

---

# Tecnología láser

Un LASER, de sus siglas en inglés Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation (Amplificación de Luz por medio de emisión estimulada de radiación), es un dispositivo donde la teoría está basada en la mecánica cuántica, la emisión inducida o estimulada, para generar un haz de luz coherente de un medio adecuado y con el tamaño, la forma y la pureza controlados[1].

A pesar de las grandes diferencias que existen en el funcionamiento de la extensa variedad de láseres actuales, se puede realizar una clasificación general de estas. Esto conduce a una clasificación de los tipos de láseres más usados desde la invención de esta tecnología hasta la actualidad. En este capítulo se muestra la agrupación de los láseres más comunes realizada bajo este criterio. Desde luego, esta clasificación no nos permite tener una idea clara de todas las diferencias existentes en el funcionamiento de estos tipos de láseres y por esta razón, este capítulo está dedicado al estudio descriptivo de la operación de algunos de los más importantes láseres actuales.

Ejemplo:

- 1.- Láseres de mezclas gaseosas atómicas-moleculares (ej. He-Ne, CF<sub>3</sub>I)
- 2.- Láseres de plasma caliente rarificado (ej. Ar \*)
- 3.- Láseres de material semiconductor (ej. Ga-As)

Cada sección de este capítulo corresponde a la descripción de un ejemplo representativo de

cada tipo de láser. Se debe enfatizar que sobre cada una de las secciones que componen este capítulo existe una muy abundante bibliografía, prácticamente sobre cada uno de los temas tratados hay disponibles libros dedicados exclusivamente a ellos, por tanto nuestro objetivo se reduce únicamente a plantear las ideas físicas básicas de la operación de cada uno de los tipos de láseres tratados, así como explicar algunos de sus problemas técnicos de operación.

En general la presentación de cada láser abarca la esquematización de los niveles de energía del medio activo entre los cuales tiene lugar la emisión láser, la explicación del efecto que el bombeo particular tiene sobre el medio activo, un resumen de las limitaciones que presenta el funcionamiento del láser y la forma en que éstas son solucionadas en la práctica, finalizando con una breve descripción de algunas de las aplicaciones reales o potenciales de cada tipo de láser.

Cada sección de este capítulo es independiente y por tanto, el lector interesado en la información de un tipo particular de láser puede pasar a su lectura inmediatamente.

## 2.1. Láser de Helio-Neón.

El láser de Helio-Neón (He-Ne), fue el primer láser de gas construido y actualmente sigue siendo uno de los láseres más útiles y frecuentemente utilizados. Esto a pesar del constante empuje de los láseres de semiconductores que realizan cada vez más funciones que antes eran hechas con láseres de He-Ne. Los centros activos de este láser son los átomos neutros de Neón, pero el bombeo de estos se realiza preferentemente a través de los átomos de Helio. Una mezcla típica de He-Ne para estos láseres contiene 1.33 [Pa] de He y 0.133 [Pa] de Ne.

### 2.1.1. Características Espectrales del Helio-Neón.

El diagrama de energía del sistema He-Ne está mostrado en la Fig. 2.1, ahí se muestran las tres transiciones láser más importantes, las cuales ocurren a 3.39 [ $\mu\text{m}$ ], 1.15 [ $\mu\text{m}$ ] y 0.6328 [ $\mu\text{m}$ ].

Puede notarse que los niveles  $2^1S$  y  $2^3S$  del He prácticamente coinciden con los niveles 3s y 2s del Ne, este hecho es fundamental para el bombeo de los átomos de Ne.

Los niveles 3s y 2s del Ne poseen una vida media del orden de  $10^{-7}$  [s] y pueden realizar transiciones radiactivas a los niveles 3p y 2p. Estos últimos niveles poseen una vida media del

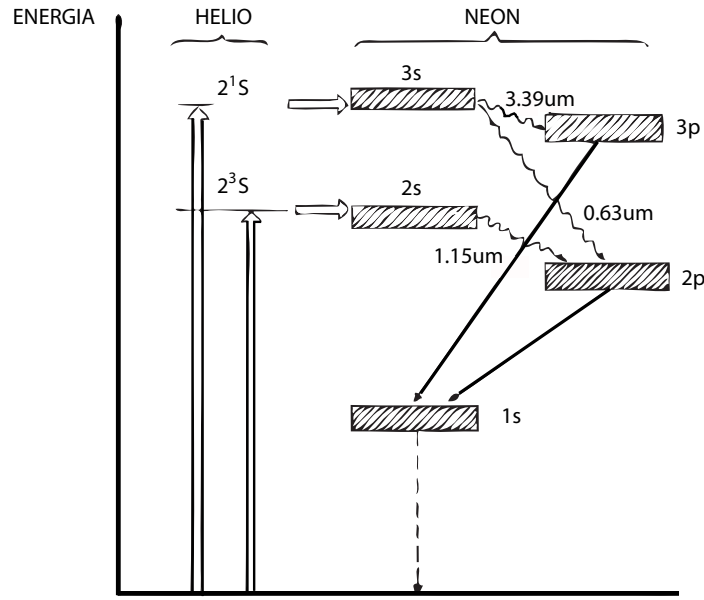


Figura 2.1: Diagrama de energía del sistema He-Ne.

orden de  $10^{-8}$  [s] y por tanto se puede establecer una inversión de población entre estos y los niveles 3s y 2s. Aunque cada uno de los niveles 3s, 2s y 1s se componen de hecho de cuatro subniveles y cada uno de los 3p y 2p de diez subniveles, las longitudes de onda de emisión predominante son para la transición  $3s \rightarrow 3p$ ,  $\lambda = 3,39[\mu\text{m}]$ , para  $3s \rightarrow 2p$ ,  $\lambda = 0,6328[\mu\text{m}]$  y para  $2s \rightarrow 2p$ ,  $\lambda = 1,15[\mu\text{m}]$ .

El vaciado de los niveles inferiores de la transición láser se realiza por medio de las transiciones espontáneas de los niveles 3p y 2p al nivel 1s. Este último nivel es metaestable y, por tanto, a menos que por algún mecanismo sea constantemente vaciado al nivel base del Ne 1p, el nivel 1s podrá saturarse e interrumpir la oscilación láser.

### 2.1.2. Funcionamiento del Láser de Helio-Neón.

El bombeo del láser de He-Ne se realiza por medio de las colisiones que una descarga de electrones producida dentro del gas tiene fundamentalmente con los átomos de He. Como resultado de estas colisiones, los electrones de los átomos de He son excitados a los niveles superiores  $2^{1S}$  y  $2^{3S}$ . La inversión de población en el Ne ocurre debido a colisiones con átomos excitados de He. Como resultado de estas colisiones, los átomos de He pasan a su estado base y los átomos de Ne pasan del estado base a los estados 3s y 2s, creando una inversión de población entre estos

estados y los estados 3p y 2p. Entre estos niveles es donde la oscilación láser puede ocurrir. La realización de una transferencia de energía entre átomos de He y Ne ocurre debido a los siguientes factores:

1. La proximidad de los niveles excitados de energía del He y del Ne.
2. El hecho de que los estados  $2^{1S}$  y  $2^{3S}$  del He son meta-estables, lo cual garantiza un tiempo suficientemente largo para colisionar con átomos de Ne antes de que el He decaiga espontáneamente.
3. La más elevada presión del He en la mezcla He-Ne, lo cual también reduce la probabilidad de que la excitación ocurra en la dirección opuesta, es decir Ne-He.

