



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE COMUNICACIÓN
ÓPTICA



“Realización de un dispositivo en base de un Diodo Láser”

TESIS

Para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias Aplicadas

Presenta:

Mario Echenique Lima

Asesor: Dr. Andrei Yu. Gorbachev
CoAsesor: M. I. Griselda Rodríguez Pedroza

A mis Padres

Mi agradecimiento al Dr. Andrei Gorbachev por toda su experiencia, por ser mi guía durante esta tesis y un buen amigo. Gracias a la M.I. Griselda por su apoyo y sus consejos. Al Dr. Raúl Balderas por su apoyo y su amistad de siempre. Al Dr. V. Michournyi por su actitud tan maravillosa de compartir conocimiento. A Ismael Lara por ser un excelente compañero, este trabajo también es suyo.

También quiero agradecer a Pedro Viramontes, Francisco Ramírez Arenas, Edgar Cerda, Irving Vargas, Héctor Pérez Ladrón de Guevara, José Manuel Flores Camacho, Manuel Pérez Caro, Luis Zamora y Medel, Dr. Alfonso y Luis Felipe Lastras, Dr. Guel, Dr. Victor Hugo Méndez, al M.C. Oscar Núñez, Ezequiel Ontiveros y a Joaquín que me ayudó en el diseño mecánico de una mezcladora para ataques químicos y otras cosas. Agradezco también a mi familia, a Alejandro el Pájaro, Mario Motilla y a Cristina Padrón por su apoyo y paciencia durante el desarrollo de esta tesis.

Quiero agradecer al IICO-UASLP por abrir de una manera muy especial sus puertas, a mi y a mis compañeros, y por la oportunidad que nos brinda para aprender, para hacer amigos y prepararnos para la vida.

Contenido

Introducción	1
--------------	---

Capítulo I Conceptos Generales

1.1	Discusión general	3
1.2	Emisión y absorción en semiconductores	4
1.2.1	Inversión de población	12
1.2.2	Emisión estimulada inducida por un fotón	12
1.3	Elementos básicos de diodos semiconductores láser	13
1.4	Ganancia óptica y condición umbral	16
1.5	Conclusiones	19

Capítulo II Contactos Óhmicos y su caracterización

2.1	Discusión general	20
2.2	Contactos Metal-Semiconductor	20
2.3	Tecnología de contactos de tira	23
2.3.1	Contacto de tira con dieléctrico	25
2.4	Proceso Fotolitográfico	26
2.5	Deposición de metales por evaporación	30
2.6	Clivado de chips	31
2.7	Características V-I en una unión p-n	34
2.7.1	Método de Caracterización	34
2.8	Materiales utilizados	35
2.8.1	Discusión de resultados	36
2.9	Conclusiones	37

Capítulo III Caracterización de emisión láser

3.1	Discusión general	38
3.2	Estructura láser	40
3.3	Caracterización de emisión por la técnica de electroluminiscencia	40
3.3.1	Ancho espectral	42
3.3.2	Modos en la cavidad Láser	44

3.4	Resultados	45
3.4.1	Tablas de resultados	54
3.4.2	Análisis de resultados	56
3.5	Conclusiones	57

Capítulo IV Construcción de un dispositivo usando chips DL

4.1	Introducción	58
4.2	Fijado de chip sobre disipador	58
4.3	Interconexiones del dispositivo	60
4.4	Fuente de bombeo del dispositivo	62
4.5	Conclusiones	64

APÉNDICE A	66
-------------------	----

Receta del Proceso fotolitográfico para la obtención de contactos de tira

APÉNDICE B	68
-------------------	----

Datos técnicos del dieléctrico (Spin On Glass)

APÉNDICE C	70
-------------------	----

Datos técnicos de la resina fotosensible y de la fuente UV

APÉNDICE D	71
-------------------	----

Cálculo del espesor de la capa depositada por medio de la técnica de deposición por evaporación de metales

APÉNDICE E	73
-------------------	----

Medición de características V-I en chips de contacto de área ancha

APÉNDICE F	77
-------------------	----

Wirebonding (enlace ó interconexión por medio de alambre)

BIBLIOGRAFÍA	80
---------------------	----

INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta tesis es el desarrollo de la tecnología de postrecimiento de fabricación de un dispositivo diodo láser (DL) con resonador Fabry-Perot.

Los procesos envueltos en esta tecnología son los de fotolitografía, creación de contactos óhmicos y caracterización de estructuras láser. La estructura Láser de SCH (Heteroestructura de confinamiento separado) utilizada en este proyecto fue crecida en Lasertel por el método de MBE (Epitaxia por haces moleculares) la cual emite en el infrarrojo y puede ser aplicada para bombeo de láseres de estado sólido.

Estos procesos son muy importantes en la industria de semiconductores, y no son exclusivos de la construcción de diodos láseres semiconductores, en esencia estos procesos se utilizan en la fabricación de cualquier dispositivo semiconductor convencional, sea optoelectrónico o no, desde dispositivos simples como los son diodos y transistores, hasta circuitos integrados, microprocesadores y celdas solares.

Es importante mencionar que en las industrias transnacionales de semiconductores, los procesos están perfectamente caracterizados y optimizados utilizando herramientas más precisas, costosas y procesos automatizados, y que además cuentan con recursos tecnológicos, humanos y conocimientos científicos invaluable. En una industria tan competitiva cada empresa posee sus tecnologías propias, y algunos detalles finos de los procesos son celosamente guardados.

Durante el desarrollo de esta tesis se tratan los detalles fundamentales de cada proceso, retomando el trabajo que se ha hecho en este instituto por estudiantes e investigadores con el propósito de llevar a término la elaboración de un dispositivo láser.

El Capítulo I titulado "Conceptos Generales" habla de los materiales para la construcción de dispositivos semiconductores láser, así como los elementos básicos de un diodo láser semiconductor y las condiciones de emisión y amplificación láser.

El Capítulo II titulado "Contactos Óhmicos" trata de la técnica de metalización de contactos en la superficie de semiconductores con el fin de inyectar corriente al dispositivo.

El Capítulo III titulado "Caracterización de emisión láser", se habla de la estructura semiconductor Láser utilizada para la construcción del dispositivo, y se menciona la técnica de caracterización para la evaluación y determinación del rango de emisión óptica de chips láser.

El Capítulo IV titulado "Construcción de un dispositivo usando chips DL" habla del acondicionamiento del dispositivo para su operación.

CAPITULO I

Conceptos Generales

1.1 Discusión general

Láser, acrónimo del término en inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation se define como una zona de ganancia de radiación electromagnética localizada en una cavidad resonante. Las estructuras láser semiconductoras necesitan:

- Un medio que proporciona la ganancia óptica por emisión estimulada,
- Una guía óptica que confina fotones en la zona activa del material,
- Una cavidad resonante que asegure las reflexiones múltiples de la radiación en la zona activa.

La ganancia óptica de los primeros láseres semiconductores realizados sobre GaAs fueron obtenidos por inyección de electrones y de huecos a través de una unión GaAs-p GaAs-n [Hall 1] solamente dos años después de la realización del primer láser de rubí [Mainman 2]. La idea era de aprovechar la estructura de bandas de conducción (BC) y de valencia (BV) para crear una zona de recombinación radiativa privilegiada (zona activa) entre los electrones de la BC y los huecos de la BV. Más tarde, los progresos realizados en el crecimiento cristalino de estructuras semiconductoras permitieron la realización de láseres de inyección de doble heteroestructura, láseres de pozos cuánticos, de hilos cuánticos y poco después láseres puntos cuánticos entre otras tecnologías.

Los láseres semiconductores, gracias a las posibilidades de crecimiento de estructuras semiconductoras ofrecidas por las técnicas de epitaxia por haces moleculares (MBE), epitaxia metalorgánica en fase gaseosa (MOVPE), y epitaxia en fase líquida (LPE), han llegado a ser en los últimos años particularmente funcionales. Estos láseres de tamaño reducido, poco costo, robustos, utilizables a temperatura ambiente y en modo continuo en el espectro visible y el infrarrojo cercano, operan con débil alimentación eléctrica, poseen múltiples aplicaciones en el dominio de la comunicación (almacenamiento, transmisión de lectura datos, lectura de CDs y de DVDs, conexiones de alta transmisión por fibra óptica), en metrología (telemetría láser, LIDAR, análisis de gases, espectroscopía en el infrarrojo), en medicina (ORL, oftalmología, dermatología, cancerología), en el dominio militar (contra-medidas, interferencia, guía de misiles).

Los diferentes tipos de materiales utilizados para la realización de láseres semiconductores se muestran en la *figura 1.1* en función de la longitud de onda de emisión. En el dominio del espectro visible (0.4-0.8 μm) y en el infrarrojo cercano (0.8-2.0 μm) estos utilizan materiales en base de los compuestos GaN, GaAs y InP. En el dominio del infrarrojo medio (MIR, 2-5 μm) los compuestos en base de antimonuros, sobre sustratos GaSb, InAs. En el infrarrojo (IR), más allá de 5 μm , se utilizan compuestos en base de plomo.

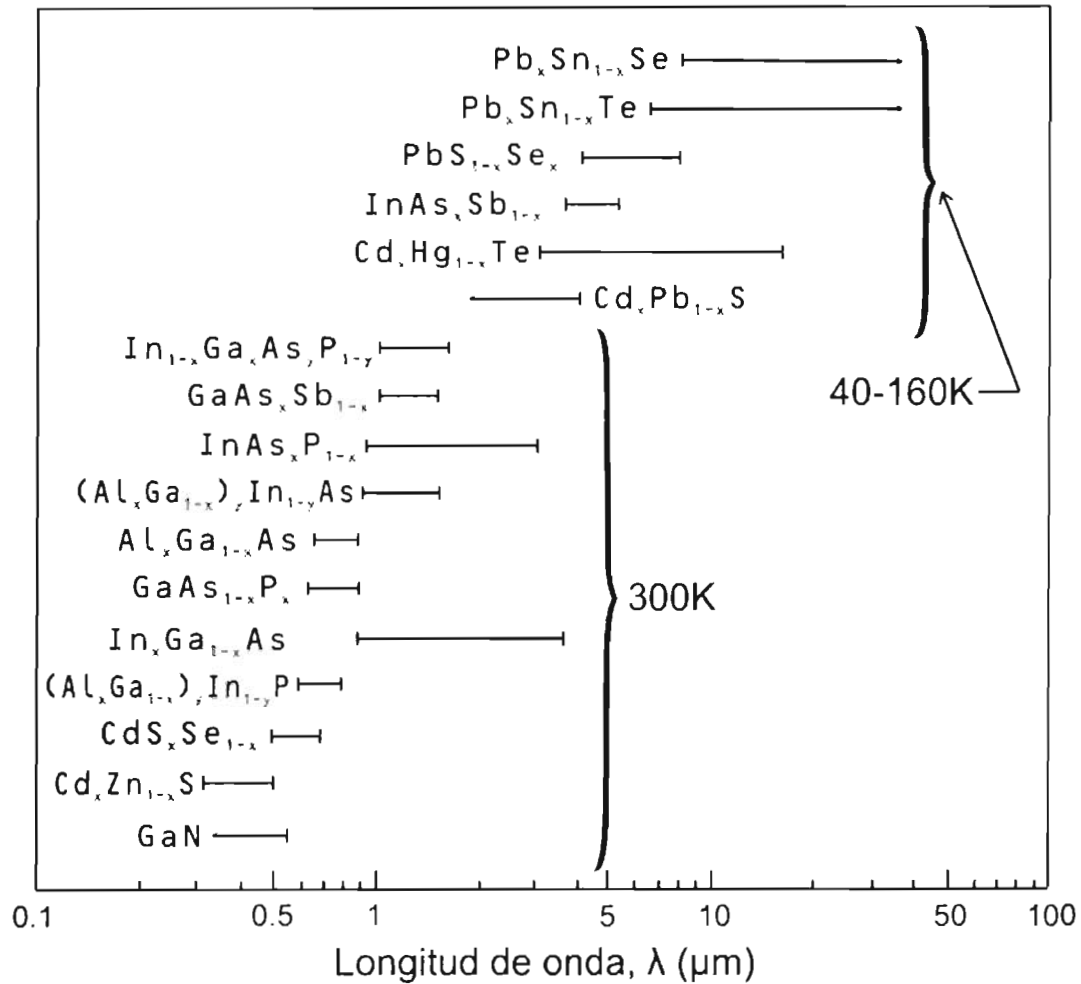


Figura 1.1. Se muestran los rangos de emisión (λ) para diferentes tipos de materiales utilizados en la realización de láseres semiconductores.

En este capítulo se hablará de las consideraciones fundamentales que se deben de tomar en cuenta en la construcción de láseres semiconductores, abordando conceptos físicos básicos para su construcción y operación, lo cuál nos permitirá considerar problemas básicos tecnológicos para el desarrollo de un dispositivo en base a un diodo láser.

1.2 Emisión y absorción en semiconductores

Los láseres de gas y de estado sólido tienen niveles de energía que son casi tan delgados como los niveles de energía de átomos aislados. En semiconductores, estos niveles de energía son engrosados en bandas de energía debido al traslape de los orbitales atómicos. En un semiconductor sin excitación externa a temperatura de $T = 0K$, la banda de conducción, está completamente vacía y la banda de energía por debajo de la banda de conducción, llamada banda de valencia, esta completamente llena con electrones. Las bandas de conducción y de valencia están separadas por un una banda prohibida (gap) de

energía, que tiene un valor de $E_g \sim 0.5-2.5 \text{ eV}$ (materiales III-V) para materiales semiconductores con los que los diodos láseres están contruidos.

Dos tipos de portadores contribuyen a la conducción electrónica, estos son electrones en la banda de conducción y huecos (vacancias de electrones) en la banda de valencia. Un electrón libre tiene energía cinética de $E = p^2/(2m_0)$ donde $m_0 = 9.109534 \times 10^{-31} \text{ kg}$ es la masa en reposo del electrón libre y p el momento mecánico. Cuando es tratada como una partícula mecánica-cuántica, el momento $p = \hbar k$ es proporcional al número de onda $k = 2\pi/\lambda$ con la constante de Planck reducida $\hbar = h/(2\pi) = 6.582173 \times 10^{-16} \text{ eV}$ y con longitud de onda λ . De esta manera, para un electrón libre, la dependencia de energía contra número de onda es $E(k) = (\hbar^2 k^2)/(2m_0)$. En semiconductores, las energías del electrón en la banda de conducción $E_c(k)$ y en la banda de valencia $E_v(k)$ se comportan con similitud para valores pequeños de k .

$$E_c(k) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \quad E_v(k) = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h} \quad (1)$$

La *figura 1.2* muestra el comportamiento llamado aproximación de portadores cuasi-libres. La interacción de los portadores con la red de estado sólido es tomada en cuenta para la introducción de masas efectivas para los electrones m_e y para los huecos m_h que en general difieren de la masa libre del electrón m_0 . Como la dependencia de $E(k)$ en la banda de valencia es una curva negativa parabólica, los huecos pueden ser considerados como partículas con masa positiva.

Las transiciones banda-banda son generación y recombinación de pares electrón-hueco asociados a la absorción y emisión de fotones. Para estas transiciones, la conservación de energía E y momento $\hbar k$ tienen que cumplirse. Debido al alto valor de la velocidad de la luz en el vacío $c_0 = 2.997\,925 \times 10^{10} \text{ cm/s}$, el momento del fotón $\hbar k = \hbar \omega / c_0 = E_{ph} / c_0$ para energías del fotón E_{ph} en el rango de $0.5-2.5 \text{ eV}$ puede ser despreciado en comparación con el momento de los portadores electrónicos. De esta forma, la transición radiativa entre un electrón en la banda de conducción con energía $E_2(k_2)$ y un hueco en la banda de valencia con energía $E_1(k_1)$ bajo la emisión o absorción de un fotón puede solamente ocurrir al mismo número de onda k .

$$E_{ph} = \hbar \omega = E_2 - E_1, \quad k_2 = k_1 \quad (2)$$

Como se mostró en la *figura 1.2*, estas transiciones pueden ser ilustradas con flechas verticales de longitud de la energía del fotón $\hbar \omega$ apuntando hacia arriba para generación de un par electrón-hueco y hacia abajo para recombinación. En equilibrio térmico, los portadores tienden a ocupar los estados de más baja energía. Para electrones, estos son estados en el mínimo de la banda de conducción. En el eje ordenado de este diagrama de bandas, la energía del electrón $E(k)$ es graficada; por lo tanto, el mínimo de energía para huecos cargados positivamente es el máximo de la banda de valencia. El máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de la banda de conducción de semiconductores directos están ambos localizados en el punto $k = 0$. En semiconductores indirectos como el

silicio y el germanio, el mínimo y máximo tienen distintos valores de k ; por lo tanto, las recombinaciones banda-banda solo pueden ocurrir con la contribución de fonones y trampas. Estas transiciones no son convenientes para la actividad láser, pues la densidad espacial de fonones y trampas debe ser muy pequeña. Además, estas transiciones son en su mayoría no radiativas.

En equilibrio térmico a temperatura T , la probabilidad de que un estado con nivel de energía E esté ocupado por electrones es expresado por la función de Fermi $f(E, T)$.

$$f(E, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right) + 1} \quad (3)$$

A $T = 0K$, la función de Fermi es una función escalón la cual tiene un valor de 1 (todos los estados electrónicos están llenos) por debajo del nivel de Fermi E_F y un valor de 0 (todos los estados vacíos) para energías más altas. En semiconductores sin dopar, el nivel de Fermi se encuentra en la mitad de los bordes de la banda de conducción y la de valencia. Para temperaturas más altas T , la función de Fermi está en términos de $E_F \pm 2k_B T$.

Para un fotón dado con energía $\hbar\omega$, es completamente correcto considerar solo dos niveles discretos de energía $E_1(k_1)$ y $E_2(k_2)$ puesto que la transición solo puede ocurrir al mismo número de onda como se ilustra en la *figura 1.2*.

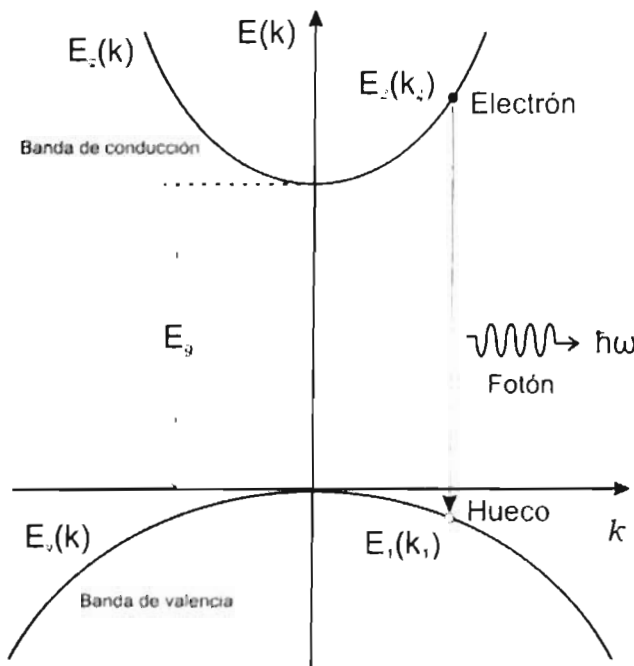


Figura 1.2. Estructura parabólica de bandas $E(k)$ para electrones en un semiconductor directo. La banda de conducción está separada de la banda de valencia por un "gap" de energía E_g . La recombinación entre un electrón con $E_2(k_2)$ en la banda de conducción y un hueco con $E_1(k_1)$ en la banda de valencia genera un fotón con energía $\hbar\omega$. Como el momento de un fotón $\hbar k$ es insignificamente pequeño, las transiciones radiativas de electrones entre las bandas de conducción y de valencia solo ocurren a un mismo número de onda k .

Existen tres tipos de transiciones radiativas banda-banda en los semiconductores, estas son ilustradas en la *figura 1.3*.

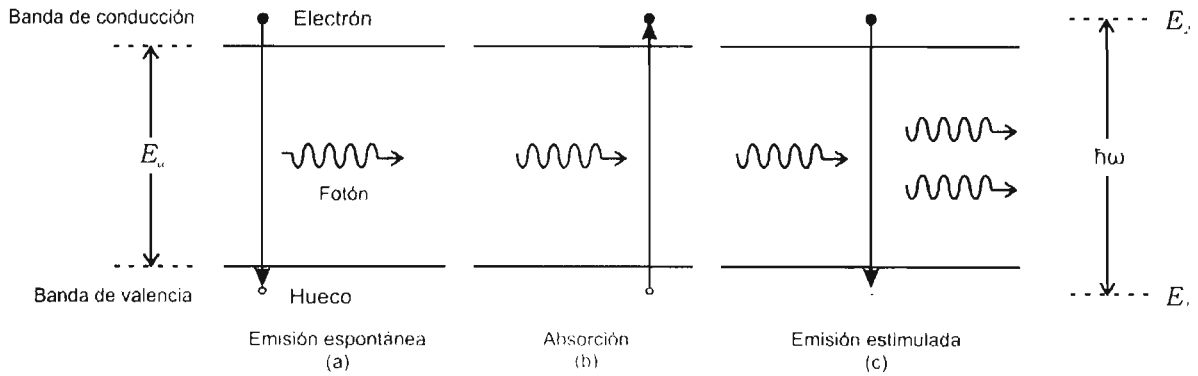


Figura 1.3. Transiciones radiativas banda-banda en semiconductores.

El primer proceso es llamado emisión espontánea, donde la recombinación de un par electrón-hueco provoca a la emisión de un fotón (*figura 1.3(a)*). Este proceso es predominante en diodos emisores de luz (LEDs). La emisión de un fotón es aleatoria en dirección y fase, esto resulta en radiación no coherente. Como este proceso depende de la existencia de un electrón de energía E_2 y un hueco de energía E_1 simultáneamente, la razón de transición para la emisión \mathcal{R}_{SP} es proporcional al producto de la densidad de electrones en E_2 y la densidad de huecos en E_1 .

Por lo tanto la densidad de electrones de energía E_2 es el producto de la densidad de estados electrónicos $g(E_2)$ y la probabilidad de que estén ocupados por electrones esta dada por la función de Fermi $f(E_2, T)$. La densidad de huecos de energía E_1 es la densidad de estados $g(E_1)$ multiplicada con la probabilidad de no estar ocupada por electrones $[1 - f(E_1, T)]$. Entonces, la razón de transición por volumen de fotones de emisión espontánea con una energía fija $\hbar\omega = E_2 - E_1$ puede ser escrita como:

$$\mathcal{R}_{SP} = A g(E_2) f(E_2, T) g(E_1) [1 - f(E_1, T)], \quad (4)$$

donde A es la constante de proporcionalidad de la emisión espontánea.

La absorción, llamada también absorción estimulada, es el segundo proceso ilustrado en la *figura 1.3*. Cuando un fotón es absorbido un par electrón-hueco es generado. Este es un proceso de tres partículas y la razón de transición \mathcal{R}_{12} por lo tanto es proporcional al producto de las densidades de tres partículas: primero, la densidad de estados no ocupados $g(E_2) [1 - f(E_2, T)]$ en la banda de conducción de energía E_2 , segundo, la densidad de estados ocupados por electrones $g(E_1) f(E_1, T)$, en la banda de valencia de energía E_1 , y el tercero, la densidad de fotones $\rho(\hbar\omega)$ con energía $\hbar\omega = E_2 - E_1$. De esta manera se aprecia que:

$$\mathcal{R}_{12} = B_{12} \rho(\hbar\omega) g(E_1) f(E_1, T) g(E_2) [1 - f(E_2, T)], \quad (5)$$

B_{12} es la constante de proporcionalidad de la absorción estimulada.

El tercer proceso es la emisión estimulada. La recombinación de un par electrón-hueco es estimulada por un fotón y un segundo fotón es generado simultáneamente con la misma dirección y fase que el primer fotón. El proceso puede ser utilizado para amplificar

radiación óptica, pues los fotones son emitidos en un modo óptico del fotón estimulado, el resultado es radiación coherente. Las fuentes de luz basadas en este proceso se llaman láseres, que es la abreviación de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". De manera análoga a la absorción estimulada, la razón de transición \mathcal{R}_{21} para la emisión estimulada puede ser escrita como

$$\mathcal{R}_{21} = B_{21} \rho(\hbar\omega) g(E_2) f(E_2, T) g(E_1) [1 - f(E_1, T)], \quad (6)$$

B_{21} es la constante de proporcionalidad de la emisión estimulada.

Cuando un semiconductor está en equilibrio térmico con los fotones, no hay energía transferida del semiconductor al campo de radiación óptica, por lo tanto, la absorción y la emisión deben estar balanceadas:

$$\mathcal{R}_{12} = \mathcal{R}_{21} + \mathcal{R}_{SP} \quad (7)$$

Usando (4), (5), y (6) para las razones \mathcal{R}_{SP} , \mathcal{R}_{12} y \mathcal{R}_{21} respectivamente, tenemos que

$$\frac{B_{21}\rho(\hbar\omega) + A}{B_{12}\rho(\hbar\omega)} = \frac{f(E_1, T)[1 - f(E_2, T)]}{f(E_2, T) - [1 - f(E_1, T)]} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{B_{21} + A}{B_{12} \rho(\hbar\omega)} &= \frac{f(E_1, T) - f(E_1, T)f(E_2, T)}{f(E_2, T) - f(E_1, T)f(E_2, T)} \\ &= \frac{1}{f(E_2, T)} \frac{1 - f(E_1, T)}{1 - f(E_1, T)f(E_2, T)} \end{aligned} \quad (9)$$

La densidad espectral $\rho(\hbar\omega)$ en equilibrio térmico no depende de la función específica de densidad de estados $g(E)$. Insertando la función de distribución de Fermi $f(E, T)$ de (3) y utilizando la relación $\hbar\omega = E_2 - E_1$ (2), tenemos que

$$\begin{aligned} \frac{B_{21} + A}{B_{12} \rho(\hbar\omega)} &= \frac{\exp\left(\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)}{\exp\left(\frac{E_1 - E_1}{k_B T}\right)} \\ &= \exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\rho(\hbar\omega) = \frac{A}{B_{12} \exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - B_{21}} \quad (11)$$

La densidad de energía espectral $u(\nu)d\nu$ a una frecuencia ν en un medio con un índice de refracción n de radiación en equilibrio térmico está dada por la fórmula de Planck para la radiación de cuerpo negro.

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h n^3 \nu^3}{c_0^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} d\nu, \quad (12)$$

donde:

$$\rho(\nu) = \frac{dN(\nu)}{d(\nu)} = \frac{8\pi n^3 \nu^2 V}{c_0^3} \quad - \quad \text{Es la densidad de modos por unidad de frecuencia } (\nu) \text{ cerca de } \nu \text{ en un resonador de volumen } V.$$

$$f(\nu) = \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \quad - \quad \text{Es la función de distribución de Bose-Einstein para } \alpha \rightarrow 0 \text{ siendo } T \text{ pequeño.}$$

$$E(\nu) = h\nu \quad - \quad \text{La energía del fotón}$$

Dividiendo la densidad de energía $u(\nu)$ por la energía del fotón $h\omega$, tenemos la densidad de fotones $\rho(h\omega)$. Adicionalmente, las relaciones $\omega=2\pi\nu$, $h=2\pi\hbar$, y $d(h\omega)=d(h\nu) h d\nu$ son usadas.

$$\rho(h\omega)d(h\omega) = \frac{n^3 (\hbar\omega)^2}{\pi^2 \hbar^3 c_0^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right) - 1} d(h\omega). \quad (13)$$

En equilibrio térmico de un material semiconductor con el campo de radiación, la densidad espectral de un fotón es descrita por (11) debe ser idéntica a la densidad de fotón en la radiación de cuerpo negro descrita por (13). Comparando estas ecuaciones tenemos que

$$B_{12} = B_{21} = B, \quad A = \frac{n^3}{\pi^2 \hbar^3 c_0^3} (\hbar\omega)^2 B. \quad (14)$$

Con el conocimiento de estas relaciones entre las constantes de proporcionalidad, las consideraciones pueden ser extendidas a condiciones de no equilibrio. Cuando una unión p-n es polarizada positivamente, electrones y huecos son inyectados a la región de deserción donde se pueden recombinar o viajar más allá, hacia el otro lado de la junta y recombinarse entre los portadores mayoritarios. En la zona de transición, los electrones y huecos coexisten, la distribución de portadores no puede ser descrita por una sola función de Fermi en equilibrio (3). En lugar de eso son usadas cuasi funciones de Fermi separadas para los electrones en la banda de conducción $f_c(E,T)$ y para huecos en la banda de valencia $f_v(E,T)$.

$$f_c(E, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_{F_c}}{k_B T}\right) + 1}, \quad f_v(E, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_{F_v}}{k_B T}\right) + 1} \quad (15)$$

Las ecuaciones son idénticas a las funciones de Fermi en equilibrio pero diferentes niveles de energías de Fermi E_{F_c} y E_{F_v} son usados para las distribuciones de portadores en las bandas de conducción y de valencia respectivamente. La situación de no equilibrio puede ser descrita reemplazando $f(E_1, T) \rightarrow f_v(E_1, T)$ y $f(E_2, T) \rightarrow f_c(E_2, T)$.

