



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACION Y ESTUDIOS DE POSGRADO

**CRECIMIENTO Y CARACTERIZACION DE
HETEROESTRUCTURAS LASER InGaAsP/GaAs EN LA REGION DE
0.8 μm .**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERIA ELECTRICA
opción
Materiales y Dispositivos Optoelectrónicos**

PRESENTA:

GRISELDA RODRIGUEZ PEDROZA

Composición del Jurado:

Dr. Viatcheslav Andreevich Mishournyi

Dr. Alfonso Lastras Martínez

Dr. Francisco de Anda Salazar

Dr. Salvador Guel Sandoval (suplente)

SAN LUIS POTOSI, S.L.P.
DICIEMBRE DE 1996





UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI

FACULTAD DE INGENIERIA

Dr. Manuel Nava No. 8 Zona Universitaria

Teléfonos: 13-11-86, 13-52-38, 13-63-35 y 13 82-22

Fax: (48) 13-09-24

78290, San Luis Potosí, S. L. P., México

DICIEMBRE 05, 1996.

A la Srta. Ing. Griselda Rodríguez Pedróza
P r e s e n t e.-

En atención a su solicitud de autorización de Temario, presentada por el Dr. Viatcheslav Andreevich Mishurnyi, Asesor del Trabajo de Investigación que deberá desarrollar en su Examen de Grado en la Maestría en Ingeniería Eléctrica. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico - Consultivo celebrada el día 5 de Diciembre del presente año, fué aprobado el Temario propuesto:

"CRECIMIENTO Y CARACTERIZACION DE HETEROESTRUCTURAS LASER InGaAsP/GaAs EN LA REGION DE 0.8um."

TEMARIO:

- INTRODUCCION
- I.- CONCEPTOS GENERALES
- II.- HETEROEPITAXIA EN FASE LIQUIDA
- III.- FABRICACION Y CARACTERIZACION DEL LASER
- IV.- DISCUSION Y CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

" MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO "

A T E N T A M E N T E.-

ING. JOSE ARNOLDO GONZALEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD



UNIVERSIDAD AUTONOMA
DE SAN LUIS POTOSI
FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION

'real.

AGRADECIMIENTOS

-Al Dr. Alfonso Lastras Martínez por su confianza y apoyo.

-Al equipo formado por mi asesor el Dr. Viatcheslav Mishournyi, Dr. Igor Ericovich Berishev, M.C. Iván César Hernández del Castillo que siempre se mostró dispuesto a colaborar y Dr. Andrei Yu. Gorbachev.

-Al M.C. Raúl Balderas Navarro quien de una manera entusiasta transmite sus conocimientos, así como a mi amigo el Dr. Gustavo Ramírez Flores que no tuvo límite en facilitarme medios para desarrollar mi trabajo.

-Al Dr. Francisco de Anda Salazar por la revisión del presente trabajo, al Dr. Hugo Navarro Contreras por su apoyo y junto con ellos a todos mis maestros que siempre manifestaron interés en mis estudios.

-Al M.C. Jorge Huerta Ruelas, Lic. Guadalupe Carrizales Aguilar y Dr. Adrián García García quienes con su amistad e interés me impulsaron.

-A todos mis compañeros tanto de trabajo como de estudios ya que siempre que solicité su ayuda pude contar con ella.

INDICE

INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1 CONCEPTOS GENERALES.	
1.1 Conceptos básicos de semiconductores y uniones p-n.....	4
1.2 Láseres semiconductores.....	6
1.3 Materiales empleados y estructura del láser fabricado.....	9
CAPITULO 2 HETEROEPITAXIA EN FASE LIQUIDA.	
2.1 Generalidades.....	12
2.2 Descripción del sistema LPE.....	13
2.3 Procedimiento.....	15
2.4 Medidas de limpieza.....	22
CAPITULO 3 FABRICACION Y CARACTERIZACION DEL LASER.	
3.1 Caracterización de las películas epitaxiales.....	24
3.2 Fabricación del láser.....	28
3.3 Caracterización del láser.....	29
CAPITULO 4 DISCUSION Y CONCLUSIONES	
4.1 Discusión.....	31
4.2 Conclusiones.....	37
ANEXO SISTEMA ABIERTO DE COMUNICACION OPTICA.....	38
REFERENCIAS.....	39

INTRODUCCION

Los láseres semiconductores encuentran aplicación en un gran número de campos. Entre estos se encuentran: sistemas de comunicación con fibras ópticas, discos compactos, bombeo de láseres de estado sólido y fibras activas, medición de distancias, espectroscopía con resolución espacial, poligrafía e impresión láser, medicina, aplicaciones militares, control de procesos tecnológicos, sistemas ópticos para procesar información, memorias ópticas, sensores ópticos, óptica integrada y holografía.

La investigación sobre láseres en base a InGaAsP está enfocada principalmente al desarrollo de fuentes de luz coherente para sistemas de comunicación óptica. Para esta aplicación las longitudes de onda de interés son 1.3 y 1.55 μm , debido a que las fibras ópticas en esas longitudes de onda tienen muy bajas pérdidas. También se ha enfocado esta investigación a al desarrollo de heteroláseres para el bombeo de láseres de Nd³⁺:YAG, cuya longitud de onda de absorción es de $0.806 \pm .003 \mu\text{m}$.

En la presente tesis se describen la obtención y la caracterización de heterouniones dobles (HD) en base a InGaAsP/GaAs con emisión de luz coherente a una longitud de onda en el rango cercano a 0.8 μm , para usarse como fuentes para el bombeo de láseres de Nd³⁺:YAG. Se crecieron las HD por Epitaxia en Fase Líquida (EFL), la cual es una técnica común para el crecimiento de estas heteroestructuras.

Un láser se puede describir como un oscilador óptico coherente y por lo tanto está constituido, al igual que cualquier oscilador, de un amplificador retroalimentado positivamente que cumple con dos condiciones: 1) la ganancia del amplificador debe ser mayor que la disipación y 2) la retroalimentación debe estar en fase con la entrada original del amplificador.

En un láser semiconductor el amplificador lo constituye el material semiconductor de su región activa, el cual es excitado por medio de una corriente eléctrica, y la retroalimentación se

obtiene por medio de un resonador óptico. El láser descrito en este trabajo es una heteroestructura doble GaInP/GaInPAs/GaInP, que permite el confinamiento, tanto de las cargas inyectadas a la región activa del láser, como de la radiación generada en dicha región activa, obteniéndose un incremento en la ganancia del amplificador al igual que una reducción en las pérdidas por disipación.

Al usar un material cuaternario en lugar de un ternario para fabricar el láser nos da un grado de libertad mayor, permitiéndonos escoger en forma simultánea el ancho de banda prohibida que corresponde a la longitud de onda en que queremos emita el láser y la constante de red adecuada para lograr el acople reticular película-substrato.⁽¹⁰⁾

Además, los diodos láser fabricados en base al cuaternario InGaAsPs tienen la ventaja de estar libres de aluminio, con lo cual hay un menor sobrecalentamiento de las caras del resonador óptico que en los láseres análogos de AlGaAs/GaAs, alargándose de esta manera su tiempo de vida. Una ventaja adicional de las capas libres de Al es que se evitan los problemas para la formación de contactos óhmicos debido a la oxidación del Al durante el crecimiento epitaxial.^{(6),(7)}

El trabajo presentado en esta tesis se ha organizado de la siguiente manera:

Introducción, en donde se da una breve explicación de las características del tema de este trabajo.

Capítulo 1. Conceptos generales. En este capítulo se habla de los materiales usados para el crecimiento del láser y de la estructura del mismo.

Capítulo 2. Heteroepitaxia en fase líquida. En este capítulo se detallan todos los problemas tecnológicos involucrados en el procedimiento seguido para el crecimiento de la heterounión doble. Se describe, asimismo, el sistema utilizado para tal fin.

Capítulo 3. Fabricación y Caracterización del láser. En este capítulo se muestran y explican los resultados obtenidos en las caracterizaciones realizadas por microscopía, rayos X, fotoluminiscencia y electroluminiscencia, así como en el depósito de contactos.

Capítulo 4. Discusión de resultados y conclusiones. Aquí se manifiestan las observaciones que se desprendieron del trabajo realizado.

Anexo. Sistema abierto de comunicación óptica. Se detalla un sistema abierto de comunicación óptica donde se demuestra el funcionamiento del láser fabricado en este trabajo.

CAPITULO 1

CONCEPTOS GENERALES

Un láser es un oscilador óptico y como todo oscilador (Fig. 1.1) está compuesto por un amplificador retroalimentado positivamente. En un láser semiconductor la amplificación de luz se produce en la región activa (semiconductor) y la retroalimentación se efectúa por medio de un resonador óptico (cavidad óptica). Esto es ilustrado en la Fig, 1.2. La salida es extraída a través de un espejo parcialmente transmisor.⁽¹⁾ Para entender el funcionamiento de los láseres semiconductores se dará una breve explicación de las características de estos materiales.

1.1 CONCEPTOS BASICOS DE SEMICONDUCTORES Y UNIONES p-n

Un semiconductor es un sólido cristalino en el cual la periodicidad atómica da como resultado que los electrones ocupen bandas de energía, llamadas bandas permitidas, separadas por bandas prohibidas (Fig. 1.3.a). A la última banda llena de electrones se le llama banda de valencia y la banda permitida inmediata superior se le llama banda de conducción. En un semiconductor el ancho de la banda prohibida es del orden de 1 eV y los electrones tendrán suficiente energía para alcanzar la banda de conducción, dejando huecos en la banda de valencia (generación de pares electrón-hueco).

Las propiedades eléctricas y ópticas de los semiconductores son significativamente sensibles a cantidades muy pequeñas de impurezas. Así, si un semiconductor del grupo cuatro es

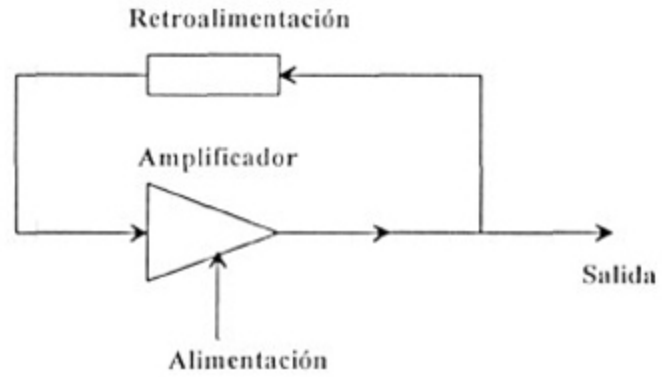


Figura 1.1 Un oscilador es un amplificador con retroalimentación positiva.

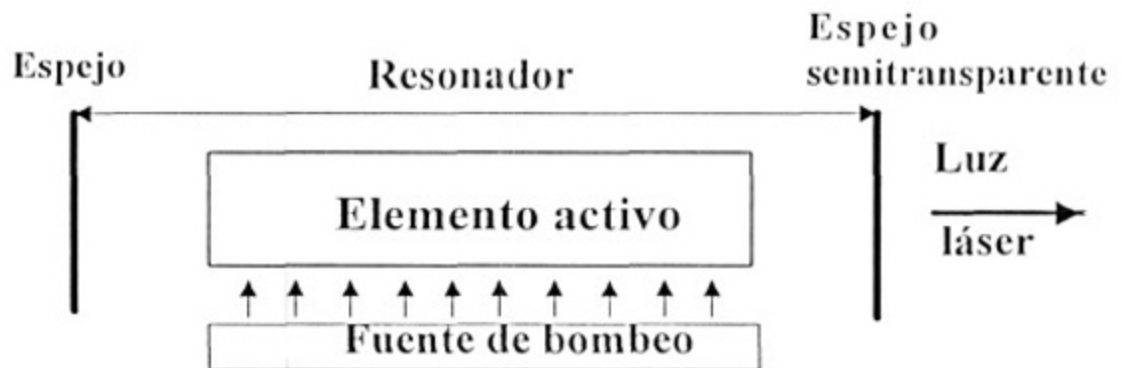


Figura 1.2 Diagrama simplificado de un sistema de luz láser.

dopado con átomos de un elemento del grupo V obtenemos un material tipo-n; si en cambio lo dopamos con átomos de un elemento del grupo III conseguimos un material tipo-p. El primero tiene exceso de electrones y el segundo tendrá exceso de huecos.