El vaciado de los átomos de Ne del estado metaestable 1s a su estado base ocurre fundamentalmente debido a colisiones con las paredes del tubo láser. Esto causa que, al aumentar el diámetro del tubo la potencia de salida no aumenta, sino que disminuye. Un diagrama esquemático de un láser de He-Ne se muestra en la Fig. 2.2. Las potencias típicas de salida de estos láseres son bastante pequeñas, de 1 a 50mW de potencia continua. La elección de una sola longitud de onda de oscilación se logra introduciendo un elemento dispersor dentro de la cavidad, como un prisma o una rejilla de difracción, o colocando un filtro pasa banda a la frecuencia de interés.

### 2.1.3. Algunas aplicaciones de los Láseres de Helio-Neón.

A pesar de que los láseres de He-Ne están en proceso de ser continuamente desplazados por los láseres de semiconductores, siguen siendo ampliamente utilizados. Encuentran uso tanto en investigación básica como en aplicaciones industriales que no requieran altas potencias luminosas, así como en aplicaciones didácticas.

Aplicaciones típicas se dan en áreas como metrología, alineación de sistemas ópticos, topografía, detección de vibraciones, holografía e interferometría holográfica[2], esto último para llevar a cabo la realización de pruebas mecánicas no destructivas, por ejemplo para verificar el estado de fatiga de tanques de alta presión, estructuras mecánicas, etc., lo cual introduce factores de seguridad difícilmente alcanzables por otros medios. Dentro de las aplicaciones médicas destacan su uso en dermatología para el tratamiento de manchas en la piel y como auxiliares para estimular la regeneración de tejido en cicatrices[2].

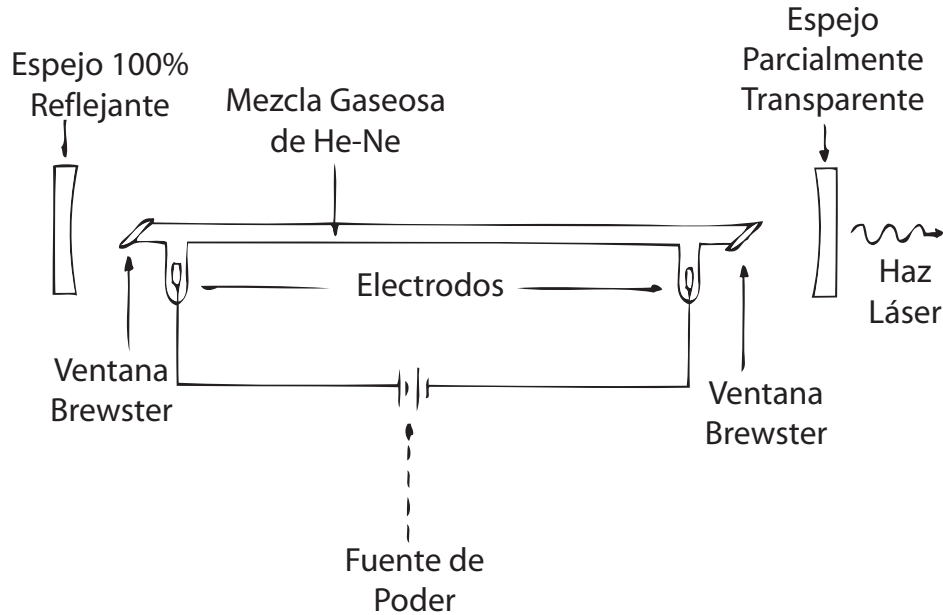


Figura 2.2: Diagrama esquemático de un láser He-Ne.

## 2.2. Láser de Argón ionizado

Las transiciones radiactivas entre niveles altamente excitados de gases nobles han sido conocidas durante largo tiempo y la oscilación láser en este medio activo data desde la década de los sesentas. De estos láseres, el de Argón (Ar) ionizado es el más utilizado debido a sus intensas líneas de emisión en la región azul-verde del espectro electromagnético y a la relativamente alta potencia continua que es posible obtener de él.

### 2.2.1. Características Espectrales del Argón ionizado.

La Fig. 2.3 muestra los niveles energéticos que contribuyen principalmente para lograr la emisión láser en el argón ionizado. El bombeo necesario tanto para ionizar el Ar como para lograr la población de los niveles energéticos superiores de éste se realiza por medio de colisiones múltiples entre electrones producidos por una descarga eléctrica con iones y átomos activos.

El nivel superior de la transición láser corresponde al nivel  $4p$  que es poblado en forma principalmente colisional, siguiendo los procesos  $3p \rightarrow 4d \rightarrow 4p$  o  $3p \rightarrow 4p$ , llamados en “cascada”

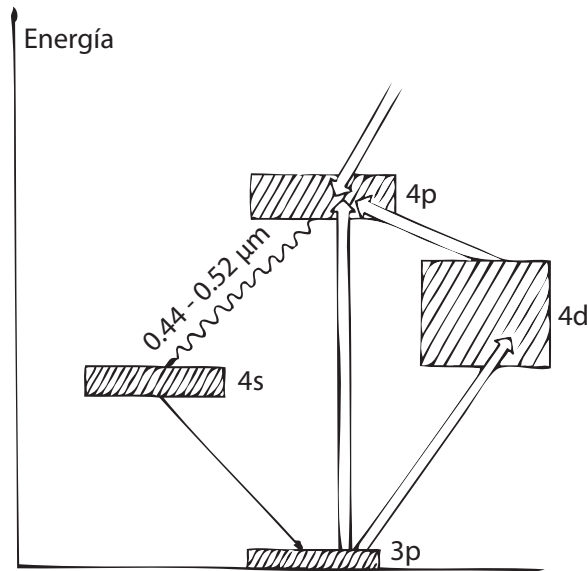


Figura 2.3: Niveles energéticos de Ar.

y “directo” respectivamente. No obstante, la población del nivel superior de la transición láser puede también producirse debido a transiciones de niveles superiores al 4p hacia el nivel 4d. El nivel inferior de la transición láser es el 4s. Es importante remarcar que la razón de incremento de población debido al bombeo del nivel superior 4p es menor a la razón de incremento del nivel inferior 4s y que la inversión de población entre estos dos niveles se logra solo debido a que el tiempo de decaimiento del nivel inferior es mucho más corto que el del nivel superior. Por tanto, en este láser la inversión de población se logra no debido a una excitación preferencial del nivel superior, sino a la desexcitación preferencial del nivel inferior. El láser de Ar tiene varias líneas de emisión debido a que los “niveles” 4p y 4s están compuestos de hecho por 15 y 8 niveles espectrales respectivamente, pero las líneas más intensas corresponden a transiciones a  $\lambda = 0.488[\mu\text{m}]$ , con una intensidad relativa del 45 por ciento y a  $\lambda = 0.515[\mu\text{m}]$  con una intensidad relativa del 35 por ciento.

### 2.2.2. Funcionamiento del Láser de Argón Ionizado.

Como hemos visto, en este láser el bombeo se realiza por una descarga eléctrica de corriente típica entre 15 y 50 amperes, que al pasar por el tubo de descarga puede producir densidades de corriente del orden de  $10^3 [A/cm^2]$ . Dado que la ganancia aumenta con la corriente, es importante reducir las pérdidas por colisiones entre electrones y las paredes del tubo de descarga.