Para determinar si una onda óptica con energía cuántica $\hbar\omega$ es absorbida o amplificada por emisión estimulada, el cociente de las correspondientes razones \mathcal{R}_{12} y \mathcal{R}_{21} es calculado.

$$\begin{aligned} \mathcal{R}_{12} / \mathcal{R}_{21} &= \frac{f_v(E_1, T)[1 - f_c(E_2, T)]}{f_c(E_2, T) - [1 - f_v(E_1, T)]} = \frac{f_v(E_1, T) - f_v(E_1, T)f_c(E_2, T)}{f_c(E_2, T) - f_v(E_1, T)f_c(E_2, T)} \\ &= \frac{1}{f_c(E_2, T)} - 1 = \frac{\exp\left(\frac{E_2 - E_{F_c}}{k_B T}\right)}{f_c(E_2, T)} \\ &= \frac{1}{f_v(E_1, T)} - 1 = \frac{\exp\left(\frac{E_1 - E_{F_v}}{k_B T}\right)}{f_v(E_1, T)} \\ &= \exp\left(\frac{\hbar\omega - (E_{F_c} - E_{F_v})}{k_B T}\right). \end{aligned} \quad (16)$$

En equilibrio térmico $E_{F_c} = E_{F_v} = E_F$, el exponente $[\hbar\omega/(k_B T)]$ es positivo, la función exponencial es más grande que 1, y por lo tanto la razón de absorción \mathcal{R}_{21} es siempre más grande que la razón \mathcal{R}_{12} de la emisión estimulada. La operación láser en semiconductores solo puede ser lograda si la condición

$$E_{F_c} - E_{F_v} > \hbar\omega > E_g \quad (17)$$

se cumple. En ese caso, que es llamado inversión, la función exponencial es más pequeña que 1 y la razón de emisión estimulada es más grande que la razón de absorción. La operación láser requiere un proceso llamado bombeo que acumula y mantiene una distribución de no equilibrio de portadores en el material semiconductor. De (16) puede ser deducido que una transición activa láser siempre muestra absorción en equilibrio térmico. Aunque el bombeo también puede ser provisto por excitación óptica de pares electrón-hueco, una ventaja fundamental de los láseres semiconductores sobre otros tipos de láseres es el hecho de que éstos pueden ser fácilmente bombeados con corrientes eléctricas como un diodo semiconductor en polarización directa como se muestra en la *figura 1.4*. Por esta razón, los láseres semiconductores bombeados eléctricamente son llamados diodos láser.

Un tipo de diodo láser eficiente utiliza heteroestructuras dobles p-i-n polarizadas positivamente para lograr la inversión de portadores. En este tipo de estructura, una capa semiconductor no dopada con un gap directo es emparedado entre un material dopado tipo

“p” y otro dopado tipo “n” con gaps mayores. Cuando la unión es polarizada positivamente, los cuasi-niveles de Fermi E_{F_c} y E_{F_v} en la capa intrínseca son localizados dentro de la banda de conducción y de valencia como se ilustra en la *figura 1.4*. De esta manera, la región actúa como una capa activa láser que amplifica la radiación óptica con emisión estimulada. Además, las heteroestructuras dobles tienen dos ventajas adicionales. En primer lugar, los portadores (electrones y huecos) son confinados entre las dobles heterobarreras en la banda de conducción y de valencia y por lo tanto forzados a recombinarse dentro de la capa intrínseca del material semiconductor directo. En segundo lugar, esta secuencia de capas funcionan como una guía de onda óptica puesto que para la mayor parte de los sistemas de materiales semiconductores, la capa activa (capa de menor gap) de la estructura tiene un índice de refracción más alto.

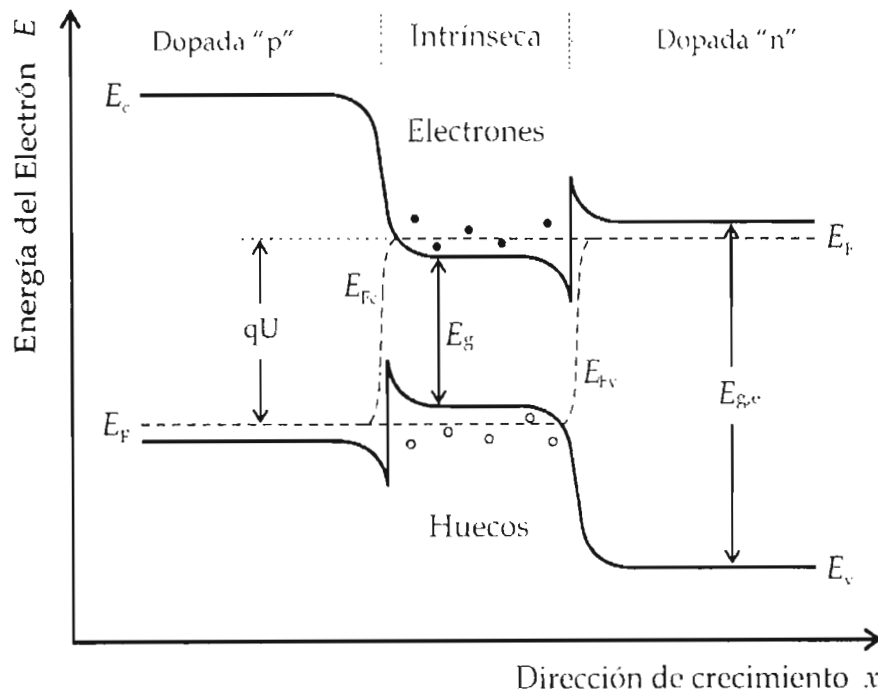


Figura 1.4. Doble heteroestructura de unión p-i-n con polarización directa donde se cumple:
 $E_{F_c} - E_{F_v} > \hbar\omega > E_g$
 Los bordes de las bandas de conducción E_c y de valencia E_v son graficados en líneas sólidas. El nivel de energía de Fermi E_f , representado por líneas punteadas, se divide en los cuasi-niveles de Fermi E_{F_c} y E_{F_v} en la región de transición no dopada, donde huecos y electrones coexisten. En esta región, la inversión es lograda pues los cuasi-niveles de Fermi están dentro de las bandas.

Para determinar que proporción de portadores se recombinan por emisión estimulada y espontánea, la razón entre \mathcal{R}_{12} y \mathcal{R}_{SP} es determinada.

$$\mathcal{R}_{12} / \mathcal{R}_{SP} = \frac{B}{A} \rho(\hbar\omega) = \frac{\pi^2 \hbar^3 c_0^3}{n^3 (\hbar\omega)^2} \rho(\hbar\omega). \quad (18)$$

Esta ecuación muestra que la alta densidad de fotones $\rho(\hbar\omega)$ es necesaria para suprimir la emisión espontánea. Debido al término $(\hbar\omega)^2$ en el denominador de (18), un valor más alto en la densidad de fotones $\rho(\hbar\omega)$ se requiere para láseres con alta energía de fotón $\hbar\omega$ para lograr la misma supresión de emisión espontánea. Para obtener una alta densidad de fotones en los láseres semiconductores, son implementadas guías ópticas para confinar los fotones en región activa del dispositivo. Además, un resonador óptico, en muchos casos un

resonador de Fabry-Perot, es usado para incrementar la densidad de fotones en la cavidad del resonador. Un láser semiconductor puede ser visto como un oscilador óptico que consiste de un medio óptico amplificador y un resonador que provee de retroalimentación óptica al amplificador.

1.2.2 Inversión de Población

La inversión de población es la consecuencia directa de la penetración de los pseudo niveles de Fermi en la banda de conducción y en la banda de valencia causada por el bombeo eléctrico u óptico, los electrones son promovidos a los niveles de energía superiores de la banda de conducción. La inversión de población ocurre siempre que el número de electrones en la banda de conducción es superior al número de electrones en la banda de valencia, en este momento se dice que el material ha cruzado el límite máximo de transparencia.

1.2.3 Emisión estimulada inducida por un fotón

Fue en 1917, alrededor de 40 años antes de la obtención del primer láser (de rubí), que Albert Einstein predijo el principio de la emisión estimulada, proceso que es la base del fenómeno de emisión láser. Un fotón incidente con energía $h\nu$ provoca el regreso a la energía de equilibrio de un átomo (en los láseres de gas) o de un electrón (láser semiconductor) emitiendo un segundo fotón de igual energía y con el mismo vector de onda que el fotón que lo provoca (figura 1.5).

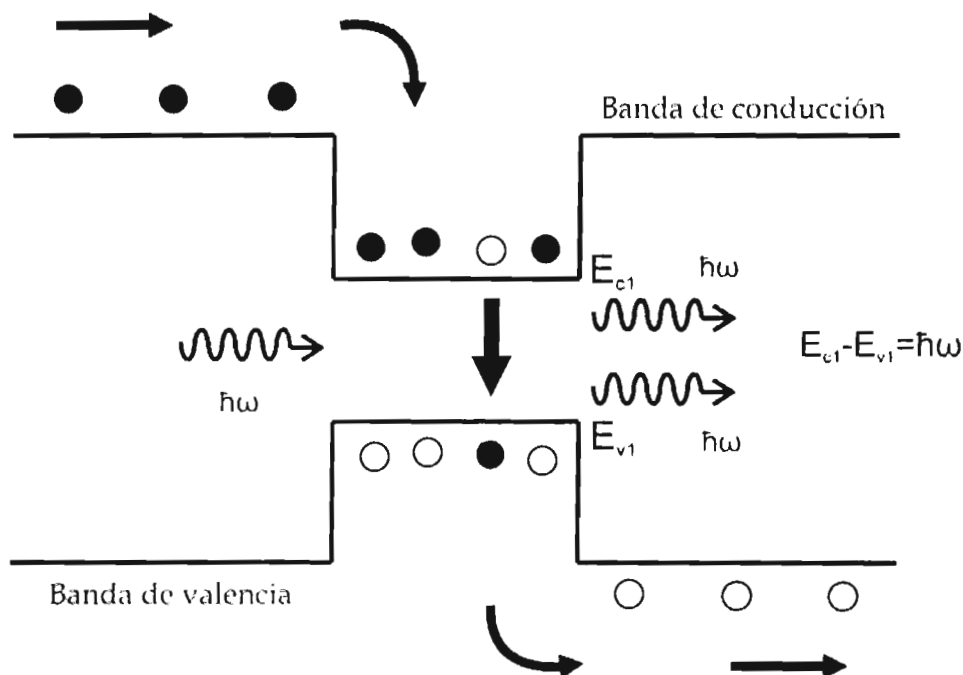


Figura 1.5. Emisión inducida por un fotón en un semiconductor. Recombinación radiativa de E_{c1} a E_{v1} .

Cuando la inversión de población se alcanza, la emisión estimulada provoca el regreso al equilibrio de todos los portadores promovidos en el nivel de energía de la banda de conducción emitiendo fotones idénticos en energía y en vector de onda, provocando un haz coherente: la luz es amplificada a la frecuencia considerada. Al mismo tiempo el bombeo eléctrico u óptico continuo de portadores en los niveles de conducción asegura la inversión de población.

1.3 Elementos básicos de Diodos Semiconductores láser

Varios elementos básicos son necesarios en la realización de un diodo semiconductor láser*:

- Un medio que provee de un ganancia óptica por emisión estimulada,
- Una guía de onda que confine los fotones en la región activa del dispositivo,
- Un resonador creando una retroalimentación óptica.

El medio de ganancia óptica (región activa) en láseres de heteroestructura doble consiste frecuentemente en una región activa sin dopar de un semiconductor directo entre dos regiones dopadas tipo p y n de mayor gap. Cuando esta doble heterounión es polarizada directamente, electrones y huecos son inyectados en la región activa donde la emisión estimulada es conseguida. Las dos hetero-barreras (emisores) sirven para confinar los portadores en la región de ganancia óptica, para tener un buen confinamiento óptico estas capas deben medir varias micras de espesor. La región activa puede consistir de un material en bulto con un espesor típico de 100nm (0.1-1 μ m) o de más pozos cuánticos teniendo un espesor típico de 10nm.

En láseres semiconductores de bombeo eléctrico, la luz es confinada y guiada por una guía de onda dieléctrica. Una guía de onda óptica dieléctrica consiste en una capa central con alto índice de refracción embebida en un material de menor índice de refracción como se muestra en la *figura 1.6(a)*.

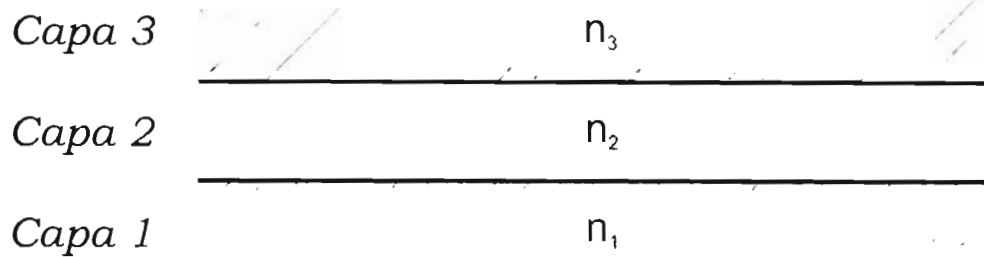
La condición de guía de onda ocurre si:

$$n_2 > n_1 \geq n_3$$

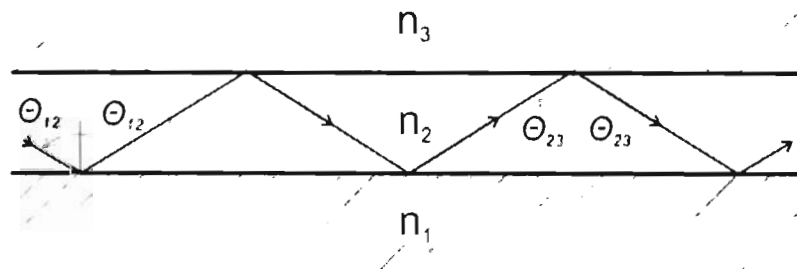
Para esta condición, el ángulo del rayo θ_{12} en la interfaz de las capas 1 y 2 en la *figura 1.6(b)* excede el ángulo crítico dado por:

$$\theta_c = \text{sen}^{-1}(n_1 / n_2)$$

* Es posible además promover el confinamiento lateral de inyección de corriente, para obtener una emisión lateral filiforme y reducción de modos de emisión en láseres de cavidad Fabry-Perot. Es importante tomar en cuenta que el bombeo eléctrico es necesario para la operación de un diodo láser, por lo que la tecnología de creación de contactos óhmicos para la inyección de portadores es fundamental.



(a)



(b)

Figura 1.6. (a) Representación de una guía de onda de tres capas, donde la capa 2 es un dieléctrico. (b) Trayectorias del haz de la onda guiada con ángulos de rayo θ medidos de la normal a la interfaz.

La *figura 1.7* muestra una guía de onda óptica para un láser de doble-heteroestructura. La capa activa tiene un banda de región prohibida (band gap) $E_{g,a}$ con índice de refracción n_a , y espesor d , entre dos capas con un gap de $E_{g,c}$ con índice de refracción n_c . Si la diferencia de índices $\Delta n = n_a - n_c$ y el espesor d son lo suficientemente pequeños, solo el modo fundamental con una distribución de campo cuasi-Gaussiano se propagará por la guía de onda. La onda óptica que viaja en dirección de la guía de onda experimenta un índice de refracción efectivo n_{eff} que es diferente de los índices de refracción de la capa activa y de las capas de recubrimiento.

$$n_c \leq n_{eff} \leq n_a$$

La *figura 1.7* muestra una estructura donde la misma capa provee el confinamiento de portadores de la onda óptica. En láseres de pozos cuánticos, las estructuras de confinamiento separadas son necesarias, donde el confinamiento de portadores en pozos cuánticos y la onda óptica son confinados en una estructura separada dieléctrica-guía de onda.

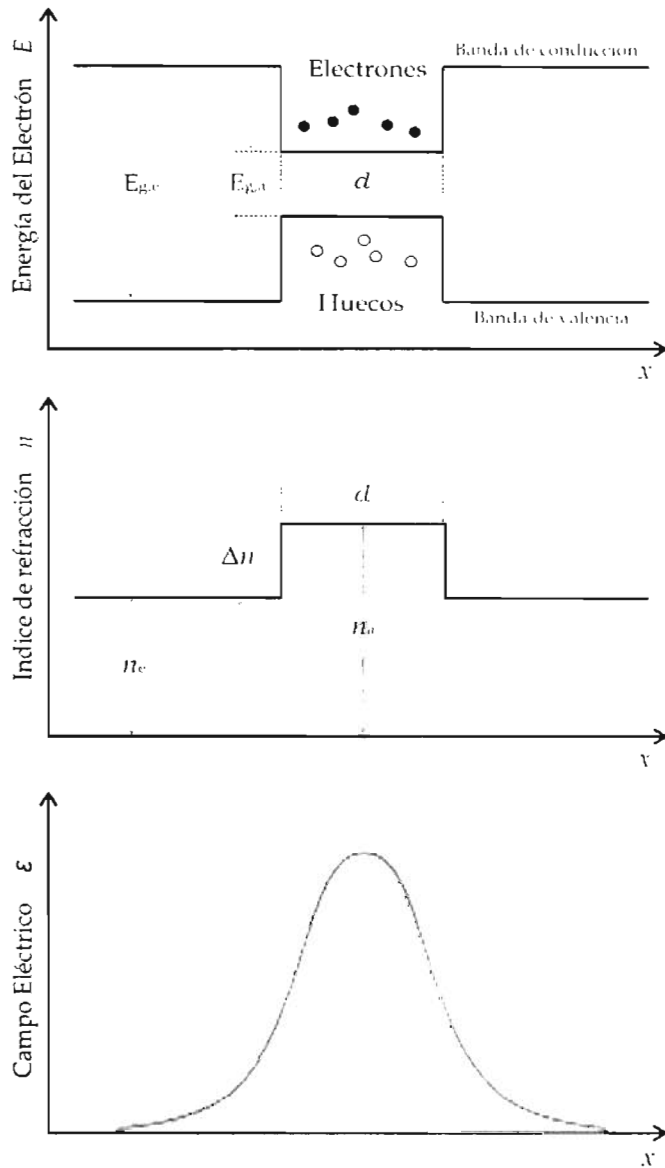


Figura 1.7. Confinamiento de portadores (electrones y huecos) y de campo eléctrico (fotones) de un diodo láser de doble heteroestructura (de interfaces ideales) donde x es la dirección de crecimiento epitaxial. Se presenta un esquema de la doble heteroestructura, donde se observa el confinamiento de portadores en la capa activa (arriba), el perfil de índice de refracción $n(x)$ de la guía de onda dieléctrica (al centro), y la distribución de campo eléctrico $\epsilon(x)$ del modo óptico fundamental viajando en la dirección z (abajo).

Para láseres de emisión lateral son usados los resonadores de Fabry-Perot. La *figura 1.8* muestra este tipo de resonador que consiste de dos espejos a una distancia L alrededor de un medio que contiene una guía de onda óptica con un índice de refracción efectivo n_{eff} con propagación en dirección normal a las superficies de los espejos. El resonador provee de retroalimentación, cuando una onda estacionaria está entre los espejos:

$$L = m \frac{\lambda_0}{2n_{eff}}, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

m es el orden de modos estacionarios permitidos en el resonador de longitud L , y λ_0 es la longitud de onda en el vacío. En sistemas de comunicación óptica existen láseres con otros tipos de resonadores, como el resonador “Distributed Feedback” (DFB) ó “Distributed Bragg Reflector” (DBR). Más detalles sobre los modos en un diodo láser se discutirán en la sección 3.3.2.

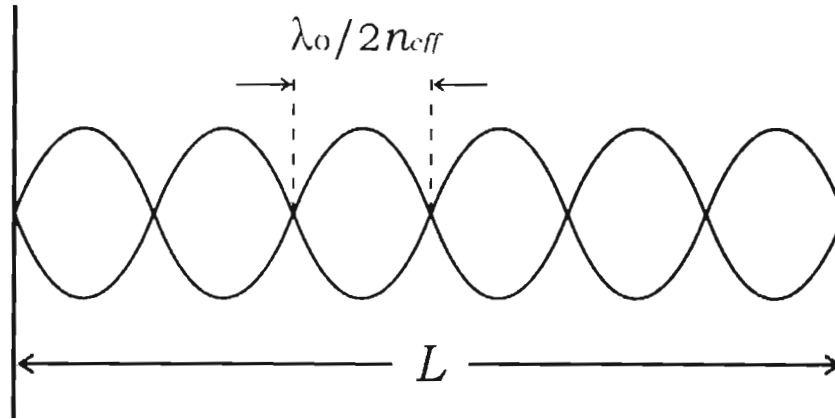


Figura 1.8. Onda estacionaria que tiene un orden $m=6$ modos estacionarios permitidos en un resonador de Fabry-Perot con una cavidad de longitud L . La onda se propaga en una guía de onda con un índice de refracción efectivo n_{eff} . La distancia entre dos nodos es $\lambda_0/(2n_{eff})$ donde λ_0 es la longitud de onda en el vacío.

Hasta este punto, se ha discutido el confinamiento óptico y de portadores para una dirección que es perpendicular al plano de la capa activa. Esta dirección es también llamada dirección vertical. Sin embargo el confinamiento lateral es también necesario para obtener una reducción de modos en ambas direcciones transversales.

Hay tres tipos de mecanismos de confinamiento lateral: confinamiento de corriente que lleva a una guía lateral de onda, confinamiento óptico por guía de índices de refracción, y heteroestructuras enterradas para proveer de un confinamiento de portadores adicional. En la tecnología de nuestro trabajo utilizamos el confinamiento de corriente por medio de contactos de tira para la guía lateral de onda, lo cual se tratará en detalle más adelante.

1.4 Ganancia óptica y condición Umbral

Al pasar a través de un material absorbente en dirección z , la intensidad J de la onda plana óptica decrece exponencialmente.

$$J(z) = J_0 e^{-\alpha z}$$

siendo J_0 la intensidad inicial y α el coeficiente de absorción de intensidad. En la capa activa de un semiconductor láser, se logra la amplificación óptica de la onda. En este caso, el aumento exponencial de la intensidad puede ser descrito por un valor negativo de α que es referido como ganancia óptica $g = -\alpha$. En una guía de onda óptica, solo parte de la intensidad del patrón del modo óptico es superpuesta a la región activa. Se debe distinguir entre la ganancia del material activo por sí mismo, llamado la ganancia del material g , y la ganancia significativamente más pequeña del modo óptico, llamada ganancia modal g_{modal} .

La figura 1.9 ilustra el patrón óptico de intensidad $J(x)$ del modo óptico fundamental en una doble heteroestructura de emisión lateral con un espesor d de la capa activa. La relación entre la ganancia modal g_{modal} y la ganancia del material g es expresada definiendo el factor

de confinamiento Γ que depende de la superposición del patrón óptico de modos con la región de ganancia del láser.

$$g_{\text{modal}} = \Gamma g, \quad \Gamma = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} J(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} J(x) dx}$$

En dobles heteroestructuras con espesor de capa activa de 50-300nm, el factor de confinamiento Γ tiene valores en el rango de 10-70%. Si la capa activa consiste en un pozo cuántico con espesor típico de alrededor de 10nm, factores de confinamiento de un pequeño porcentaje son obtenidos.

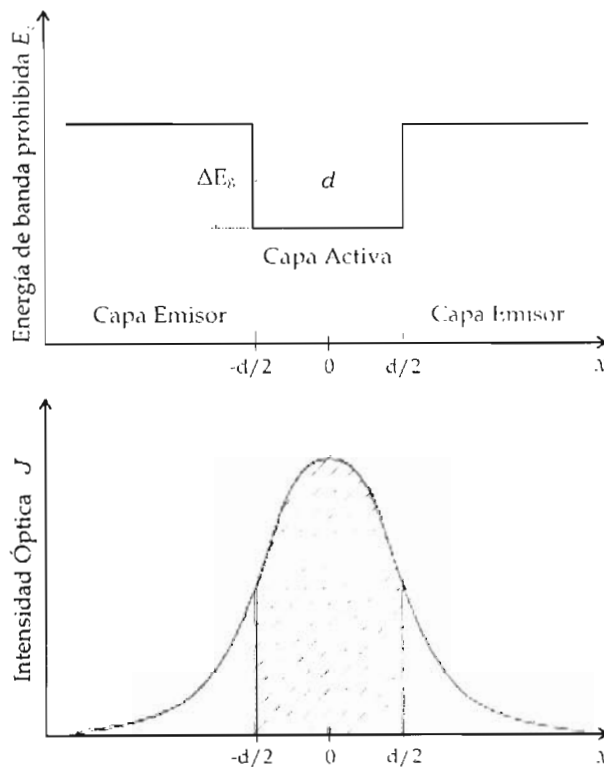


Fig. 1.9. El factor de confinamiento Γ es definido por la superposición del patrón intrínseco J del modo óptico con la región activa. La ilustración muestra la intensidad de distribución $J(x)$ en la dirección vertical x (dirección de crecimiento) del modo óptico fundamental de forma cuasi-Gaussiana para un láser de emisión lateral con espesor de capa activa d .

Para un modo que viaja a lo largo de una guía de onda óptica, el coeficiente de absorción α es usualmente dividido en dos partes, una que describe la absorción modal intrínseca α_i y otra que describe la ganancia modal $g_{\text{modal}} = \Gamma g$ la cual depende en la densidad de portadores inyectados.

$$\alpha = \alpha_i - \Gamma g$$

La absorción intrínseca modal es causada por la dispersión del modo óptico por defectos o interfaces rugosas y por absorción de portadores libres. Mientras que la dispersión es extremadamente baja para diodos semiconductores láser con buena calidad cristalina, la

absorción de portadores libres no puede ser evitada pues parte del patrón de modos ópticos se superpone con las regiones dopadas tipo n y p . Cuando la ganancia modal Γg es más larga que la pérdida modal α_l , la propagación de modos ópticos es amplificada.

En un dispositivo láser, la guía de onda óptica es combinada con un resonador de Fabry-Perot con espejos cuyas reflectividades son R_1 y R_2 . Parte de la intensidad óptica sale de la cavidad y contribuye al haz de salida del láser. Como se ilustra en la *figura 1.10*, la intensidad J_n del modo óptico modal después de un trayecto ida y vuelta en la cavidad es dado por

$$J_n = J_0 R_1 R_2 e^{2(\Gamma g - \alpha) L}$$

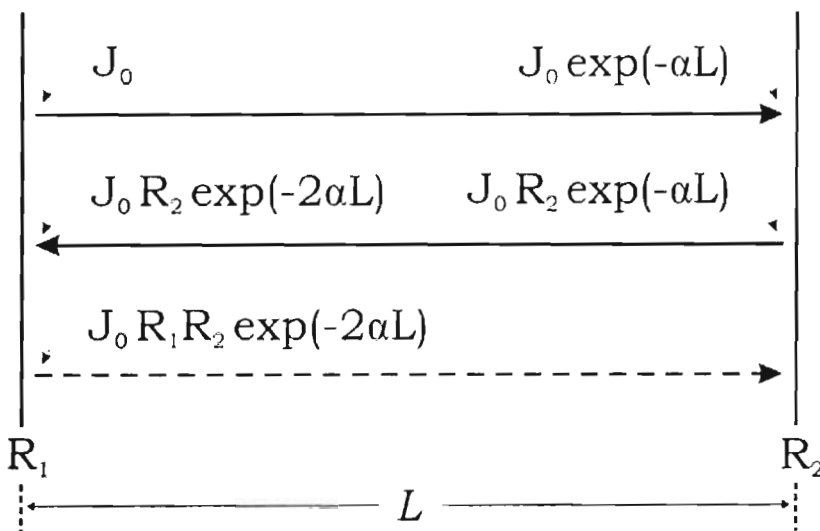


Figura 1.10. Intensidad de una onda óptica durante un trayecto ida y vuelta en un resonador Fabry-Perot con una longitud de cavidad L y reflectividades R_1 y R_2 .

La emisión láser ocurre cuando la ganancia provista al modo óptico compensa la absorción y las pérdidas de los espejos en una vuelta. La ganancia mínima g cuando comienza la emisión láser del dispositivo se le llama ganancia umbral g_{th} . En este caso, la intensidad J_n después de una vuelta en la cavidad vuelve a tener el valor $J_0 = J_{th}$.

$$J_n = J_0,$$

$$1 = R_1 R_2 e^{2(\Gamma g_{th} - \alpha) L},$$

$$\Gamma g_{th} = \alpha_l + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) = \alpha_l + \alpha_{espejo}$$

En el umbral láser, la ganancia modal Γg_{th} es la suma de los dos términos de la absorción α_l y las pérdidas debidas a los espejos α_{espejo} . Las pérdidas por los espejos dependen en el largo de la cavidad L y de las reflectividades R_1 y R_2 . Estas reflectividades en diodos semiconductores de emisión lateral están dadas comúnmente por el cambio de índices de

refracción del semiconductor al aire ($n=1$), para estructuras cuyos sustratos son GaAs y InP $n_s \sim 3.4$. Realizando un breve cálculo:

$$R = \frac{n_s - n}{n_s + n} \approx 54\%$$

Se obtiene la reflectividad para los semiconductores que utilizamos en este trabajo.

Estas condiciones nos muestran que las interfases de las capas en una estructura semiconductor deben ser de buena calidad para lograr una dispersión baja de tal manera que sea posible la amplificación en un dispositivo láser semiconductor.

1.5 Conclusiones

En este capítulo se mencionaron consideraciones fundamentales para construir un láser semiconductor.

- La primera es escoger un material semiconductor directo para la capa activa del dispositivo, cuyo gap nos determina la longitud de onda de emisión.
- Se mencionó que para tener emisión estimulada la cual es coherente se requiere de una inversión de población en la región de recombinación (capa activa), esto es posible si la región de recombinación es estrecha, lo cual favorece el confinamiento eléctrico, como consecuencia se disminuye la inyección de portadores necesaria para tener ganancia y se logra la emisión láser.
- Se requiere además que las interfases de la capa activa sean de buena calidad para evitar la dispersión de fotones fuera de la capa activa, este aspecto es fundamental para tener una buena guía de onda, además los índices de refracción de las capas que rodean a la capa activa deben ser menores.
- Para tener oscilación es necesario tener una retroalimentación, la cual se logra mediante una cavidad resonante, en los dispositivos que se desarrollaron la cavidad es de Fabry-Perot. Esta retroalimentación se logra en diodos láser mediante un buen clivado de chips, lo cual se discutirá en la sección 2.6.
- La temperatura es un factor importante en la operación de un láser, la probabilidad de que ocurran recombinaciones no radiativas Auger aumentan con la temperatura (así mismo con la concentración de portadores y también en función de la longitud de onda). Por lo que es importante considerar la resistencia térmica del material y la estabilización de la temperatura del dispositivo.