Cuando unimos metalúrgicamente un material semiconductor tipo p con uno tipo n se forma una barrera de potencial debida a la difusión de portadores mayoritarios. Esta barrera es reducida notablemente cuando se aplica una polarización directa, inyectándose una corriente eléctrica. Si los dos semiconductores que forman la unión p-n tienen la misma composición química estamos hablando de una homoestructura; cuando dichas composiciones son diferentes se le llama una heteroestructura ó una heterounión. Los láseres fabricados con heteroestructuras dobles, se les llama heteroláseres. El empleo de una doble heterounión para la fabricación de láseres semiconductores confina la carga (Fig. 1.6) y así elimina el problema de la difusión de cargas cuando la longitud de la región activa es menor a la longitud de difusión de los electrones y huecos.

1.2 LASERES SEMICONDUCTORES

Al proceso inverso a la generación de pares electrón-hueco se le llama recombinación de pares. Si esta recombinación es inducida por un fotón propagándose en el medio, se emite un nuevo fotón de la misma energía, dirección, fase y polarización, a lo que se le llama emisión estimulada (Fig. 1.3.c). Ahora tenemos dos fotones idénticos propagándose, o sea radiación coherente⁽²⁾. Para la operación de un amplificador láser es necesario crear una inversión de población, es decir, es necesario que el número de electrones en la banda de conducción sea mayor que el número de electrones en la banda de valencia. Para obtener esta inversión de población es necesario crear una elevada concentración de pares electrón-hueco (Fig. 1.3.b). Al valor de densidad de corriente en el cual se logra la inversión de población en la zona de deserción (Fig. 1.4) se le llama densidad de corriente de transparencia (Fig. 1.5) y antes de este valor sólo tenemos radiación incoherente debida a la emisión espontánea, de donde sale el primer fotón necesario para generar la emisión estimulada una vez lograda la inversión de población. Esto ocurre cuando la emisión es mayor que la absorción.

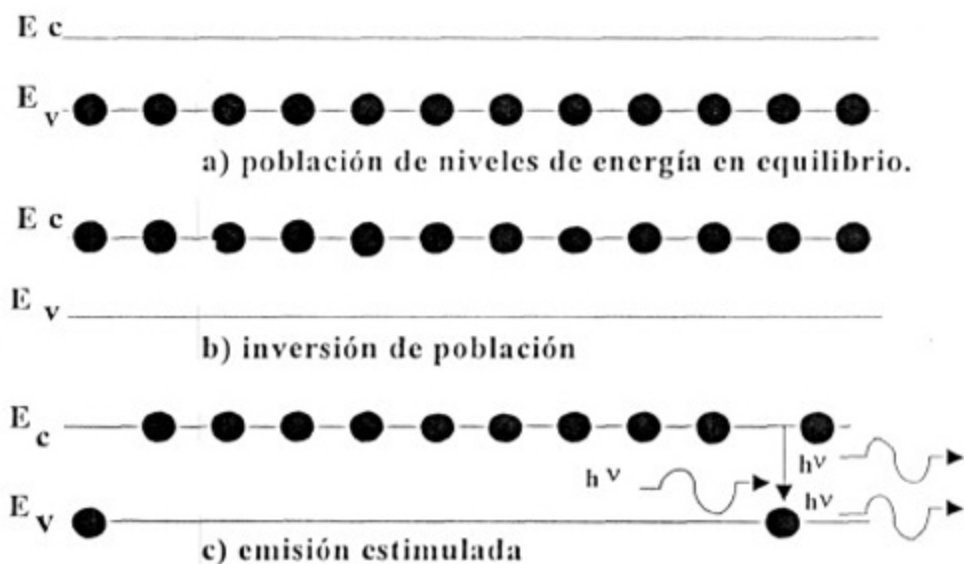


Fig. 1.3 Representación ideal de los niveles de energía correspondientes a la banda de valenci y a la banda de conducción para mostrar el fenómeno láser.

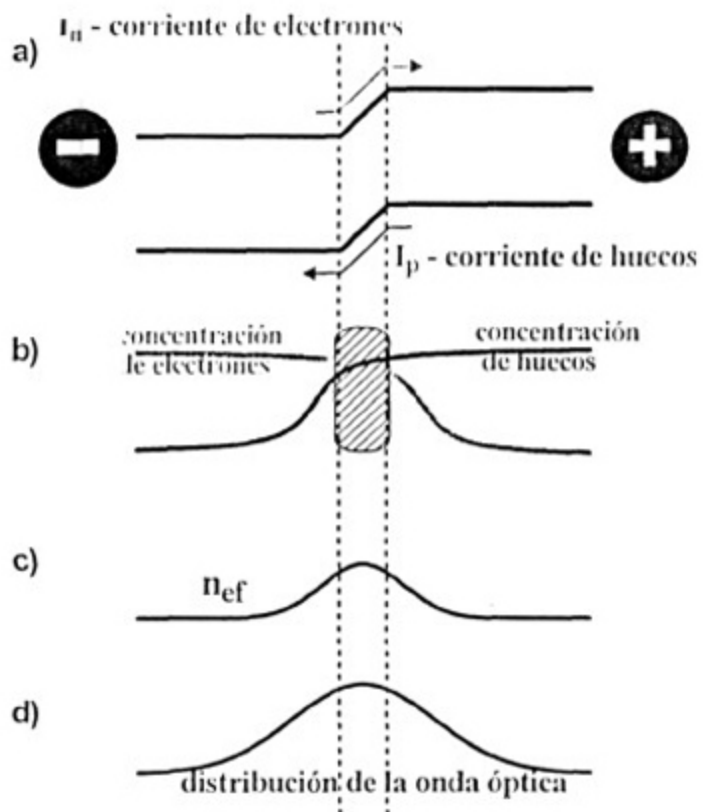


Figura 1.4 Unión p-n polarizada directamente.

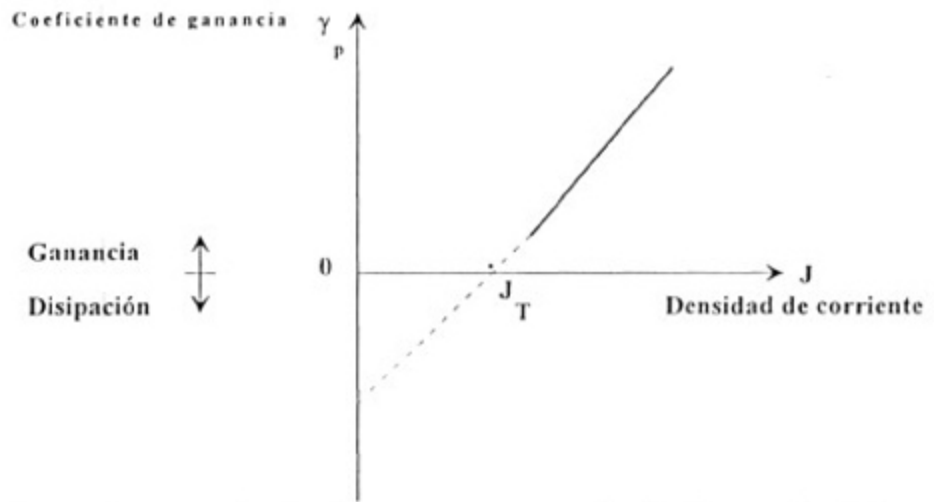


Figura 1.5 Coeficiente de ganancia de pico como una función de la densidad de corriente.

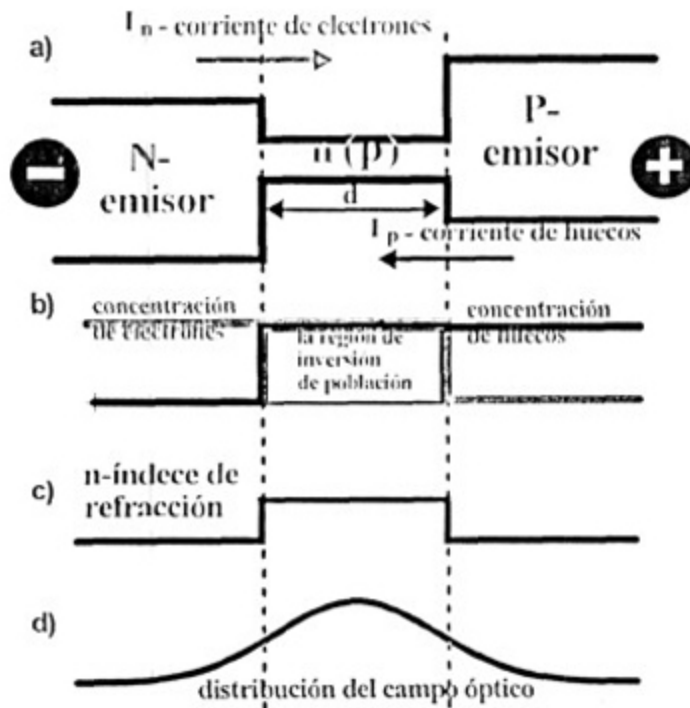


Figura 1.6 a) heterounión doble del laser (DH);
 b) distribución de los portadores de carga;
 c) perfil de índice de refracción;
 d) distribución del campo óptico.

Es necesario también que el material semiconductor que forma la región activa sea de gap directo; esto quiere decir que el nivel más bajo de energía de la banda de conducción y el nivel más alto de la banda de valencia coincidan en el mismo valor de momento lo que facilita el bombeo del material y la emisión de radiación.

1.3 MATERIALES EMPLEADOS Y ESTRUCTURA DEL LASER FABRICADO

1.3a Materiales

El material que usamos para fabricar nuestros láseres fue una solución sólida cuaternaria de tres semiconductores compuestos binarios de estructura zinc-blenda: InP, InAs, GaAs, y GaP. Esta solución sólida nos ofrece un grado de libertad mayor que los materiales ternarios para escoger simultáneamente la constante de red y el ancho de banda prohibido. En efecto, como se puede observar en la Fig. 1.7, la composición del material se puede escoger dentro de un área y no sobre una línea como es el caso de los ternarios.

En el material cuaternario $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{P}_{1-y}\text{As}_y$ los valores de x e y nos dan la composición de la fase sólida, la cual determina el ancho de banda prohibida y la constante de red requeridas. Para la fabricación de los láser es necesario que el material de la capa activa tenga un ancho de banda de 1.54eV, para tener una emisión cercana a 0.8 μm . Además, tomando en cuenta que el sustrato es GaAs, es necesario que la capa activa tenga una constante de red de 5.65 Å. Para esta constante de red y esta longitud de onda se necesitan concentraciones de $x = 0.87$ y $y = 0.26$.

Debido al hecho de que no se creará en el punto del diagrama de fase donde coinciden las concentraciones de fase sólida con las de fase líquida, es necesario encontrar estas concentraciones. Es imposible la construcción de un diagrama de fase que contenga los cuatro materiales, la temperatura y el ancho de banda prohibida. A esto se suma el hecho de que al unir el volumen de las concentraciones de fase líquida con el área de la composición en fase sólida a una misma temperatura no existe una dependencia unívoca. Es necesario la obtención de diagramas de fase con líneas isotérmicas⁽⁴⁾, para encontrar la concentración del material en la FL necesaria para una composición en la fase sólida a una temperatura dada. Una vez obtenida la concentración de material en fase líquida se calculan las masas necesarias de cada material.

$$m_{\text{In}}(1/91 - 2x_{\text{P}}^{\text{L}} - 2x_{\text{As}}^{\text{L}} - x_{\text{Ga}}^{\text{L}})x_{\text{P}}^{\text{L}}/M_{\text{InP}}$$

Existen varias razones que nos impiden tomar los valores directamente de los diagramas de fase y asegurar un crecimiento exitoso. En primer lugar, la temperatura que estamos usando no es la temperatura de la mezcla, ya que sería imposible introducir el termopar directamente en ella, además de que existen gradientes de temperatura. Cada sistema es diferente y cambia con el tiempo, todos éstos son problemas tecnológicos a resolver y es necesario efectuar múltiples experimentos para obtener los valores adecuados.