Esto último se logra produciendo un campo magnético longitudinal al tubo de descarga que limita el movimiento de los electrones a la dirección longitudinal del tubo. Debido a la alta corriente, se producirá un movimiento de los iones hacia el cátodo y de los electrones hacia el ánodo, causando una diferencia en la distribución de iones y de presión en el tubo que puede interrumpir la oscilación láser. Para solucionar este problema, se coloca una conexión de retorno para el gas, entre el cátodo y el ánodo, cuidando que la distancia recorrida en la conexión de retorno sea mayor que la distancia de la columna de descarga en el tubo, para evitar que la descarga eléctrica se realice por la conexión de retorno. El esquema típico de un láser de argón ionizado se muestra en la Fig. 2.4.

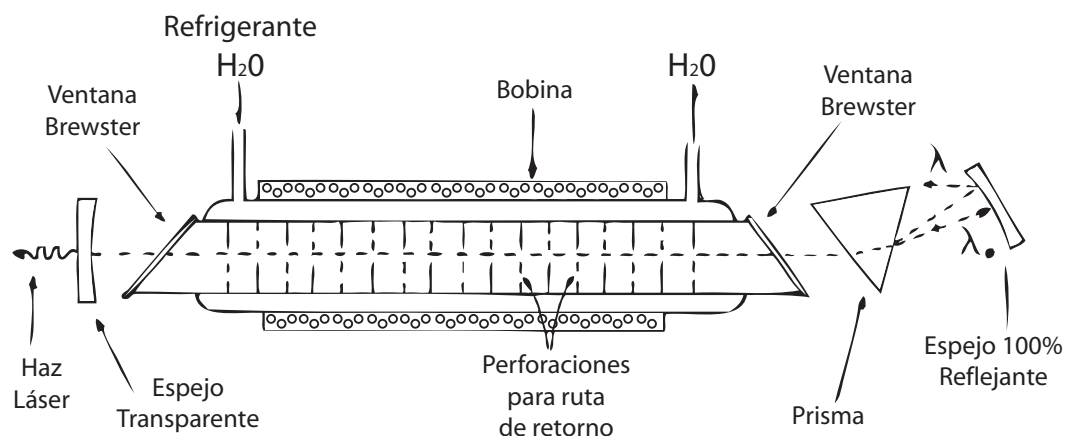


Figura 2.4: Esquema típico de un láser de argón ionizado.

La utilización de un láser de argón localizado a una sola frecuencia requiere de la introducción de un elemento dispersor, como un prisma o una rejilla dentro de la cavidad, como se muestra en la figura anterior. Estos láseres pueden proporcionar potencias continuas de hasta 100 [W] y pueden ser también operados en forma pulsada.

### 2.2.3. Algunas aplicaciones del Láser de Argón Ionizado.

Dado que estos láseres pueden proporcionar potencias continuas de hasta 100 Watts y pueden ser también operados en forma pulsada, han encontrado variadas aplicaciones médicas, técnicas y científicas. Por ejemplo, han sido extensamente utilizados en el estudio de la cinética de reacciones químicas y en la excitación selectiva de esta. Hay algunas reacciones químicas que solo

ocurren bajo radiación o cuya rapidez puede incrementarse notablemente cuando los reactivos son irradiados con luz láser de longitud de onda apropiada. En el primer caso podemos obtener productos que de otro modo sería difícil de obtener y en el segundo caso se tiene la posibilidad de incrementar la productividad de algunas industrias químicas[3]. Asimismo, el uso de estos láseres en foto impresión, litografía y grabado de logotipos comerciales está ampliamente difundido. Por otra parte, el área médica es también un campo importante de aplicación. En particular destacan sus aplicaciones en oftalmología para fotocoagulación, “soldadura” de pequeñas áreas, así como en cirugía endoscópica y dermatología[3]. Finalmente, cabe mencionar que, además de las aplicaciones anteriores, este tipo de láser es ampliamente utilizado en “antros” y “laser-shows”.

## 2.3. Láser de semiconductores.

Los láseres de semiconductores son los láseres más eficientes, baratos y pequeños obtenibles en la actualidad. Desde su invención en 1962 se han mantenido como líderes en muchas aplicaciones científico-tecnológicas y su continua producción masiva da indicio de que esta situación se prolongará por bastante más tiempo, desplazando en su uso a otros láseres como el de He-Ne.

### 2.3.1. Características Generales de un Semiconductor.

La teoría del funcionamiento y operación de este tipo de láseres se encuentra en la física del estado sólido: en particular, en la teoría de bandas para semiconductores. Esta teoría está ampliamente descrita en la literatura[4], aquí solo nos limitaremos a dar una breve descripción de los resultados más importantes.

Un cristal tiene ordenados sus átomos de acuerdo con una estructura periódica regular. Si trazamos la gráfica del potencial  $V(x)$  producido por un conjunto de átomos en una dimensión  $x$ , obtendremos algo parecido a lo mostrado en la Fig. 2.5. Por simplicidad dicho potencial se puede aproximar al mostrado en la Fig. 2.6, donde los átomos están espaciados por una distancia  $a+b$ , que es la longitud de la celda unitaria y el potencial máximo es  $V_0$ .

Esta simplificación constituye el modelo de Kronig-Penney para redes periódicas[4].

De este modelo se obtiene que, a temperatura de cero absoluto, los electrones de las capas



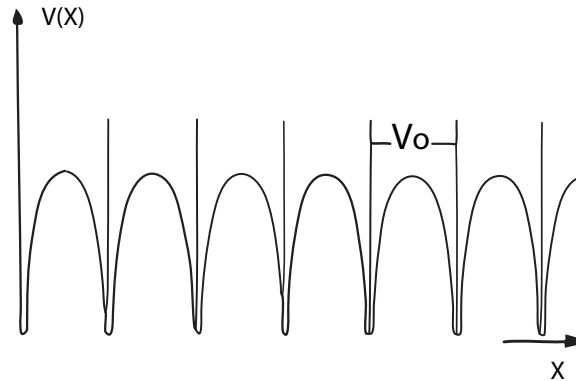


Figura 2.5: Potencial  $V(x)$  producido por un conjunto de átomos en una dimensión  $x$ .

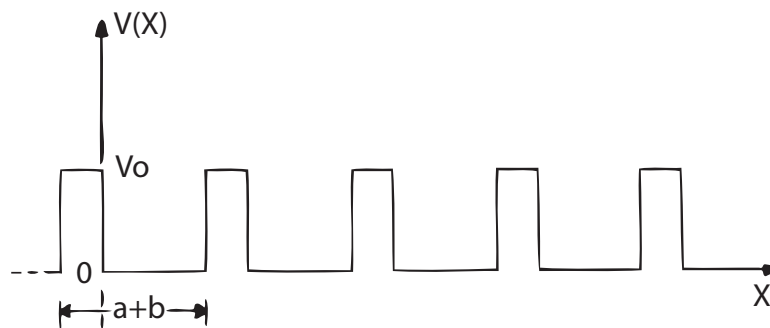


Figura 2.6: Bandas de valencia y de conducción en un conductor.

internas de los átomos se encuentran ligados a estos y no contribuyen a la conducción de corriente. Los electrones de las capas externas pierden su identidad respecto de los átomos a los cuales pertenecen y conforme se aumenta la temperatura absoluta, pueden contribuir a la conducción de la corriente eléctrica. Esto se puede mostrar gráficamente en un diagrama de bandas, donde los electrones que se encuentran ligados al átomo forman un nivel de energía llamado la banda de valencia, mientras que los electrones de la capa más externa forman la banda de conducción. Así mismo, las bandas de valencia y conducción están separadas por una amplia banda de energías prohibidas, Fig. 2.7-a. Un electrón en la banda de valencia no puede pasar a la banda de conducción debido a esta barrera. En un conductor, Fig. 2.7-b, las

bandas de valencia y de conducción están juntas o traslapadas, lo cual facilita la conducción de portadores de carga en el medio. Para un buen conductor como la plata, la conductividad es de  $6 \times 10^7$  [S/m], mientras que un buen aislante como el cuarzo fundido tiene una conductividad de  $2 \times 10^{-17}$  [S/m]. Existe una tercera categoría intermedia al conductor y al aislante. Esta categoría la constituyen los llamados semiconductores, Fig. 2.7-c; que tienen una conductividad de 7 a 14 órdenes de magnitud menor a los metales. Podemos encontrar semiconductores formados por un elemento, como el Ge y el Si o compuestos, como el arsenuro de galio, GaAs, y el Sulfuro de Plomo, PbS.