Todas estas consideraciones se traducen en detalles tecnológicos que se consideran más adelante en el proceso de crecimiento y postcrecimiento de estructuras láser.

CAPITULO II

Contactos Óhmicos y su caracterización

2.1 Discusión General

Para hacer posible el bombeo eléctrico o inyección de corriente a estructuras semiconductoras, es necesario realizar un proceso de metalización. Este proceso se efectúa depositando, por distintos métodos, metales sobre la superficie de semiconductores y posteriormente se realiza un horneado para lograr así la aleación entre metal-semiconductor.

En este Capítulo se hablará de los métodos de obtención de contactos óhmicos en las estructuras láser con el fin de inyectarles corriente; se explicará la importancia y elaboración de la tecnología de contactos de tira en diodos semiconductores. Finalmente se hablará de la caracterización y resultados de estos contactos.

2.2 Contactos Metal-Semiconductor

Los metales en los dispositivos semiconductores se utilizan por las siguientes razones:

- 1) Proveen de contactos óhmicos a los dispositivos para permitir a los electrones y huecos entrar y salir del semiconductor con una pequeña resistencia.
- 2) Proveen interconexiones de baja resistencia entre dispositivos.
- 3) Proveen de uniones rectificadoras como las barreras Schottky a semiconductores.

Por lo tanto los contactos metal-semiconductor son un componente esencial en cualquier dispositivo semiconductor.

No se puede asumir que estos contactos sean de menor resistencia que dos metales conectados. En particular, un gran desacople de la energía de Fermi entre un metal y un semiconductor puede resultar en un contacto de alta resistencia rectificador. Una elección adecuada de materiales puede dar como resultado un contacto óhmico de baja resistencia.

Dicho de otra manera, siempre que un metal y un semiconductor están en contacto directo, existe un potencial de barrera V_b entre los dos que evita el paso a la mayor parte de los portadores (electrones y huecos) de un material a otro (ver figura 2.1). Sólo un pequeño número de portadores tienen la energía necesaria para pasar por arriba de la barrera y cruzar al otro material.

Cuando un voltaje es aplicado a la unión, puede tener dos efectos: puede hacer que la barrera parezca más pequeña del lado del semiconductor (polarización directa), o puede hacerla parecer más grande (polarización inversa). El voltaje aplicado no cambia el alto de la barrera del lado del metal.

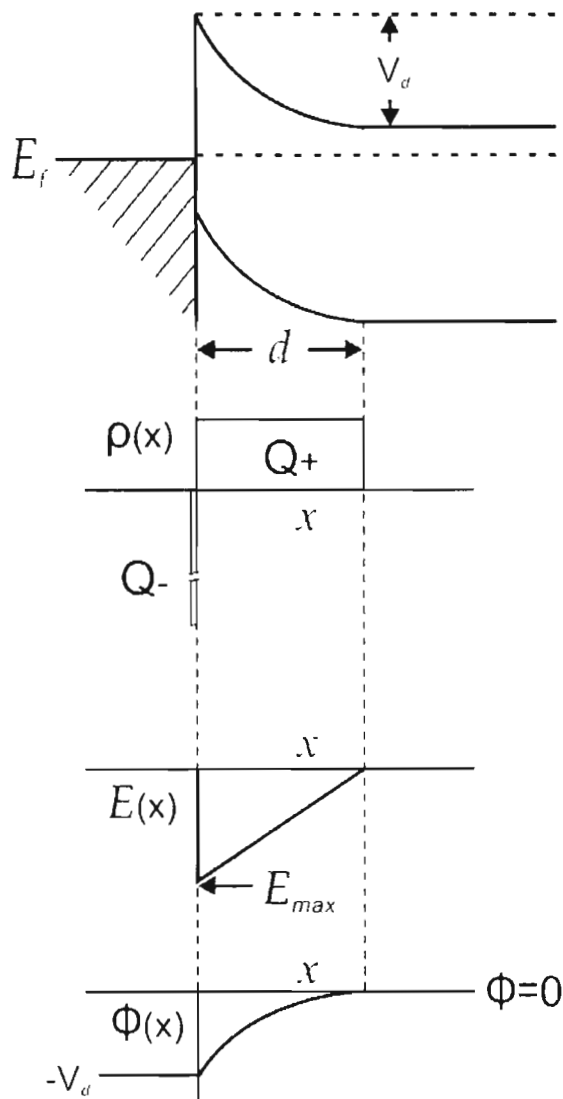
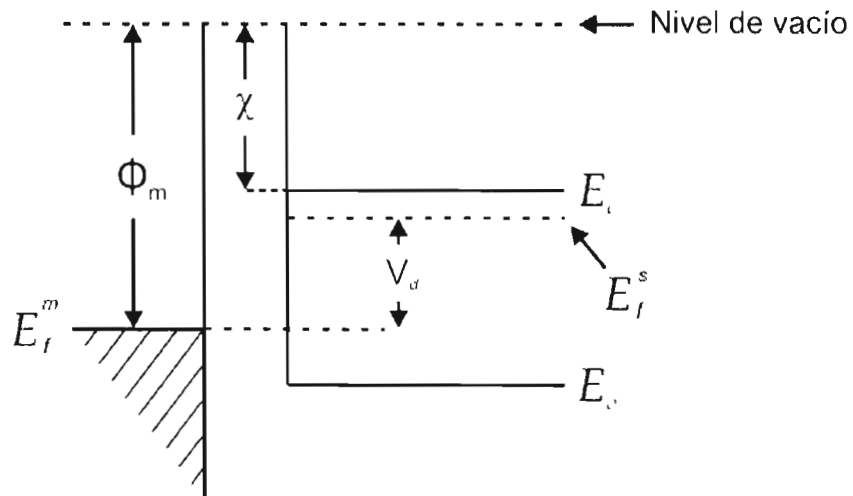


Figura 2.1. Diagrama de una unión metal-semiconductor tipo "n". $V_b \approx \Phi_m - \chi$

El resultado de esto es una barrera Schottky (un contacto rectificador), donde la unión conduce para una polaridad de voltaje aplicado, pero no conduce de forma inversa. Casi todas las uniones metal-semiconductor exhiben este comportamiento de rectificación.

Los contactos Schottky crean diodos con características útiles; incluso pueden ser usados para un tipo de transistor, pero para introducir corriente en un dispositivo semiconductor, generalmente se desean contactos óhmicos. Los contactos óhmicos conducen de igual forma en ambas polarizaciones; es decir, obedecen la Ley de Óhm. Hay dos maneras de realizar un contacto óhmico entre un metal y un semiconductor (haciendo lo contrario se obtiene un buen contacto Schottky):

1. Reduciendo el alto de la barrera

El alto de la barrera es una propiedad de los materiales usados. Se deben utilizar materiales cuyo alto de barrera sea pequeño al formar la unión. El recocido puede crear una aleación entre metal y semiconductor en la unión, que también puede reducir la altura de la barrera.

2. Fabricar la barrera suficientemente delgada

Debido a la cualidad de que los electrones y huecos pueden mostrar el “efecto túnel” en barreras en las cuales no tienen la energía suficiente para pasar por encima, la probabilidad de presentar este efecto se vuelve alta para barreras extremadamente delgadas (decenas de nanómetros), se realizan barreras muy delgadas dopando altamente ($N_d \approx 10^{19}$ portadores/cm⁻³ o más).

El potencial de barrera que es aproximadamente

$$V_b \approx \Phi_m - \chi, \text{ para un semiconductor tipo "n"}$$

En la aproximación de deserción completa:

$$d = \frac{2\epsilon\epsilon_0 V_b}{N_d}, \text{ donde}$$

d - Es el ancho de barrera

Φ_m - Función de trabajo del metal

χ - afinidad electrónica del semiconductor.

N_d - densidad de carga (densidad de donadores)

Lo más cercano sea la barrera a cero, mejor comportamiento óhmico tendrá.

- $V_b > 0$ para un semiconductor tipo “n” significa que la corriente tiende a fluir más fácilmente hacia el semiconductor.
- $V_b > 0$ para un semiconductor tipo “p” significa que la corriente tiende a fluir más fácilmente hacia el metal.

En este sentido se ha observado que al realizar contactos metal-semiconductor de Au con GaAs ó InP es más complicado obtener un contacto óhmico para el contacto tipo “p” en los dispositivos que un contacto tipo “n”, esto se debe a que el potencial de barrera resulta mayor en los contactos tipo “p”.

Como ejemplo el potencial de barrera para un contacto de GaAs dopado tipo “p” con Au es aproximadamente de 1.19eV mientras que para Au con GaAs tipo “n” con niveles de dopaje similares es de aproximadamente 0.23eV.

Potenciales de barrera V_b para contactos metal-semiconductor:

	GaAs tipo “n”	GaAs tipo “p”	InP tipo “n”	InP tipo “p”
Au	0.23eV	1.19eV	-0.15eV	1.49eV
Pt	1.25eV	0.17eV	0.87eV	0.47eV

Donde $\Phi_{Au} = 5.1 \text{ eV}$ y $\Phi_{Pt} = 6.35 \text{ eV}$, $T_{f,Au} = 1064.18^\circ\text{C}$ y $T_{f,Pt} = 1768.3^\circ\text{C}$

En base de estos cálculos se observa que en materiales como el GaAs y InP es más conveniente usar Pt para los contactos óhmicos tipo “p”, aunque debido a su temperatura de fusión puede presentar algunos problemas técnicos al intentar depositarlo sobre las muestras por el método de evaporación por filamento caliente. Otro detalle es que el Pt es más costoso que el Au.

En resumen, para muchos semiconductores no hay el metal apropiado disponible, por lo que es importante el contacto de efecto túnel. Estos contactos consisten de una barrera delgada, obtenida por un semiconductor altamente dopado, a través del cual portadores pueden pasar por efecto túnel. La formación de contactos es típicamente acabada con un recocido final después de una deposición de metal.

Con el fin de mejorar el desempeño de chips láseres semiconductores, se limitan estos contactos metal-semiconductor a un área superficial reducida de inyección de corriente, para ello se utiliza comúnmente la tecnología de fabricación de contactos de tira la cuál es descrita a continuación.

2.3 Tecnología de contactos de tira

Tanto en láseres de SH (confinamiento separado) como en láseres DH (heteroestructura doble), la cavidad resonante es del tipo Fabry-Perot y los láseres pueden ser fabricados con contacto de área ancha o con contacto de tira (stripe-geometry láser). El contacto de área ancha es el contacto metal-semiconductor que se realiza sobre la superficie completa del semiconductor, por lo tanto la inyección de portadores no es restringida. En cambio el contacto de tira es el que se realiza sólo en un área limitada de la superficie de la estructura semiconductor, lo cuál provee de ciertas ventajas tecnológicas que mencionaremos enseguida.

El contacto de tira restringe la corriente a lo largo del plano de la unión. Los anchos de la tira son típicamente de 5 a 30 μm . Este confinamiento lateral sirve para varios propósitos:

1. Reducción de la sección de área transversal de recombinación desde la superficie, que también reduce la corriente de operación, lo que se puede traducir en degradación atenuada con respecto a diodos láser de contacto de área ancha.
2. Operación filiforme y modo fundamental de emisión a lo largo del plano de la unión para contactos de tira $S \leq 15\mu\text{m}$.

El efecto de disminuir el ancho de tira es el de tener una región de recombinación y ganancia más pequeña, por lo que la potencia de salida en el diodo láser es comprometida, así mismo el factor de confinamiento Γ también disminuye por lo que la densidad de corriente umbral aumenta como se verá en resultados experimentales del siguiente capítulo.

Para un contacto de tira se tiene también *confinamiento de corriente*, este confinamiento se suma al *confinamiento óptico* debido al cambio de índices de refracción entre la capa activa sin dopar con las capas dopadas que la recubren y finalmente el *confinamiento de portadores*, debido al potencial que forma la doble heteroestructura a lo largo del perfil del dispositivo.

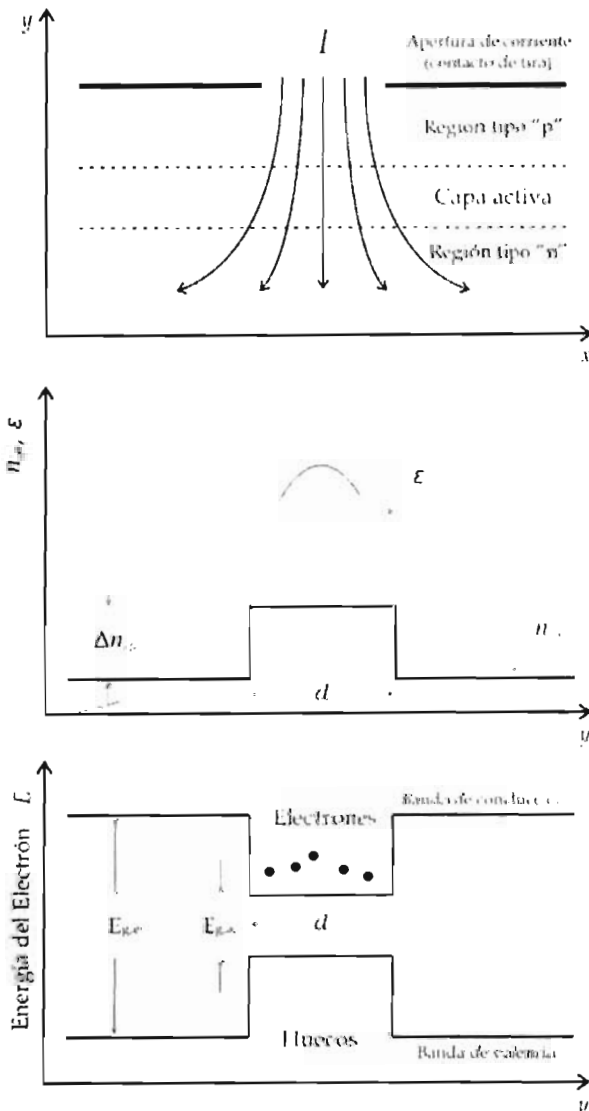


Figura 2.2. Tres tipos básicos de confinamiento lateral. y-dirección de crecimiento, x-dirección transversal.

Confinamiento de corriente (arriba): la corriente es inyectada a través de la apertura.

Confinamiento óptico (al centro): un escalón en el índice efectivo de refracción n_{eff} conforma una guía lateral de onda para los modos ópticos (la forma de escalón de índices de refracción es una idealización de una doble heteroestructura de interfases perfectas).

Confinamiento de portadores (abajo): la barrera de potencial de una heteroestructura doble previene la difusión lateral de electrones y huecos.

Hay numerosos tipos de contactos de tira (estructuras de geometría de tira) como stripe de meseta, aislamiento por bombardeo de protones, tira planar, etc. En este trabajo se optó por utilizar los contactos de tira con dieléctrico por su simplicidad tecnológica y sus buenos resultados. Este proceso tecnológico es descrito a continuación.

2.3.1 Contacto de tira con dieléctrico

En el contacto de geometría de tira del láser, el contacto metal-semiconductor (y por lo tanto la inyección de corriente) de un láser DH es limitado con una capa de dieléctrico como se muestra en la *figura 2.3*. En nuestros dispositivos usamos SiO_2 como dieléctrico, el cual es utilizado con frecuencia, sin embargo también se puede usar Si_3N_4 . Así mismo, se puede utilizar un Sputtering para bombardear SiO_2 . Para tiras de contacto, la capa de aislante es usualmente de 1500 a 3000 Å de espesor.

En el desarrollo tecnológico de nuestros dispositivos realizamos contactos de tira de 10 y 100 μm sobre la capa de contacto tipo "p" de las estructuras semiconductoras, por medio de un proceso fotolitográfico. Finalmente encima de estas tiras de dieléctrico se realizó la fabricación del contacto metal-semiconductor por medio del método de deposición por evaporación de metales seguido de un recocido para formar una aleación metal-semiconductor. Los detalles del proceso de fotolitografía se describen a continuación.

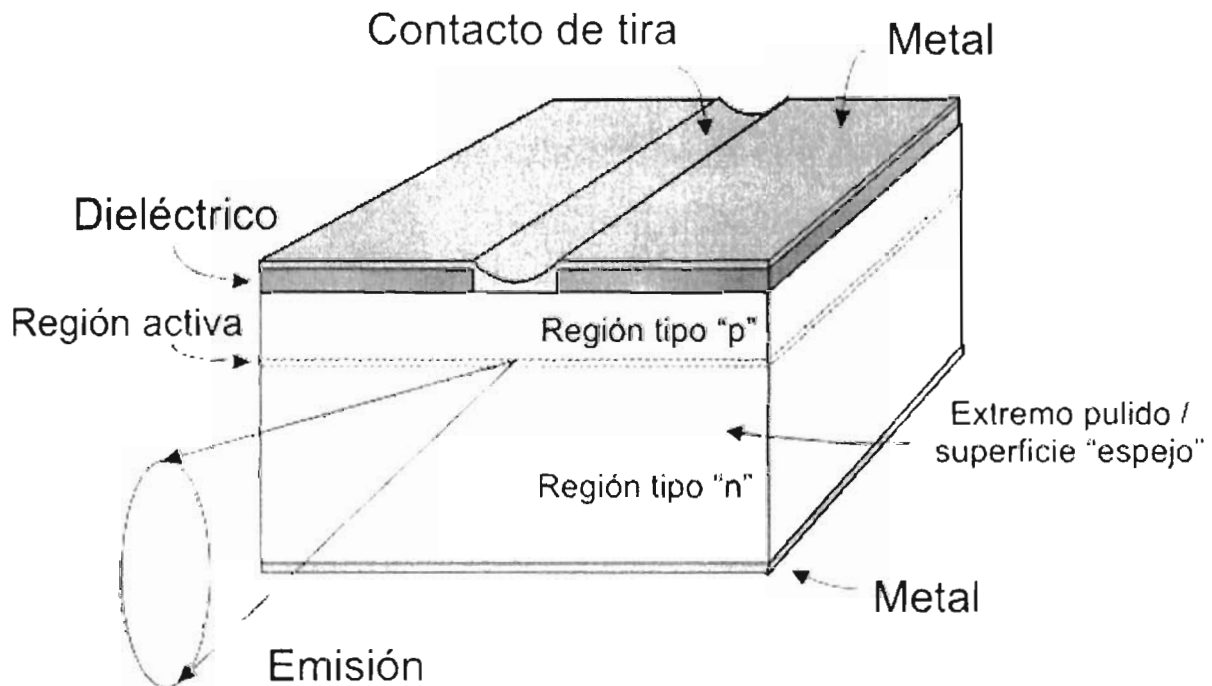


Figura 2.3. Chip láser semiconductor de emisión lateral de contacto de tira con dieléctrico.

2.4 Proceso fotolitográfico

Se mencionó que la reducción de la sección de área transversal en la cual se recombinan portadores nos ayuda entre otras cosas a disminuir la corriente de operación y a tener un confinamiento de inyección de corriente.

Para limitar el flujo de corriente a través de cierta área de la superficie del semiconductor se utilizó un proceso fotolitográfico en el cual fueron transferidos patrones de franjas periódicas de un motivo o mascarilla a la superficie de un semiconductor. Al final de este proceso se obtiene un patrón de tiras de dieléctrico, lo cual limita el contacto metal-semiconductor a franjas periódicas de anchos de 10 y 100 μm dependiendo del motivo o mascarilla utilizado.

Los pasos envueltos en el proceso fotolitográfico son limpieza de la muestra, aplicación y horneado del dieléctrico, aplicación y horneado del “fotore Resist” o resina fotosensible, alineación de la mascarilla y exposición, revelado, ataque químico y finalmente removimiento de la resina fotosensible (*ver figura 2.5*).

A continuación se describen en detalle los pasos de dicho proceso (*ver apéndice A* para más detalles del proceso):

- **Limpieza de la muestra:** Se realiza con la finalidad de eliminar impurezas y obtener un buen contacto con la superficie de la muestra, éste consiste en un desengrasado con tricloroetileno y metanol seguido de enjuague con H₂O deionizada.
- **Aplicación y horneado del dieléctrico:** Inicialmente el dieléctrico se encuentra en estado líquido (*ver apéndice B* para detalles técnicos del dieléctrico), éste se suministra sobre el semiconductor por medio de un gotero, la muestra se hace rotar en un “spinner” (base giratoria de centrifugado de alta velocidad) a una frecuencia aproximada de 4500 rpm por un lapso de 20 segundos formando una película uniforme de espesor entre 0.16 μm y 0.26 μm . El dieléctrico al ser horneado se endurece y pasa a estado sólido.
- **Aplicación y horneado del “fotore Resist”:** De la misma forma se aplica una gota de resina fotosensible (Resina positiva 1818 SP 16 Shipley, *ver apéndice C* para detalles técnicos de la resina fotosensible) sobre la capa de dieléctrico formada en la superficie de muestra, al hacerla girar a una frecuencia aproximada de 4500 rpm por 20 segundos se forma una película uniforme (~ 2 μm de espesor). Posteriormente se efectúa un horneado (90°C) con la finalidad de que ésta sea endurecida ligeramente y se adhiera a la superficie.
- **Alineación de la mascarilla y exposición:** Se coloca el motivo sobre la muestra en contacto directo con el fotore Resist, este motivo consta de un patrón de franjas oscuras con espacios entre ellas de distintos anchos (10 y 100 μm) y se expone a luz ultravioleta. Se eligió como tiempo de exposición 45 segundos. El tiempo de exposición depende del espesor de fotore Resist, tiempo de horneado, reflectividad del sustrato y la fuente de exposición. Los parámetros usados en la fuente de UV son;

Potencia 155W, voltaje de la lámpara 50 volts y corriente 3 Amperes. Ocurre una reacción química en la fotosesina (fotosesist) expuesta a luz UV, para resinas positivas la región expuesta se vuelve más soluble de esta manera es más fácil de ser removida en el proceso de revelado, para resinas negativas esta se vuelve menos soluble y se endurece (se polimeriza). Es importante alinear las franjas del motivo con la orientación cristalográfica de la oblea semiconductora de tal forma que las caras del resonador de nuestro diodo queden perpendiculares a los contactos de tira como muestra la *figura 2.1*. Para el proceso de exposición se utilizó un sistema de alineación y exposición UV OAI serie 200 el cual es mostrado en la *figura 2.4*.

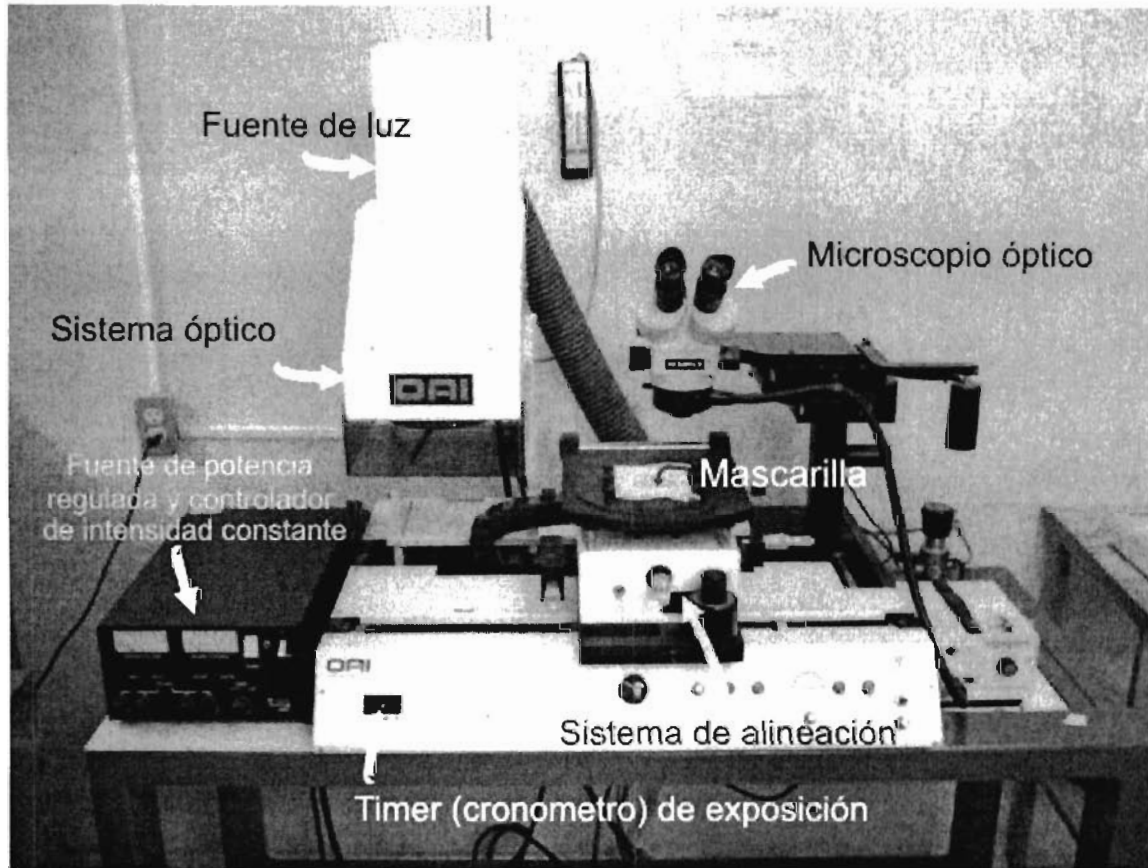


Figura 2.4. Sistema de alineado y exposición UV OAI serie 200 utilizado en el proceso fotolitográfico.

- **Revelado:** Se sumerge la muestra en el líquido revelador (Microposit® 319) por 60 segundos a 20°C, la resina es positiva por lo que al efectuar el revelado se desprenden las regiones que fueron expuestas a la radiación ultravioleta al ser éstas solubles al revelador. Un enjuague con agua desionizada es realizado para detener el proceso de revelado. Tiras periódicas de resina se encuentran sobre la capa de dieléctrico
- **Ataque Químico:** La resina protege secciones periódicas de dieléctrico, al realizar un ataque de 10H₂O:1HF, la región descubierta es atacada hasta abrir canales en la superficie del semiconductor, el cuál no es atacado por esta solución.

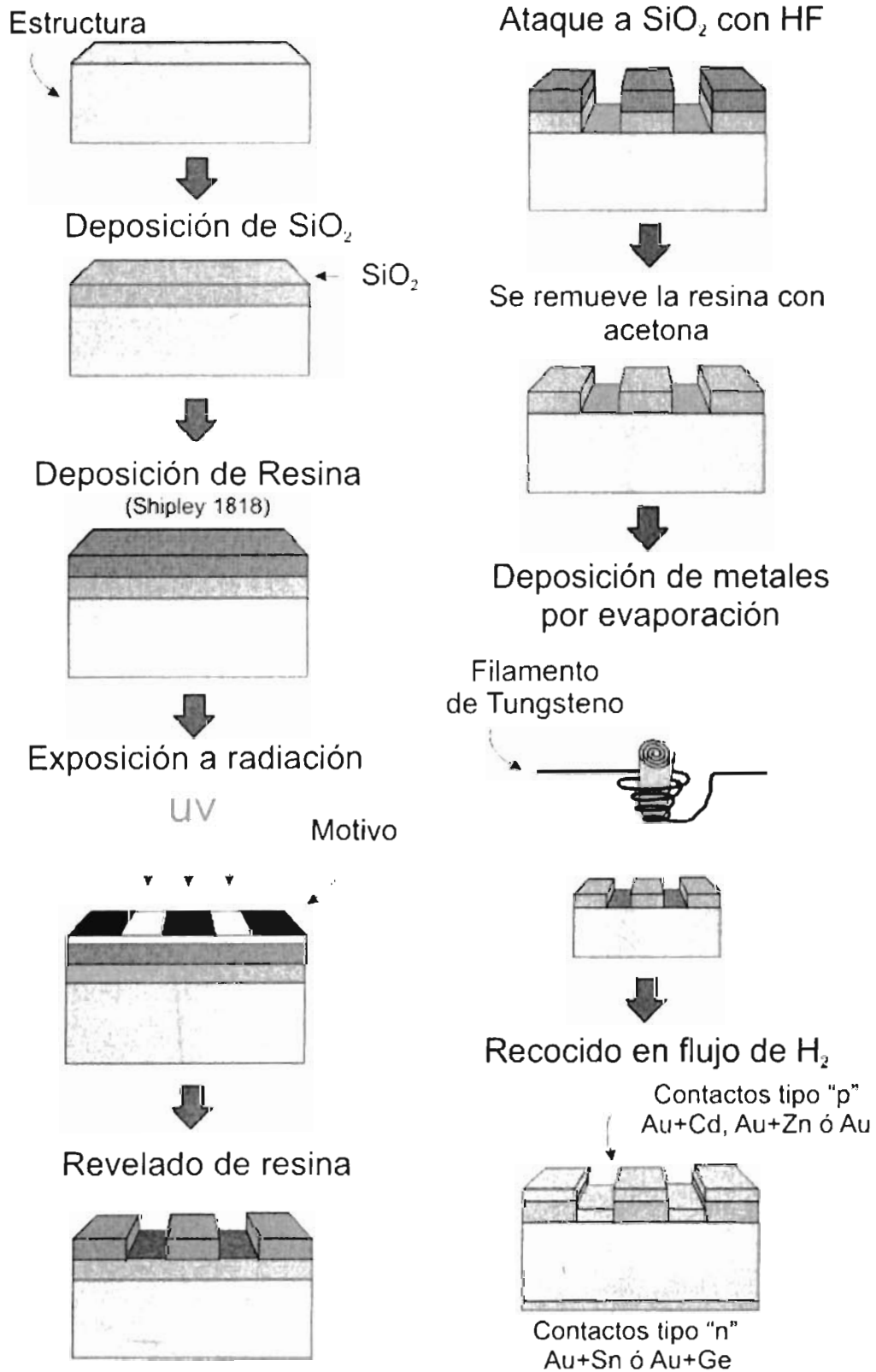


Figura 2.5. Proceso fotolitográfico y de deposición de contactos por evaporación de metales para la obtención de contactos óhmicos metal-semiconductor. Los detalles del proceso de metalización sobre las capas de contacto son descritos en la sección 2.5.

