

# 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].

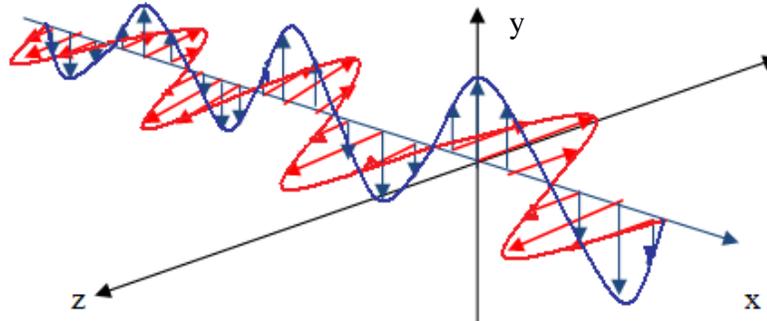


Figura 1. La luz es una onda electromagnética.

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].

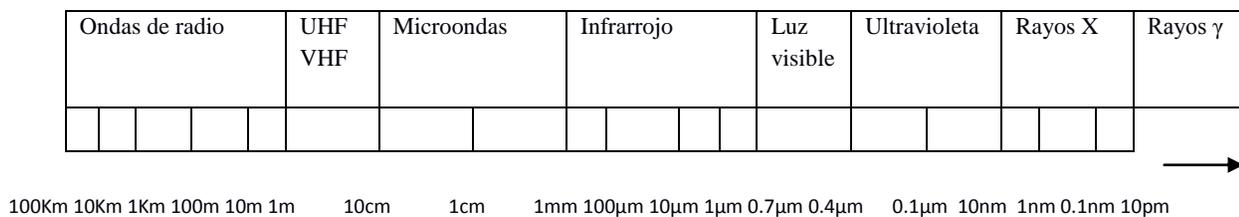


Figura 2. Esquema del espectro electromagnético expresado en longitud de onda

## 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:

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

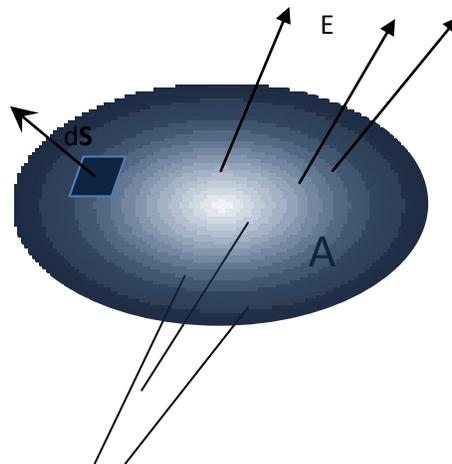


Figura 3. Campo eléctrico E a través de un área cerrada A.

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.

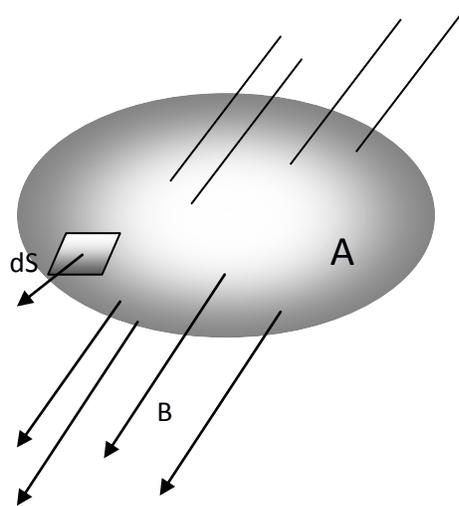


Figura 4. Campo magnético  $B$  a través de un área cerrada  $A$ .

*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:

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

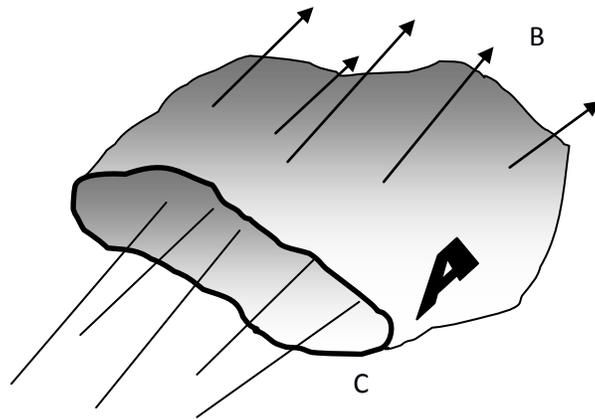


Figura 5. Campo magnético B a través de un área abierta A

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

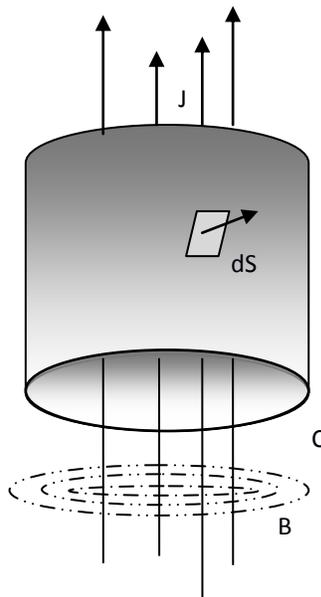
dentro o, cerca de ningún conductor. El campo eléctrico aparece como consecuencia de un campo magnético variable en el tiempo. Sin cargas que actúen como fuentes o sumideros, las líneas de campo se cierran formando circuitos.

### *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).

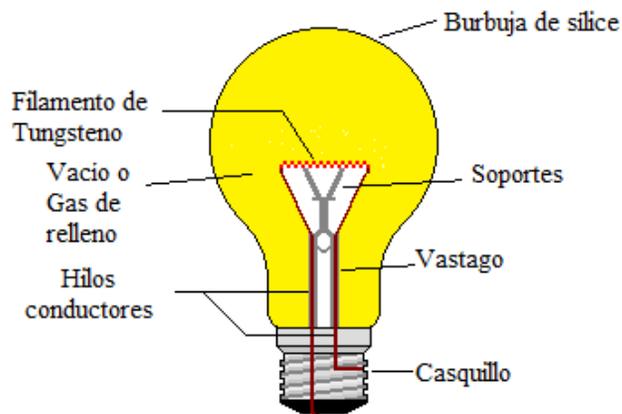


Figura 7. Esquema de una lámpara incandescente.

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).

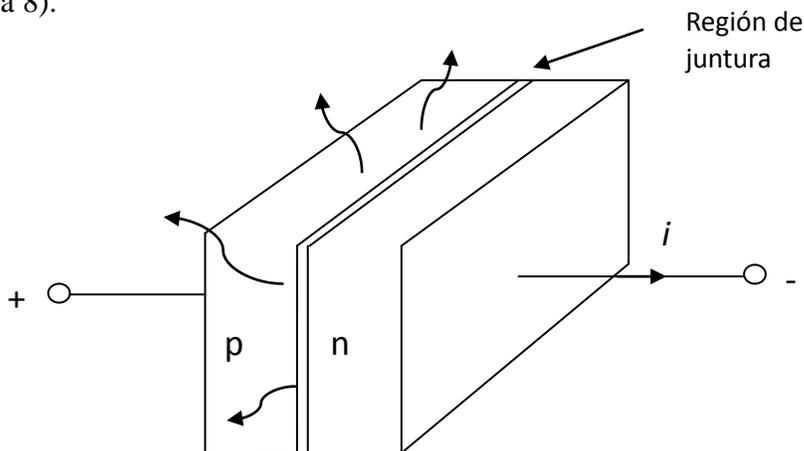


Figura 8. Los fotones son emitidos espontánea de la región de juntura.

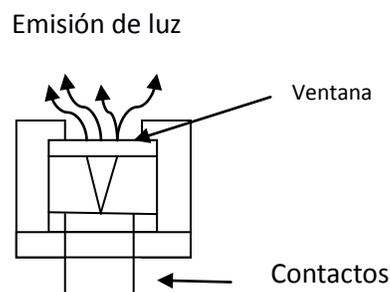
Los LED's tienen características monocromáticas del orden de los 30-150nm (varía según la longitud de onda a la cual trabajen), trabajando regularmente a bajas tensiones (2-5V), bajas corrientes (20-100mA) y la mayoría de ellos trabajan linealmente [5].

Características deseadas:

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

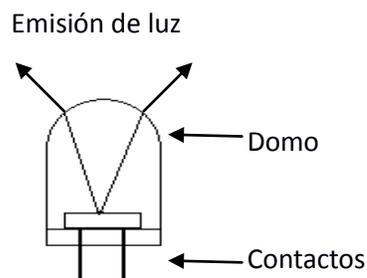
### *Estructuras de LED's*

- 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.