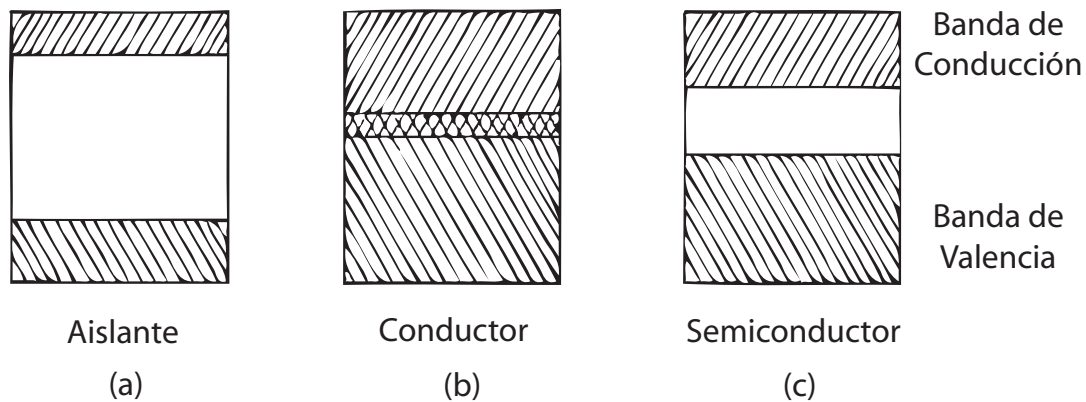


Figura 2.7: Bandas de valencia y conducción de diversos materiales.

### 2.3.2. Láseres de Semiconductores.

Entre las bandas de valencia y conducción, existe un nivel, llamado nivel de Fermi, que se puede interpretar físicamente como un parámetro que describe la distribución estadística de los portadores de carga en el semiconductor. La expresión explícita para esta distribución, conocida como distribución de Fermi, es:

$$f_e = \left\{ \frac{1}{1 + e^{\frac{E-F}{kT}}} \right\} \quad (2.1)$$

$$E = -1.6 \times 10^{-19} \text{ [J]}$$

$$F = 3 \times 10^5 \text{ [eV]}$$

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}$$

donde “E” es la energía del electrón, “F” es el nivel de Fermi del semiconductor, “K” es la constante de Boltzman y “T” es la temperatura absoluta en Kelvin. Cuando el semiconductor está a cero absoluto, todos los electrones están en la banda de valencia y el material se comporta como un aislante. A cualquier otra temperatura, algunos de los electrones pueden ocupar la banda de conducción, dejando en la banda de valencia una ausencia de electrones que se denominan agujeros u hoyos. Esto permite la conducción de corriente en el semiconductor. Los hoyos producidos por la ausencia de un electrón, equivalen a una carga positiva y en un semiconductor ideal, el número de electrones en la banda de conducción es igual al número de hoyos en la banda de valencia. La energía de un portador de carga en un semiconductor es función de su ímpetu y este del vector de onda:

$$E \propto p^2 \tag{2.2}$$

$c > 0$  arriba

$c < 0$  abajo

$$k = \frac{p}{\hbar} \left[ \frac{J}{K} \right] \tag{2.3}$$

Con la ecuación 2.2 podemos construir una parábola que contenga la energía del electrón como función de su momento y obtener resultados como los indicados en las Fig. 2.8, en donde la máxima energía en la banda de valencia se indica por el punto M, mientras que la mínima energía de la banda de conducción se indica con el punto m, y  $E_g$  representa la diferencia de estas energías.

En la Fig. 2.8-(A), se muestra el caso en que no se requieren cambios en el momento de un portador de carga, cuando éste pasa de un nivel a otro. A este tipo de semiconductores se les llama semiconductores directos. En el diagrama de la Fig. 2.8-(B), se muestra el caso en que para que el portador de carga en el punto de máxima energía de la banda de valencia M pase al punto de mínima energía de la banda de conducción m, se requiere que el portador sufra además un cambio en su momento. A este tipo de semiconductores se les llama semiconductores indirectos. Ejemplos del primer tipo son el arsenuro de galio (GaAs) y el arsenuro de indio (IAs),

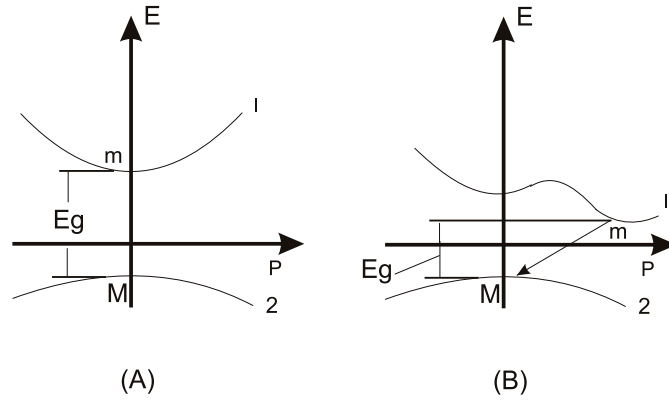


Figura 2.8: Bandas de valencia de un semiconductor.

mientras que ejemplos del segundo tipo son el fosforo de galio (GaP) y el silicio (Si). El proceso de recombinación de electrones de la banda de conducción con huecos de la banda de valencia con la consecuente emisión de un fotón debido a la diferencia de energía, podrá ocurrir siempre y cuando el momento y la energía se conserven en la transición.

El momento máximo  $P_{max}$  que un portador de carga en una red cristalina puede tener, se limita al intervalo:

$$P_{max} = \pm \frac{\hbar}{2(a+b)}, \quad (2.4)$$

$$\text{donde } \hbar = \frac{h}{2\pi} = 6.626 \times 10^{-34} \text{ [Js]}$$

la cual se conoce como la primera zona de Brillouin, mientras que el momento  $P_f$  de un fotón está dado por

$$P_f = \frac{\hbar}{\lambda}. \quad (2.5)$$

Los valores típicos de  $a+b$  donde  $a$  y  $b$  son los parámetros de la red y se dan en el orden de angstroms ( $10^{-10}$ [m]), por tanto, considerando fotones con una longitud de onda en el visible tendremos  $P_{max} \gg P_f$ . Esto es, el momento de un portador es mucho mayor que el momento de un fotón, por tanto, para tener transiciones en las cuales únicamente participe un fotón y un portador de carga, necesitaremos que el momento del portador sea muy pequeño, lo cual implica

transiciones prácticamente verticales, como se muestran en la Fig. 2.8-(A); transiciones no-verticales, como la mostrada en la Fig. 2.8-(B), también son posibles, sin embargo, en este caso, la participación de un fotón es esencial para conservar el momento del proceso. No obstante, esto último es poco deseable en un láser, ya que la presencia de fotones aumenta la energía disipada térmicamente, lo cual impide el buen funcionamiento del dispositivo. Es debido a la ventaja que presentan las transiciones verticales que casi la totalidad de los láseres semiconductores son producidos con materiales semiconductores directos.