- **Removimiento de la resina:** Esta es removida con acetona, el patrón de franjas de dieléctrico queda grabado sobre la superficie de la capa de contacto del semiconductor. La muestra esta lista para la creación de contactos óhmicos.

Se presentan resultados del proceso fotolitográfico para una muestra de contactos de tira de $100\mu\text{m}$ de ancho. Primeramente se muestra el perfil de dicha muestra en el perfilómetro *Alpha-Step 500*[®].

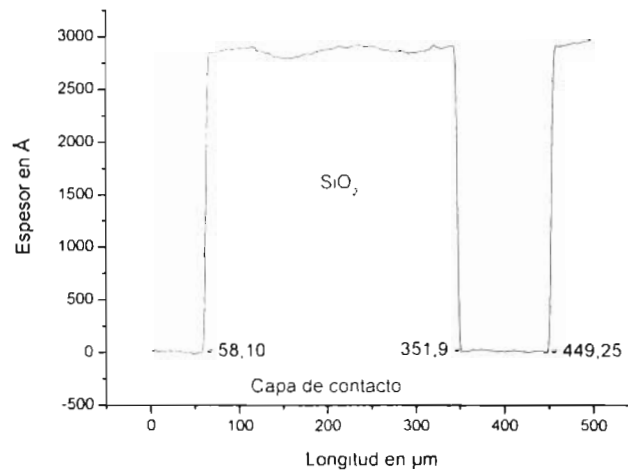


Figura 2.6. Perfil de una muestra con contactos de tira de $100\mu\text{m}$

A continuación mostramos una imagen de microscopio óptico de un patrón de tiras en el que se observa el resultado final del proceso fotolitográfico.

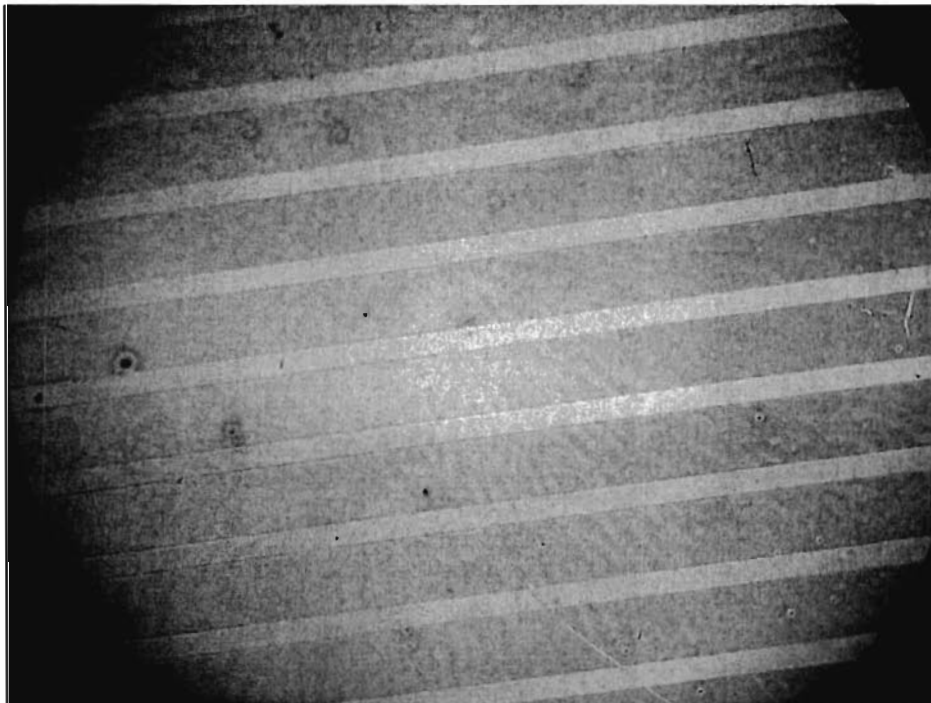


Figura 2.7. Tiras de dieléctrico de $100\mu\text{m}$ de espaciado entre éstas bajo un microscopio óptico (5x).

Las secciones más anchas son tiras de SiO_2 , las secciones más delgadas entre estas tiras de dieléctrico constituyen la capa de contacto de semiconductor sobre las que más tarde se realizan los contactos óhmicos para la inyección de corriente al dispositivo.

2.5 Deposición de Metales por evaporación

Películas de metal pueden ser depositadas sobre un semiconductor por varios métodos, los más importantes son deposición por evaporación física (Técnica de evaporación por filamento caliente o por Sputtering) y deposición por evaporación química.

Con la finalidad de depositar películas de metal en el proceso de obtención de contactos óhmicos metal-semiconductor utilizamos una técnica de deposición de evaporación física, la técnica de deposición de metales por evaporación usando un filamento (resistencia) calentada en alto vacío, por medio de una evaporadora de metales VEECO V-300.

El vacío en la cámara se efectúa inicialmente con la ayuda de una bomba mecánica, la cual lleva a la cámara de la presión atmosférica a una presión del orden de mili-Torr, seguida por una bomba de alto vacío que reduce la presión al orden de 5×10^{-6} Torr o menor.

En la creación de filamentos son usados metales como el tungsteno por su alta temperatura de fusión, se le da forma al filamento de canasta por medio de una espiral, de tal manera que pequeños pedazos de metal son suspendidos del filamento. Conforme un flujo de corriente ($\sim 20A$) pasa a través del filamento, los metales dentro de la espiral son calentados, estos experimentan cambios de fase pasando por fase líquida y finalmente se vaporizan, al expandirse se depositan sobre el semiconductor. El último paso para la obtención de contactos óhmicos es un recocido en flujo de H_2 (o de alguna atmósfera que prevenga de oxidación) para crear una aleación entre metal depositado y semiconductor (Figura 2.8). Los materiales envueltos en el proceso de deposición se mencionan en la sección 2.7.

Al cabo de este proceso es posible preparar chips para la fabricación de dispositivos láser, para hacer esto posible es necesario tomar ciertas consideraciones que se describen a continuación.

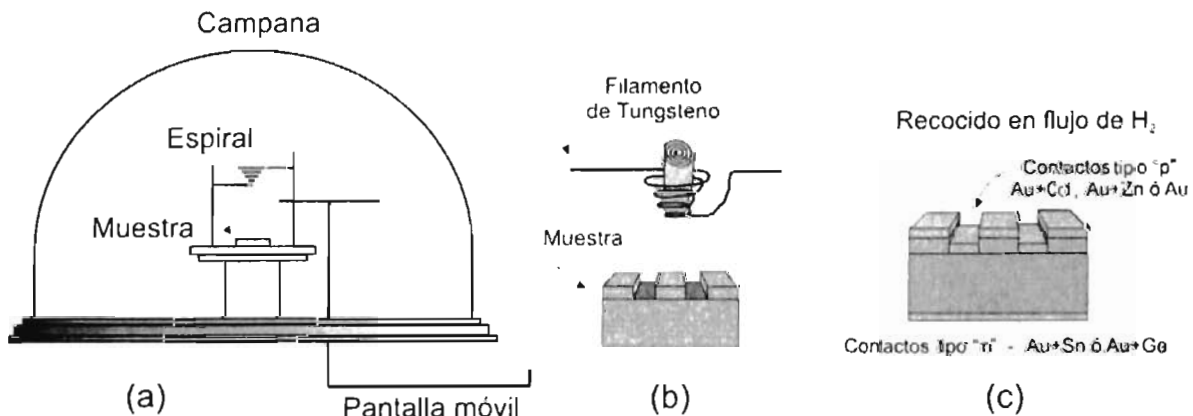


Figura 2.8. Deposición de metales por evaporación (a) Diagrama de la campana de la evaporadora de metales VEECO V-300 (b) Muestra con tiras de dieléctrico colocada bajo el filamento (c) Muestra con contactos después de la deposición de metales y el recocido en flujo de H_2 .

2.6 Clivado de chips

Al ser creados los contactos metal-semiconductor, se procede a la obtención de chips clivando las estructuras semiconductoras. El clivado (corte en una dirección cristalográfica) consiste en aplicar presión a un costado de la oblea en la dirección (110) como se observa en la *figura 2.9*, el propósito es romper los enlaces covalentes entre los átomos de Ga y los de As, de esta forma se provoca un rompimiento en dicha dirección y los costados del chip quedan seccionados con calidad espejo. Esto es posible en semiconductores como el GaAs y el InP por su simetría cúbica. Es importante que la oblea tenga un espesor entre 100 y 200 μm para lograr un clivado de buena calidad. Los chips son típicamente de dimensiones < 500 μm por el ancho de tira. Al ser clivados los chips se colocan sobre una base de cobre u otro metal para la medición de sus características V-I (*figura 2.10*).

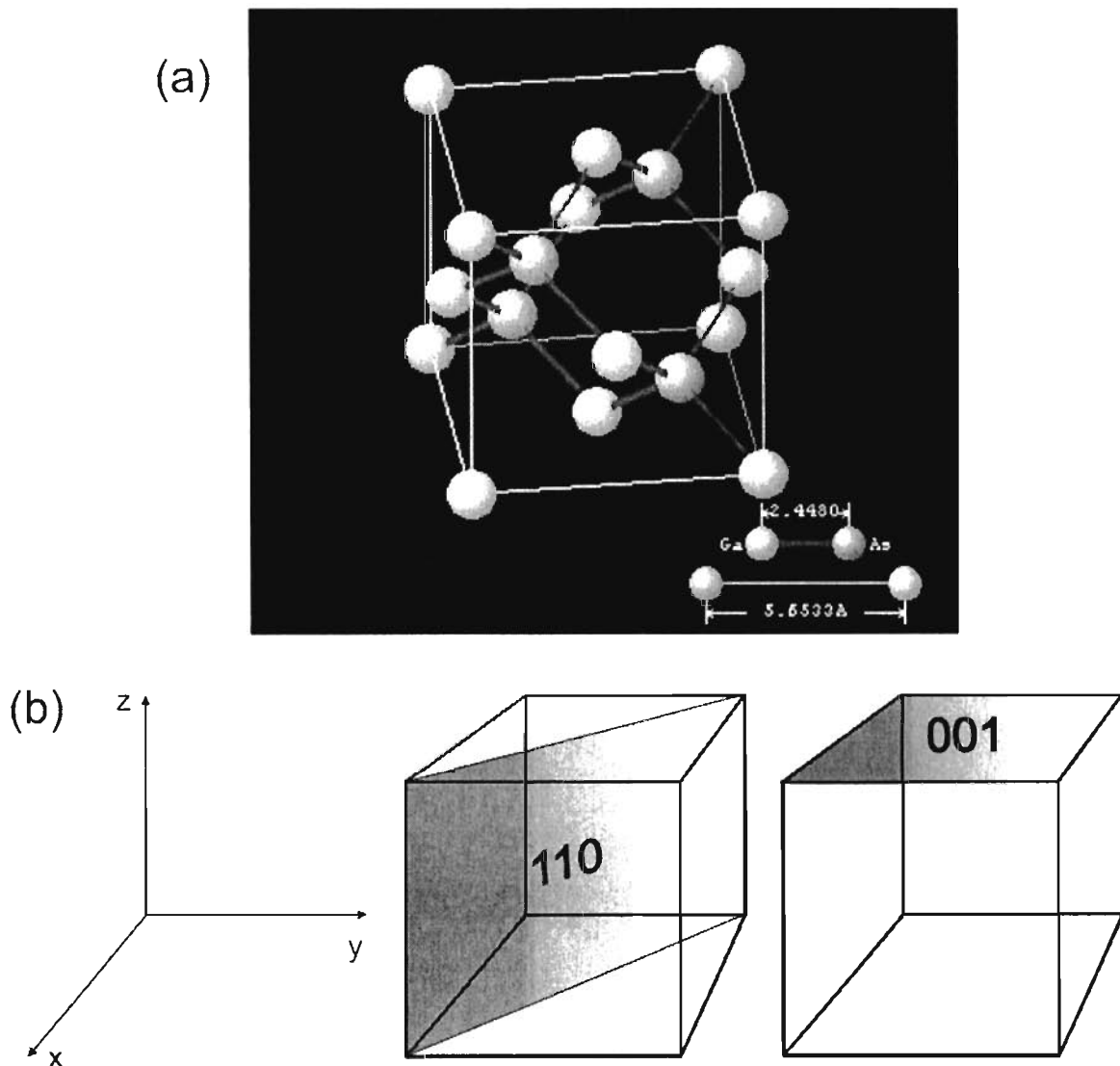


Figura 2.9. Celda unitaria del GaAs (a), se ilustran también (b) las dirección de clivado (110) y la dirección paralela a la superficie de la oblea (001). La figura (a) se obtuvo de la siguiente dirección de internet <http://jas.eng.buffalo.edu/education/solid/unitCell/home.html>

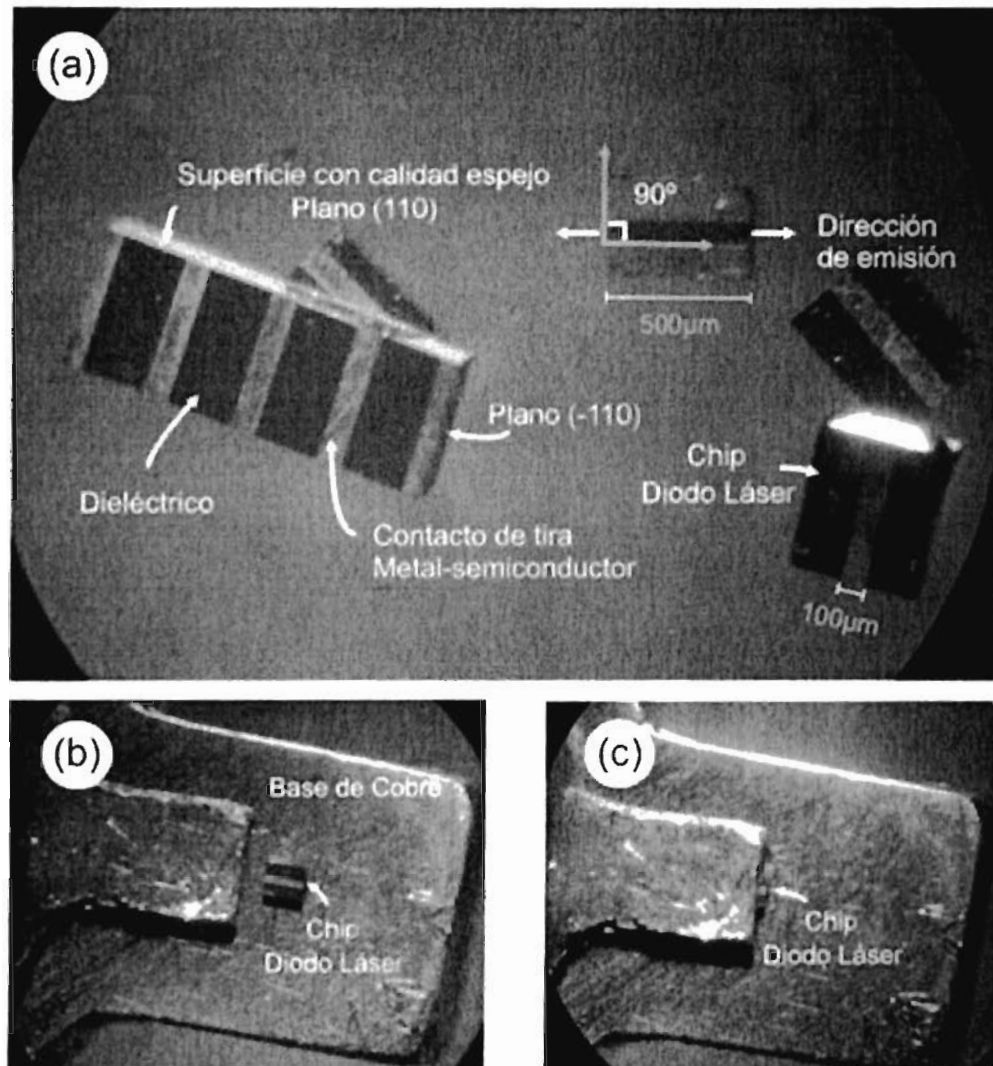


Figura 2.10. Fabricación de chips, (a) se observa que el patrón de tiras está alineado perpendicularmente a la dirección (110) de clivado, en (b) y (c) los chips son colocados en una base de cobre para inyectarles corriente y realizar caracterización de V-I y electroluminiscencia.

Es importante señalar que los chips diodo láser de contacto de tira con cavidad Fabry-Perot emiten en los extremos paralelos del contacto de tira como se ilustra en la *figura 2.10a*, el cambio de índices de refracción entre la capa activa y el aire es grande, esto actúa como un par de espejos ($R_1=R_2=54\%$ como se menciona en la sección 2.4) en los extremos de la cavidad láser, por esta razón es importante un clivado de buena calidad. Esta propiedad reflectiva que posee debido al cambio de índices de refracción, provee al dispositivo de una ventaja tecnológica adicional sobre otros dispositivos láser, pues no es necesario el montaje y alineación de espejos, lo cual es una tarea que puede resultar complicada. El chip láser con contacto de tira emite en direcciones opuestas, por lo que un extremo se utiliza como salida de emisión del dispositivo, y en ocasiones el otro para monitorear la potencia de éste, pues los dispositivos se degradan a través del tiempo en operación.

Se ha descrito hasta ahora el proceso postrecimiento de obtención de chips diodo láser. En la sección siguiente se describe la manera de evaluar el funcionamiento de estos contactos y en el capítulo III se describe la caracterización de emisión de los chips. El montaje del dispositivo y detalles finales para la preparación del dispositivo se describen en el Capítulo IV.

2.7 Características Voltaje-Corriente en una unión p-n

Los chips diodos láser, para efectos de caracterización V-I constituyen fundamentalmente una unión p-n con una región estrecha privilegiada de recombinación (región sin dopar).

La unión p-n posee algunas características interesantes que tienen usos útiles en electrónica moderna. Un semiconductor dopado tanto "p" como "n" es relativamente conductor. Pero la unión entre ellos es aislante. Esta capa no conductora, llamada "zona de agotamiento" ocurre debido a que los portadores de carga eléctrica de tipo "n" y de tipo "p" (electrones y huecos, respectivamente) se atraen y se anulan en proceso llamado de recombinación. Al manipular esta capa no conductora, las uniones p-n son utilizadas comúnmente como diodos; interruptores eléctricos que permiten un flujo de electricidad en una dirección pero no en la dirección opuesta. Esta característica se explica en términos de los efectos de polarización directa y polarización inversa, donde el término polarización se refiere a la aplicación de un voltaje eléctrico en unión p-n.

El análisis de las características V-I de los dispositivos diodos láser nos da información tanto de la resistividad del bulbo de la estructura semiconductor como de la calidad de los contactos óhmicos realizados sobre ésta.

En la búsqueda de realizar buenos contactos óhmicos para los dispositivos, es importante centrar nuestra atención en las capas de contacto de la estructura semiconductor láser (sustrato y capa superior), las cuales son de GaAs (como se aprecia en la *sección 3.2*) dopadas tipo "n" y tipo "p". Para lo cual se experimentó con varios materiales y regímenes de recocido como se menciona en la siguiente sección.

2.7.1 Método de Caracterización

El primer paso para la caracterización de dichos contactos es la preparación de chips descrita en la *sección 2.6*.

Es posible analizar las características Voltaje-Corriente (V-I) de cada chip por medio de un trazador de curvas, o de una fuente de voltaje programable, los cuales aplican un voltaje en el rango de +V a -V al dispositivo y toman mediciones de corriente para cada uno de estos voltajes, desplegando esta característica mediante un gráfico de Voltaje contra Corriente (*figura 2.11*), en la caracterización de contactos óhmicos se utilizaron muestras de contacto de área ancha.

Por medio de la medición V-I se obtiene la resistencia del dispositivo R, se calculó también la resistividad del dispositivo con la fórmula $\rho=R \cdot A$, donde A es el área superficial del chip. Finalmente se calcula el voltaje de barrera V_b del dispositivo considerándolo como el voltaje en el cual el dispositivo comienza a conducir corriente en polarización directa.

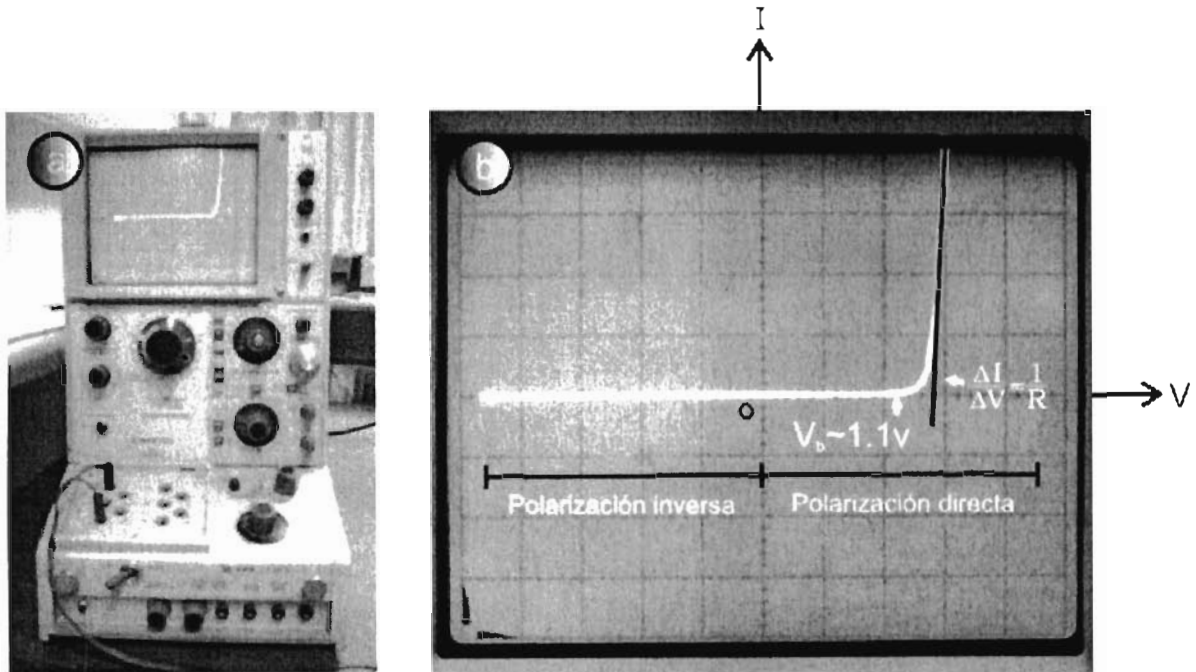


Figura 2.11. (a) Trazador de curvas, (b) Comportamiento típico de un diodo rectificador, escala por división de 20mA en el eje de las abscisas y 0.5V en el eje de ordenado. Para calcular la resistencia del dispositivo se aproxima la función $I(v)$ a una recta en la región de valores superiores al voltaje de barrera V_b y se toma el inverso de la pendiente como el valor de resistencia R .

2.8 Materiales utilizados

El estudio y selección de materiales y regímenes de recocido del proceso de creación de contactos óhmicos se basó en trabajos anteriores realizados en el UASLP-IICO [Matadamas 3], [Lara 4].

Se realizaron cuatro experimentos distintos en los cuales se utilizaron contactos Au+Zn ó Au+Cd sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo "p" con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) y Au+Sn ó Au+Ge sobre el sustrato de GaAs tipo "n" Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Sobre cada una de estas capas se realizó una segunda deposición con Au. Posteriormente a cada deposición se realizó un recocido en un reactor de cuarzo en el que se hizo circular hidrógeno a una razón aproximada de $5 \text{ cm}^3/\text{min}$, el régimen de recocido de las muestras después de la deposición de metales se muestra en la *figura 2.12*.

En todos los experimentos se colocó un filamento de tungsteno a una altura de las muestras aproximada de 4cm durante la deposición de metales por evaporación de filamento caliente, por lo que la capa depositada sobre la muestra antes del recocido es entre 0.064 (Au) y $0.139 \text{ }\mu\text{m (Au+Ge)}$ aproximadamente (ver apéndice D para detalles de cálculo del espesor de la capa de metal depositada).

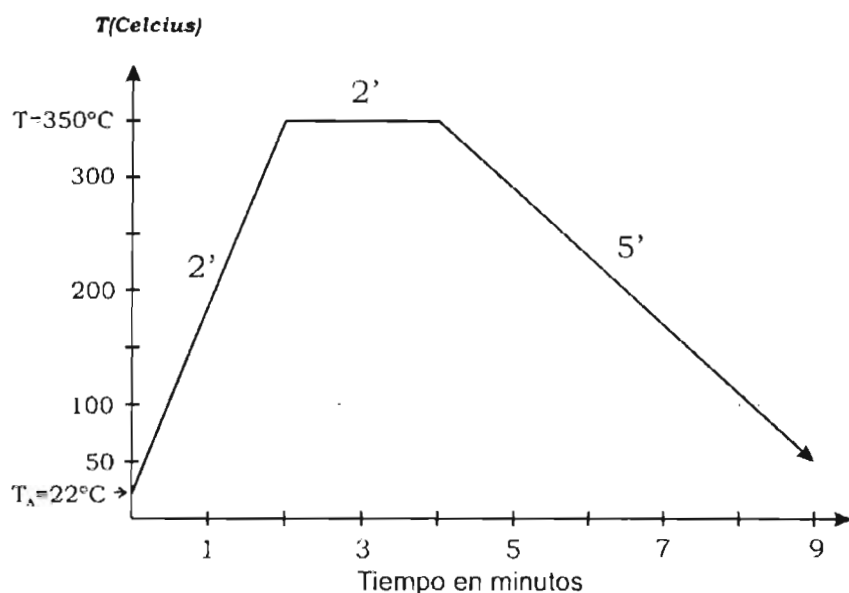


Figura 2.12. Régimen de recocido de las muestras después de cada deposición de metales.

En cada experimento se prepararon 5 chips para su caracterización V-I, las dimensiones de las muestras se escogieron para que fueran cercanas al tamaño típico de dispositivos láseres. Los resultados de estos experimentos se muestran a continuación.

2.8.1 Discusión de resultados

El motivo de experimentar con contactos tipo "p" de Au + Cd en vez de contactos Au + Zn es por que el Cd se difunde menos que el Zn al calentar las muestras, no es deseable que el material dopante se difunda hasta la capa activa del material, la cual se encuentra a unas cuantas micras de la capa de contacto, este no es un factor menos importante en los contactos tipo "n" puesto que la superficie del sustrato se encuentra a decenas o centenas de micras de la capa activa.

Para apreciar mejor los resultados de estos experimentos se muestra a continuación un promedio de los resultados de los experimentos realizados.

Número de experimento	Resistencia promedio Ω	Resistividad promedio $\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$	Capas de material sobre GaAs tipo "n"	Capas de material sobre GaAs tipo "p"
1	1.83	4.1	Au+Sn	Au+Zn
2	1.55	3.06	Au+Sn	Au+Cd
3	1.99	4.69	Au+Ge	Au+Zn
4	1.71	3.44	Au+Ge	Au+Cd

Se observa como se obtuvieron mejores resultados para los experimentos 2 y 4 donde se utilizó Au+Cd en la capa tipo “p”, se puede apreciar también que se obtuvieron resultados ligeramente mejores utilizando Au+Sn en vez de Au+Ge, al utilizar Cd se tiene un ventaja adicional sobre el Zn, pues la difusión de Cd a las capas del bulbo es menor que la del Zn.

A partir de este estudio se utilizó la misma formulación del experimento 2:

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo “p” con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Cd (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo “n” dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Es necesario recordar que la resistividad obtenida como resultado de estos experimentos no se debe simplemente a los contactos metal-semiconductor, parte de esta resistividad se debe a que tenemos una unión p-n formada por varias capas de materiales semiconductores con distintos niveles de dopaje. El método para saber realmente la resistencia que oponen estos contactos metal-semiconductor se realiza simplemente poniendo contactos sobre sustratos “n” ó “p” según sea el caso.

2.9 Conclusiones

Es importante los contactos óhmicos en la operación de dispositivos, de esta tecnología depende el desempeño así como el tiempo de vida de ellos. Se han hecho grandes esfuerzos a partir de la invención del diodo semiconductor para poder perfeccionar estas técnicas de contacto para la inyección de portadores y sigue siendo un reto hasta ahora especialmente para materiales nuevos como los basados en semiconductores orgánicos y nanotubos. Por lo que este tópico es de gran importancia para el desarrollo tecnológico de dispositivos de toda índole.

CAPITULO III

Caracterización de emisión láser

3.1 Discusión general

El IICO-UASLP realiza desarrollo tecnológico de láseres semiconductores DH (doble heteroestructura) y SCH (Heteroestructuras de confinamiento separado) los cuales tienen aplicaciones de baja potencia como apuntadores láser, CDs, DVDs, bombeo de láseres de estado sólido, para comunicaciones ópticas, impresoras láser, lectores de código barras, tratamientos médicos entre otros.

Las aplicaciones varían para distintas longitudes de onda de emisión de dispositivos diodo láser dependiendo del material utilizado en la capa activa. Se muestra a continuación los distintos materiales de capa activa que han sido estudiados o que pueden ser utilizados en el desarrollo de diodos Láser (DL) en el IICO-UASLP, con la finalidad de dar una perspectiva de las posibilidades de construcción de dispositivos DL con algunas de sus aplicaciones.

