una pérdida similar a la del láser a la salida del WDM que es una pérdida de 20 dB en el empalme entre el WDM y la fibra dopada, esto sugiere que la concentración de iones de Erblio en la fibra dopada es menor a la proporcionada por el fabricante y es alrededor de  $N_T = 1.25 \times 10^{25}$  [iones/m<sup>3</sup>].

En el esquema de la figura 28, tenemos el espectro de la fuente superluminiscente, que tiene una pequeña fluctuación láser en el pico, probablemente debido a que los cortes realizados en el WDM estén funcionando como espejos y esto provoca una resonancia a esta longitud de onda, que no afecta el funcionamiento de la fuente superluminiscente ya que es claro que es una fuente de amplio ancho de banda.

# CONCLUSIONES GENERALES

---

1.- En este trabajo se utiliza el concepto de la teoría cuántica de la luz, ya que muestra su comportamiento como paquetes de partícula en los fenómenos de emisión y absorción existen dentro de la fibra dopada con Erblio al ser bombeada por el diodo láser.

De las fuentes de radiación de luz construidas por el hombre, la implementación de la más importante es el láser el cual tiene propiedades únicas, las cuales pueden usarse como fuentes de excitación, para otros láseres o fuentes superluminiscentes, como en este trabajo se hace usando un diodo láser a 980 nm de longitud de onda pico, excitando los iones activados de la fibra dopada con Erblio.

En el caso de los detectores es imprescindible, elegir el adecuado, debido a que se necesita una rápida respuesta, que sea sensible a la longitud de onda del diodo láser y de la fuente superluminiscente, además de soportar la potencia emitida por éstos, es por esta razón que se eligió un detector semiconductor de InGaAs.

La propagación de la luz puede darse en el espacio libre sin necesidad de un medio que lo transporte, pero también puede propagarse dentro algunas sustancias y materiales, esto ha sido aprovechado y se han construido estructuras como las fibras ópticas, en donde la luz es propagada por reflexión interna total.

2.- Las fibras ópticas son guías de onda cilíndricas de materiales cristalinos, las cuales han sido utilizadas en telecomunicaciones debido a que pueden transmitir la información a muy largas distancias y con pocas pérdidas, con el paso del tiempo la estructura de los materiales de las fibras ópticas comenzó a modificarse para mejorar sus características y darles nuevas aplicaciones.

En la actualidad se construyen diversos tipos de fibras ópticas, en donde dependiendo de su construcción y material tienen diferentes aplicaciones, por ejemplo las fibras de cristal fotónico, son fibras ópticas que usan múltiples estructuras para mejorar la transmisión de la luz o para manipular los efectos no lineales; también existen fibras con dopajes, las fibras centelladoras son fibras plásticas dopadas que ser excitadas por radiación tienen una fluorescencia, por otro lado las fibras ópticas dopadas con tierras raras las cuales son fibras de vidrio, tienen emisiones en ciertas longitudes de onda, cuando la fibra es bombeada con otras fuentes de luz, es por esta razón que son usadas en la fabricación de láseres en fibra óptica, amplificadores ópticos en fibra dopada con Erblio y fuentes superluminiscentes en fibra óptica.

3.- Los elementos conocidos como tierras raras pertenecen al grupo IIIB de la tabla periódica, son elementos que cuando son usados como dopantes de estructuras cristalinas u otros compuestos, presentan el fenómeno de luminiscencia o fluorescencia, estos elementos son usados como dopantes en fibras ópticas de vidrio, para la implementación de láseres en fibra óptica, las cuales son usadas como medio activo.

Los láseres funcionan en base a un fenómeno conocido como amplificación de emisión estimulada, en donde es necesario tener una inversión de población, la cual debe producirse en los niveles de energía de los materiales usados como medios activos, los láseres existentes usan medios activos de tres y cuatro niveles, las fuentes superluminiscentes están basadas en una simple superluminiscencia, es decir, amplificación de emisión espontánea, estas también funcionan en base a los mismos medios activos de tres y cuatro niveles.

La fibra óptica dopada con Erblio, es un medio activo de tres niveles, el interés de usar este dopante como medio activo para fuentes superluminiscentes, radica en que la emisión pico a 1550 nm cuando es bombeada por un láser de 980 nm, corresponde a la llamada región de la tercera ventana de las telecomunicaciones en donde existen bajas pérdidas de transmisión en las fibras ópticas, además este tipo de fuentes de radiación tienen una gran estabilidad térmica, y una de sus características muy importantes es que debido a que tienen una larga longitud de onda son dispositivos que tienen una vida útil mayor. Las fuentes superluminiscentes en fibra óptica dopada con Erblio, actualmente son utilizadas en la construcción de giroscopios ya que otorgan una mayor señal a ruido que usando láseres.

4.- Los cálculos teóricos, se realizaron con la intención de simular el comportamiento de la fuente superluminiscente, y también para entender los principios de operación del dispositivo.