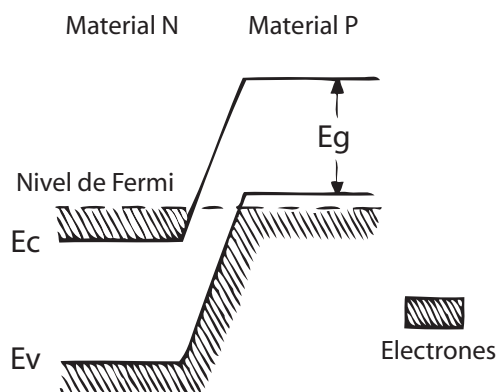


Figura 2.9: Bandas de valencia y conducción en un semiconductor.

A los cristales utilizados en la construcción de láseres semiconductores, se les añaden átomos de materiales con excesos de portadores negativos o positivos, llamados impurezas tipo N y P respectivamente. El efecto de las impurezas en el semiconductor es desplazar el nivel de Fermi hacia arriba en los materiales tipo P y hacia abajo en los tipo N, de forma que, cuando juntamos dos semiconductores, uno tipo P y otro tipo N y además existe equilibrio termodinámico, los niveles de Fermi se mantienen a un mismo nivel, como se muestra en la Fig. 2.9. Entonces, parte de los electrones del semiconductor tipo N, se desplazan al semiconductor tipo P, mientras que parte de los huecos del tipo P se desplazan hacia el tipo N, formando alrededor de la unión una región llamada zona de depleción. Esta zona será más ancha entre mayor sea su temperatura absoluta, la cual es el valor de la temperatura medida con respecto a una escala que comienza en el cero absoluto.

Conectando una batería a las terminales de la junta semiconductor, de tal manera que su polo positivo se conecte al semiconductor tipo P y su polo negativo al tipo N, esta configuración

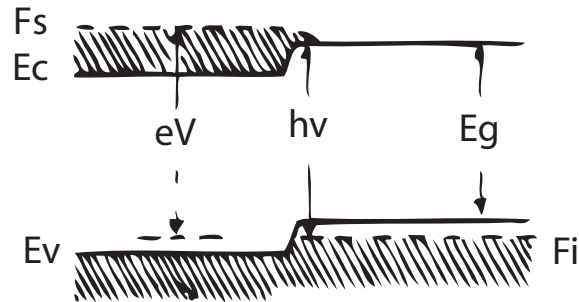


Figura 2.10: Diagrama de un semiconductor en polarización directa.

se llama polarización directa y, en estas circunstancias, el semiconductor no se encuentra en equilibrio termodinámico. El diagrama de niveles de energía tendrá la apariencia mostrada en la Fig. 2.10. Bajo el campo eléctrico aplicado al semiconductor, los electrones se recombinarán con los hoyos, produciendo la emisión de un fotón en el proceso. La energía máxima por fotón resultante estará dada por:

$$h\nu = eV = F_s - F_i, \quad (2.6)$$

donde  $eV$  es la energía potencial del portador,  $F_s$  es el nivel de Fermi del semiconductor tipo N y  $F_i$ , el nivel de Fermi del tipo P. Los electrones que se recombinan con los agujeros en la zona de depleción, en general emitirán el fotón de una forma espontánea pero, si aumentamos la densidad de corriente, aumentará también la densidad fotónica. Si proporcionamos un mecanismo de realimentación luminosa, podemos tener emisión estimulada con suficientemente alta densidad de corriente.

Dado que:

$f_c(E)$  es la probabilidad de que se encuentre un portador de carga en la banda de conducción con energía  $E$ .

$f_v(E)$  es la probabilidad de que se encuentre un portador de carga en la banda de valencia con energía  $E$ .

tenemos que, la probabilidad de tener un portador con energía  $E_2$  en la banda de conducción y otro con  $E_1$  en la banda de valencia es:

$$\text{Probabilidad} = f_c(E_2)(1 - f_v(E_1)), \quad (2.7)$$

o también, abreviando  $f_c(1 - f_v)$ . La tasa de transiciones de portadores con energía  $E_2$  en la banda de conducción a  $E_1$  en la banda de valencia es:

$$B_\rho(\omega)f_c(1 - f_v), \quad (2.8)$$

mientras que la tasa para el proceso inverso es:

$$B_\rho(\omega)f_v(1 - f_c), \quad (2.9)$$

siendo "B" el coeficiente de Einstein y  $\rho(\omega)$  la densidad de energía luminosa a la frecuencia  $\omega$ . Puesto que para tener emisión láser necesitamos que el número de transiciones radiactivas de la banda de conducción a la banda de valencia Ec.(2.8) sea mayor que el número de transiciones de absorción Ec.(2.9), necesitamos satisfacer la condición

$$f_c(1 - f_v) > f_v(1 - f_c), \quad (2.10)$$

lo que resulta en  $f_c > f_v$ , que es la condición para que la emisión estimulada sea el proceso dominante. Ésta es la condición de inversión de población para el láser semiconductor. Si incluimos las distribuciones de Fermi

$$f_v^{-1} = 1 + e^{(E-F_v)/kT} \quad (2.11)$$

$$f_c^{-1} = 1 + e^{(E-F_c)/kT} \quad (2.12)$$

la última condición se convierte en

$$f_c - f_v > E_2 - E_1 = \hbar\nu \quad (2.13)$$

y dado que  $E_2 - E_1$  nunca es menor que  $E_g$ , tenemos  $(F_c - F_v) > E_g$ , que es otra forma de expresar la condición de inversión de población. La potencia de salida de un láser semiconductor como función de la corriente de entrada se ilustra cualitativamente en la Fig. 2.11. En ella observamos dos zonas: una donde la potencia aumenta lentamente con la corriente, en la cual el proceso la emisión espontánea y la luz emitida es de naturaleza incoherente. En la segunda zona, la potencia aumenta rápidamente con la corriente y la energía luminosa es coherente por ser la emisión estimulada el proceso dominante.

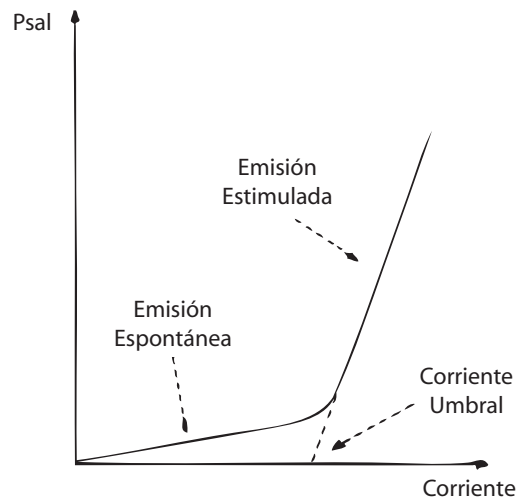


Figura 2.11: La potencia de salida de un láser semiconductor como función de la corriente de entrada.