Debido a que nuestro sustrato es un compuesto binario y las mezclas a depositar son materiales ternarios y cuaternarios, existe el riesgo de que haya disolución del sustrato en la mezcla. La forma de aminorar este problema es encontrando el grado de sobresaturación. En saturación existirá intercambio atómico de especies en un sentido y en otro; es decir, del sustrato a la mezcla y viceversa. En cambio, con un grado adecuado de sobresaturación la disolución del sustrato en la mezcla se evita, pudiendo sólo existir movimiento de masas en de la mezcla al sustrato.

1.3b Estructura del láser

El heteroláser que construimos es una heteroestructura doble la cual consta de cuatro capas. La primera es una capa ternaria de GaInP, que cumple la función de ser el emisor tipo n del láser, está dopado con estaño y tiene un grosor en el orden de $1\ \mu\text{m}$. Hay que hacer notar que un grosor grande de esta capa resultaría en una resistencia grande y no tendríamos una buena emisión de portadores. Por otro lado, si el grosor es muy pequeño tendríamos escape de portadores fuera de la capa activa. El ancho de banda prohibida de esta primera capa es de $1.9\ \text{eV}$, lo que nos da un buen confinamiento para los portadores en la región activa del láser, la cual tiene un ancho de banda de $1.5\ \text{eV}$. Dicha región debe tener un espesor de aproximadamente $0.1\ \mu\text{m}$, ya que si es muy angosta tendríamos una densidad de corriente de umbral muy alta por la disipación óptica. La tercera capa es otro emisor del mismo material ternario que el primero, pero compuesta de dos regiones, una sin dopaje muy delgada, décimas de micra, y otra tipo p dopada con Zn, con un espesor de aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ (Fig. 1.8). La primera región tiene la finalidad de evitar que el Zn del dopaje de la segunda región se difunda hacia la capa activa, debido al alto coeficiente de difusión del Zn.

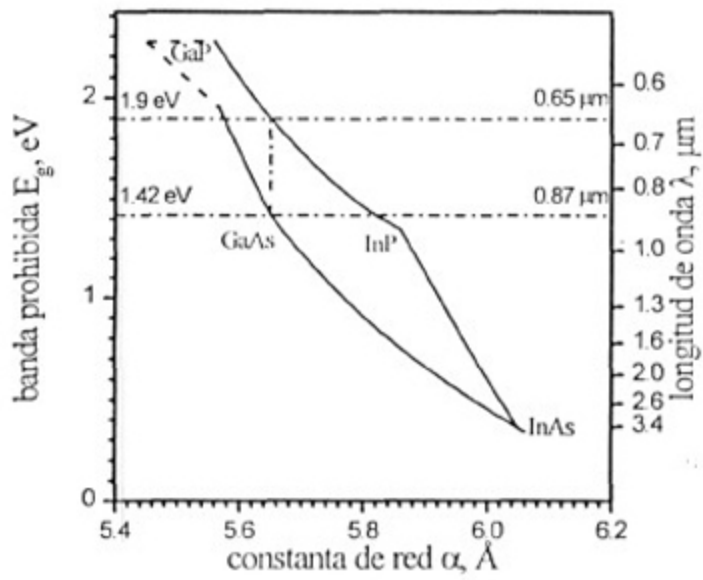


Fig.1.7. Diagrama de la banda prohibida del sistema cuaternaria InGaAsP.

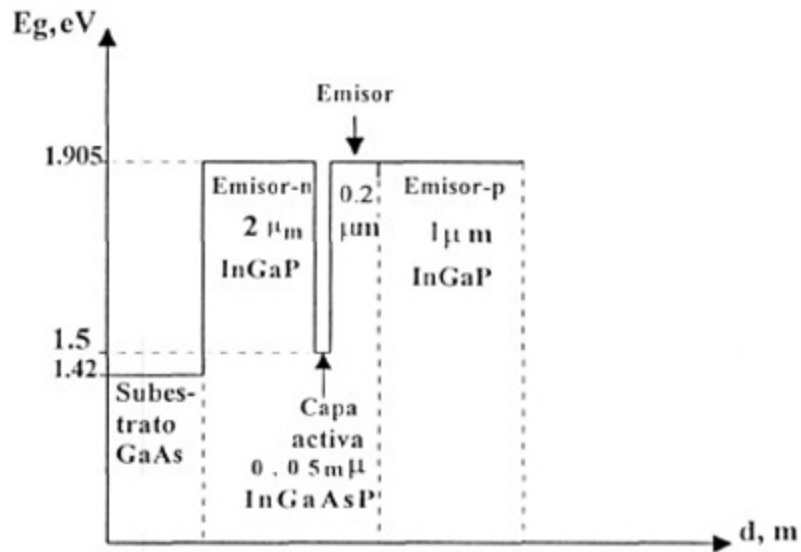


Figura 1.8 Diagrama de las bandas prohibidas de la heteroestructura láser de InGaAsP/GaAs .

CAPITULO 2

HETEROEPITAXIA EN FASE LIQUIDA

2.1 GENERALIDADES.

La EFL es el crecimiento de capas epitaxiales sobre sustratos cristalinos por precipitación directa desde la fase líquida. Consiste en colocar un sustrato bajo una solución líquida sobresaturada para producir una solución sólida. La velocidad de crecimiento está limitada por la difusión a través de la capa frontera, siendo los parámetros a controlar la temperatura y la sobresaturación de la solución.⁽⁵⁾ Una vez que se alcanza la supersaturación crítica, el soluto empieza a nuclear. Esto sucede cuando los núcleos de radio mayor o igual que el radio crítico disminuyen de energía aumentando de tamaño, se juntan al expandirse y forman la capa atómica. Los nucleos con radios menores desaparecen.⁽⁵⁾

La EFL es una técnica de crecimiento muy conveniente para algunos sistemas de materiales semiconductores, entre los que se encuentra el cuaternario InGaPAs. Entre las ventajas de la EFL se encuentran la alta calidad cristalográfica de la películas epitaxiales obtenidas y el bajo costo para llevar a cabo su instrumentación.

Esta solución sólida debe tener el mismo parámetro de red del sustrato para lograr un mínimo de esfuerzo y densidad de dislocaciones interfaciales. De los cuatro elementos que forman nuestro material se debe escoger uno que será el solvente. La temperatura de fusión del

solvente debe ser menor que la del sustrato. Este solvente debe ser: químicamente inerte al bote, muy puro, de muy pequeña solubilidad máxima en el cristal, eléctricamente activo en el cristal y con baja presión de vapor.

Aunque el sustrato se decapa y pule químicamente, también se decapa dentro del horno, en el momento inmediato anterior al crecimiento. Esto se logra insertando el sustrato en una solución subsaturada. Nuestro sistema LPE es un sistema de deslizamiento horizontal. Se usa un bote de grafito para contener las mezclas y el sustrato. Las características que hacen al grafito apropiado para contener los materiales para el crecimiento son su fácil manufactura y limpieza, además de ser inerte químicamente a los materiales que se calentarán ahí.

Existen varias técnicas de crecimiento, la que escogimos es una combinación de dos de ellas; las técnicas de enfriamiento escalón y enfriamiento en equilibrio, obteniéndose la técnica de super enfriamiento. En ella el sustrato se inserta en una solución sobrenfriada y por consiguiente sobresaturada, lo cual permite la solidificación del soluto, su transporte y deposición en el sustrato. Se sigue enfriando durante el crecimiento para mantener la sobresaturación.

La técnica de crecimiento que usamos sufre una variante, ésta consiste en que en el fondo e algunos pozos del bote de grafito, hay una rejilla muy angosta, para lograr un menor depósito de solución sobre el sustrato y así obtener capas epitaxiales muy delgadas.

2.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA DE LPE

El sistema utilizado para la fabricación de los láseres descritos en este trabajo se muestra en la Fig. 2.1. Dicho sistema consta de:

- a) Tubo de cuarzo.
- b) Bote de grafito.
- c) Horno.
- d) Termopar.
- e) Controlador de temperatura.
- f) Tanque de hidrógeno.
- g) Purificador de hidrógeno.
- h) Sistema controlador de flujo de masas.

i) Bombas de vacío.

El corazón del sistema es el reactor, en el cual se introduce un bote de grafito que contendrá los materiales a depositar y el sustrato. Este reactor es cubierto por un horno que se puede recorrer hasta la posición del bote de grafito, con lo que se logra calentar los materiales y el sustrato a la temperatura deseada. La temperatura del horno es regulada por un controlador de temperatura que por medio del termopar sensa la temperatura en la región cercana al bote de grafito. Es necesario que el crecimiento se realice en un medio inerte, por lo que se hace fluir hidrógeno de ultra alta pureza por el reactor, la cantidad de hidrógeno es regulada por los controladores de flujo de masas.

Se utiliza cuarzo (SiO_2) para el reactor debido a su resistencia a las altas temperaturas. Las características que hacen al grafito apropiado para contener los materiales para el crecimiento son su fácil manufactura y facilidad de limpieza, además de ser inerte químicamente a los materiales de crecimiento. Se trata de una regla rectangular con nueve pozos, lo que permite crecer hasta ocho capas en un mismo crecimiento. Tiene un piso deslizante, para poder colocar el sustrato bajo el material que deseamos crecer de forma consecutiva. Por la necesidad de crecer capas muy delgadas este bote tiene la particularidad de tener dos pozos en cuyo fondo se encuentra una rejilla muy angosta, para lograr un menor depósito sobre el sustrato y por lo tanto capas muy delgadas.

El horno es una resistencia de 13 ohms que al alimentarse con 220 volts. genera una corriente de aproximadamente 17 amperes, consumiendo una potencia de 3723 watts. Esta resistencia se encuentra dentro de una estructura cilíndrica recubierta de oro, para concentrar la radiación hacia el reactor de cuarzo. El termopar es una aleación de Cromel-Alumen, que al calentarse genera una diferencia de potencial en milivolts, proporcional a la temperatura sensada. El controlador de temperatura es Eurotherm modelo 831. Este nos permite incrementar y decrecer la temperatura con una inclinación de rampa adecuada a nuestras necesidades, así como estabilizarla cuando sea requerido.

El crecimiento se debe realizar en un medio inerte, que permita la desoxidación del sustrato o reducción. Esto se logra escogiendo hidrógeno como el gas que será inyectado en el reactor, debido a que el oxígeno que se desprende se combina con el H_2 , formando moléculas de

agua que en forma de vapor salen del reactor. Se usa hidrógeno de alta pureza, prepurificado de 99.9999. Debido a la ultra alta pureza que se necesita, se pasa este gas por un purificador de hidrógeno, que consta de una celda de paladio, que al calentarse a 400 °C permite el paso de los átomos de hidrogeno, impidiendo el paso de otros elementos. El sistema controlador de flujos UNIT instruments, modelo URS-100 regula el flujo de hidrógeno necesario, se utiliza este tipo de controladores y con ellos se determina el flujo que se desea entre al sistema.

Las bombas de vacío son cámaras que al enfriarse con nitrógeno líquido atrapan las moléculas. Para regenerar estas bombas, se calientan y evacúan. Es necesario hacer vacío al purificador de hidrógeno antes de enfriar la celda de paladio, ya que si no se hace así ésta puede deformarse de manera irreparable.

El sistema se encuentra dentro de un cuarto con circulación de aire controlada, además de tomarse todas las medidas necesarias para no contaminar ni el reactor, ni el crisol, ni ningún elemento que se encuentre dentro del reactor.