En la implementación de la fuente superluminiscente, fue necesario aprender a realizar empalmes de fibra óptica, los empalmes fueron realizados por una empalmadora automática que utiliza el método de fusión de fibra óptica. Por razones de costos principalmente no se pudieron perfeccionar los empalmes, lo cual no afectó la implementación de la fibra óptica ya que se consiguió una potencia suficiente de bombeo y una buena señal de salida de la fuente superluminiscente en fibra óptica dopada con Erblio.

El trabajo teórico y el trabajo experimental concuerdan en que  $P_s^+(z, \lambda_i)$  tiene una potencia mucho menor a  $P_s^-(z, \lambda_i)$ , pero, en cuanto a magnitud son muy diferentes, esto es debido a dos razones: la primera y que considero la más importante son pérdidas por fallas en los empalmes, la segunda es la suposición de algunos datos de la fibra dopada con Erblio que no son proporcionados por el fabricante, además, al parecer la concentración de iones de la fibra dopada es menor a la proporcionada. La parte más importante del trabajo experimental es el espectro de la señal de salida obtenido, que corresponde a las características de las fuentes superluminiscentes en fibra óptica dopada con Erblio.

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] B. Rossi. *Fundamentos de Óptica*. Editorial Reverté, S.A. y editada por Addison Wesley. España 1976.
- [2] D. Malacara. *Óptica Básica*. Secretaría de Educación Pública y Fondo de cultura económica. México 1989.
- [3] H. Hetch, A. Zajac. *Óptica*. Fondo Educativo Interamericano, S.A. E.U.A. 1977.
- [4] M.N. Sadiku. *Elementos de Electromagnetismo*. Editorial Grupo Alfa Omega. Tercera edición. México 2003.
- [5] N. Menn. *Practical Optics*. Elsevier Academic Press. U.S.A. 2004.
- [6] B. E. Saleh, M. C. Teich. *Fundamental of photonics*. Ed. John Wiley & Sons. U.S.A 1991.
- [7] Y. Semenova. “*Optical Sources: The Light Emitting Diode*”. Dublin Institute of Technology. Dirección electrónica consultada al día 16/06/2010: <<http://www.electronics.dit.ie/staff/ysemenova/OCS/Light%20Emitting%20Diode.pdf>>
- [8] O. Svelto. *Principles of Lasers*. Plenum Press. Third Edition. U.S.A. 1989.
- [9] M. J. Digonnet. *Rare-Earth- Doped Fiber Lasers and Amplifiers*. Marcel Dekker Inc. Second Edition. U.S.A 2001.
- [10] F. W. Sears. *Óptica*. Ed. Aguilar. Cuarta edición. España 1974.
- [11] J. M. Sanz. *Comunicaciones Ópticas*. Editorial Paraninfo S.A. España 1996.
- [12] C. E. Ojeda Nava. Tesis de Maestría: “*Implementación de un Sensor para Radiación Beta en Fibra Óptica*”. UNAM 2005.
- [13] Ficha técnica de la fibra fotónica consultada al día 16/06/2010 en la página electrónica: <[www.bicron.com](http://www.bicron.com)>
- [14] R. Paschotta. “*Encyclopedia of Laser Physics and Technology*”. Revisada en la página electrónica al día 16/06/2010: <[http://www.rp-hotonics.com/photonic\\_crystal\\_fibers.html](http://www.rp-hotonics.com/photonic_crystal_fibers.html)>
- [15] F. Ramos Pascual. “*Fibras de cristal fotónico*”. *Revista de electrónica y comunicaciones No 212*. Editorial Cypsela S.L. Revisada de la página electrónica al día

16/06/2010:

<[http://www.cypsela.es/revista/revistas\\_anteriores/revista\\_212/articulos/art1.html](http://www.cypsela.es/revista/revistas_anteriores/revista_212/articulos/art1.html)>

[16] G. E. Sandoval-Romero, V. A. Nikolaev. “Límite de detección de un giroscopio de fibra óptica usando una fuente de radiación superluminescente”. *Revista Mexicana de Física* 49 (2) p. 155-165 Abril 2003.

[17] M. J. Digonet. *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers Sources and Amplifiers*. Volume MS 37. SPIE Optical Engineering Press. Printed in USA 1992.

[18] Sandoval-Romero, G. E. “Fiber optic gyrocompass Superluminescent fiber source”. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 20 (7), pp. 19-20. 2005.

[19] G. E. Sandoval-Romero, J. Hernández-Cordero, L.A. Sosa-Martínez, P.E. Ramos-Alvarez, A. García-Valenzuela, C. Sánchez-Pérez. “Superluminescent fiber laser sources for fiber optic sensors”. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 5478, pp. 298-306. (2004).

[20] G. E. Sandoval-Romero, V. Argueta-Díaz and O. Pottiez. “Theoretical results of the analytical and numerical solutions of superluminescent fiber sources”. *Physica Status Solidi C* 6, No. S1, S227–S230. (2009).

[21] Ficha técnica de la fibra dopada con Erblio consultada en la dirección electrónica al día 16/06/2010: <[http://www.liekki.fi/products\\_detailsEr.php?code=Er30-4/125](http://www.liekki.fi/products_detailsEr.php?code=Er30-4/125)>