La construcción práctica de un láser semiconductor se muestra esquemáticamente en la Fig. 2.12. Una pastilla de cristal semiconductor P-N tiene dos contactos, uno a cada tipo de semiconductor y, en dos caras paralelas, se hace un corte por fractura para que sirvan de espejos. Las caras serán paralelas entre sí y, debido al alto índice de refracción, en algunos casos no será necesario recubrir las caras que forman la cavidad. Para evitar que las otras caras puedan formar una cavidad, éstas se tallan o bien se les da un cierto ángulo. En los láseres de semiconductores como en los de gas, la longitud de la cavidad aumentará la coherencia espacial, pero



la absorción del medio impide que la longitud se agrande. Además, la brecha de energía en la unión es función de la presión, la temperatura y de la cantidad de contaminantes por lo que, mantener la monocromaticidad, es algo muy difícil. La energía térmica degrada rápidamente la condición de inversión de población, razón por la cual inicialmente muchos láseres de fase sólida semiconductor operaban a temperaturas de nitrógeno líquido y en forma pulsada. No obstante, ahora es fácil encontrar láseres económicos, continuos y de operación a temperatura ambiente.

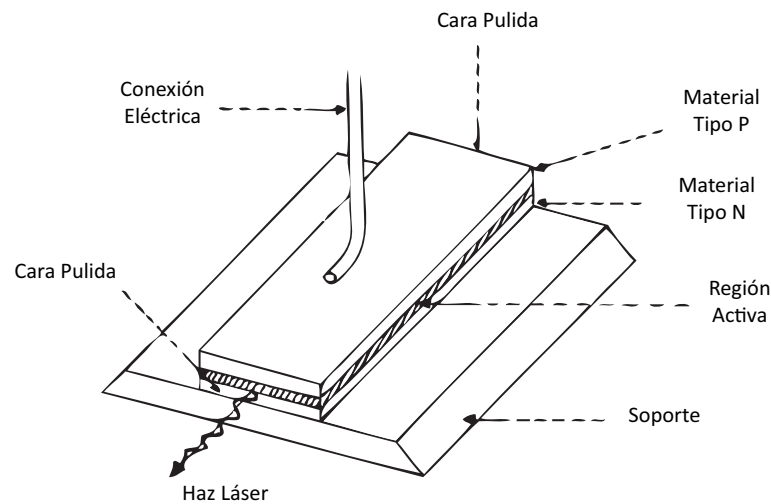


Figura 2.12: Construcción práctica de un láser semiconductor.

### 2.3.3. Algunas aplicaciones de los láseres de semiconductores.

Debido a su solidez, poco peso y pequeñas dimensiones, estos láseres encuentran aplicación en cualquier área tecnológico - científica que no demande un haz láser de muy alta intensidad y coherencia espacial. Actualmente, una de las principales aplicaciones de estos láseres está en sistemas electro-ópticos de comunicación, en los cuales las líneas de transmisión usadas son fibras ópticas. El uso de fibras ópticas tiene la ventaja de hacer al sistema prácticamente insensible a perturbaciones externas. Por otra parte, debido a que la frecuencia portadora (la luz) es del orden de  $10^{14}$  [Hz] existe teóricamente la posibilidad de modular la señal a frecuencias mucho mayores que las usadas en radio y microondas, lo cual abre la posibilidad de contar con canales de comunicación de contenido extremadamente alto de información. Sin embargo,

actualmente las frecuencias de modulación logradas son 105 veces menores que las que en teoría podrían permitir la frecuencia portadora. La Fig. 2.13, ilustra la idea básica de estos sistemas de comunicación. El emisor es, generalmente, un diodo láser, mientras que el detector es un fotodiodo. La unidad repetidora recibe la señal, la amplifica y la transmite nuevamente para contrarrestar los efectos de pérdidas y dispersión. Además, si la señal transmitida es digital, la unidad repetidora puede también restaurarla extrayendo ruido y distorsión. Principalmente debido a estas ventajas, se favorece la transmisión digital de información. Una línea telefónica requiere un ancho de banda de 4 [kHz] o 64 [Kb/s] si es transmitida digitalmente. Actualmente es posible transmitir hasta 50,000 conversaciones telefónicas simultáneamente usando una sola fibra óptica. Otra aplicación de los diodos láser, de mucha actualidad, se encuentra

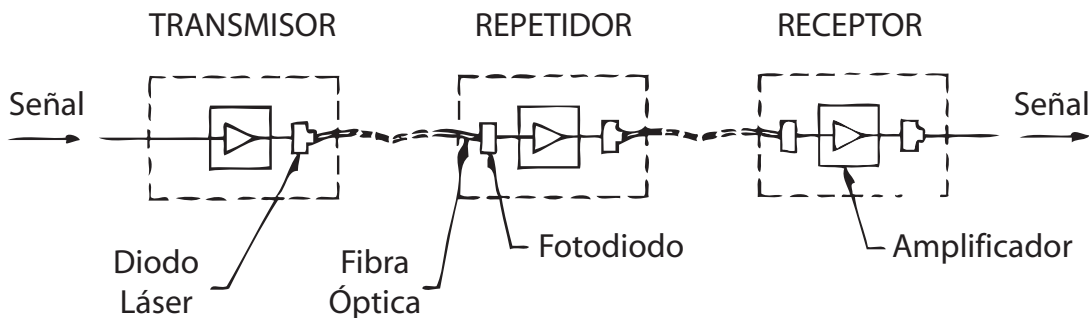


Figura 2.13: Aplicaciones de estos láseres en sistemas electro-ópticos de comunicación.

en los sistemas de lectura de discos ópticos compactos. Estos discos contienen información grabada digitalmente, por medio de perforaciones en una lámina metálica que es encapsulada en el plástico que constituye el disco compacto (poniendo a contraluz uno de estos discos, se puede apreciar la presencia de dichas perforaciones). La lectura de la información se realiza en la forma mostrada en la Fig. 2.14. Mientras el disco compacto gira, la presencia o ausencia de perforaciones es detectada por medio de la radiación láser reflejada en la superficie metálica del disco. Haciendo uso del detector mostrado en la misma figura, la radiación reflejada es convertida en una señal eléctrica digital cuyo procesamiento continúa por métodos electrónicos convencionales.

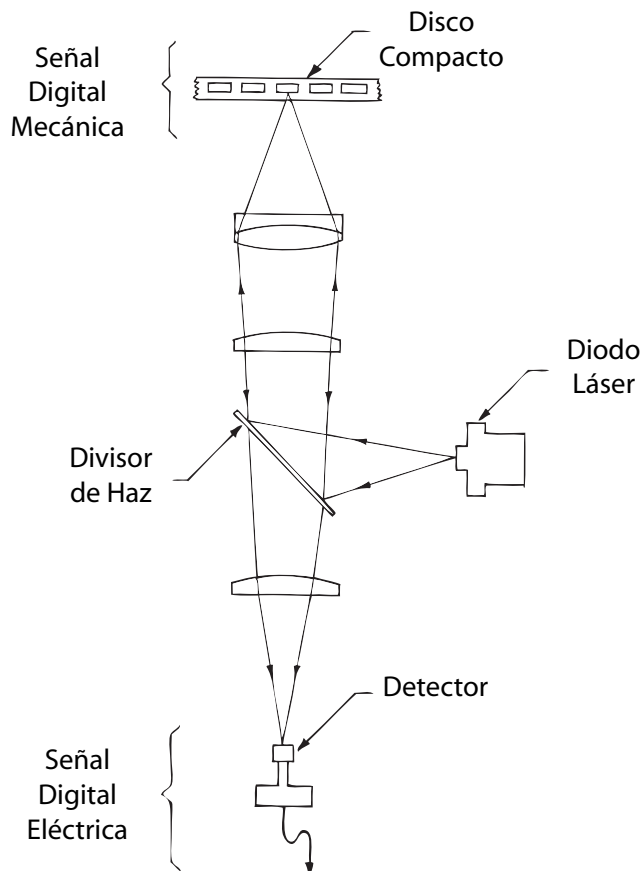


Figura 2.14: Aplicación de los diodos láser en sistemas de lectura de discos ópticos compactos.