2.3 PROCEDIMIENTO.

Si queremos una buena estructura es necesario tener un muy pequeño desacople de red entre el sustrato y las capas crecidas. De forma experimental se sabe que el desacople de red deber ser cercano a $5 \times 10^{-3} \text{ \AA}$. Para esto necesitamos tomar datos del diagrama de fase para InGaAsP/GaAs⁽⁴⁾. Hay mucha diferencia de los datos de este artículo con nuestros valores, lo cual está conectado con diferentes razones: la temperatura no es sensada en el mismo lugar, existen diferencias en el superenfriamiento, en la construcción del bote y en la tecnología de crecimiento. Es necesario crecer las capas por separado para encontrar la tecnología de crecimiento para cada capa.

Se hicieron primero varios experimentos para encontrar la temperatura y composición correcta de crecimiento. En éstos sólo se creció la capa de emisor ya que ésta es la que queda en contacto con el sustrato y por lo tanto es la que conlleva mayor dificultad de crecimiento, al no existir equilibrio termodinámico.

2.3a Decapado

Un punto especial en el crecimiento es el decapado. En todas las mezclas hay fósforo, este elemento tiene alta presión de vapor y se evapora fósforo durante el crecimiento, las partículas de fósforo reaccionan con el sustrato, se depositan cubriéndolo y convirtiéndolo en una solución sólida de GaAsP cuya constante de red es diferente de la de GaAs. Es necesario remover esta capa antes del crecimiento. La mejor forma de hacerlo es en estaño subsaturado de GaAs. Se hicieron varios experimentos para conocer el tiempo de decapado adecuado para que el sustrato no se decape demasiado y deje de obtenerse un buen crecimiento. Esta subsaturación es para controlar la disolución del sustrato y para que no se formen valles de ataque.

Después de varios experimentos se encontró que los pesos de los materiales para la capa de emisor son los siguientes:

	Ataque	Q_{emisor}
Ga	-	29
InP	-	136
In	-	5000
Sn	5000	-
GaAs	300	-

Nota: Las cantidades están dadas en miligramos.

La exactitud requerida es de centésimas de miligramos debido a que los coeficientes de segregación grandes producen variaciones muy grandes de las composiciones del sólido. El Indio es el solvente que usamos debido a que cumple con los requerimientos necesarios como son: el hecho de que debe ser un metal, tener baja presión de vapor y un coeficiente de segregación $k \ll 1$.

2.3b Homogenización

Este procedimiento consiste en calentar los materiales hasta formar mezclas homogéneas, es necesario porque el tiempo de saturación debe ser grande y si la realizamos dentro del proceso de crecimiento, estarían presentes los dopantes y el sustrato. El sustrato sería atacado por el

fósforo que se evapora de las mezclas y además se evaporarían cantidades importantes de los dopantes.

Una vez pesados los materiales se colocan con mucho cuidado en los pozos correspondientes del bote de grafito. El bote cargado se introduce en el reactor y se hace fluir hidrógeno por espacio de media hora a $10 \text{ cm}^3/\text{seg}$. Esto barre los átomos de oxígeno que puedan formar moléculas de agua y evita se produzca una explosión a alta temperatura, además de evitar la oxidación del sustrato y de todo lo que se encuentra dentro del reactor. Después de transcurrida esta media hora se baja el flujo de hidrógeno a $1 \text{ cm}^3/\text{seg}$., porque ahora no deseamos que sean arrastrados los vapores que se desprenden de los materiales y contaminen las mezclas. También se enciende el horno, y al llegar a 300°C se tapan las mezclas deslizando la cubierta del bote, no es necesario tapar la mezcla decapante. Se deja por espacio de 15' a 770°C que es la temperatura de saturación de las mezclas, esto se hace para obtener una correcta homogenización, ya que de lo contrario crecerían capas con composiciones incorrectas.

Al término de este período, apagamos el horno y lo recorremos rápidamente para colocar un ventilador abajo de la posición del bote y así lograr un rápido enfriamiento. Ahora están listas las mezclas para el crecimiento.

2.3c Crecimiento.

Se debe cortar el sustrato por los planos perpendiculares al plano cristalográficos (100), la medida es la del suceptor, en este caso 16 por 10 mm. La mejor forma de realizar los cortes, es hacer una pequeña incisión en la medida adecuada y después golpear el sustrato suavemente por el lado opuesto. Enseguida se realiza el proceso de limpieza que describo en la sección de medidas de limpieza. Una vez limpio el sustrato se coloca en el suceptor del bote junto con las mezclas previamente homogenizadas, en una region intermedia entre el pozo del decapante y el pozo de las mezclas de emisor, de esta manera queda tapado y evitamos su contaminación.

Igual que cuando homogenizamos, dejamos la tapa del bote abierta para que la posible capa de óxido que se haya formado en la mezcla se desprenda. Introducimos el bote al reactor, pasamos flujo de hidrógeno de $10 \text{ cm}^3/\text{seg}$ por media hora, con el fin descrito en la homogenización. Enseguida se baja el flujo de hidrógeno a $1 \text{ cm}^3/\text{seg}$, que es un flujo adecuado

según se pudo comprobar en unos experimentos realizados con anterioridad. Se enciende el horno y al llegar a 300°C tapamos mezclas. A 770°C comenzamos a contar 10' hasta que se estabiliza la temperatura y así aseguramos una buena homogenización. Enseguida corremos el programa de enfriamiento fig. 2.2, que tiene una rampa de 2 °C/min., este valor de rampa se encontró experimentalmente, debido a que si el enfriamiento es muy abrupto se cristalizarían los materiales en la solución y no tendríamos deposición, con esto estamos logrando la sobresaturación necesaria para el crecimiento. Al llegar a la temperatura que deseamos crecer se baja el flujo de hidrógeno a 0.5 cm³/seg., evitando arrastrar impurezas entre capa y capa, sobretodo los vapores

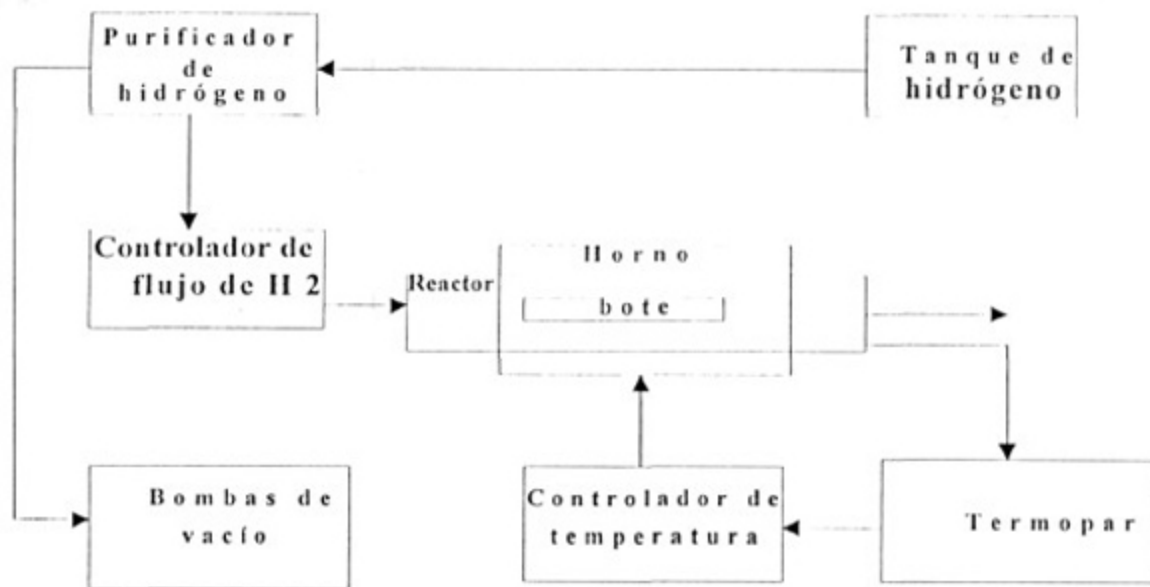


Figura 2.1 Montaje experimental del sistema de fase líquida para el crecimiento de heteroestructuras.

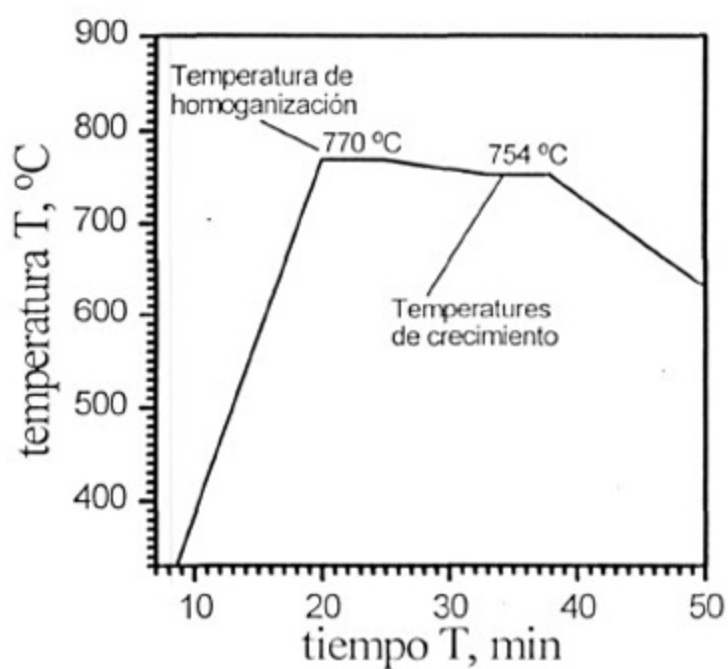


Figura 2.2 Régimen de temperatura-tiempo de crecimiento de la heteroestructura láser InGaAsP/GaAs.

del fósforo. Deslizamos el sustrato rápidamente al pozo del ataque por sólo 2", de un solo movimiento se pasa al pozo de la mezcla de emisor y se deja ahí por espacio de 1'. Si sólo se va a crecer una capa se recorre hasta sacarlo del los pozos, se apaga, se recorre el horno y se coloca el ventilador nuevamente abajo del bote para un acelerado enfriamiento. El movimiento del sustrato dentro de la mezcla del decapado debe ser rápida, ya que sólo se decapará por 2". De igual forma el movimiento para introducir el sustrato a la mezcla de emisor debe ser firme y veloz, evitando discontinuidad en el movimiento. Este fué el mayor problema durante todos los crecimientos realizados, hasta que se encontró un método que aseguró el dominio de los movimientos. Este consistió en colocar un tope para las varillas que delizan el piso del bote, con lo que se logró la uniformidad y rapidez en el deslizamiento.

Enseguida del proceso de crecimiento se puede observar si hubo crecimiento o no. Nunca se debe sacar la muestra a temperatura mayor de 50°C, para evitar la oxidación del crecimiento.

Se realizaron un total de 24 crecimientos, algunos con sólo la capa de emisor, que es la que conlleva mayor dificultad en cuanto a la técnica de FL, por ser la primera en crecerse y existir el riesgo de que se disuelva el sustrato en la mezcla. Otros crecimientos fueron con una capa activa gruesa sobre un emisor. A esta capa activa gruesa es posible aplicarle rayos X y así corregir la composición de la capa activa, si el desacople de red es mayor de 5×10^{-3} Å. También se midió fotoluminiscencia para determinar si la composición es la adecuada para la emisión de 0.8 µm. Se realizaron crecimientos de dobles heterouniones. En estas heteroestructuras la capa activa es cercana a 0.1µm., lo cual se logra gracias a la rejilla del pozo que contiene las mezcla y se controla con el tiempo de crecimiento. En nuestro caso se deslizó lentamente para la doble heteroestructura.