Material de la capa activa	Sustrato	λ De emisión	Energía de gap (Directo) 300K	Aplicaciones	Métodos de crecimiento Disponibles En el IICO	Ventajas y Desventajas	Constante de red
GaAs	GaAs 001	~870 nm	1.42eV	Bombeo de láseres de estado sólido 200-500mW (Nd : YAG) con arreglo multicanal, Sustrato. Aplicaciones médicas (bio-estimulación)	MBE, LPE	Prácticamente sin desacople. Emisión en una sola longitud de onda	5.65325 A
$Al_xGa_{1-x}As$	GaAs 001	630-873nm	1.42-1.97eV	Lectura de código de barras, apuntadores láser (635-670nm), DL para CDs (780nm, 5mW, $I_{th}=30mA$, $I_{op}=50mA$, $V=1.7-2.5V$, $I=30mA-100mA$), Impresoras láser (780nm, ejemplo: 20mW a 30mW con enfriador TE, 5 a 7 mW sin éste, $I_{th}=60$ a 70mA, típicamente: 5-50mW, 150mW o más para plotters y impresoras de alta velocidad), Aplicaciones médicas de tipo terapéutico (bio estimulación)** (780nm,820nm – 5mW), DVDs (650nm), lectores de código de barras (650.670nm, 5mA) bombeo de láseres de estado sólido y tratamientos de foto coagulación (808nm, 200mW)	MBE, LPE	Prácticamente sin desacople El elemento Al forma óxidos. Cerca de la transición directo a indirecto ($x\sim 0.45$) la eficiencia de emisión del material es menor	5.6533+0.0078x A

Material de la capa activa	Sustrato	λ De emisión	Energía de gap (Directo) 300K	Aplicaciones	Métodos de crecimiento Disponibles En el IICO	Ventajas y Desventajas	Constante de red
$Ga_xIn_{1-x}As$	GaAs, InP 001	0.87- 3.44 μ m	0.36- 1.42eV (0.36+ 1.064x)	Dispositivos electrónicos de altas velocidades. Láseres en el infrarrojo, láseres de cascada cuántica, bombeo de láseres de estado sólido.	MBE, LPE	En $x=0.47$ $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ el parámetro de red se ajusta al de InP (0.86eV-1.44 μ m)	6.0583- 0.405x A
InGaAsP	GaAs, InP 001	1.06, 1.3, 1.55 μ m	$E_g=[1.353(1-z) + 0.737z + 0.13z^2]$ eV a 300 K	GalnAsP, con parámetro de red ajustado con InP [(InP) $_{1-z}$ (Ga $_{0.47}$ In $_{0.53}$ As) $_z$, que es $Ga_xIn_{1-x}As_zP_{1-z}$ con $x=0.47z$] es un aleación cuaternaria de extrema importancia. Es utilizado actualmente en optoelectrónica comercial (especialmente en láseres semiconductores que emiten en 1.3 y 1.55 μ m) y en dispositivos electrónicos (especialmente transistores de alta movilidad electrónica).	LPE	Zonas de misibilidad en el material	Se ajusta al InP y al GaAs
$Ga_xIn_{1-x}P$	GaAs, InP 001	554- 917n m	1.35- 2.239eV (1.351+ 0.643 (1-x) +0.786 (1-x) 2)	Apuntadores láser, DVDs (650nm), lectores de código de barras (650nm, 5mA)	LPE	Cerca de la transición directo a indirecto ($x \sim 0.73$) la eficiencia de emisión del material es menor X=0.51, $Ga_{0.51}In_{0.49}P$ se ajusta al parámetro de red del GaAs (1.9eV-652nm)	5.8687- 0.4182x A

La caracterización de chips láseres es un proceso fundamental para la aplicación de un dispositivo. La información obtenida mediante dichas caracterizaciones sirve para evaluar los procesos de crecimiento y postcrecimiento, de tal manera que nos indiquen las capacidades del dispositivo y las cuestiones específicas en las que se debe poner atención para mejorar su desempeño. La caracterización de un dispositivo es un proceso muy amplio, algunas mediciones importantes que se realizan en chips láser son; Emisión (espectro de electroluminiscencia, campo cercano y lejano), potencia, corriente y densidad de corriente umbral, estimación de tiempo de vida del dispositivo, etc. No obstante este trabajo está limitado a la caracterización de emisión por espectro de electroluminiscencia, corriente umbral y densidad de corriente umbral.

En la sección siguiente se hablará de las estructuras usadas en este trabajo para crear los chips láser en el desarrollo de esta Tesis.

3.2 Estructura Láser

Para la realización de un dispositivo láser se utilizó una estructura crecida en Lasertel (figura 3.1), dicha estructura tiene las siguientes características:

- La concentración de Be en el GaAs, GaInP y AlGaInP es alrededor de $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$.
- La concentración de Si en el GaAs, GaInP y AlGaInP es de $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$.
- Para el QW (70Å) de GaInAs tiene emisiones entre 900 y 905 nm ($\sim \text{Ga}_{0.95}\text{In}_{0.05}\text{As}$).

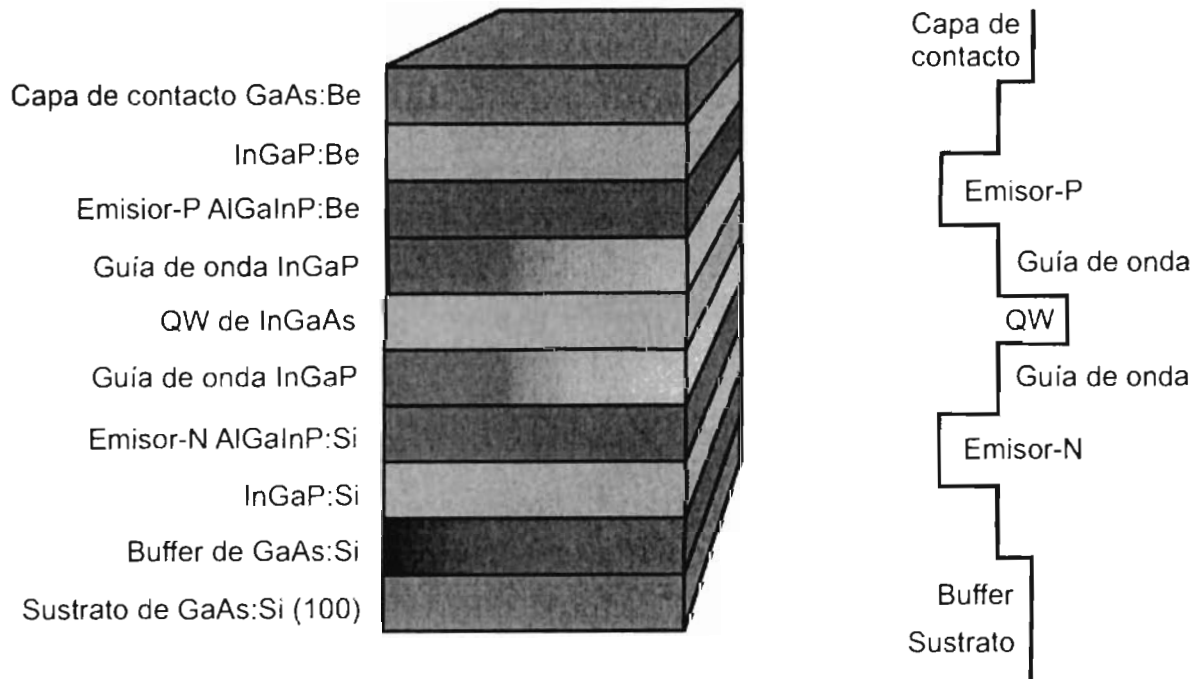


Figura 3.1. Estructura láser SCH crecida por MBE de capa activa InGaAs Lasertel.

3.3 Caracterización de emisión por la técnica de electroluminiscencia

Electroluminiscencia es la emisión óptica obtenida por excitación eléctrica al ocurrir recombinación radiativa de pares electrón-hueco, el bombeo ocurre al aplicar una diferencia de potencial al diodo en polarización directa. La intensidad y el contenido espectral de esta electroluminiscencia es también una medición directa de varias propiedades importantes de materiales, como el gap de la región de recombinación, así como la determinación del tipo de emisión de nuestro dispositivo, ya sea espontánea o estimulada.

Como se mencionó antes es necesario tener contactos en la superficie de la muestra para inyectarle corriente, esta operación se realiza colocando el chip en una montura de cobre (o de algún buen conductor) y utilizando una fuente pulsada para el bombeo eléctrico del dispositivo. Dicha fuente fue construida en el IICO-UASLP por el Ing. Pedro Viramontes, los pulsos de corriente de salida de esta fuente son de 2 microsegundos de ancho y de 3

milisegundos de descanso entre ellos, y la corriente que provee es de 0 a 5 Amperes, se habla de la fuente de bombeo en la *sección 4.4*. En la caracterización de los diodos es un requisito importante la inyección pulsada de corriente, puesto que en esta etapa de caracterización los chips carecen de una forma efectiva de disipación de calor. Al evitar el calentamiento excesivo de las muestras se obtiene emisión estimulada estable y evitamos su degradación.

El montaje experimental para medir electroluminiscencia se muestra en la *figura 3.2*, la emisión del chip es enfocada a través de una lente a la entrada de un monocromador Spectra Pro[®] 500 Acton Research Corporation, el cual es un dispositivo óptico que transmite una banda estrecha de longitudes de onda de luz ($\Delta\lambda$), de una gama más amplia de longitudes de onda disponibles en la entrada, por medio de una rejilla de difracción. El monocromador tiene un mecanismo para dirigir la radiación seleccionada ($\Delta\lambda$) a una rendija de salida. En dicha salida se colocó un fotodetector NewPort de InGaAs, la señal de este detector es amplificada por un Lock-In SR510 de Stanford Research System, el cual esta sincronizado a la frecuencia en que el láser es pulsado por la fuente de corriente. Después de amplificada la señal de salida del detector, ésta es registrada por una computadora.

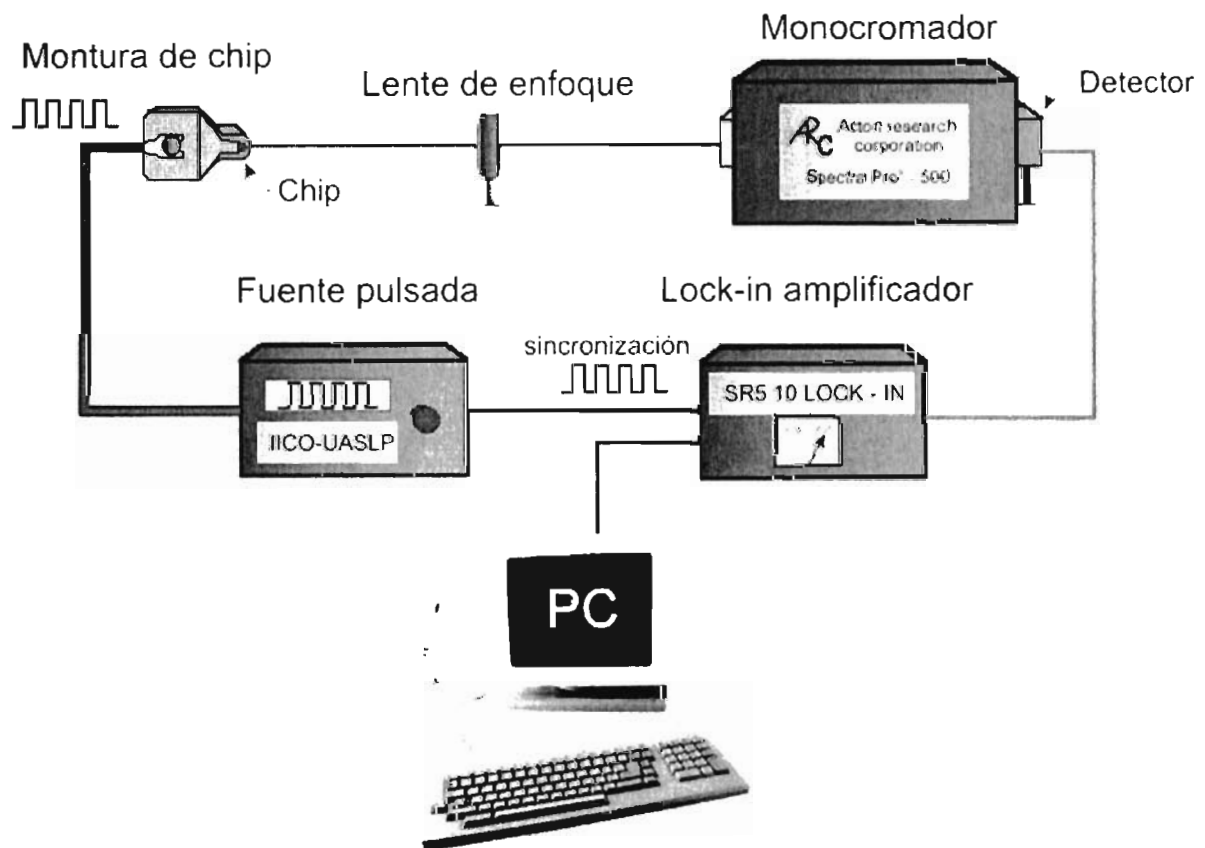


Figura 3.2. Montaje experimental para medir Electroluminiscencia.

Para la medición de emisión del dispositivo por excitación eléctrica (electroluminiscencia) se inyectó corriente en el rango de 200mA a 1.5A de tal manera que se pudiera apreciar la corriente umbral (I_{th}) y la densidad de corriente umbral ($J_{th}=I_{th}/A$) a la cual ocurre la inversión de población y la emisión láser. Se midieron otras características de emisión entre ella el ancho espectral el cuál describiremos a continuación.

3.3.1 Ancho espectral

Es el rango de emisión en el espectro electromagnético que un rayo láser (o una fuente de emisión electromagnética) cubre.

En telecomunicaciones, el ancho espectral es el intervalo de longitud de onda sobre el cuál la magnitud de todos los componentes espectrales es mayor o igual que una fracción específica de magnitud del componente que tiene el valor máximo.

En aplicaciones en comunicaciones ópticas, el método usual para especificar el ancho espectral es el ancho completo a la mitad del máximo (full width at half maximum) que llamaremos semi-ancho ($\Delta\lambda$). Este método puede ser difícil de aplicar cuando el espectro tiene una forma de línea compleja. La *figura 3.3* muestra gráficamente la obtención del semi-ancho de un espectro simple.

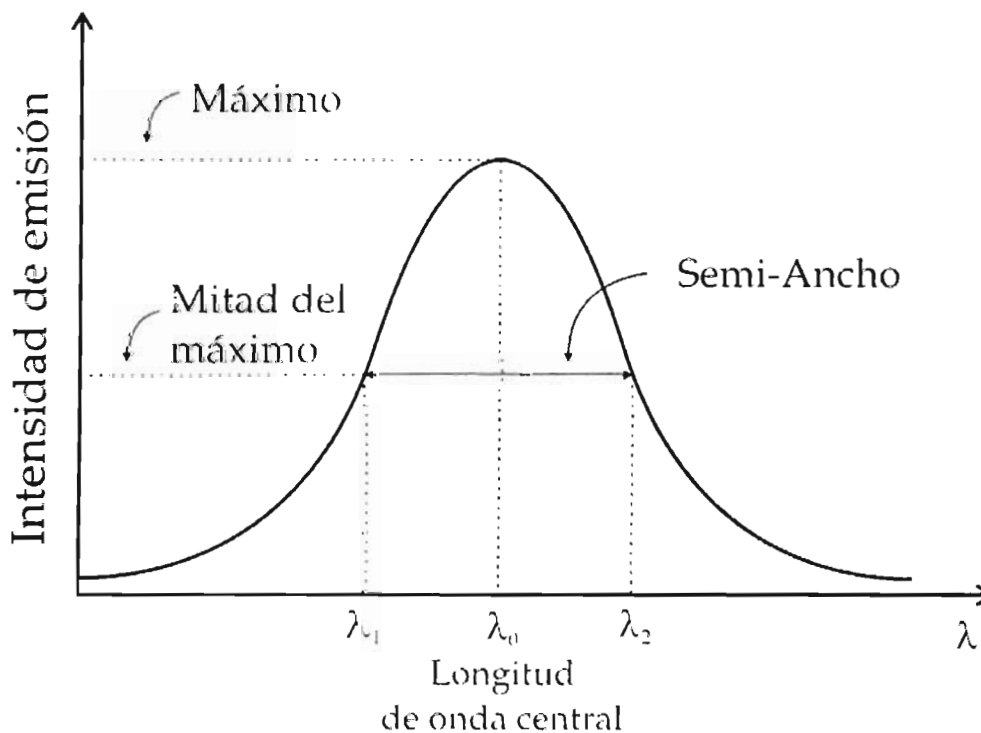


Figura 3.3. Determinación del ancho espectral por medio del método FWHM (Full width at half maximum) o semi-ancho.

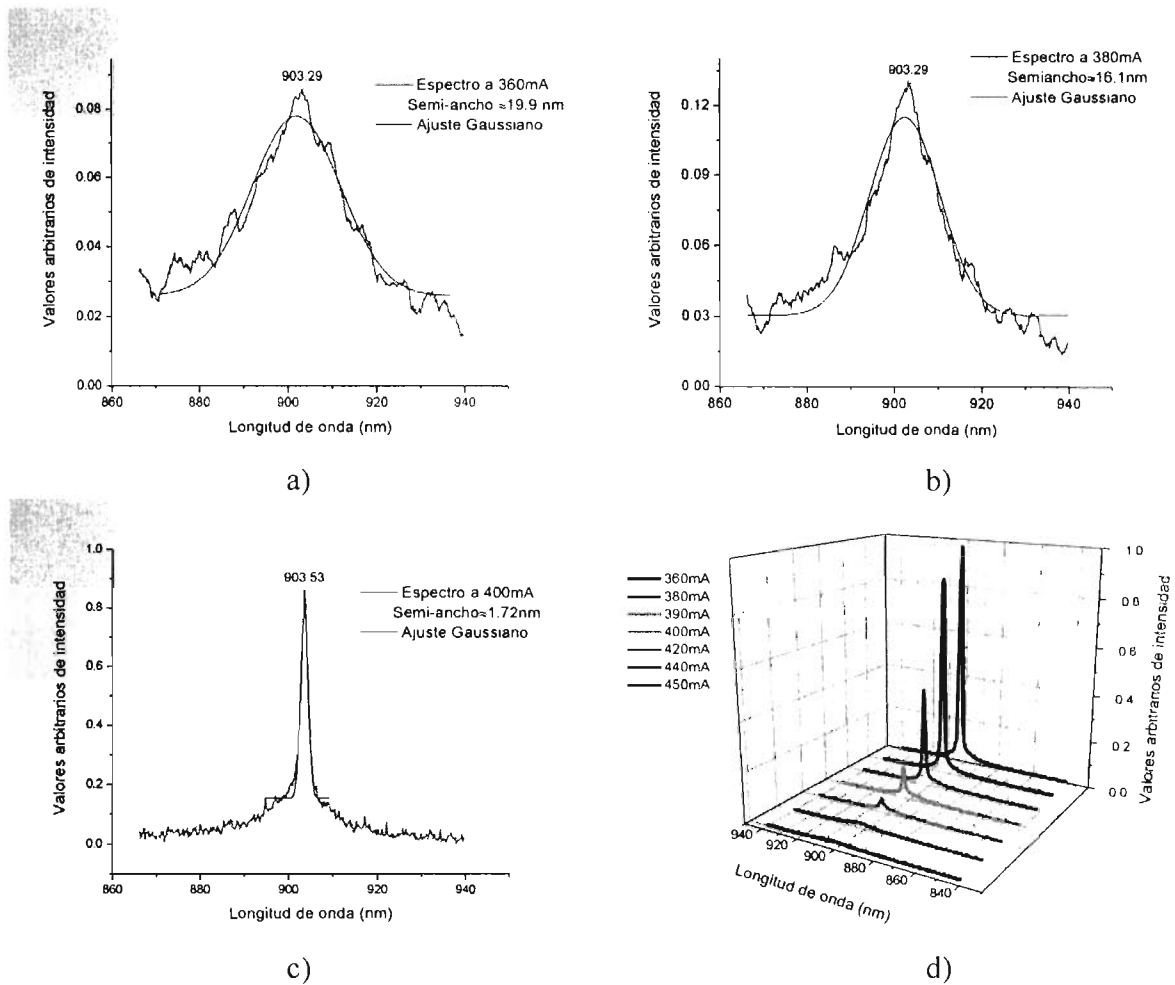


Figura 3.4. Cálculo del semi-ancho con ajuste Gaussiano por medio de OriginPro-7 para espectros de electroluminiscencia de un diodo láser (estructura láser de la sección 3.2) con contacto de tira de longitud de 100 μm a diferentes corrientes de operación. **a)** Espectro de emisión espontánea: el ancho espectral es $\Delta\lambda \sim 19.9\text{nm}$ a una corriente $I=360\text{mA}$ por debajo de la corriente umbral. **b)** Espectro de emisión espontánea: El ancho espectral es $\Delta\lambda \sim 16.1\text{nm}$, a una corriente $I=380\text{mA}$ por debajo de la corriente umbral. **c)** Espectro de emisión estimulada: el ancho espectral es $\Delta\lambda \sim 1.72\text{nm}$, para $I=400\text{mA}$, la emisión del diodo es láser. **d)** Espectro de electroluminiscencia para distintas corrientes de operación (360, 380, 400, 420, 440 y 450mA).

Durante la caracterización se observaron anchos espectrales de 1.45 a 2.37 nm ($\Delta\nu \sim 503\text{-}945\text{GHz}$) en chips láser por encima de la corriente umbral, para un Led rojo cuya emisión es espontánea, el semi-ancho es de alrededor de 41nm. La *figura 3.4* muestra una comparación entre anchos espectrales de emisión espontánea y estimulada en un diodo láser a distintas corrientes de operación, se observa que al superar la corriente umbral el ancho espectral se hace más delgado y la intensidad del diodo se amplifica. Los espectros de electroluminiscencia nos muestran los modos amplificados en la cavidad láser, el ancho espectral está en función de las dimensiones del resonador, pues este determina el número de modos posibles de operación para el dispositivo. Generalmente a más alto el número de modos, es menor el grado de coherencia temporal y espacial.

3.3.2 Modos en la cavidad Láser

Los modos en un diodo láser pueden ser longitudinales ó espaciales:

- Para *modos longitudinales* solo frecuencias específicas son posibles dentro de la cavidad óptica de un láser, de acuerdo con la condición de onda estacionaria.
- Los *modos transversales* son los creados perpendicularmente al eje óptico del láser y por ser modos espaciales se manifiestan en la emisión externa del láser, en este trabajo no se realizaron mediciones de campo cercano y lejano, por lo que no son descritos con detalle estos modos.

Los modos longitudinales son ilustrados en la *figura 3.5*. Físicamente cada modo longitudinal es una onda estacionaria de luz, creada por el traslape de dos ondas viajeras que se mueven en direcciones opuestas.

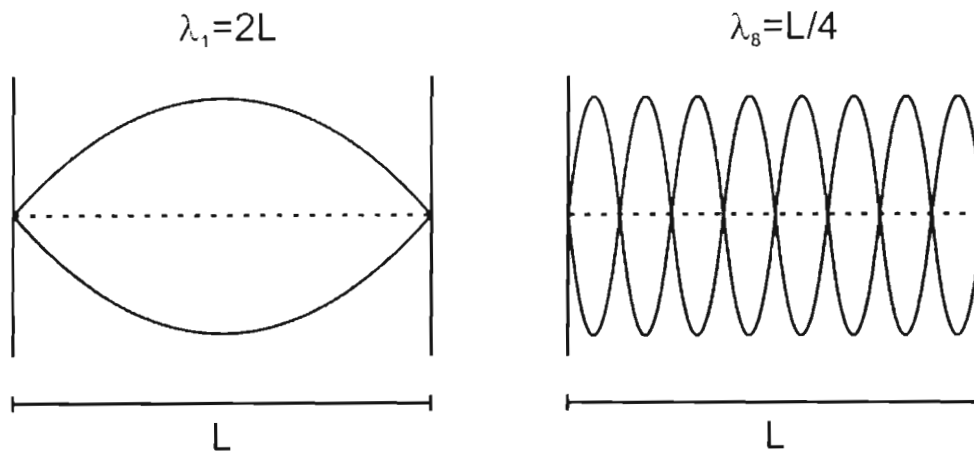


Figura 3.5. Modos longitudinales en una cavidad láser de longitud L , se muestra en la figura el modo fundamental ($m=1$, λ_1) y un modo de orden 8 ($m=8$, λ_8), los cuales cumplen con la condición de onda estacionaria $L = m \lambda_m / 2$. En un láser convencional de resonador Fabry-Perot, $L \gg \lambda$.

La cavidad láser es muy importante para un láser en muchos aspectos, sus dimensiones determinan los modos longitudinales de modos láser.

Usando un interferómetro de Fabry-Perot se puede observar que el haz de salida de un láser consiste en un número de componentes discretos de frecuencia. Estos modos son conocidos como modos longitudinales o modos axiales. Estos modos son creados dentro del resonador óptico entre el par de espejos, los cuales cumplen con dos objetivos:

- 1) Incrementan la longitud del medio activo, haciendo que el haz pase por este muchas veces.
- 2) Determinan las condiciones de frontera, para el campo electromagnético dentro de la cavidad láser.

Para crear una onda estacionaria es necesario que dos ondas con la misma frecuencia y amplitud, se muevan en direcciones opuestas. Dentro de la cavidad las ondas estacionarias cumplen con la condición (sección 1.3):

$$L = m \lambda_m / 2$$

donde :

L = Longitud de la cavidad

m = Número de modo, que es igual al número de mitades de longitud de onda dentro de la cavidad óptica. El primer modo consiste en la mitad de la longitud de onda, el segundo es dos mitades ó λ .

λ_m = Longitud de onda de orden “ m ” dentro de la cavidad láser.

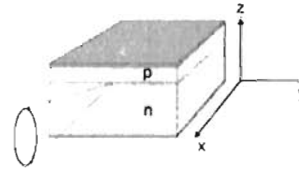
El número de modos en la mayoría de los láseres es muy grande. Por ejemplo si la longitud de onda central es de 500nm y la separación entre espejos es de 25cm, el valor de m es de 1,000,000, al ser “ m ” cualquier número entero, hay muchos modos de resonancia posibles en la cavidad del láser. Para λ alrededor de 900nm (láseres utilizados en este trabajo), y $L \sim 500\mu\text{m}$, $m=2,222$ modos.

3.4 Resultados

Se eligieron 20 chips con distintas características, tanto de contactos de área ancha y de tira de 10 y 100 μm , de distintas longitudes de resonador, con la finalidad de estudiar la operación de diodos láser en régimen pulsado a temperatura ambiente. Se determinaron mediante espectros de electroluminiscencia y con la medición de curvas características V-I los parámetros de resistencia (R), resistividad (ρ), corriente umbral (I_{th}), densidad de corriente umbral (J_{th}), longitud de onda central ó máximo de emisión (λ_0), ancho espectral por medio del cálculo de FWHM ó semi-ancho ($\Delta\lambda$).

A continuación se muestran resultados representativos de distintas mediciones realizadas a cuatro chips con la finalidad de ilustrar el proceso de caracterización mediante tablas de parámetros y gráficas de electroluminiscencia a distintos regímenes de inyección de corriente, el análisis de resultados se tratará en la siguiente sección, donde se mostrará los resultados obtenidos para todos los chips que se analizaron durante este estudio.

Chip #1 con contacto de área ancha



Parámetros del chip obtenidos por medio de medición de la curva característica del diodo y espectros de electroluminiscencia:

Resistencia	V_b	Dimensiones (μm)			Resistividad ρ	Corriente umbral I_{th}	Densidad de corriente umbral J_{th}	Pico de emisión estimulada a 900mA	Semi-ancho $\Delta\lambda$
Ω	volts	X	Y	z	$\Omega \text{ cm}^2$	mA	KA/cm^2	nm	nm
2	1.1	642.6	392.7	185	5.05×10^{-3}	800	0.317	917nm	2

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo "p" con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Cd (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo "n" dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

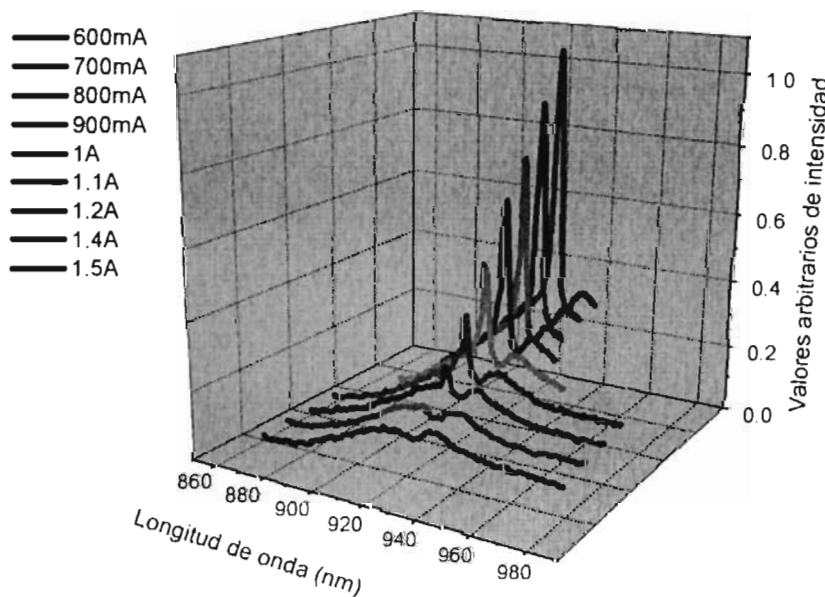


Figura 3.6

Espectro de Electroluminiscencia λ contra intensidad para varias corrientes aplicadas a un chip (con contacto de área ancha) de 600mA a 1.5A.