## 2.4. Diodo láser.

Dentro del apartado de Láseres Semiconductores encontramos al diodo láser que es un dispositivo semiconductor similar a los diodos LED pero que bajo las condiciones adecuadas emite luz láser. A veces se los denomina diodos láser de inyección, o por sus siglas en Inglés LD o ILD.

### 2.4.1. Especificaciones de funcionamiento de los Diodos Láser

Los diodos láser (también llamado “láseres de inyección”) constituyen de hecho una forma especializada de LED. Al igual que un LED, que es una forma de diodo de unión P-N con una capa delgada de reducción donde los electrones y los huecos colisionan para crear fotones de luz, cuando el diodo está polarizado. La diferencia es que en este caso la parte “activa” de la capa de reducción (es decir, donde hay mayor flujo de corriente) se hace muy estrecha, para concentrar

los portadores. Los extremos de esta región activa son estrechos y también altamente pulidos, o cubiertos con varias capas muy finas de reflexión que actúan como espejos, por lo que se forma una cavidad óptica resonante. El nivel de corriente continúa también incrementándose, hasta el punto donde la densidad de corriente alcanza un nivel crítico cuando la inversión de población de portadores ocurre. Esto significa que hay más agujeros que electrones en la banda de conducción, y más electrones que huecos en la banda de valencia o en otras palabras, un exceso de electrones y de huecos que potencialmente se pueden combinar para liberar fotones. Y cuando esto sucede, la creación de nuevos fotones no puede producirse sólo por colisiones al azar de los electrones y los huecos, pero también por la influencia del paso de dichos fotones.

Al paso de los fotones estos son capaces de estimular la producción de más fotones, sin que ellos mismos sean absorbidos. Así que la acción del láser es capaz de producir: Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación. Y lo importante es darse cuenta de que los fotones que son accionados por otros fotones tienen la misma longitud de onda, y también están en fase con ellos. En otras palabras, terminan en sincronización formando así la radiación de onda continua coherente. Debido a la cavidad resonante, los fotones pueden, así, ir y venir de un extremo de la región activa a la otra, provocando la producción de fotones cada vez más en sintonía con ellos mismos. Así que mucha de la energía de luz coherente es generada. Y como los extremos de la cavidad no son totalmente reflectantes (típicamente alrededor de 90-95 %), parte de esta luz coherente puede dejar el chip láser para formar el haz de salida.

Debido a que la salida de luz láser es coherente, es muy baja en ruido y también más adecuada para usarla como “portadora” para comunicaciones de datos. El ancho de banda también tiende a ser más estrecho y mejor definidos que los LED’s, haciéndolos más convenientes para los sistemas ópticos en donde los rayos de luz deben reflejarse por separado o manipulados en función de su longitud de onda. El tamaño compacto de los diodos láser los hace muy adecuados para su uso en equipos reproductores de CD, DVD, MiniDisc y grabadoras. A medida que su luz está razonablemente bien colimada (aunque no tan bien como los láseres de gas) y centrada con facilidad, ellos también son utilizados en niveles ópticos como punteros láser compactos, escáner de código de barras, etc. Hay dos formas principales de diodo láser: el tipo horizontal, que emite una luz brillante de los extremos del chip, y la vertical o del tipo “superficie emisora”. Ambos funcionan de la manera que se acaba de describir, difieren principalmente en cuanto a la forma en que la luz activa la generación de la región y de la cavidad resonante que se forma en el interior del chip.

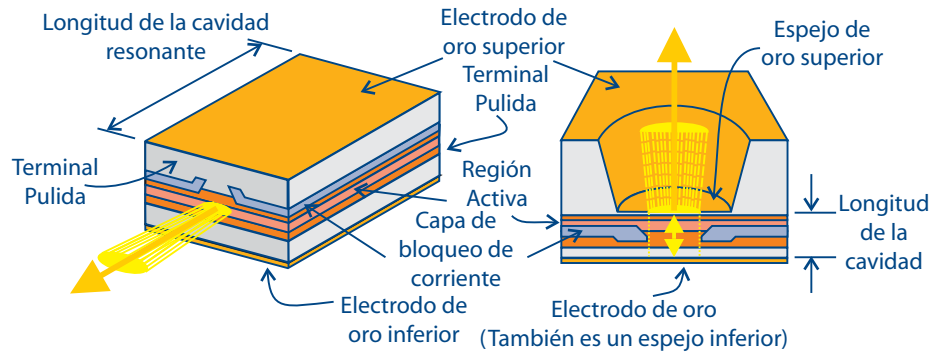


Figura 2.15: Los dos tipos principales de chip de diodos láser, horizontal (izquierda) y vertical (derecha).

Debido a que los diodos láser tienen una alta densidad de corriente para operar, y tienen una resistencia de entrada muy baja cuando la emisión del láser se produce, corren el riesgo de destruirse a sí mismos debido a escapes térmicos. Su densidad de luz de operación también puede elevarse a un nivel donde los espejos del final pueden empezar a derretirse. Como resultado de su funcionamiento eléctrico debe ser mucho más cuidadoso su control que el de un LED. Esto significa que no sólo la corriente debe ser regulada en un diodo láser por un circuito de “corriente constante” con solo una simple resistencia en serie, pero la realimentación negativa generalmente se debe utilizar también. Para garantizar que la salida óptica se mantiene a un nivel seguro constante. Para hacer esta realimentación óptica más fácil, la mayoría de los diodos láser tienen un PIN que es un fotodiodo de silicio integrado en el paquete, colocado de manera que automáticamente recibe una proporción fija de la salida del diodo láser. La salida de este diodo monitor se puede utilizar para controlar la alimentación de corriente a través del láser por el circuito de corriente constante, para un funcionamiento estable y fiable.

La Fig. 2.16, muestra un chip típico de láser “horizontal” montado en su paquete, con el fotodiodo monitor montado en la brida de la base debajo de la misma por lo que el diodo recibe la emisión de luz desde la parte “trasera” del chip láser.

La Fig. 2.17, muestra un circuito regulador de corriente utilizado para operar un pequeño diodo láser, y se puede ver cómo el fotodiodo monitor está conectado. El diodo monitor es la polarización directa de derivación de base para el transistor Q1, que tiene su tensión en el emisor fijada por el diodo Zener. Así que a medida que aumenta la salida del láser, el diodo monitor

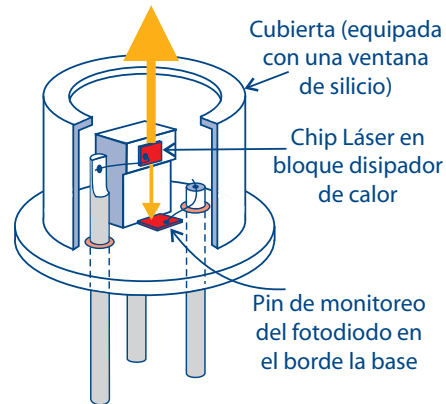


Figura 2.16: Como un chip láser típico “horizontal” está montado en su paquete, con el diodo de control incorporado capaz de percibir la salida.