Los primeros tres crecimientos realizados fueron de emisor a diferentes temperaturas de crecimiento, 751°C, 750°C y 749°C. La mejor apariencia morfológica se encontró a la temperatura de 750°C y por medio de rayos X se encontró que la composición de la capa era la adecuada para lograr un buen empate de red. Después se procedió a crecer una doble capa con emisor y capa activa gruesa. Con los resultados de fotoluminiscencia y rayos X se afinaron los pesos de los materiales, para lograr una emisión adecuada y un buen empate de red. Con estos

resultados se procedió a crecer las cuatro capas de un láser de doble heterounión. Los pesos en miligramos de los materiales para estas capas fueron:

	ataque	emisor-n	$Q_{act.}$	1ª parte de emisor	2ª parte de emisor-p
InP	-	136	23.2	136	136
Ga	-	29	-	29	29
GaAs	300	-	414	-	-
InAs	-	-	400	-	-
In	-	5000	5000	5000	5000
Sn	5000	20	-	-	-
Zn	-	-	-	-	2.5

Se hicieron tres crecimientos a diferente temperatura, debido a que existía una gota de indio sobre el substrato y era muy grande. La mejor apariencia morfológica se obtuvo en el crecimiento realizado a 749 °C.

Después de estos crecimientos no obtuvimos reproducibilidad ya que no se logró crecimiento. Es importante señalar que en estos procesos el tiempo que se dejó para saturar las mezclas fué de 5'. Después se creció nuevamente sólo una capa de emisor aumentando la temperatura de crecimiento hasta 754°C. Sin embargo hasta que no se cambió el tiempo de saturación a 15' no se obtuvo crecimiento. Otro cambio fué atacar el substrato con estaño sin semisaturar y limpiar éste hasta lograr una superficie de espejo, como se menciona en la sección de limpieza. Aún con todas estas medidas la gota de indio seguía siendo grande en todos los crecimientos y se presentaban terrazas debido a un deslizamiento discontinuo. Fué entonces cuando se introdujo la innovación de implementar un tope, para lograr movimientos rápidos y continuos y de una manera notable se mejoraron los crecimientos.

Una vez obtenido un el emisor y la capa activa se creció un láser de doble heterounión. Cuando se usan las mismas mezclas para crecer varias estructuras se debe añadir 2mg. de InP, lo cual se determina en base a unos experimentos realizados con anterioridad para conocer la razón de evaporación del fósforo.

2.4 MEDIDAS DE LIMPIEZA

2.4a Materiales.

Fué sumamente importante tomar toda clase de precauciones al manejar los materiales involucrados en el crecimiento, así como las partes del sistema de epitaxia en fase líquida que pudieran contaminar la solución de crecimiento. Al pesar los materiales se limpió con etanol la mesa de trabajo, pinzas, tablillas de apoyo y los cuchillos con los que se cortan los materiales. Cada material está en recipientes tapados y algunos se sometieron a tratamientos químicos para su total limpieza. Los diferentes materiales de crecimiento fueron sujetos a los siguientes tratamientos:

i) Indio

El Indio es nuestro solvente y por lo tanto se puso especial cuidado para asegurar que estaba libre de contaminación al introducirlo al reactor. De esta manera, antes de pesarlo se le limpió con un ataque en una solución de composición $4\text{HNO}_3:1\text{HF}$. Este ataque se realiza por quince segundos aproximadamente y se hace con sumo cuidado ya que despiden vapores muy tóxicos. Estos vapores tienen un tono rojizo al principio, lo cual indica alta desoxidación y toman tonos amarillos cuando termina la desoxidación. La reacción se interrumpe agregando agua en el momento en que estos vapores dejan de ser rojos para tomar tonos amarillos.

ii) Estaño

Para limpiarlo al Estaño se le hirvió en una solución de composición $3\text{HCl}:1\text{HNO}_3$ hasta que su superficie fué de espejo.

iii) Galio

La limpieza del galio se llevó a cabo calentándolo hasta fundirlo y haciéndolo pasar por un papel filtro, donde quedan todas las impurezas. Se repite una vez más el procedimiento debido a que queda una capa de impurezas difícil de detectar.

2.4b Substrato

Otra rutina de limpieza fundamental es la del substrato, en este caso GaAs. Primero se limpia con acetona o etanol hasta estar seguro que no tiene manchas de suciedad. Después se decapa y pule con una solución de agua desionizada, ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno al 30 % , en una proporción de 1:5:1. Se agita la solución moviendo el recipiente donde se está efectuando el tratamiento en forma circular, con el fin de que éste se realice de una manera homogénea y no se formen huecos en la superficie. El tiempo de decapado depende del grosor del substrato, ya que el pozo suceptor tiene una profundidad de 300 μm . Para substratos con un grosor aproximadamente igual a la profundidad del pozo con 30 segundos es suficiente. Es muy importante enjuagar el substrato generosamente, dado que si quedan residuos de ácido el crecimiento se dificultará. Enseguida se sopla con nitrógeno en forma vertical, para secarlo y barrer las posibles impurezas. Se coloca en un recipiente limpio y cerrado. Este procedimiento se debe hacer en el momento inmediato anterior al crecimiento.

2.4c Reactor y bote de grafito.

Cada vez que se cambió de materiales de crecimiento se siguieron los siguientes procedimientos de limpieza:

- i) El tubo de cuarzo del reactor se mantuvo en agua regia (ácido nítrico y ácido clorhídrico en proporción de 3:1) por 10 horas, después de lo cual se le enjuagó con alcohol isopropílico y se le secó con nitrógeno.
- ii) El bote de grafito se calentó en agua regia durante dos horas, después de lo cual se le hirvió en alcohol isopropílico también por dos horas y enseguida en agua desionizada durante una hora. Después se seca en un horno durante 24 horas.
- iii) Finalmente se calentó el reactor con el bote de grafito dentro, a 800°C durante 12 horas como mínimo, con el fin de evaporar las impurezas del bote, del tubo de cuarzo y de todo lo que se encuentra dentro del reactor.

Al manejar el bote de grafito para colocar los materiales y el substrato se emplearon guantes desechables ya que la grasa de las manos contaminaría la solución de crecimiento.

CAPITULO 3

FABRICACION Y CARACTERIZACION DEL LASER

Describiremos en este capítulo todos los procedimientos empleados para fabricar y caracterizar los láseres, a partir de las heteroestructuras crecidas siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo anterior.

3.1 CARACTERIZACION DE LAS PELICULAS EPITAXIALES

Al terminar el crecimiento epitaxial normalmente quedan gotas de indio sobresaturado sobre la película y se deben remover. Para lograrlo se atacó la muestra con una solución de composición $3\text{HF}:2\text{HNO}_3:60\text{H}_2\text{O}$. Si la gota era muy grande se calentó la muestra y se desprendió el indio con una punta de algodón. Por otro lado, se evitó la formación de estas gotas durante el crecimiento, ya que al enfriar rápidamente la muestra al final del mismo por varios cientos de grados para alcanzar la temperatura ambiente, se genera un sobrecrecimiento bajo dichas gotas.

3.1a Microscopía óptica.

Para determinar el espesor de las diferentes películas epitaxiales crecidas sobre el sustrato se clivó una parte de la muestra de unos 3 o 4 milímetros por lado y se sumergió en una solución química de composición $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6:\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}$, en las proporciones 16 g:24 g:140 ml. Esta solución constituye un decapante selectivo, de tal manera que su velocidad de ataque depende de la composición química de las diferentes capas epitaxiales, dando lugar a la formación

de un relieve. Este relieve fácilmente nos permite distinguir las diferentes capas crecidas. Este ataque se realiza por 5 ó 10 segundos. Al término del mismo se enjuagó muy bien, la muestra, se secó y se colocó bajo un microscopio metalográfico marca *Versamet-3*. En la Fig. 3.1 podemos observar un perfil obtenido de esta manera.

3.1b Rayos X.

La parte de la muestra que no se usó para la determinación de los espesores, se empleó para determinar la magnitud y el signo del desacople reticular interfacial. Estas mediciones se realizaron en un difractómetro de rayos-x Philips X'PERT 3050 de alta resolución. El desacople reticular de una capa epitaxial con el sustrato de GaAs depende de la composición de dicha capa. Podemos decir que el empate de redes es bueno si tenemos un desacople menor al 88 %. Este desacople puede ser positivo si el parámetro de red del sustrato es mayor que el de la capa crecida o negativo si sucede lo contrario. Cuando se efectúan mediciones en crecimientos de varias capas obtenemos información de todas las interfaces, o al menos de todas aquellas en las que estén involucradas las capas más gruesas.

3.1c Fotoluminiscencia.

Esta es una técnica espectroscópica que nos brinda información sobre la calidad del crecimiento y nos permite con exactitud afinar la composición de las diferentes capas del láser en base a la intensidad de emisión en la longitud de onda correspondiente al ancho de banda prohibido del material de la capa, esto aunado con el ancho del impulso que nos manifiesta la homogeneidad de la composición de la capa.

En la Fig. 3.2 se muestra el sistema de fotoluminiscencia empleado, que, como elementos principales, cuenta con un láser de argón que emite a una longitud de onda de 514 nm, un monocromador de 0.5 m de distancia focal y un amplificador *lock-in*. Para llevar a cabo los experimentos de fotoluminiscencia, el haz del láser es pulsado por un recortador de haces a una frecuencia de 100Hz. El haz pulsado se hace incidir sobre la muestra excitándola para que emita una radiación incoherente. Esta radiación es dispersada por el monocromador sensándose a la salida del mismo por medio de un fotodiodo de silicio. La salida eléctrica del fotodiodo es

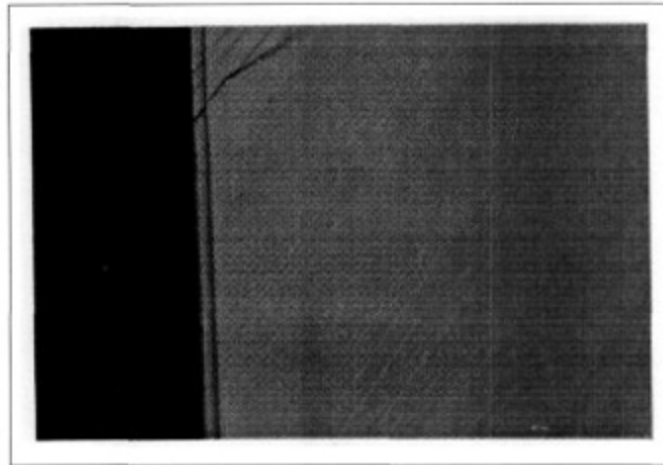


Figura 3.1.a Perfil de la capa emisora de InGaP/GaAs con grosor de $2\mu\text{m}$.