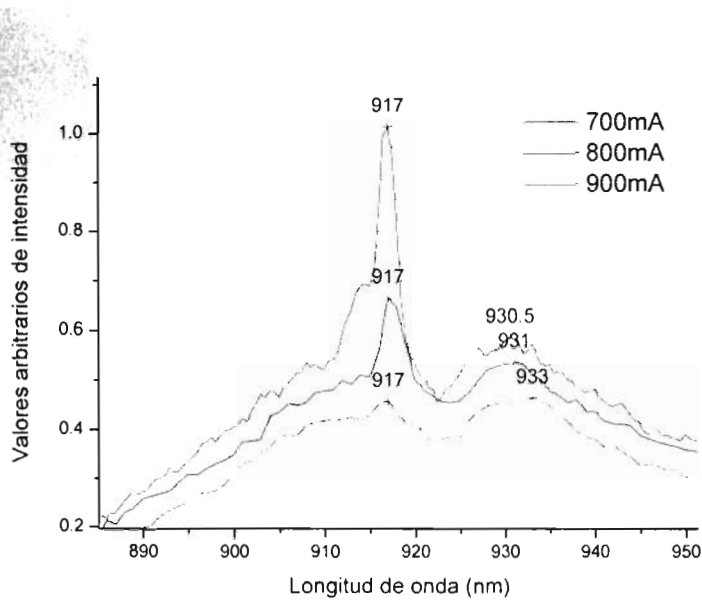


Figura 3.7

Espectro de Electroluminiscencia para distintas corrientes aplicada a un chip (con contacto de área ancha). Se puede apreciar el cambio de emisión espontánea a estimulada de 700mA a 800mA. El semi-ancho a $I=900\text{mA}$ es de $\Delta\lambda \sim 2\text{nm}$.

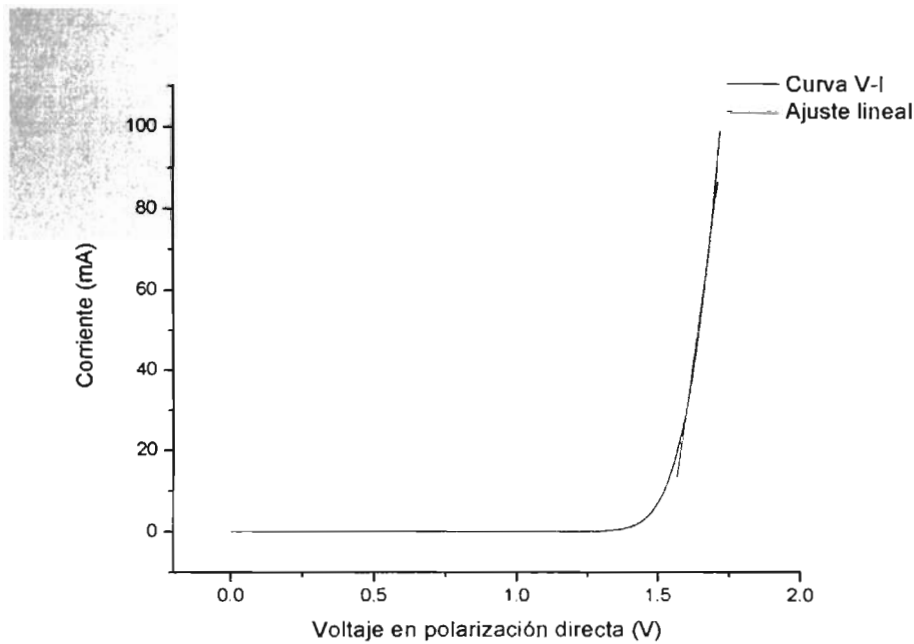


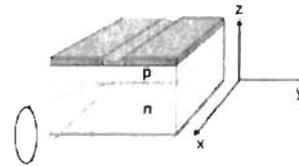
Figura 3.8

Curva V-I de un chip de contacto de tira de área ancha, un ajuste lineal a la curva V-I fue realizado en OriginPro 7. La pendiente de esta curva es igual a 0.5 por lo que $R=2\Omega$.

Observaciones:

- Se puede apreciar que la corriente umbral es más alta que en los chips de contacto de tira, sin embargo al tener una cavidad más grande se observan más modos amplificados, así mismo se observa que la densidad de corriente es menor que en el resto de los chips (de contacto de tira). Es importante considerar que el chip de contacto de área ancha emite en las cuatro caras paralelas a la dirección de crecimiento.

Chip #2 con contacto de tira (10 μ m)



Parámetros del chip obtenidos por medio de medición de la curva característica del diodo y espectros de electroluminiscencia:

Resistencia	V_b	Dimensiones (μ m)			Resistividad ρ	Corriente umbral I_{th}	Densidad de corriente umbral J_{th}	Pico de emisión estimulada a 160mA	Semi-ancho $\Delta\lambda$
Ω	volts	x	Y	z	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	mA	KA/cm^2	nm	
2.73	1.1	357	10	185	9.75×10^{-5}	145	4.06	895.94	1.5

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo "p" con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Cd (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo "n" dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

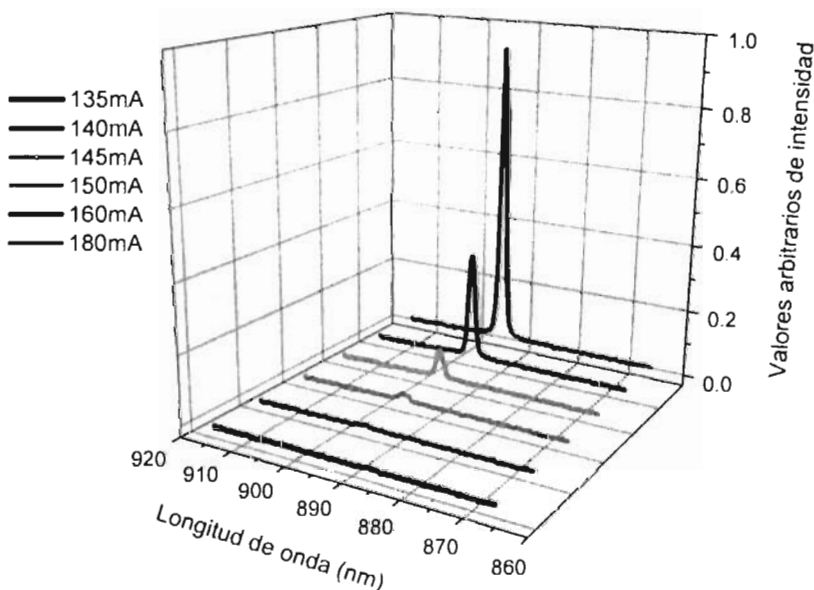


Figura 3.9
Espectro de Electroluminiscencia, λ contra intensidad para varias corrientes aplicadas a un chip (de contacto de tira de 10 μ m) de 135mA, a 180mA

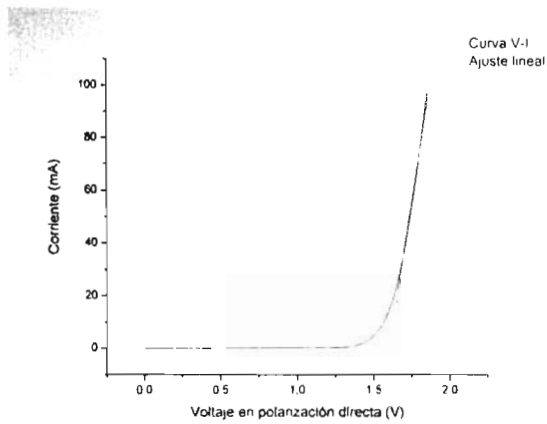


Figura 3.11

Curva V-I de un chip de contacto de tira de 10µm, un ajuste lineal a la curva V-I fue realizada en OriginPro 7. La pendiente de esta curva es igual a 0.367 por lo que $R=2.73\Omega$.

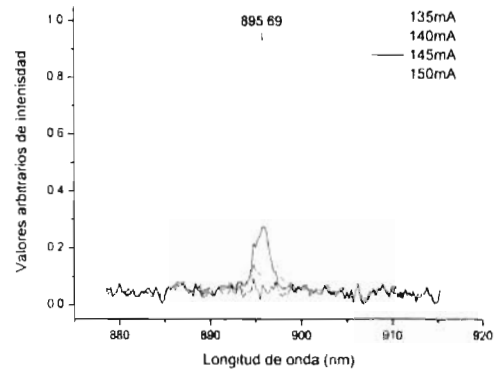


Figura 3.12

Se puede apreciar el cambio de emisión espontánea a estimulada de 140mA a 145mA. El semi-ancho del espectro de electroluminiscencia para $I=150mA$ es $\Delta\lambda\sim 1.5nm$.

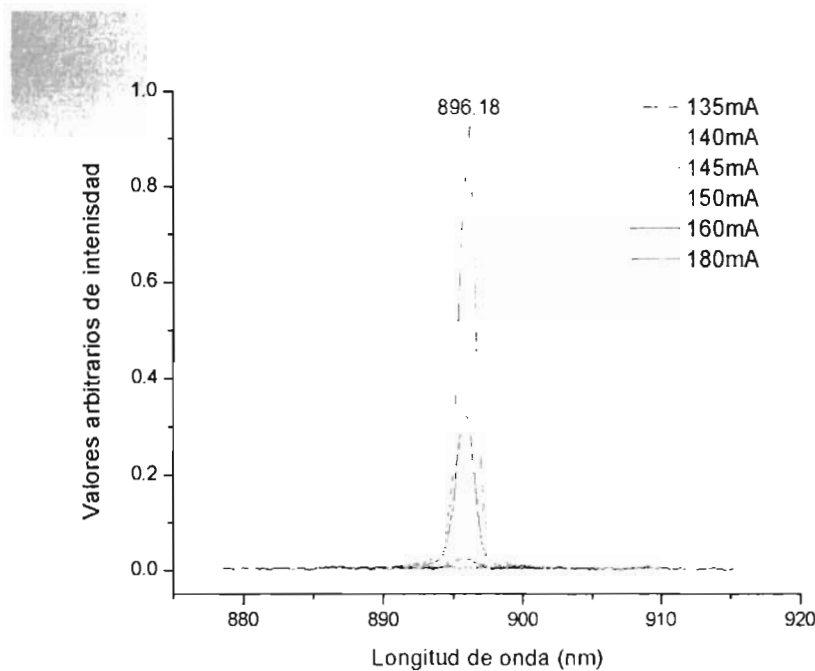


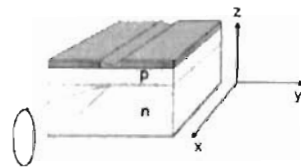
Figura 3.10

Espectro de Electroluminiscencia λ contra intensidad para varias corrientes aplicadas a un chip (con contacto de tira de 10µm). La intensidad de emisión es amplificada rápidamente al aumentar la corriente por encima del umbral.

Observaciones:

- Se aprecia como en los chips de contacto de tira de 10µm, la corriente umbral es menor que en contactos de área ancha y de tira de 100µm. Sin embargo las densidades de corriente umbral son mayores al tener una región de recombinación más delgada, en consecuencia tiene un mayor peso el factor de pérdidas por dispersión debido a defectos interfasiales.

Chip #3 con contacto de tira (100 μ m)



Parámetros del chip obtenidos por medio de medición de la curva característica del diodo y espectros de electroluminiscencia:

Resistencia	V_b	Dimensiones (μ m)			Resistividad ρ	Corriente umbral I_{th}	Densidad de corriente umbral J_{th}	Pico de emisión estimulada a 500mA	Semi-ancho $\Delta\lambda$
Ω	volts	x	Y	z	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	mA	KA/cm ²		nm
2.5	1.1	464.1	100	185	1.16×10^{-3}	450	0.969	899	2.3

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo "p" con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Cd (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo "n" dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

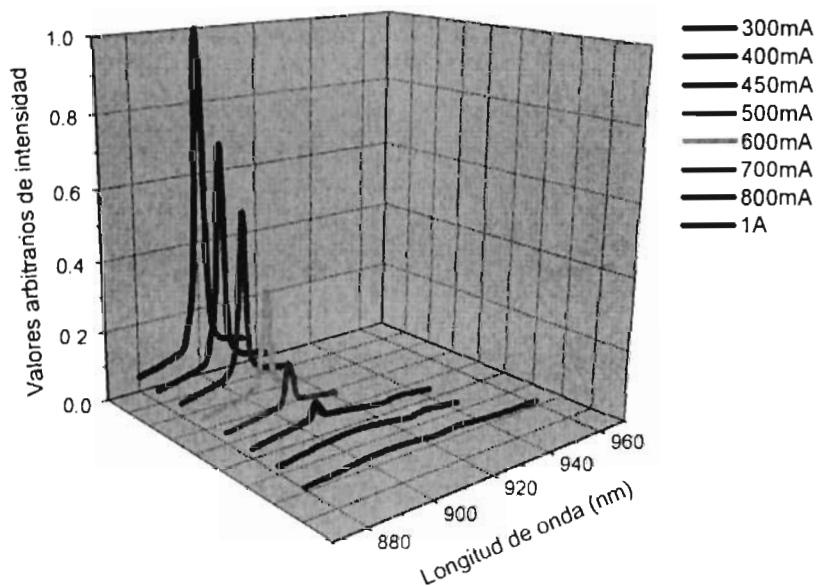


Figura 3.13

Espectro de Electroluminiscencia λ contra intensidad para varias corrientes aplicadas a un chip (con contacto de tira de 100 μ m) de 300mA, a 1A.

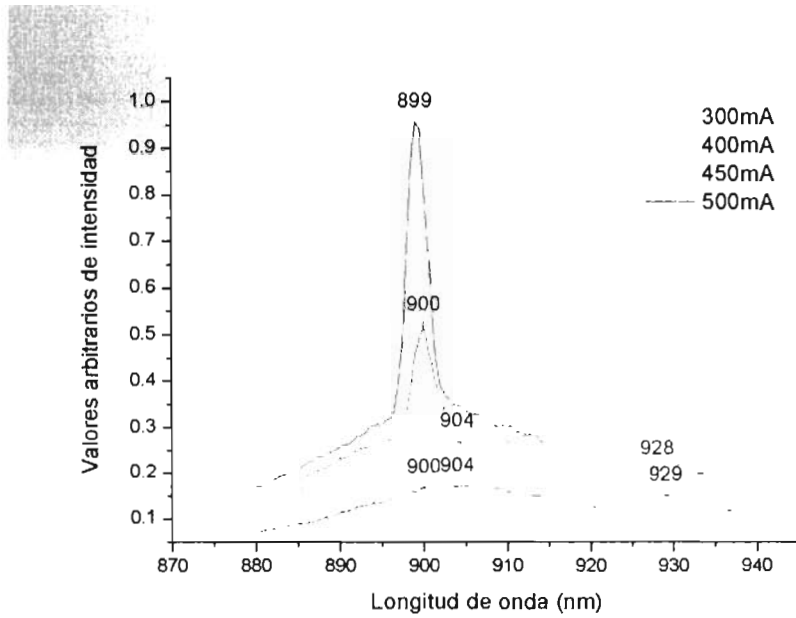


Figura 3.14

Espectro de Electroluminiscencia λ contra intensidad para varias corrientes aplicadas a un chip (de contacto de tira de $100 \mu\text{m}$). Se puede apreciar el cambio de emisión espontánea a estimulada a 400mA a 450mA. El semiancho del espectro de $I=500\text{mA}$ es de $\Delta\lambda \sim 2.5\text{nm}$

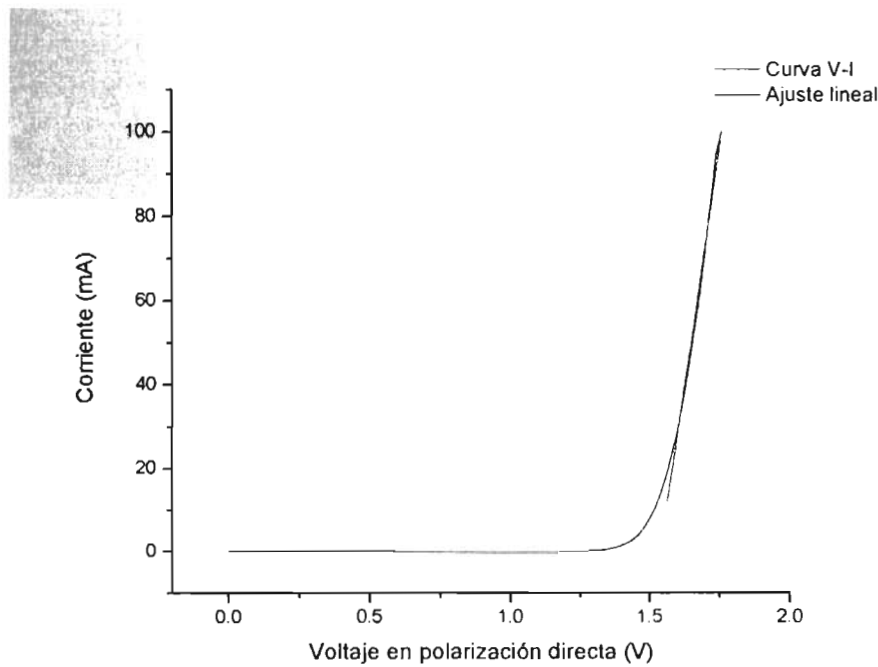


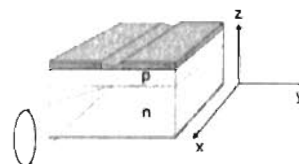
Figura 3.15

Curva V-I de un chip de contacto de tira de $100\mu\text{m}$, un ajuste lineal a la curva V-I fue realizada en OriginPro 7. La pendiente de esta curva es igual a 0.4 por lo que $R=2.5\Omega$

Observaciones:

- Se muestra como se puede inyectar grandes corrientes a los chips puesto que están trabajando de manera pulsada. Las corrientes de operación para un chip de contacto de tira son menores que para las de un chip de área ancha, los valores de densidad de corriente en las que operan los chips de $100\mu\text{m}$ son mucho menores que para chips de $10\mu\text{m}$.

Chip #4 con contacto de tira (100µm)



Parámetros del chip obtenidos por medio de medición de la curva característica del diodo y espectros de electroluminiscencia:

Resistencia	V_b	Dimensiones (µm)			Resistividad ρ	Corriente umbral I_{th}	Densidad de corriente umbral J_{th}	Pico de emisión estimulada a 400mA	Semi-ancho $\Delta\lambda$
Ω	volts	x	Y	z	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	mA	KA/cm^2	a 400mA	nm
1.38	1.1	571.4	100	185	7.89×10^{-4}	390	0.682	903.53	1.72

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo "p" con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido*	Tiempo
1	Au (25 mg)	420°C	2'
2	Au (25 mg)	280°C	5'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo "n" dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido*	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	420°C	2'
2	Au (25 mg)	280°C	5'

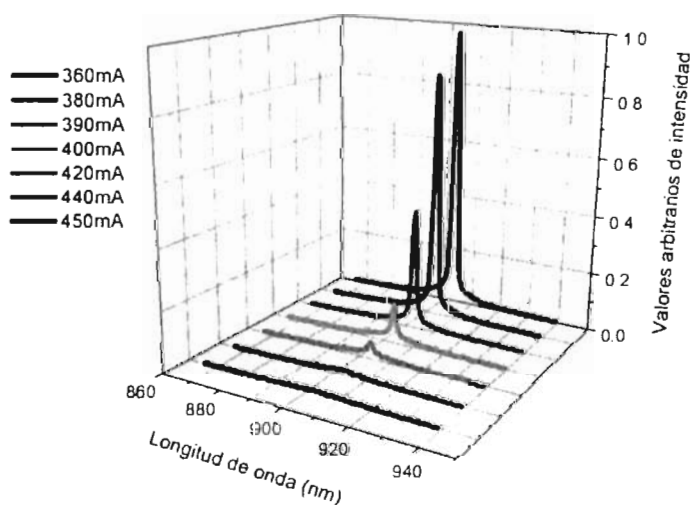


Figura 3.16

Espectro de Electroluminiscencia λ contra intensidad para varias corrientes aplicadas a un chip (de contacto de tira de 100 µm) de 360mA a 450mA.

* Regímenes de recocido desarrollados por Ismael Lara, IICO-UASLP, 2005.

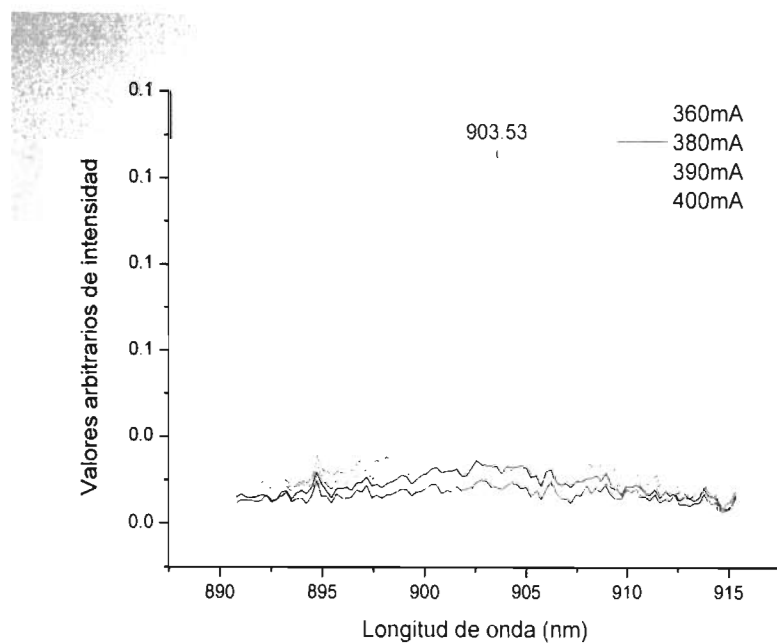


Figura 3.17

Espectro de Electroluminiscencia para distintas corrientes aplicadas a un chip (con contacto de tira de 100 μm). Se puede apreciar el cambio de emisi3n espont3nea a estimulada de 400mA a 500mA.

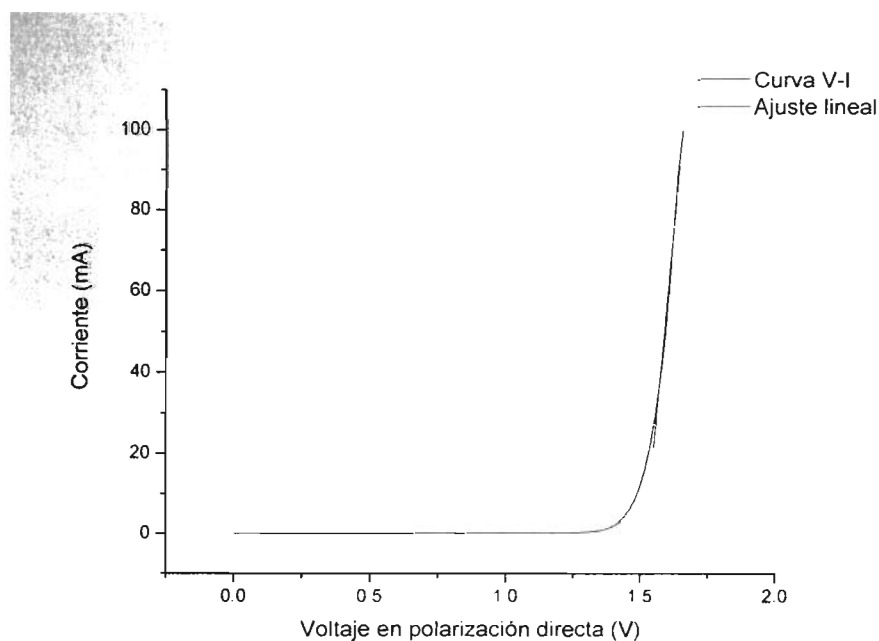


Figura 3.18

Curva V-I de un chip de contacto de tira de 100 μm , un ajuste lineal a la curva V-I fue realizado en OriginPro 7. La pendiente de esta curva es igual a 0.725 por lo que $R=1.38\Omega$

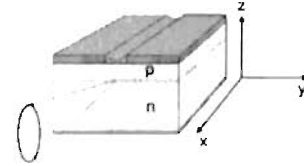
Observaciones:

- Al aumentar el recocido de los materiales depositados las resistencias y resistividades de los chips disminuyen, por lo que se considera interesante agregar Cd durante el proceso de dep3sito de metales sobre la capa tipo "p" con los mismos r3gimenes de calentamiento.

3.4.1 Tablas de resultados

Se caracterizaron 20 chips láser de contacto de área ancha y de contacto de tira con las siguientes características:

1) Chips de contacto de área ancha (1 chip) y de contacto de tira de $10\mu\text{m}$ (4 chips) y $100\mu\text{m}$ (7 chips), con distintas longitudes (x) de cavidad en los que se depositaron los siguientes metales:



Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo "p" con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Cd (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo "n" dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

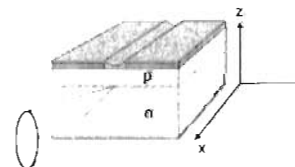
#	R	V _b	Dimensiones (μm)			Resistividad ρ	Corriente umbral I _{th}	Densidad de corriente umbral J _{th}	Máximo emisión estimulada nm	Semi-ancho $\Delta\lambda$
	Ω	volts	x	Y	z	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	mA	KA/cm ²	(Corriente)	nm
1*	2	1.1	642.6	392.7	185	5.05×10^{-3}	800	0.277	917nm	2

#	R	V _b	Dimensiones (μm)			Resistividad ρ	Corriente umbral I _{th}	Densidad de corriente umbral J _{th}	Máximo emisión estimulada nm	Semi-ancho $\Delta\lambda$
	Ω	volts	x	Y	z	$\Omega \cdot \text{cm}^2$	mA	KA/cm ²	(Corriente)	nm
1*	2.73	1.1	357	10	185	9.75×10^{-5}	145	4.06	895.94 (160mA)	1.5
2	3.18	1.1	500	10	185	1.59×10^{-4}	190	3.8	902.8 (190mA)	1.89
3	2.67	1.1	500	10	185	1.34×10^{-4}	245	4.9	898.63 (250mA)	1.32
4	2.78	1.1	821.1	10	185	2.28×10^{-4}	185	2.25	909.16 (190mA)	1.56

* Los chips ilustrados en la sección anterior son aquellos que están sombreados.

#	R	V _b	Dimensiones (μm)			Resistividad ρ	Corriente umbral I _{th}	Densidad de corriente umbral J _{th}	Máximo emisión estimulada nm	Semi-ancho Δλ
	Ω	volts	x	Y	z	Ω·cm ²	mA	KA/cm ²	(Corriente)	nm
1	2	1.1	357	100	185	7.14x10 ⁻⁴	600	1.68	893.73 (620mA)	1.64
2	2.24	1.1	357	100	185	8x10 ⁻⁴	500	1.4	892.02 (500mA)	2.37
3	1.79	1.1	428.4	100	185	7.67x10 ⁻⁴	450	1.05	898.63 (450mA)	1.75
4*	2.5	1.1	464.1	100	185	1.16x10 ⁻³	450	0.969	899 (500mA)	2.3
5	1.55	1.1	500	100	185	7.75x10 ⁻⁴	400	0.8	900.35 (460mA)	1.78
6	1.78	1.1	571.2	100	185	1.02x10 ⁻³	375	0.65	905 (375mA)	1.9
7	1.56	1.1	785.4	100	185	1.23x10 ⁻³	370	0.47	907.69 (370mA)	1.45

2) Chips de contacto de tira de 100μm (8 chips), de distintas longitudes (x) de cavidad en los que se depositaron los siguientes metales:



Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo "p" con Be (~5x10¹⁹ cm⁻³).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido**	Tiempo
1	Au (25 mg)	420°C	2'
2	Au (25 mg)	280°C	5'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo "n" dopado con Si (~1x10¹⁸ cm⁻³).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido**	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	420°C	2'
2	Au (25 mg)	280°C	5'

** Regímenes de recocido desarrollados por Ismael Lara, IICO-UASLP, 2005.

#	R	V _b	Dimensiones (μm)			Resistividad ρ	Corriente umbral I _{th}	Densidad de corriente umbral J _{th}	Máximo emisión estimulada nm	Semi-ancho Δλ
	Ω	volts	x	Y	z	Ω·cm ²	mA	KA/cm ²	(Corriente)	nm
1	1.96	1.1	284.8	100	185	5.58x10 ⁻⁴	470	1.65	929.66 (500mA)	1.64
2	1.73	1.1	357	100	185	6.18x10 ⁻⁴	450	1.26	897.16 (450mA)	2.37
3	1.7	1.1	446.2	100	185	7.59x10 ⁻⁴	395	0.885	900.59 (400mA)	1.75
4	1.16	1.1	500	100	185	5.8x10 ⁻⁴	390	0.78	901.33 (400mA)	1.78
5*	1.38	1.1	571.2	100	185	7.88x10 ⁻⁴	390	0.682	903.53 (400mA)	1.9
6	1.44	1.1	571.2	100	185	8.23x10 ⁻⁴	375	0.656	904.51 (405mA)	1.45
7	1.44	1.1	606.9	100	185	8.74x10 ⁻⁴	440	0.725	904.75 (450mA)	2.25
8	1.61	1.1	642.6	100	185	1.03x10 ⁻³	370	0.575	906.22 (380mA)	1.5

3.4.2 Análisis de resultados

El estudio y caracterización de este capítulo fue enfocado a la caracterización de resistividades en diodos láser de contacto de tira y a la medición de parámetros relacionados con longitudes de onda de emisión y corrientes de operación para distintas dimensiones de cavidad láser.