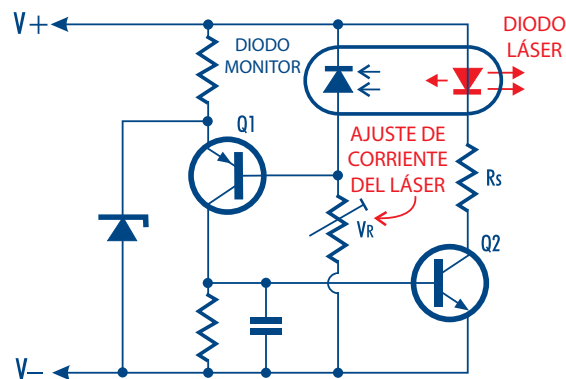


Figura 2.17: Se muestra como el diodo monitor se utiliza para controlar la corriente de operación del láser y la salida óptica, en un simple circuito de realimentación.

aumenta la corriente, la reducción de la conducción de  $Q1$  y que por lo tanto del transistor  $Q2$ , que controla el láser actual. Como resultado, el láser actual es automáticamente estabilizado a un nivel ajustado por  $V_R$  resistencia ajustable.

## 2.4.2. Parámetros del Diodo Láser.

Tal vez el parámetro clave para un diodo láser es la corriente de umbral ( $I_{TH}$ ), que es el nivel de corriente de interés, que es cuando el láser comienza a emitir por debajo de ese nivel de corriente el dispositivo ofrece una salida de luz, pero opera sólo como un LED en lugar de un láser. Así que la luz que se producen en este modo es incoherente. Otro parámetro importante es la salida de luz nominal ( $P_o$ ), que es el más alto nivel de salida de luz recomendado (en milivolts) para la

operación continua confiable. No es sorprendente que haya un nivel de corriente de operación ( $I_{OP}$ ) que corresponde a esta salida de luz nominal de la Fig. 2.18.

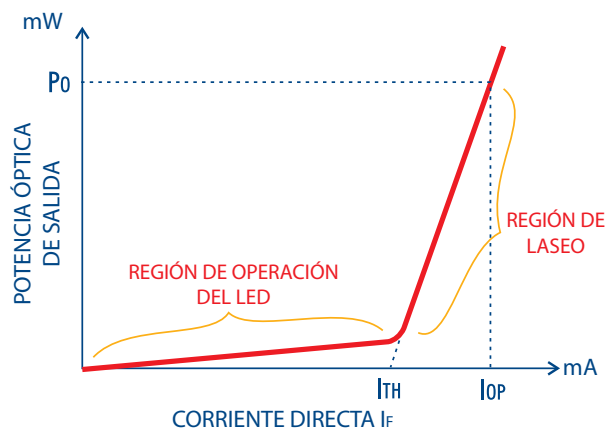


Figura 2.18: La emisión del láser se produce sólo en los niveles de corriente por encima de un valor crítico,  $I_{TH}$ .

Otros parámetros usualmente dados para un diodo láser son su punto más alto de longitud de onda de emisión con láser utilizada, dada en nanómetros (nm), y sus ángulos de divergencia del haz (definido como el ángulo lejos del eje antes de que caiga la intensidad de luz al 50%), en las direcciones X y Y (paralela a, y normal al plano del chip).

### 2.4.3. Ventajas de los Diodos Láser.

Aunque los láseres de gas He-Ne y Ión-Argón ofrecen una fiabilidad excepcional y una buena calidad óptica, los usuarios están sustituyéndolos rápidamente en sus aplicaciones OEM con tecnología de diodos láseres semiconductores. Los módulos de diodo láser ofrecen muchas ventajas físicas y electrónicas por encima de los láseres He-Ne e Ión-Argón.

### 2.4.4. Diferencias que existen con los láseres convencionales.

Los diodos láser se diferencian de los láseres convencionales, tales como el Helio-Neón (He-Ne), Ión-Argón, y tipos de gas, de varias maneras:

- Son muy eficientes (más del 20% de la energía suministrada se consigue en forma de radiación láser).

- Tienen vidas medias muy largas (estimadas en más de 100 años de operación continuada).
- Son baratos comparados con otras tecnologías (se construyen con técnicas de producción en masa utilizadas en la industria electrónica).
- Permiten la modulación directa de la radiación emitida, controlando la corriente eléctrica a través de la unión P-N. La radiación emitida es función lineal de la corriente, pudiéndose modular a décimas de GHz.
- Volumen y peso pequeños.
- Bajo umbral de corriente.
- Bajo consumo de energía.
- Banda del espectro estrecha, que puede llegar a ser de unos pocos kHz en diodos láser especiales.

#### **2.4.5. Algunas aplicaciones de los diodos láser.**

Los 50 años de historia del láser nos han llevado al siguiente escenario de la evolución de los láseres: Este es el siglo del diodo láser, donde éstos están entrando en el mercado de los láseres de alta potencia, habilitando la aplicación de proceso de materiales, como el soldado, fundido y cortado.

Los diodos láser están en todos lados estos días. Los diodos láser han sido integrados perfectamente en electrónica de consumo, equipos médicos y muchas otras aplicaciones. Recientemente se han convertido en poderosas fuentes de luz, que son capaces de entregar potencia en el orden de kilowatts.

Los diodos son utilizados para procesar directamente materiales, tales como soldaduras de metal y plásticos. Históricamente, las aplicaciones de soldadura se han basado en láseres de fase sólida con lámparas de bombeo.

Durante los últimos años, sin embargo, tales láseres han sido ampliamente reemplazados por láseres de fase sólido con diodos de bombeo que incluyen fibras y discos compactos para la transferencia de información. Siempre ha sido un sueño usar diodos láser directamente, los cuales conviertan la corriente eléctrica en luz láser de alta eficiencia, evitando tener que usar un disco o una fibra.



La evolución de emisión láser asegurará diseños compactos, sistemas láser eficientes y robustos. Previamente, la mala calidad del rayo y la baja potencia de los diodos láser han impedido ser utilizados con éxito en aplicaciones de alto brillo. Ahora, sin embargo, los láseres son capaces de lograr el alto brillo que se necesita para el soldado de penetración profunda.

### **El futuro.**

Es posible soldar con un diodo láser de alto brillo de 3 [kW]. La penetración lograda es comparable con un láser de fase sólida con lámpara de bombeo de 3.3 [kW]. La calidad de la superficie soldada es muy alta.

El soldado de penetración profunda usando diodos láser, ha llegado a ser una realidad. Esto puede ser considerado como el primer paso dentro del mercado del láser de alta potencia, donde el cortado con láser predomina. La calidad de haz que se necesita para lograr el cortado con láser es de  $5[\text{mm} \cdot \text{mrad}]$  de una fibra de  $100[\mu\text{m}]$  en un rango múltiple de kilowatts es un reto. Los láseres semiconductores de alta potencia se están desarrollando rápidamente. Las potencias logradas por este dispositivo están creciendo, la eficiencia se está incrementando y el umbral de daño se está mejorando continuamente.

Una ventaja del diodo láser no ha sido completamente explotada aún. En principio, sobre un intervalo amplio de longitudes de onda, cualquier longitud de onda deseada puede ser bien estabilizada. En el siglo del diodo láser, las posibilidades son vastas e inspiradoras.[8]



Figura 2.19: Un láser puede cortar hojas de acero con características y formas distintas