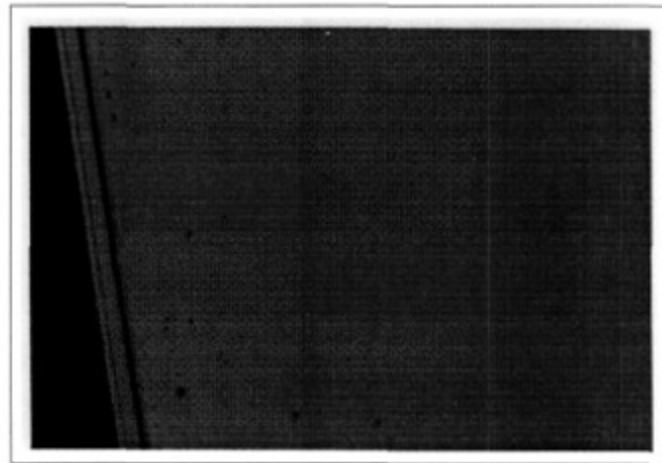


Figura 3.1.b Perfil de una doble heterounión de InGaAsP/GaAs

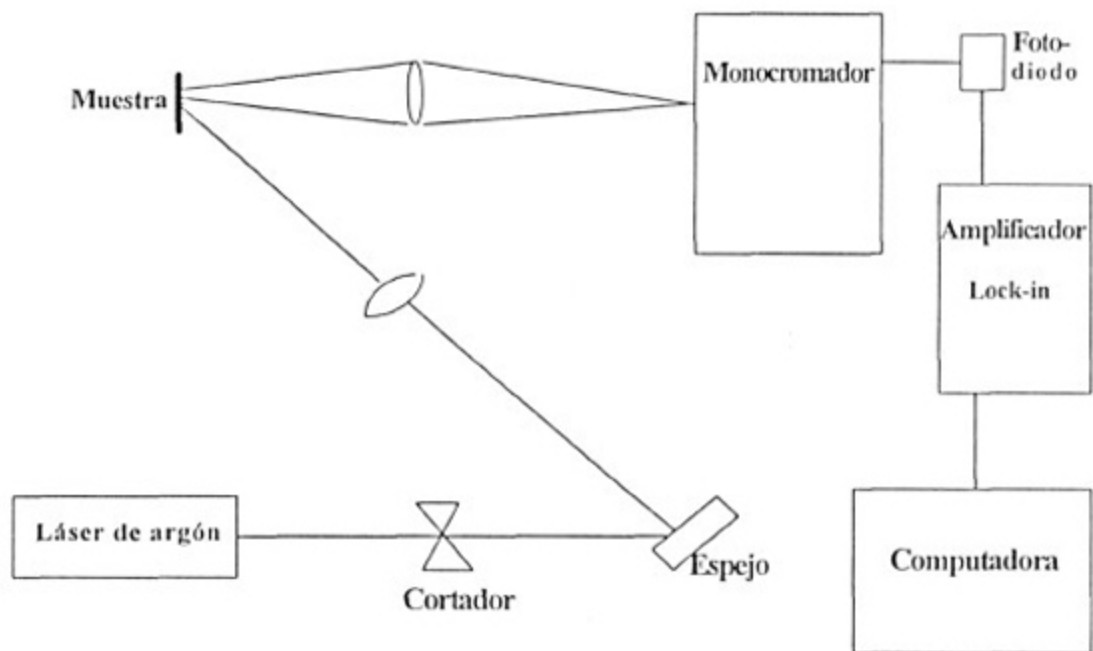


Figura 3.2 Sistema de Fotoluminiscencia.

alimentada al amplificador el cual se entona a la misma frecuencia del recortador de haces. La salida del amplificador se alimenta a su vez a una computadora, la cual controla todo el experimento, a través de una interfaz digitalizadora.

3.2 FABRICACION DEL LASER

Para depositar los contactos fué necesario previamente adelgazar las muestras hasta alcanzar un grosor de 80 a 100 μ m. De otra manera el clivado resultaría rugoso y no se lograría un resonador óptico adecuado para nuestro láser. Se decapó la muestra por el lado del sustrato, fué necesario pegarla a un vidrio grueso con parafina, dejando el lado del crecimiento hacia abajo. Se limpió el sustrato; si no se hace así, las regiones donde quede parafina no serían decapadas. Se midió el grosor de la muestra para determinar cuánto se debe decapar.

Enseguida se sumergió la muestra en una solución de peróxido de hidrógeno e hidróxido de amonio en una proporción de 3:1. Fué necesario barrer las muestras con una brocha de plástico, con el fin de remover las capas de óxido que se forman y así asegurar un decapado homogéneo. Debido a que la razón de decapado es de 10 μ m por minuto y a que se necesitan decapar aproximadamente 200 μ m, este proceso se realizó en tres etapas de 7 minutos cada una, enjuagando y midiendo, entre etapa y etapa. No se ataca los 20 ó 21 minutos de una sola vez para evitar que se desprendan las muestras. Una vez obtenido el grosor necesario se calentó el vidrio para desprender las muestras y limpiarlas. Se hirvieron en tetracloruro de carbono hasta que se consumió un 30 % del mismo, repitiendo una vez este procedimiento.

Se pesaron los materiales para el depósito de contactos. Para la capa tipo p se pesaron 30mg. de oro y 8 mg. de Zn. A fin de determinar las cantidades de Au y Zn adecuadas para los contactos se hicieron varios experimentos con varias concentraciones de Zn. Para la capa tipo n se pesaron 26mg. de oro y 3mg de Ge. Este depósito se realizó en una evaporadora al vacío.

Después del depósito se recocieron las muestras a fin de alear la capa metálica con el semiconductor. Se cuidó muy bien el tiempo de recocido porque el Zn tiene alto coeficiente de difusión y fácilmente puede difundirse hacia la capa activa. El recocido se realizó por espacio de un minuto a 390 °C, en un reactor de cuarzo al que se le hizo circular hidrógeno.

3.3 CARACTERIZACION DEL LASER

3.3a *Curvas de voltaje-corriente*

Se clivaron las muestras en cuadrados de 300 μm por 300 μm . Con ayuda del microscopio se montaron en un portamuestras y se conectaron al trazador de curvas, donde podíamos observar si la zona lineal de la curva voltaje-corriente tenía una pendiente alta, con esto se asegura una baja resistencia, del orden de 0.5 a 4 ohms. y por lo tanto buenas características de voltaje-corriente.

3.3.b *Electroluminiscencia.*

Se escogieron los diodos que mostraban las menores resistividades y se caracterizó su espectro electroluminiscente. Para esto, se les aplicaron pulsos de corriente con una longitud de pulso de 1 μs y un período de 20 μs . Se empleó una corriente pulsada en lugar de una continua con el fin de que los láseres no se sobrecalentaran.

El sistema usado para medir electroluminiscencia está mostrado en la Fig. 3.3. Este consta de un generador de pulsos de baja potencia y de un amplificador que nos permite elevar la amplitud de dichos pulsos hasta 2 A. La corriente pulsante se aplica a la muestra para excitarla y obtener la inversión de población necesaria para lograr la emisión coherente. La luz emitida por el láser es dispersada por el monocromador y sensada por un fotodiodo de silicio, cuya señal es amplificada por un amplificador *lock-in*. La salida de este amplificador se alimenta a una computadora a través de un vólmetro digitalizador. Una computadora controla todo el experimento y guarda el espectro obtenido en un disco magnético para su posterior manipulación y análisis. Una vez alcanzada la corriente umbral el espectro de electroluminiscencia muestra típicamente un pico muy agudo a una longitud de onda entre 0.8 y 0.82 μm . Este pico corresponde a la radiación coherente.

Una parte de la electrónica de este sistema se utiliza para un sistema abierto de comunicación óptica, el cual nos permite demostrar el funcionamiento de nuestro láser, ver anexo.

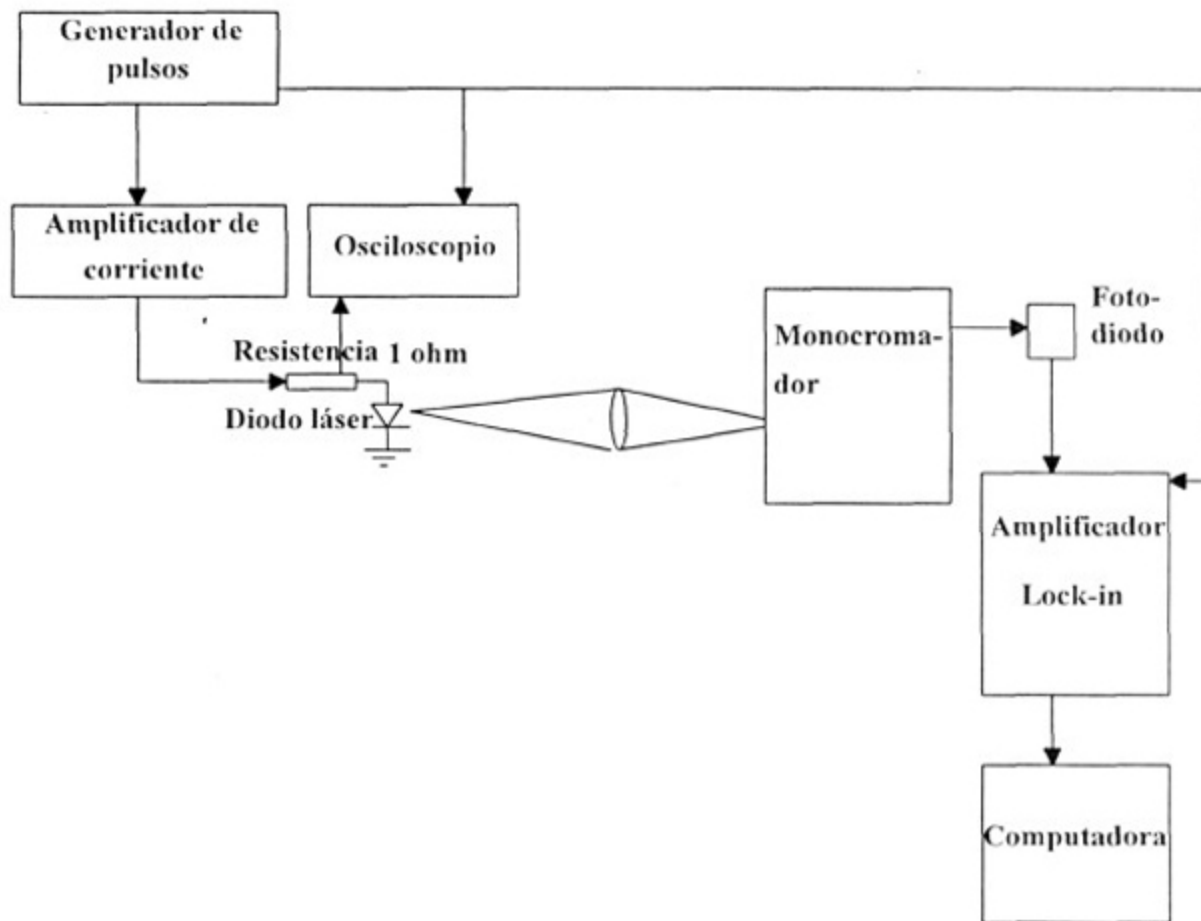


Figura 3.3 Sistema de electroluminiscencia

CAPITULO 4

DISCUSION DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 DISCUSION

4.1a Crecimiento epitaxial

En base a los experimentos realizados encontramos que es preferible decapar con estaño sin subsaturar con GaAs, sacrificando valles de decapado para obtener una mayor velocidad de ataque. La limpieza del estaño se logró de espejo con un ataque de 1:1 de ácido clorhídrico y ácido nítrico hirviéndolo hasta lograrlo, ya que anteriormente se hacía solo con ácido clorhídrico.

Es importante señalar que las capas muy delgadas, como lo es la capa activa del láser, y no pueden ser observadas en el microscopio metalográfico, ya que su grosor es de décimas de μm . Las capas de emisores, en contraste, son fácilmente observables por tener un grosor en el orden de $1\ \mu\text{m}$. Las observaciones por microscopía óptica nos permitieron determinar que la velocidad de crecimiento de las capas de InGaP es de $2\ \mu\text{m}/\text{min}$ bajo nuestras condiciones tecnológicas.

Los resultados obtenidos con el sistema de EFL utilizado en este trabajo son buenos. No obstante, existen algunos problemas que pueden ser superados. Uno de estos problemas es, por ejemplo, el que no exista un tope para el movimiento de las varillas de molibdeno que nos permiten mover el sustrato entre capa y capa. Nosotros implementamos uno provisional para el decapado, pero se podría mejorar el sistema si se asegura que todos los movimientos para la deposición de las capas sean precisos.

4.1b Rayos x

Con ayuda de mediciones de difracción de rayos X se determinaron la magnitud y el signo del desacople de red, lo que permitió optimizar el régimen tecnológico para cada capa de la heteroestructura. En este caso se considera, por razones experimentales, que un desacople positivo es mejor porque el semiancho del espectro de fotoluminiscencia es más pequeño en las muestras con desacople de red positivo, debido a que el impulso no es simétrico. En los crecimientos de buena calidad encontramos un desacople de red cercano al $5 \times 10^{-3} \text{ \AA}$. Considerando que la constante de red del sustrato es de 5.65325 \AA , este desacople está dado por $\Delta z / a = 0.00088$. En la Fig. 4.1 se muestran un difractograma obtenido para una de las capas del láser.