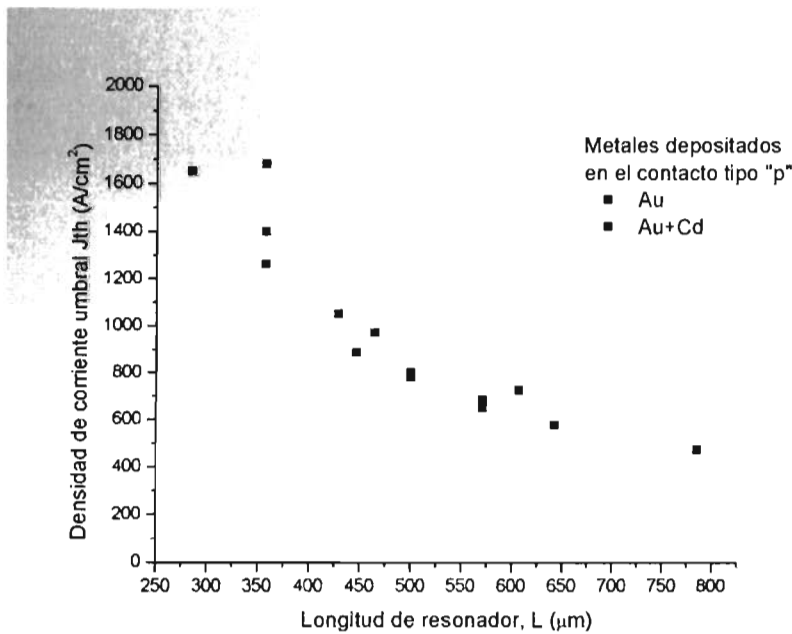


Figura 3.19

Gráfico de densidad de corriente umbral contra longitud de resonador para chips de contacto de tira de 100μm, para los cuales Au+Sn fueron depositados sobre el contacto tipo "n" y Au ó Au+Sn sobre el contacto tipo "p", donde se hizo variar la longitud "L" del resonador.

Como resumen de dichos resultados se muestra en la *figura 3.19* la caracterización de densidad de corriente umbral para 15 chips de $100\mu\text{m}$, para distintas longitudes del resonador, la gráfica nos muestra que al ir aumentando la longitud del resonador se obtiene una ganancia umbral menor (g_{th}), estos conceptos fueron discutidos con anterioridad en la *sección 1.4*, titulada “Ganancia óptica y condición umbral”.

3.5 Conclusiones

Los resultados mostrados en este capítulo nos permiten saber características importantes de diodos láser, la comparación entre distintos chips con distintos contactos (de tira de $10\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$ ó área ancha), distintos metales depositados (Au ó Au + Cd) sobre el contacto tipo “p”, o distintas dimensiones del contacto superficial nos indican la dirección en la que se debe trabajar para mejorar el funcionamiento de estos dispositivos. En este capítulo y en el pasado se presenta una metodología de caracterización postrecimiento de estructuras basadas en diodos láser, sin embargo los métodos expuestos están muy lejos de representar una caracterización completa postrecimiento. Trabajo a futuro es propuesto para determinar parámetros como la calidad del haz (campo lejano, grado de coherencia, visibilidad de franjas, divergencia del haz, etc.), pérdidas internas y externas de la cavidad, factor de ganancia, así como tiempo de vida y potencia de salida del dispositivo en régimen continuo de bombeo.

CAPITULO IV

Construcción de un dispositivo usando chips DL

4.1 Introducción

Este capítulo esta dedicado a la descripción de la construcción de un dispositivo láser a partir de chips DL (diodo láser), para lo cuál son importantes los siguientes aspectos:

- Colocación de chips sobre disipador
- Enlace ó interconexión de alambre a la superficie del chip, por medio la técnica wirebonding termosónica
- Colocación del disipador sobre un elemento peltier para la estabilización de temperatura del dispositivo
- Una fuente de bombeo eléctrico (fuente de corriente)

El dispositivo que fabricamos no consta de estabilización de temperatura, solo se utilizó un disipador de cobre en la disipación de calor. En algunas aplicaciones como apuntadores láser, CDs y DVDs, no se utiliza la estabilización de temperatura por medio de un elemento peltier (enfriador termoeléctrico), sin embargo este aspecto es importante en tareas más precisas como en aplicaciones médicas, por lo que vale la pena mencionarlo.

4.2 Fijado de chip sobre disipador

El proceso de construcción de un módulo Láser comienza fijando firmemente una cara del chip a una base o disipador. Se utilizaron disipadores de cobre realizados en el taller mecánico (*figura 4.1*), estos disipadores fueron pulidos por la superficie donde se monta el chip por medio de alúmina (AlO_2) hasta lograr un acabado espejo. Posteriormente se deposita una capa de Au (30mg a 4cm del filamento, recocido $280^{\circ}C/2min$) sobre la superficie del disipador en la evaporadora de metales, esta pequeña capa previene la oxidación de la superficie de cobre.

En el proceso de fijar el chip al disipador es necesario tomar en cuenta varias consideraciones, al trabajar con láseres de emisión lateral, se debe colocar el chip a la orilla del disipador de tal forma que la emisión sea paralela a la superficie, la cara que se fija a la superficie del disipador es aquella que sea la más cercana a la capa activa donde ocurre la recombinación de portadores y por lo consiguiente donde se genera más calor.

En el caso de nuestros chips la cara que se pega al disipador es la de contacto de tira, correspondiente a la capa de contacto tipo "p". Para fijar el chip se requiere un material conductor, con un bajo punto de fusión (como el In o la soldadura de Sn-Pb) o un adhesivo conductor (laca de plata), que nos permita fijar el chip sin incrementar demasiado la temperatura durante el proceso.

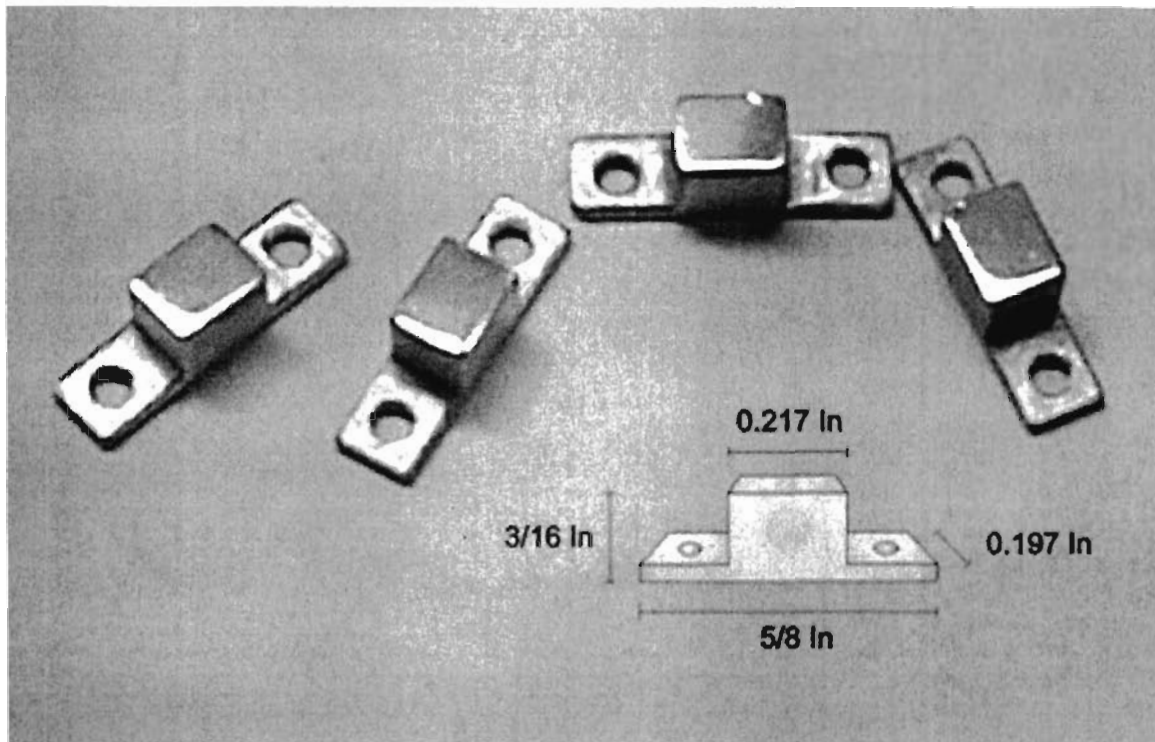


Figura 4.1. Disipadores de cobre con recubrimiento de oro.

Se observó que la soldadura de Sn-Pb nos permitía fijar fácilmente y de manera firme el chip, y con ayuda de pasta para soldar se logró una capa delgada de soldadura entre el chip y disipador, de tal forma que la soldadura no cubre significativamente el perfil del chip evitando la inyección de portadores desde las caras o tapando la emisión lateral, este es un punto importante que requiere especial atención puesto que la capa activa y por lo consiguiente la región lateral de emisión queda a sólo unas cuantas micras del disipador.

Tomando estas consideraciones el proceso para fijar el chip es el siguiente:

- Se coloca el disipador sobre una base metálica que se calienta a 200°C.
- Se coloca una pequeña cantidad de soldadura de Sn-Pb (solo el necesario para cubrir un área de 500 x 500 μm aproximadamente) en la orilla del disipador donde el chip es montado, se observa como la soldadura pasa de estado sólido a líquido.
- Se coloca pasta para soldadura, de tal forma que la soldadura se expande sobre la superficie del disipador formando una capa uniforme, si la capa es gruesa se debe hacer uso de alguna herramienta plana para expandirlo sobre la superficie.
- Se coloca el chip en la orilla del disipador sobre la soldadura y se presiona ligeramente.
- Se retira el chip de la base metálica y se deja enfriar.

4.3 Interconexiones del dispositivo

Al quedar fijo el chip al disipador, la conexión a la fuente de bombeo eléctrico (contacto tipo "p") se realiza a través del disipador de cobre, para lograr la conexión al contacto tipo "n" se requiere alambrearlo, esto se realiza por medio de un proceso de soldado termosónico (técnica wire-wedge-bonding – ver apéndice F) utilizando alambre de Au de $20\mu\text{m}$ de diámetro. Se observa que el enlace metal-semiconductor (el alambre de Au con el chip) realizado por esta técnica resultó débil por lo que se utilizó también In en el pegado de la muestra.

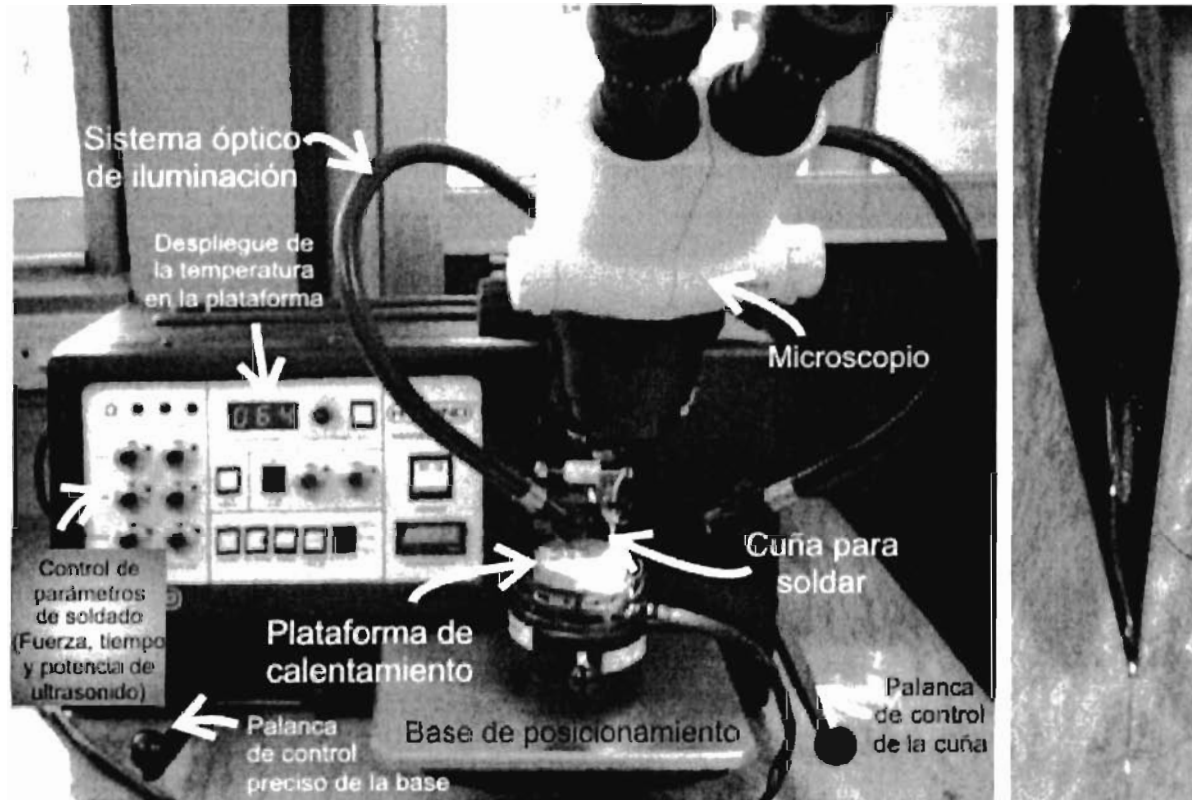


Figura 4.2. Bonder termosónico de cuña modelo 572A Hybond por el cual se realizan interconexiones de alambre de oro o de aluminio de 12.7 a $50\mu\text{m}$ de diámetro.

Herramienta de cuña para soldar

El proceso utilizado en el enlace o conexión del contacto sobre la superficie del chip (correspondiente al tipo "n") es el siguiente:

- Se coloca un pequeño pedazo pequeño de In sobre el chip (de tal manera que solo cubra parcialmente la superficie del chip) sobre el disipador.
- Se calienta en flujo de H_2 a 270°C por 2' de tal manera que el In pase a estado líquido y apenas logre difundirse sobre el chip.
- Para realizar la conexión sobre el chip con alambre de Au de $20\mu\text{m}$ en la plataforma de calentamiento del bonder a 100°C .
- A esa temperatura se realiza el soldado termosónico al chip sobre la capa pequeña de In con las mismas características para el soldado sobre Au dadas por el

proveedor – U/S Low en 18 (0-1Watt), Tiempo de soldado en 30 ~ 52ms (Bond time range – 10ms a 150ms), Fuerza de soldado en 18 (Bond force range – 15 a 150mg).

- Se procede a soldar usando un cautín. el alambre de Au (fijo de un extremo al chip) a un cable para redes usando soldadura convencional de Sn-Pb, posteriormente este cable se monta sobre un pedazo de aislante (de teflón) y es pegado con adhesivo kolaloka al disipador como se muestra en la *figura 4.3*.

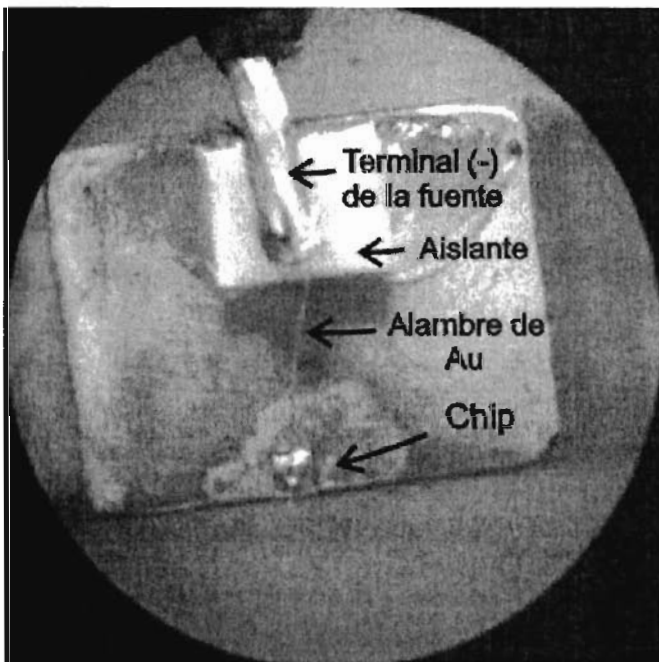
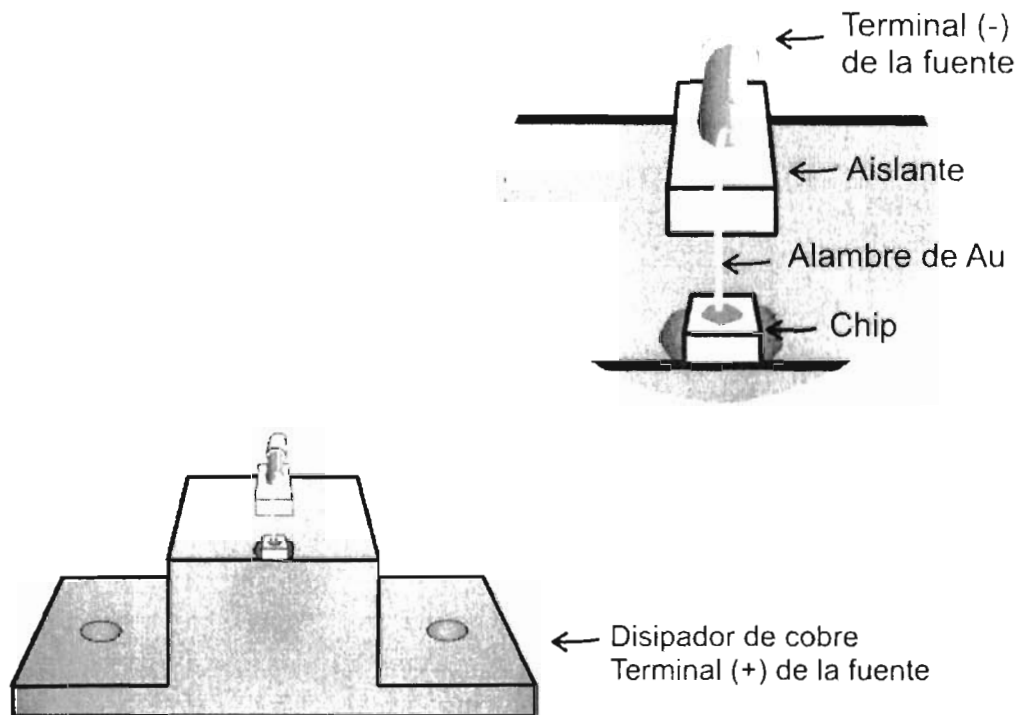


Figura 4.3

Fijado e interconexión de un chip DL.

En primer lugar el chip ha sido fijado al disipador con soldadura común de Sn-Pb.

Sobre el chip (cátodo del diodo) se ha conectado alambre de Au de 20 μm con la técnica de enlace por soldado termosónico asistido por una pequeña gota de In. Se observa también el soldado con Sn-Pb del alambre de Au a un cable para redes. Entre el cable y el disipador se ha colocado un aislante de teflón pegado entre sí con kolaloka. El ánodo del diodo Láser es conectado a la base del disipador de cobre como se indica en el diagrama superior.

4.5 Fuente de bombeo del dispositivo

Como se mencionó antes es necesario una fuente de bombeo estable para asegurar la inversión de población en nuestro DL y el funcionamiento en régimen pulsado (PW) ó continuo (CW), éste último requiere de una forma adecuada de disipación de calor, lo cual es esencial para alcanzar la corriente umbral (J_{th}), cuya dependencia de temperatura se puede expresar con el modelo empírico siguiente:

$$J_{th} = J_0 \exp\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

Donde T es la temperatura del dispositivo y T_0 es el coeficiente de temperatura umbral. Para cada dispositivo esta relación es distinta, sin embargo, es clara la relación exponencial de corriente umbral con la temperatura de operación del dispositivo, dicha caracterización se propone como trabajo a futuro.

La elección en la fuente de bombeo eléctrico depende de la demanda de corriente del dispositivo y de su posible aplicación, ésta puede ser pulsada ó corriente continua, incluso una pila alcalina puede ser usada, tal es el caso de apuntadores láser. En ocasiones se monitorea la emisión de salida del DL mediante un fotodiodo o algún otro fotodetector, esta información se retroalimenta a un circuito lógico que regula la demanda de corriente eléctrica a la fuente de bombeo para la estabilización de potencia de salida.

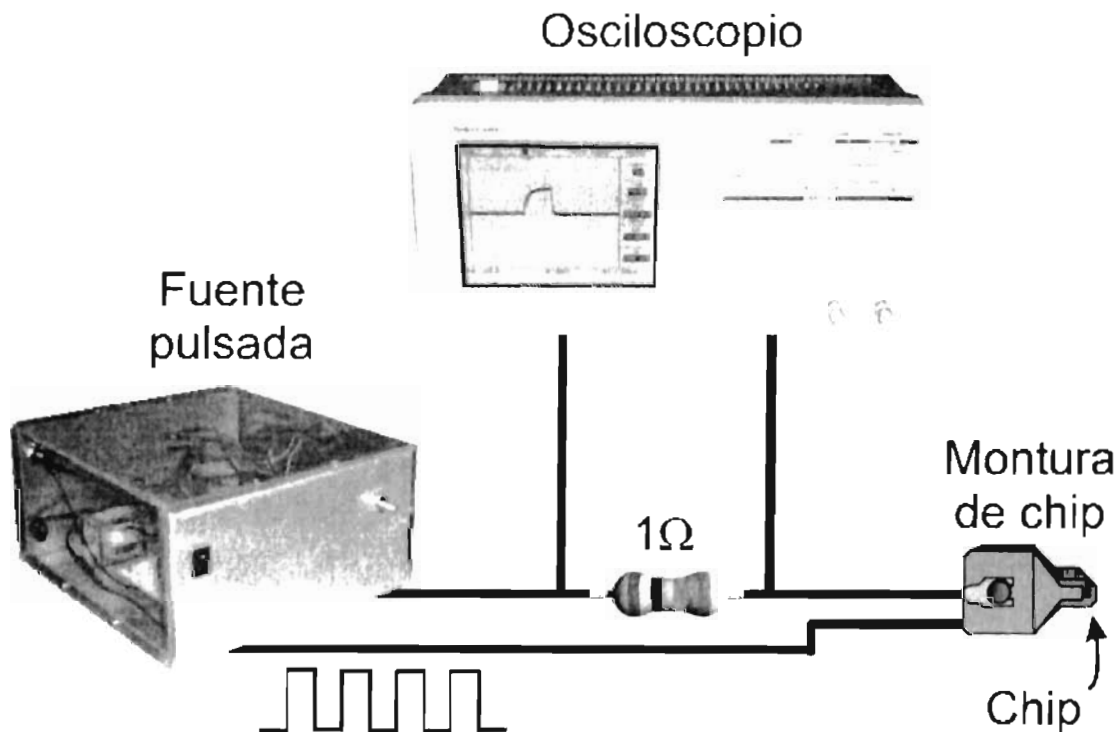


Figura 4.4. Montaje experimental de bombeo eléctrico al chip DL.

Para el funcionamiento del dispositivo se utilizó una fuente pulsada, la misma que se ocupó en el proceso de caracterización de los chips láser, dicha fuente fue construida en el IICO-UASLP por el Ing. Pedro Viramontes, los pulsos de corriente de salida de esta fuente son de 2 microsegundos de ancho y de 3 milisegundos de descanso entre ellos, y la corriente que provee es de 0 a 5 Amperes. El montaje experimental de bombeo de corriente se muestra en la *figura 4.4*.

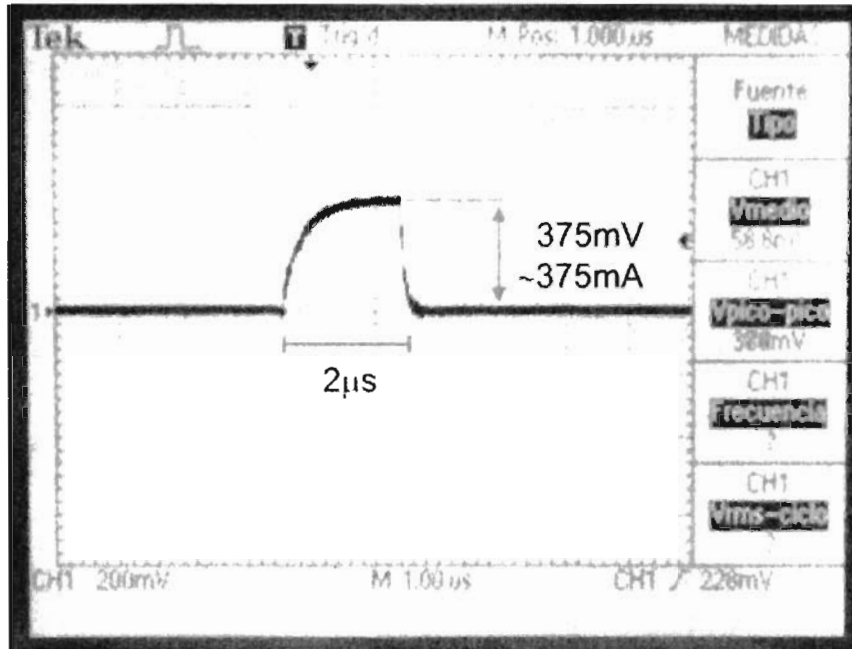


Figura 4.5. Lectura de la corriente que pasa a través del DL por medio de un osciloscopio.

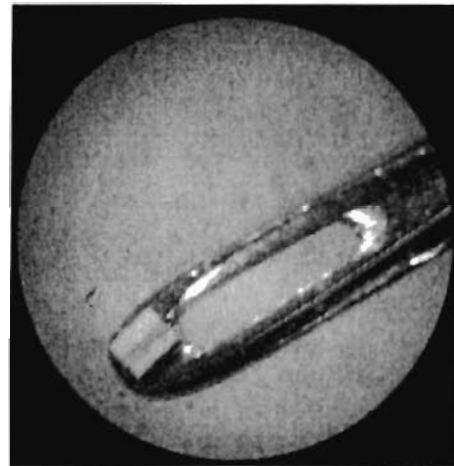
Para determinar la corriente que se le inyecta al DL, una resistencia se coloca en serie al diodo, las terminales de esta resistencia son monitoreadas por un osciloscopio que mide el voltaje entre estas terminales, siendo el valor de la resistencia $R=1\Omega$, la ley de Ohm resulta de la forma $V=I$, al estar en serie la corriente que pasa por la resistencia es la misma que la del DL, de esta manera se obtiene una medición directa de la corriente.

4.5 Conclusiones

En este trabajo fueron desarrollados en detalle procesos de posrecimiento:

- Regímenes de proceso fotolitográfico para creación de tiras de dieléctrico sobre estructuras semiconductoras
- Proceso de deposición de metales para la obtención de contactos óhmicos sobre GaAs del tipo-n y p
- Montaje de diodos semiconductores sobre disipadores de cobre y, los parámetros de alambrado de chip para la inyección de corriente.

En base de los resultados experimentales utilizando una heteroestructura láser fueron fabricados dispositivos diodos láser sobre disipadores. Además, los métodos de caracterización de estos dispositivos fueron aprobados, los que incluyen mediciones de espectros de emisión, determinación de corrientes umbrales y resistividades.



Montaje de pruebas de dispositivos en base a chips DL Chip DL sobre un extremo de una aguja de coser

Se sugiere como trabajo a futuro:

- Utilizar Pt en contactos tipo "p".
- Utilización de elemento peltier para estabilización de temperatura del dispositivo.
- Operar DL (diodos Láser) en CW (modo continuo de bombeo) y medir potencia de salida.
- Optimizar el diseño del montaje del DL (fijado del chip sobre disipador, parámetros de soldado termosónico, etc.).

APÉNDICE A

Receta del Proceso fotolitográfico para la obtención de tiras de dieléctrico

A continuación se menciona con detalle el proceso de obtención de tiras de dieléctrico con la finalidad de realizar contactos de tira sobre la superficie tipo “p” de un diodo láser de resonador de Fabry-Perot:

Desengrasado de la muestra crecida (Procedimiento estándar)

- 1) Tricloro-etileno 20 ml (5 minutos @ 50°C)
- 2) Metanol 20 ml en ultrasonido (5 minutos)
- 3) Nuevamente 20 ml de metanol en ultrasonido (5 minutos)
- 4) 5 minutos en ultrasonido con agua deionizada
- 5) Secado con N₂

Deposición de dieléctrico (Spin-On Glass 211 ACCUGLASS ® series Honeywell)

- 1) Se fija la muestra limpia en el “spinner” (se abre la válvula de vacío y se prende la bomba)
- 2) Con el gotero se pone una gota de Spin-On Glass
- 3) Se gira durante 20 segundos. Se retira el vacío
- 4) Deshidratación - Horneado a 100°C durante 15 minutos
- 5) Cocido - Horneado a 300°C durante 15 minutos (350°C máximo), esto se realiza en un horno con flujo de H₂ para evitar la oxidación de la muestra.

Proceso de Fotolitografía

15 minutos antes del proceso de exposición:

Se prende la fuente de la lámpara UV presionando “Start” durante un par de segundos, se acciona el “timer” de la alineadora, el control de corriente del motor de posicionamiento de la muestra bajo el patrón ó motivo es seleccionado a 20 miliamperes.

- 1) Se fija la muestra en el “spinner” y se pone una gota de fotoresist (Resina positiva 1818 SP 16 Shipley)
- 2) Se gira durante 20 segundos.
- 3) Cocido - 90°C, 30 minutos
- 4) Enfriado - 20°C, 5 minutos
- 5) Se expone a UV durante 45 segundos
- 6) Revelado – Microposit 319 (al 100%) – Tiempo: 60 segundos, 20°C
- 7) Se enjuaga con H₂O en abundancia
- 8) Secado con N₂

Ataque del dieléctrico

- 1) Se prepara 1 HF : 10 H₂O para el ataque
- 2) Tiempo de ataque – 30 a 60 segundos (es importante no excederse)
- 3) Secado con N₂

Removimiento del fotoresist

- 1) Se sumerge la muestra en acetona
- 2) Se puede poner por 5 minutos en el ultrasonido (no es recomendable si el espesor de la muestra es muy pequeño $E < 180\mu\text{m}$) o agitar manualmente.