4.1c Fotoluminiscencia

Por medio de la espectroscopía de fotoluminiscencia afinamos, tanto la composición de la región activa para lograr una emisión cercana a $0.8 \mu\text{m}$, como la composición del emisor. Esto se logra en base a la intensidad de emisión en la longitud de onda correspondiente al ancho de banda prohibido del material de la capa, esto aunado con el ancho del impulso que nos manifiesta la homogeneidad de la composición de la capa. Siendo aceptable un ancho de 60 a 70 meV a 300 °K. En la Fig. 4.2 se muestra un espectro típico de fotoluminiscencia obtenido.

4.1c Electroluminiscencia

Antes de efectuar la espectroscopía de electroluminiscencia se realiza una caracterización de las curvas de Voltaje-Corriente para nuestros diodos láser. En la fig.4.3 se muestra una curva típica corriente-voltaje obtenida. La investigación de las características de voltaje-corriente mostró que la tecnología del crecimiento y depósito de contactos permiten obtener una heteroestructura láser con una resistencia cercana a 1 ohm. Al efectuar la electroluminiscencia, en el momento de obtener el pico de emisión coherente debe anotarse la corriente necesaria para la obtención del efecto láser y dividirse entre el área de contacto para obtenerse la densidad de corriente de umbral, que es el parámetro más importante en la caracterización de un láser, fig 4.4. La densidad de corriente de umbral debe ser baja. En el láser que hicimos obtuvimos una

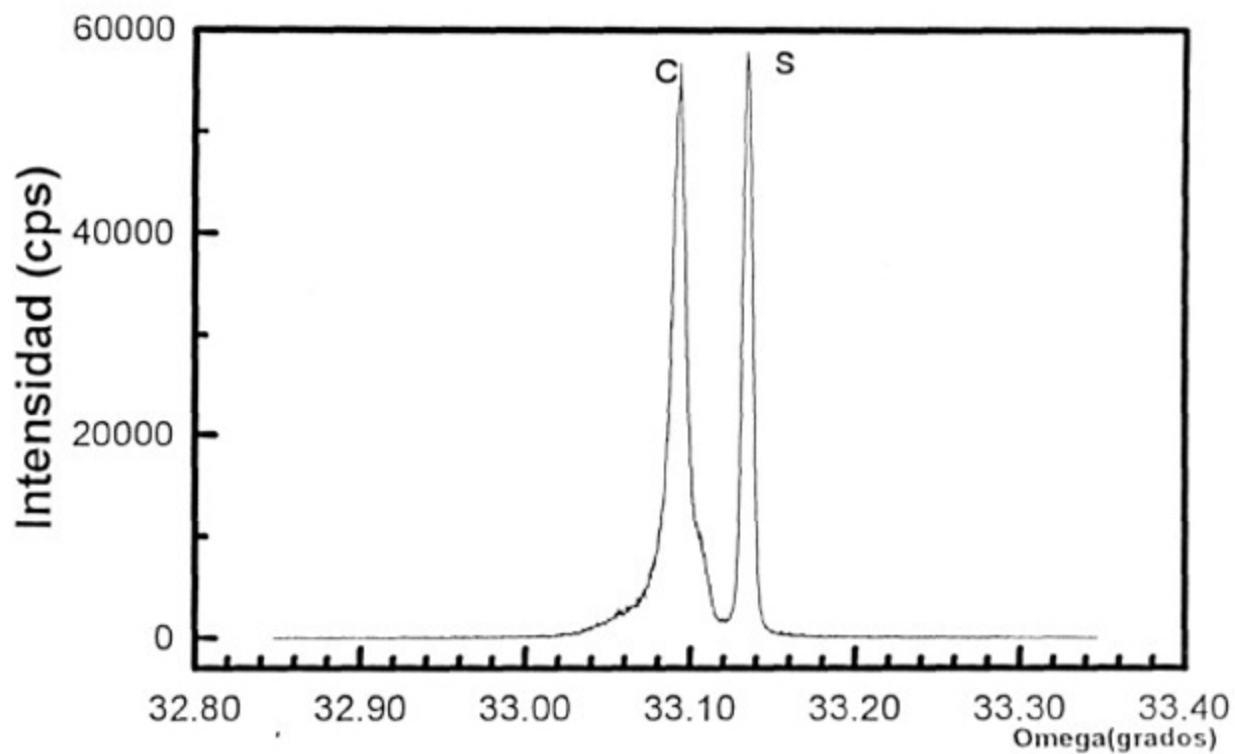


Figura 4.1 Difractograma de rayos X para una heterounión de InGaP/GaAs, donde se obtuvo un desacople entre el sustrato y la capa emisora de $5 \times 10^{-3} \text{Å}$.

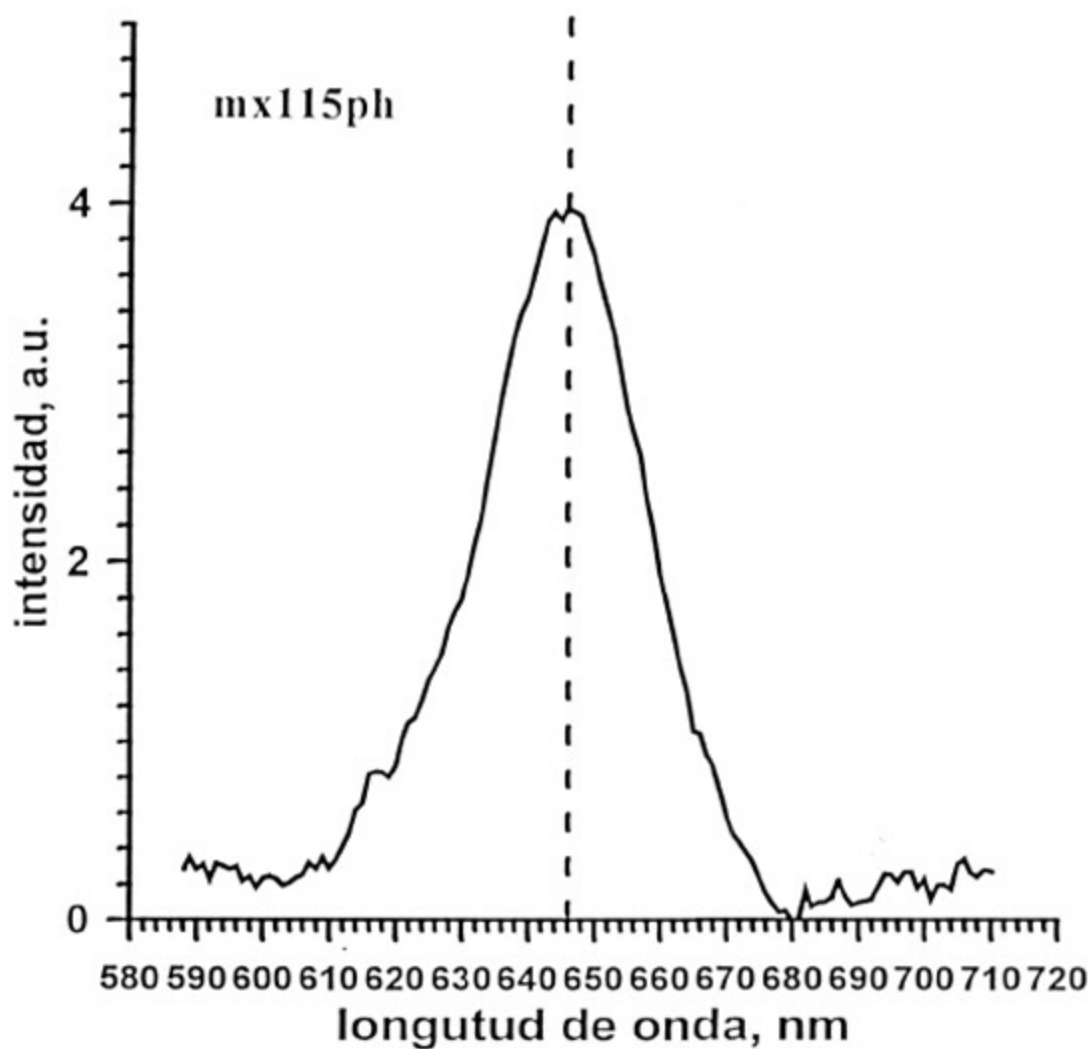


Figura 4.2 Espectro de fotoluminiscencia de la solución sólida ternaria InGaP/GaAs , de la capa emisora..

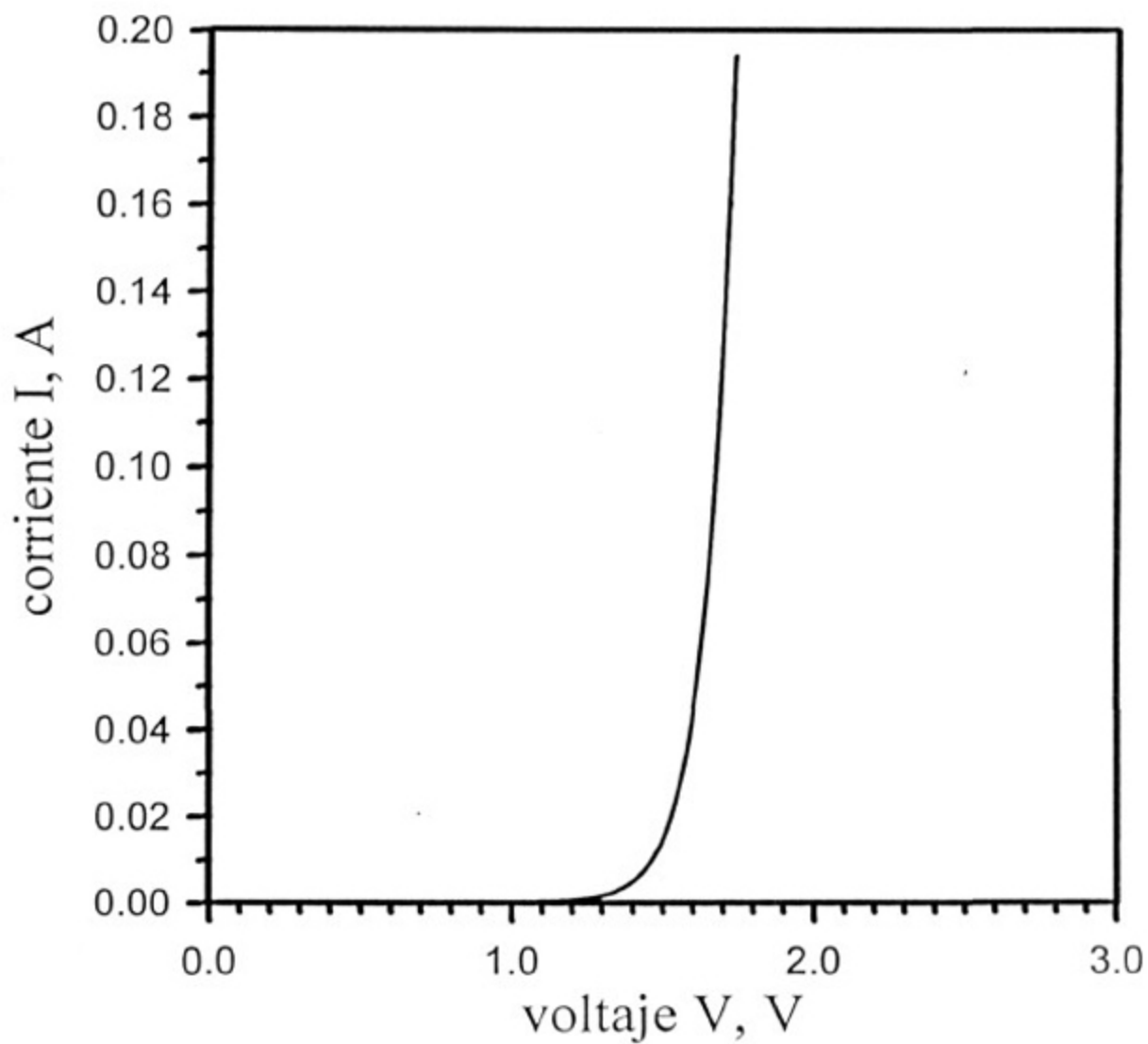


Figura 4.3 Curva voltaje-corriente del diodo láser.

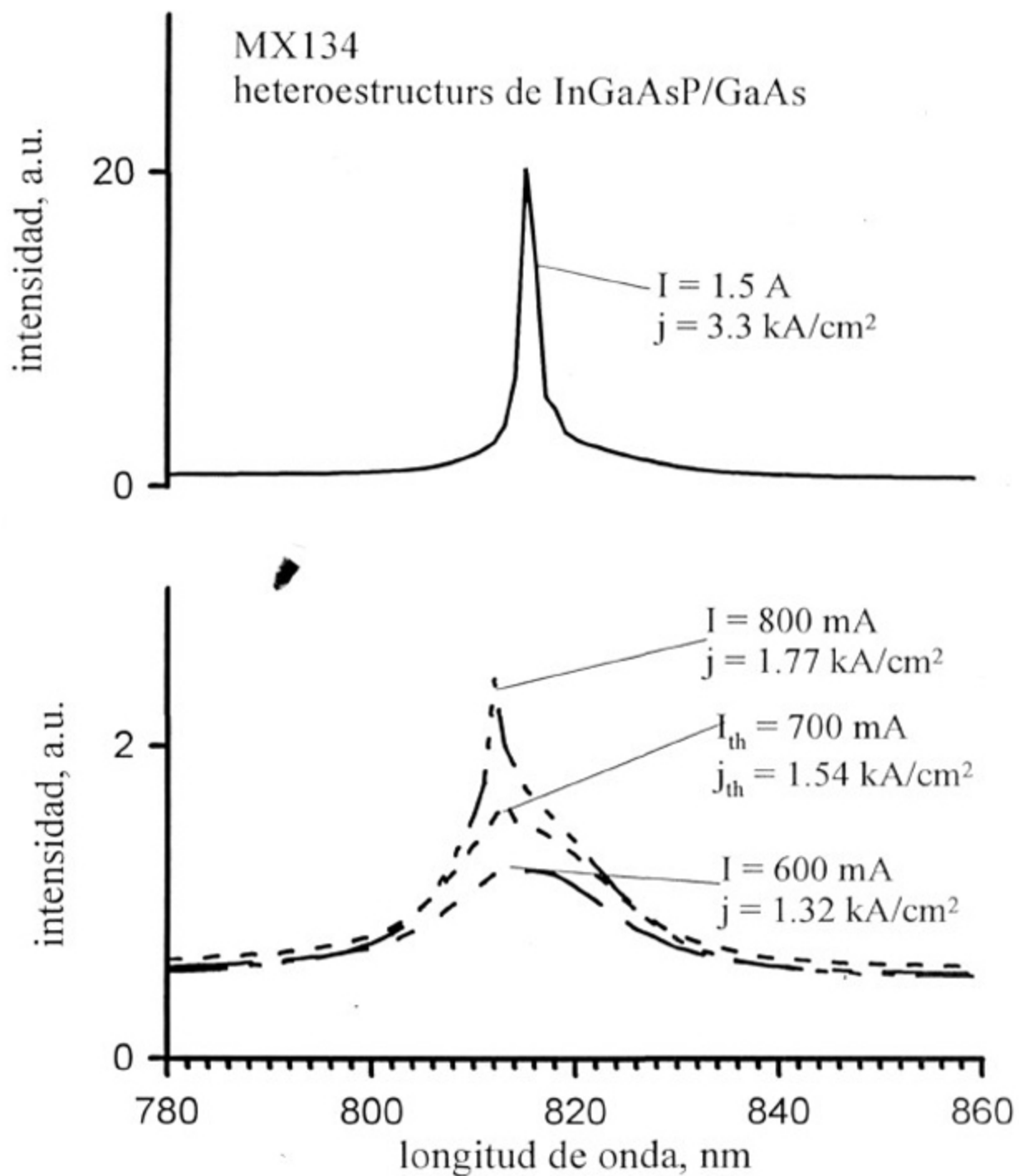


Figura 4.4 Espectro de electroluminiscencia de InGaAsP/GaAs del diodo láser.

densidad de corriente de umbral de 1540 A/cm^2 , la cual está dentro del rango necesario para un buen funcionamiento. Esta densidad de corriente es buena debido a que una muy buena sería de 500 A/cm^2 . La manera de mejorar esta densidad de corriente es con heteroestructuras de doble confinamiento.

4.2 CONCLUSIONES

De lo anterior podemos concluir que:

- Con la ayuda de microscopía, rayos X y fotoluminiscencia se optimizó el crecimiento de una heteroestructura láser InGaAsP/GaAs en la región de $0.8\mu\text{m}$, por medio de epitaxia en fase líquida.
- Mediante la técnica de electroluminiscencia se caracterizó el láser, encontrando una densidad de corriente de umbral de 1.54 kA/cm^2 .

ANEXO

SISTEMA ABIERTO DE COMUNICACION OPTICA

Este sistema es un transmisor de información por medio de luz coherente. Le llamamos abierto por el hecho de que la luz es transmitida por medio de la atmósfera y no por una fibra óptica, como es el caso de los sistemas cerrados de comunicación óptica. Esta es sólo una demostración del funcionamiento de nuestro láser. Podríamos decir que es otra prueba de electroluminiscencia, sólo que con una aplicación, fig. 1

La información que será transmitida ópticamente proviene de una grabadora, de la que se toma la señal de audio. En un oscilador se genera un tren de pulsos, cuya frecuencia es la necesaria para que el láser trabaje en el modo pulsante. Los pulsos deben tener un ancho de 1 μ seg. y un período de 20 μ seg. Se modulan los pulsos con la señal de audio. Es necesario amplificar los pulsos modulados hasta lograr una corriente del orden de amperes, para al aplicarsela al láser lograr la inversión de población y por lo tanto la emisión coherente pulsante. El láser es alimentado con los pulsos modulados y amplificados y así se logra transmitir la información por medio de la luz coherente. El fotodiodo que se usa es de silicio, dado que estos diodos tienen un espectro de frecuencia para sensar luz, alrededor de 0.8 μ m. ésto nos permite probar el láser fabricado en este trabajo. El fotodiodo convertirá la luz coherente en una señal óptica pulsante. La señal generada por el fotodiodo es de baja intensidad, por lo que es necesario amplificarla. Para demodular la señal, se filtra la frecuencia necesaria para eliminar los pulsos y sólo quedarnos con la envolvente, que es la frecuencia de audio. La señal óptica demodulada es transformada en sonido por medio de una bocina.

El generador de pulsos y el amplificador de corriente son los mismos que se utilizan para generar y alimentar al láser cuando hacemos electroluminiscencia.

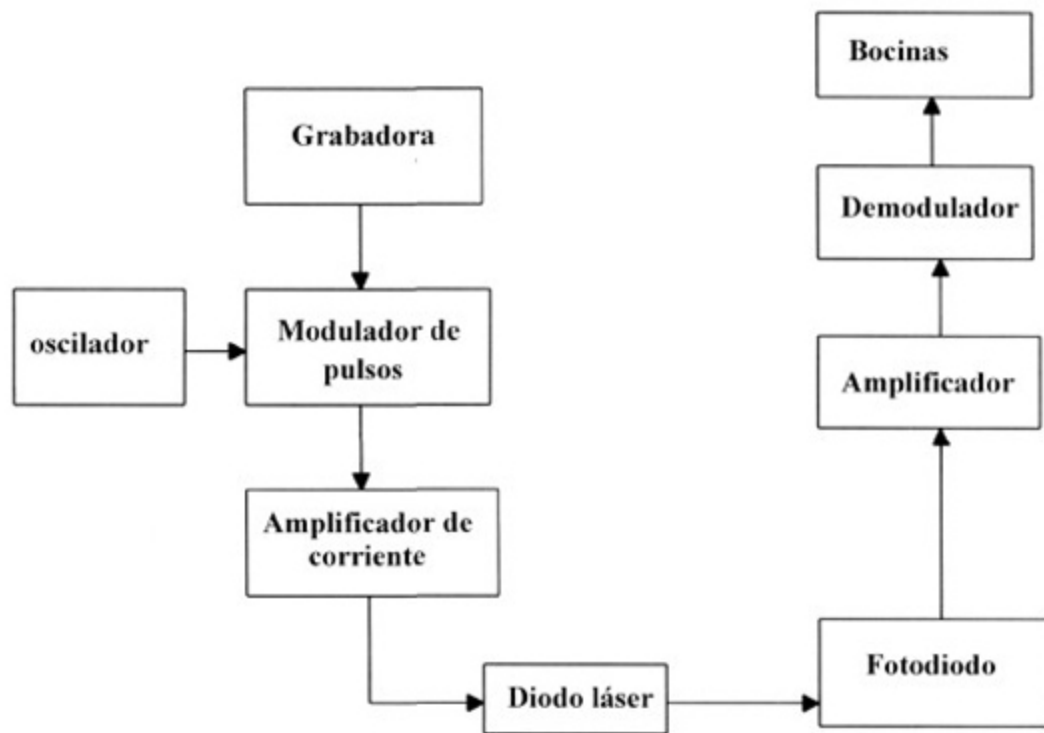


Figura 1 Sistema abierto de comunicación óptica

REFERENCIAS

- 1.- B.E.A. Saleh, M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, Wiley Interscience.(1944)
- 2.- Viatcheslav A. Mishourny, Andrei Yu. Gorbachev, Igor E. Berichev, *Láseres Semiconductores I. Principios de Funcionamiento*, Ciencia, (debe ser publicado en 1996)
- 3.- S.M. SZE, *Semiconductor Devices, Physics and Technology*, Wiley, (1985).
- 4.-R. Kúdela y M. Morvic, *Phase Diagram and LPE Growth of Quaternary InGaAsP on GaAs*, Journal of Crystal Growth 82 (1987)
- 5.-Ghandhi, Sorabk, *VSSI Fabrication principles: silicon and Gallium arseide*, Wiley, (1994)
- 6.- D.Z. Garbuzov, N. Yu. Antonishkis, S.N. Zhigulin, N.K. Il'inskaya, A.V. Kochergin, D.A. Lifshitz, E. U. Rafailov, and M.V. Fuksman, *High-power buried InGaAsP/GaAs ($\lambda = 0.8 \mu\text{m}$) laser diodes*, Appl. Phys. Lett. 62 (10), (1993)
- 7.-J. Díaz, Eliashevich, X. He, H. Yi, L. Wang, E. Kolev, D. Garbuzov, y M. Razeghi, *High-power InGaAsP/GaAs 0.8- μm laser diodes and peculiarities of operational characteristics.*, Appl. Phys. Lett, Vol. 65,(1994)
- 8.- D.Z. Garbuzov, N. Yu. Antonishdis, A.D. Bondarev, A.B. Guladov, S. N. Zhigulin, N. I. Katsavers, A. V. Kochergin, and E. V. Rafailov., *High-Power 0.8 μm InGaAsP-GaAs SCH SQW Lasers*, IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 27, No. 6, (1991)
- 9.-Seiji Mukai, *Photoluminescent and electrical properties of InGaPAs mixed crystals liquid-phase-epitaxially grow on (100) GaAs*, J. Appl. Phys. 54 (1983)
- 10.-Iván César Hernández del Castillo, V.A. Mishurnyi, I. E. Berichev, A.Y.Gorbachev, Ma. Isabel Ortiz Libreros, Griselda Rodríguez Pedroza, *Heteroláseres con corriente de umbral baja InGaAsP/InP*, conferencia de Ing. Eléctrica, Cinvestav-IPN (1996)