APÉNDICE B

Datos técnicos del dieléctrico (Spin On Glass)

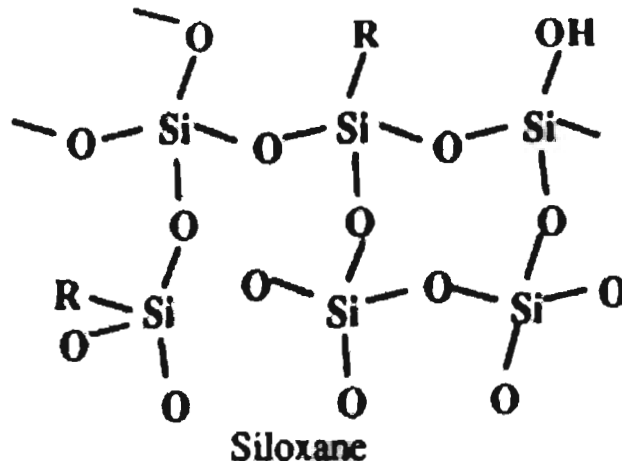
Spin-On Glass (SOG) Honeywell Electronic Materials ACCUGLASS series®
Producto 211:

Es un material dieléctrico que es aplicado a la superficie de una oblea semiconductor en forma líquida. El dieléctrico se adhiere a la muestra fácilmente. Después de un cocido el muestran una superficie plana de dieléctrico, con buenas características de uniformidad, resistencia al rompimiento, bajo stress y alta estabilidad de temperatura.

Descripción

La serie ACCUGLASS T-11 SOG es una familia de polímeros metilsiloxanos (methylsiloxane) usados como interniveles y recubrimientos de pasivación en la manufactura de circuitos integrados.

La serie de ACCUGLASS T-11 es contiene 10 wt% de grupos CH₃ (metílico) enlazados a átomos de Si en una espina dorsal de Si-O. La formulación específica resulta en un material de constante dieléctrica estable, de alta resistencia a quebrarse, y una excelente superficie de la película curada.

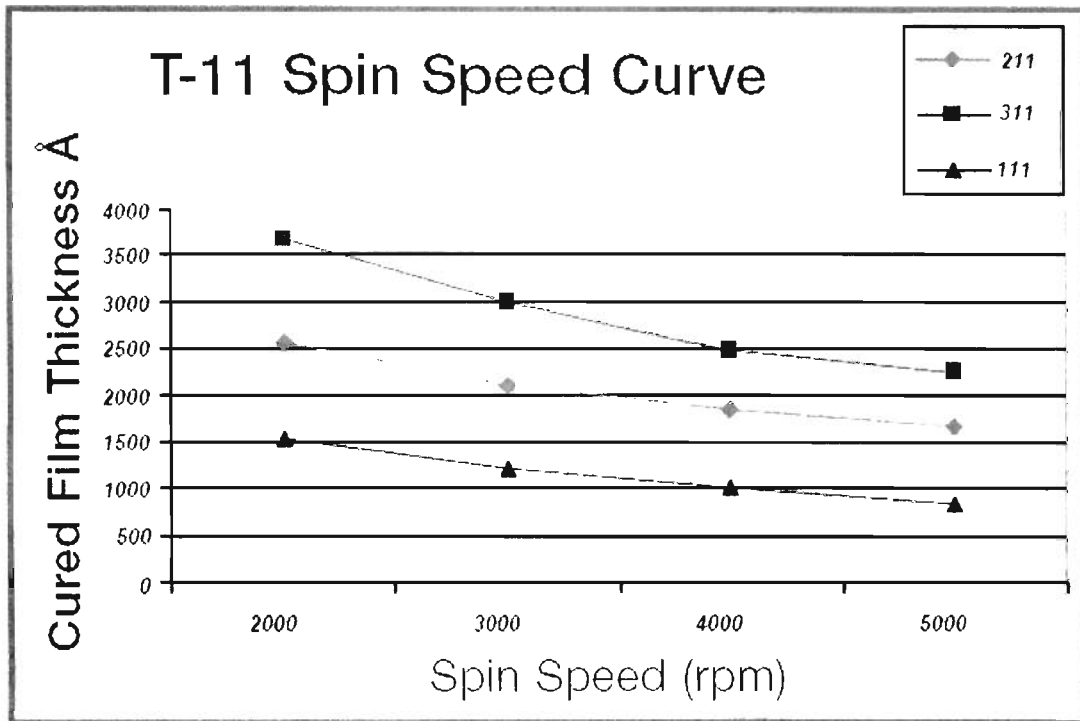


Rango de Grosor del producto

111	860Å – 1,500Å
211	1,600Å – 2,600Å
311	2,200Å – 3,800Å

Propiedades de la película curada

Constante Dieléctrica @ 1 MHz: 3.8
Estrés tensil: 120 MPa
Índice de refracción @ 633 nm: 1.39
Coeficiente de expansion térmica: $5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$



Espeor de la película contra las revoluciones por minuto del "spinner"

APÉNDICE C

Datos técnicos de la resina fotosensible y de la fuente UV

RESINA POSITIVA 1818 SP 16 SHIPLEY

Parámetros óptimos de operación:

Depósito de Resina

SPINNER
Velocidad: 5000 rev/m
Aceleración: 4000 rev/ms

Secado

HORNO
Cocido: 90°C, 30'
Enfriado: 20°C, 5'

Enmascaramiento

ULTRAVIOLETA
Sensibilidad - Longitud de onda 350-450nm (máximo 436nm)
El tiempo de exposición depende del espesor del fotoresist, el tiempo de horneado, la reflectividad del sustrato, la fuente exposición.

Revelado

REVELADOR
Naturaleza: Microposit 319
Tiempo: 60 segundos a 20°C
Enjuague en agua desionizada

Recocido

HORNO
Cocido a 120-150°C, 30 minutos. Para mejorar la estabilidad de imagen y adhesión depende entre otras cosas del tipo de superficie y el ataque químico.

FUENTE UV (Sistema de alineado y exposición UV *OAI serie 200*)

Rango de potencia – 200 a 2000 Watts

Radiación -- de 220 a 436 nm.

Los parámetros usados en este trabajo fueron:

Potencia – 155Watts \pm 2%, Voltage – 50Vac, Corriente - 3 Amperes

APÉNDICE D

Cálculo del espesor de la capa depositada por medio de la técnica de deposición por evaporación de metales

(Referencia – Semiconductor devices – Physics and Technology – S.M. SZE - Wiley)

Introducción:

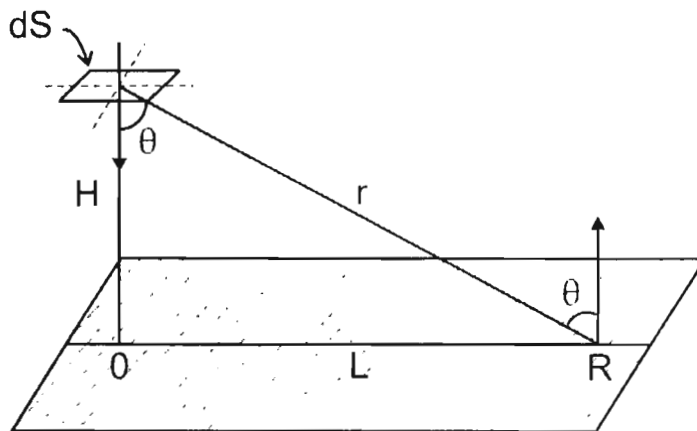
Del libro de referencia obtuvimos una fórmula de espesor de material depositado en términos de la distancia del filamento de tungsteno a la muestra, la masa y la densidad de material a depositar.

Espesor a un punto R para la fuente puntual es:

$$\ell = \frac{mH}{4\pi\rho(H^2 + L^2)^{3/2}} = \frac{m}{4\pi\rho H^2} \left\{ \frac{1}{[1 + (L/H)^2]^{3/2}} \right\}$$

Espesor a un punto R para una fuente plana:

$$\ell = \frac{mH^2}{\pi\rho(H^2 + L^2)^2} = \frac{m}{\pi\rho H^2} \left\{ \frac{1}{[1 + (L/H)^2]^2} \right\}$$



Nuestro objetivo fue verificar experimentalmente la validez de estas fórmulas para utilizarlas como estimación del espesor de la capa de metal a depositar de tal forma que el proceso de deposición de contactos por evaporación sea optimizado.

Descripción del experimento:

Se utilizaron porta-muestras de vidrio a las cuales se les depositó Au tomando tres distintas alturas "H" del filamento, estas muestras de vidrio fueron tapadas parcialmente con otras del mismo material al realizar la evaporación de metales, y finalmente se midieron las

muestras tomando el perfil desde la parte cubierta hasta la parte sin cubrir y mediante un perfilómetro *Alpha-Step*[®] 500 se observa una especie de escalón de alto “ ℓ ” el cual es el espesor de la capa depositada.

Desarrollo:

Se pesó Au para depositarlo sobre nuestra muestra, cada una se colocó a distintas distancias (H) del filamento, justo debajo de este mismo ($L=0$), a una presión de vacío determinadas, las respectivas mediciones se muestra a continuación:

$$\begin{array}{lll}
 m_1 = 15.1\text{mg} = 15.1 \times 10^{-3}\text{g} & H_1 = 2.5\text{cm} & P_1 = 5 \times 10^{-6}\text{Torr} \\
 m_2 = 15.2\text{mg} & H_2 = 3.6\text{cm} & P_2 = 3.1 \times 10^{-6}\text{Torr} \\
 m_3 = 15.1\text{mg} & H_3 = 5\text{cm} & P_3 = 3.7 \times 10^{-6}\text{Torr}
 \end{array}$$

Resultados:

Los espesores que se midieron en el perfilómetro se comparan con los cálculos teóricos a continuación:

Cálculo teórico	$\ell(L=0) = \ell_0 = \frac{m}{4\pi\rho H^2}$	Medición experimental	Porcentaje de error en el cálculo
$\ell_0(H=2.5\text{cm}) =$	$\frac{15.1 \times 10^{-3}\text{g}}{4\pi(19.3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3})(2.5\text{cm})^2} = 9.9616 \times 10^{-6}\text{cm} = 996.2 \text{ \AA}$	$\ell \approx 1394 \text{ \AA}$	-39.9%
$\ell_0(H=3.6\text{cm}) =$	$\frac{15.2 \times 10^{-3}\text{g}}{4\pi(19.3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3})(3.6\text{cm})^2} = 4.8358 \times 10^{-6}\text{cm} = 483.6 \text{ \AA}$	$\ell \approx 445 \text{ \AA}$	+7.98%
$\ell_0(H=5\text{cm}) =$	$\frac{15.1 \times 10^{-3}\text{g}}{4\pi(19.3 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3})(5\text{cm})^2} = 2.4904 \times 10^{-6}\text{cm} = 249.04 \text{ \AA}$	$\ell \approx 261 \text{ \AA}$	-4.8%

Aparentemente se observa mediante este experimento que la fórmula resulta más efectiva conforme la altura del filamento con respecto a la muestra “H” es mayor, sin embargo, para fines prácticos la fórmula es una buena aproximación en los 3 casos por lo que resulta una herramienta útil para el proceso de deposición de metales por evaporación.

APÉNDICE E

Medición de características V-I en chips de contacto de área ancha

Se muestra a continuación la bitácora de experimentación para distintos de contactos óhmicos. Estos experimentos llevaron a mejorar la calidad de contactos.

Experimento #1: Durante este experimento se depositaron los siguientes materiales sobre las capas de contacto de la estructura:

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo “p” con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Zn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo “n” dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Los resultados del análisis de las curvas V-I para cinco muestras de contacto de área ancha se muestran a continuación:

Muestra #	Resistencia Ω	V_b volts	Dimensiones (μm)		Área cm^2	Resistividad $\Omega \cdot \text{cm}^2$
			X	y		
1	1.71	1.1	500	428.4	2.14×10^{-3}	3.66×10^{-3}
2	2.02	1.1	500	428.4	2.14×10^{-3}	4.33×10^{-3}
3	1.82	1.1	535.5	428.4	2.29×10^{-3}	4.18×10^{-3}
4	1.92	1.1	571.2	428.4	2.45×10^{-3}	4.7×10^{-3}
5	1.7	1.1	500	428.4	2.14×10^{-3}	3.64×10^{-3}
promedio	1.83					4.1×10^{-3}

Experimento #2: Durante este experimento se depositaron los siguientes materiales sobre las capas de contacto de la estructura:

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo “p” con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Cd (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo “n” dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Sn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Los resultados del análisis de las curvas V-I para cinco muestras de contacto de área ancha se muestran a continuación:

Muestra #	Resistencia Ω	V_b volts	Dimensiones (μm)		Área cm^2	Resistividad $\Omega \cdot \text{cm}^2$
			x	y		
1	1.52	1.1	428.4	499.8	2.14×10^{-3}	3.25×10^{-3}
2	1.71	1.1	428.4	428.4	1.84×10^{-3}	3.14×10^{-3}
3	1.65	1.1	500	428.4	2.14×10^{-3}	3.53×10^{-3}
4	1.49	1.1	500	321.3	1.61×10^{-3}	2.39×10^{-3}
5	1.38	1.1	500	428.4	2.14×10^{-3}	2.96×10^{-3}
promedio	1.55					3.06×10^{-3}

Experimento #3: Durante este experimento se depositaron los siguientes materiales sobre las capas de contacto de la estructura:

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo “p” con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Zn (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo “n” dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Ge (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Los resultados del análisis de las curvas V-I para cinco muestras de contacto de área ancha se muestran a continuación:

Muestra #	Resistencia Ω	V_b volts	Dimensiones (μm)		Área cm^2	Resistividad $\Omega \cdot \text{cm}^2$
			x	y		
1	1.84	1.1	428.4	357	1.53×10^{-3}	2.81×10^{-3}
2	2.25	1.1	428.4	571.2	2.45×10^{-3}	5.51×10^{-3}

3	2.14	1.1	428.4	424.4	1.82×10^{-3}	3.89×10^{-3}
4	1.94	1.1	500	642.6	3.21×10^{-3}	6.23×10^{-3}
5	1.76	1.1	500	571.2	2.86×10^{-3}	5.03×10^{-3}
promedio	1.99					4.69×10^{-3}

Experimento #4: Durante este experimento se depositaron los siguientes materiales sobre las capas de contacto de la estructura:

Metales depositados sobre la capa de contacto de GaAs dopada tipo "p" con Be ($\sim 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$).

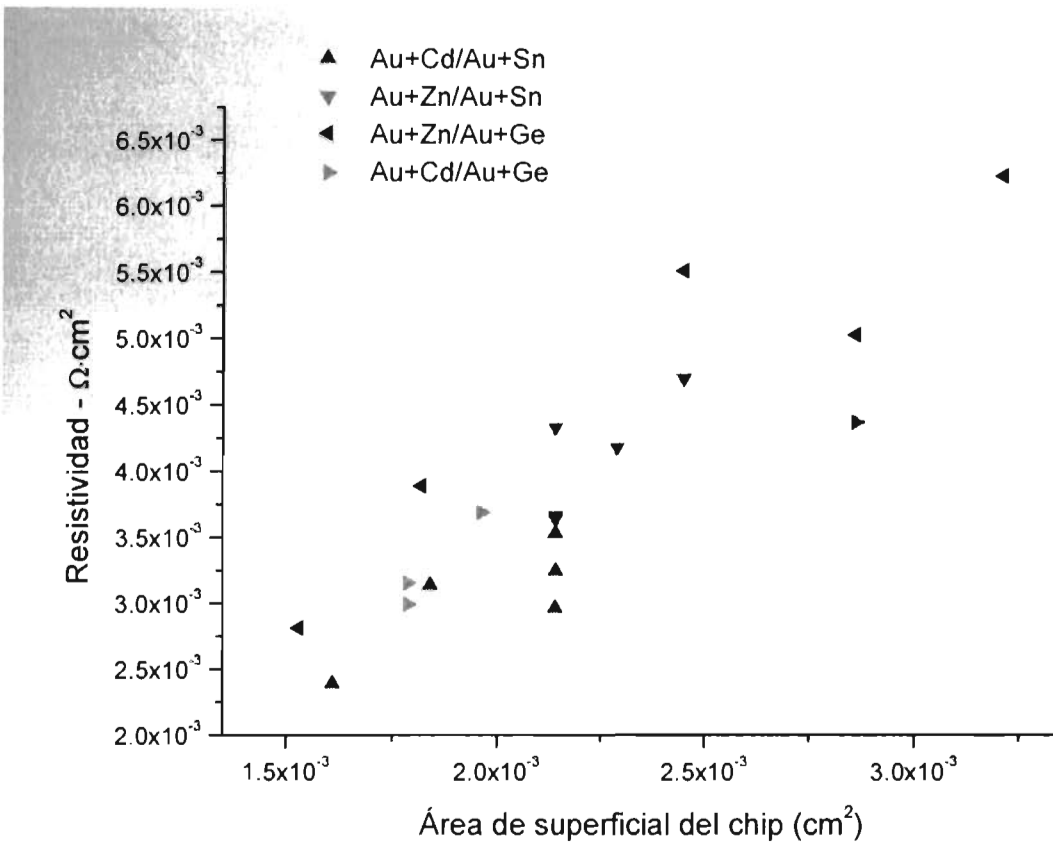
Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Cd (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Metales depositados sobre el sustrato de GaAs tipo "n" dopado con Si ($\sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$).

Deposición #	Material	Temperatura de Recocido	Tiempo
1	Au (25 mg) + Ge (8mg)	350°C	2'
2	Au (25 mg)	350°C	2'

Los resultados del análisis de las curvas V-I para cinco muestras de contacto de área ancha se muestran a continuación:

Muestra #	Resistencia Ω	V_b volts	Dimensiones (μm)		Área cm^2	Resistividad $\Omega \cdot \text{cm}^2$
			x	y		
1	1.68	1.1	357	500	1.79×10^{-3}	3×10^{-3}
2	1.88	1.1	392.7	500	1.96×10^{-3}	3.69×10^{-3}
3	1.68	1.1	357	500	1.79×10^{-3}	3×10^{-3}
4	1.53	1.1	571.2	500	2.86×10^{-3}	4.37×10^{-3}
5	1.77	1.1	357	500	1.79×10^{-3}	3.16×10^{-3}
promedio	1.71					3.44×10^{-3}



Área superficial contra resistividad de los chips que para los cuatro experimentos.

APÉNDICE F

Wirebonding (enlace ó interconexión por medio de alambre)*

Wirebonding es una técnica de interconexión eléctrica la cuál usa un alambre delgado en combinación con calor, presión y/o energía ultrasónica. Wirebonding es un proceso de soldado en fase sólida, como resultado se efectúa un contacto íntimo entre dos materiales metálicos (alambre y superficie ó terminal), una vez que esto sucede el intercambio electrónico o interdifusión de átomos tiene lugar. En el proceso de wirebonding, la fuerza de enlace puede provocar la deformación del material, rompiendo la capa de contaminación y suavizando la aspereza superficial, lo cual puede ser promovido por la aplicación de energía ultrasónica. El calor puede acelerar la difusión interatómica y de esta manera la formación del enlace.

Proceso de enlace de alambre (wirebonding)

Una vez fijado el chip sobre el disipador un alambre es soldado usando una herramienta especial (de cuña o capilaridad). Dependiendo del agente de enlace (calor o energía ultrasónica), el proceso de soldado puede ser definido por tres procesos principales: soldado de termocompresión (T/C), soldado ultrasónico (U/S), y soldado termosónico (T/S), como se muestra en la tabla A1.

Wirebonding	Presión	Temperatura	Energía ultrasónica	Alambre	Superficie
Termocompresión	Alta	300-500 °C	No	Au	Al, Au
Ultrasónico	Baja	25 °C	Si	Au, Al	Al, Au
Termosónico	Baja	100-150 °C	Si	Au	Al, Au

Tabla 1. Tres procesos de enlace de alambre.

Formas de Wirebond

Hay dos tipos básicos de wirebond, el de bola y el de cuña, la técnica de enlace, la herramienta y los materiales son listados utilizados en la tabla A2.

* Información más detallada sobre este proceso en la dirección de Internet <http://extra.ivf.se/ngl/A-WireBonding/ChapterA1.htm#A1>

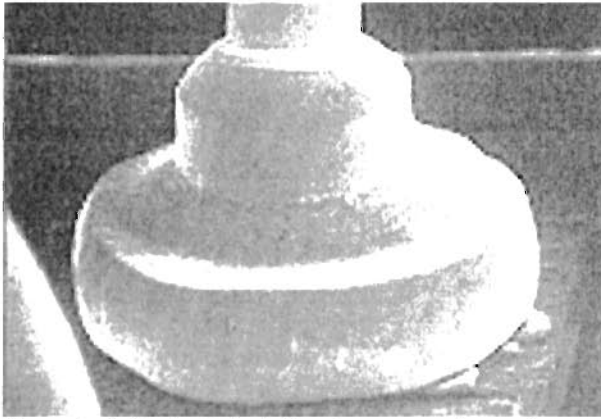


Figura 1. Soldado de bola (hecho con una herramienta de soldado APROVA).

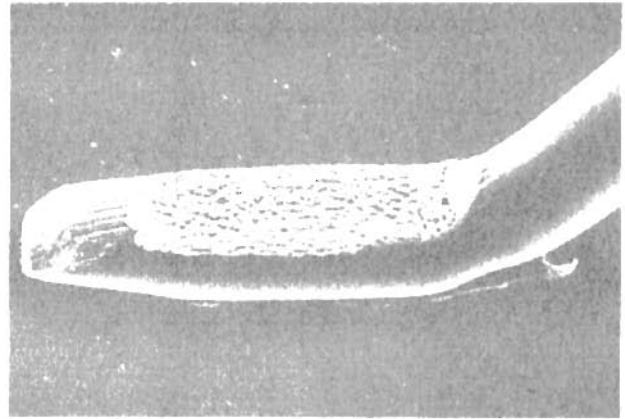
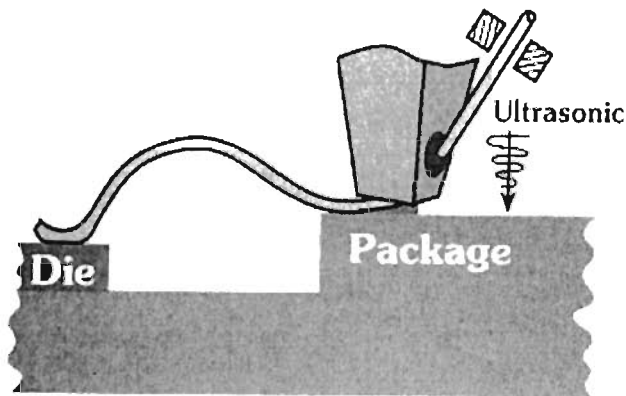


Figure 2. Soldado por medio de herramienta de cuña (hecho con herramienta K&S Micro-Swiss).

Wirebond	Técnica de enlace	Herramienta de enlace	Alambre	Terminal	Velocidad Alambres / seg
Enlace de bola	T/C, T/S	Capilaridad	Au	Al, Au	10 (T/S)
Enlace de cuña	T/S, U/S	Wedge	Au, Al	Al, Au	4

Tabla 2. Formación del enlace.

Soldadura por medio de cuña



Aplicación de la soldadura de cuña

El nombre de soldadura de cuña se basa en la forma de su herramienta para soldar. En esta técnica, el alambre es alimentado a un ángulo usualmente de 30 a 60° de la horizontal de la superficie a través de un agujero en la parte de atrás de la cuña.

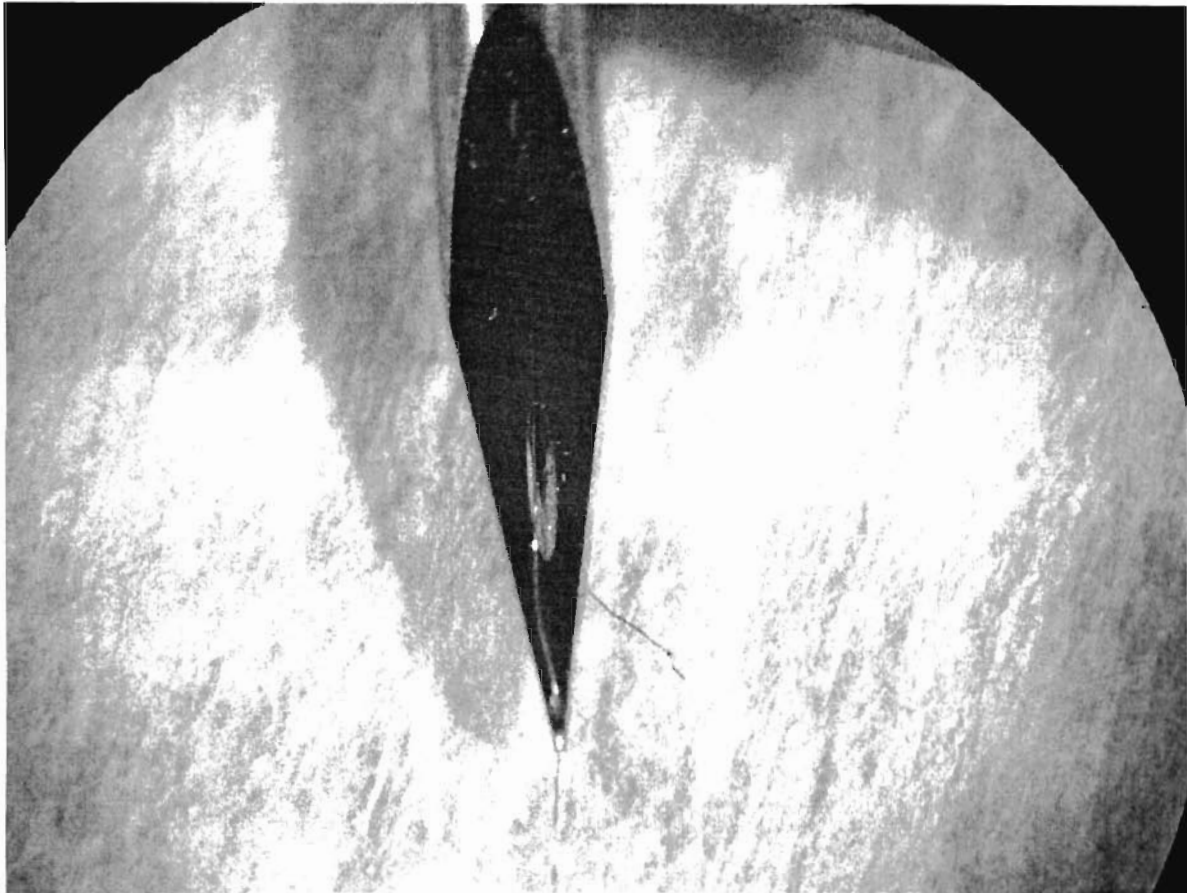


Figura 3. Herramienta para soldar por el método de "Wire wedge bond" (soldado de alambre con cuña) termosónico por medio de un sistema Hybond modelo 572A. IICO-UASLP.

El proceso comienza cuando la cuña baja hacia la base para la conexión, el alambre es presionado contra la superficie y un soldado termosónico o ultrasónico se realiza. A continuación la cuña se eleva y ejecuta un movimiento para crear una curva en el alambre. En el lugar de la segunda soldadura, la cuña descende, realizando la segunda soldadura. Varios métodos son utilizados para cortar el alambre en la segunda soldadura. Para alambres pequeños (diámetro $< 75 \mu\text{m}$), las abrazaderas pueden ser usadas para romper el alambre mientras la máquina mantiene la presión de soldado en la segunda soldadura (rasgado de abrazadera). Al descender la cuña, el alambre empujado por la abrazadera debajo de la cuña para comenzar el soldado del siguiente alambre.

Los alambres utilizados en la técnica de wirebonding es el de Au primeramente, que es usado ampliamente en aplicaciones de soldadura termocompresión y termosónica. También se usa el de aluminio y el de cobre, este último tiende a oxidarse.

Los sistemas que se utilizan normalmente para el proceso de soldadura en el wirebonding, son en orden de alambre-superficie los siguientes; Au-Au, Au-Al, Au-Cu, Au-Ag, Al-Al, Al-Ag, Al-Ni, Cu-Al, sin embargo se puede también sobre superficies de semiconductores como GaAs y InP lo cual resulta más complicado y los enlaces pueden resultar más débiles.

BIBLIOGRAFÍA

[Hall 1]

R. Hall, G. Fenner, J. Kingley, J. Soltys and R. Carlson
Coherent light emission from GaAs junctions
Phys. Rev. Lett., 9, (1962), 366

[Maiman 2]

J. Maiman
Ruby laser
Nature, 187, 493 (1960)

[Matadamas 3]

Tesis de maestría en Ingeniería Eléctrica
Construcción de Heteroestructuras Láser de
 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ por epitaxia en fase Líquida
Hector Alfonso Castillo Matadamas
Asesor. Dr. Andrei Yu Gorvatchev
IICO, UASLP, Noviembre del 2002

[Lara 4].

Tesis de Doctorado en Ingeniería Eléctrica
Ismael Lara
Asesor. Dr. Alfonso Lastras, Dr. Salvador Guel
IICO, UASLP, 2006

Topics in Applied Physics Vol. 78
High-Power Diode Lasers
Fundamentals, Technology, Applications
Ronald Diehl (Ed.)
Springer
Capítulo 1 - Peter Unger

Heterostructure Lasers
Part A: Fundamental principles
Part B: Material and operating characteristics
(Quantum electronic series)
H. C. Casey, Jr., M. B. Panish
Academic Press, Inc.

Principles of Semiconductor Devices

Bart Van Zeghbroeck

http://ece-www.colorado.edu/~bart/book/book/chapter3/ch3_5.htm

Semiconductor devices – Physics and Technology

S.M. SZE

Wiley

Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys

Journal of applied physics volume 89, number 11, 5815-5875

1 Junio 2001

Tesis - Réalisation par MBE et caractérisation physique de diodes laser à puits quantiques

GaInAsSb/AlGaAsSb émettant vers 2.3 μm .

Arnaud Perona, Alexeï Baranov, Yves Rouillard.

Université Montpellier II.

Advances in Laser and Optics Research Volumen 1

High Power Semiconductor Lasers: Different System

Salvador Guel-Sandoval

William T. Lavworth (Editor)

Nova

