



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

DONACION
 Num. Reg. FMIT4651
 Catalogador Lety Cortés
 Fecha 03/Oct/107

JUNIO 27, 1996.

A la Lic. en Fis. María Isabel Ortíz Libreros
 Presente.-

En atención a su solicitud de autorización de Tema y Temario, presentada por el Dr. Igor E. Berishev, Asesor Oficial del Trabajo de Investigación en la modalidad aprobada por Consejo Técnico Consultivo de fecha 19 de Enero de 1995, que deberá desarrollar para presentar su Examen de Grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica. Me es grato comunicarle que en la Sesión de Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 27 de Junio del presente año, fué aprobado el Tema y Temario propuesto: *

"TECNOLOGIA EN LA FABRICACION DE LASERS SEMICONDUCTORES EN LA REGION -
 =1.3 m".

TEMARIO:

- I.- GENERALIDADES
- II.- SISTEMAS EXPERIMENTALES
- III.- EXPERIMENTOS Y RESULTADOS
- IV.- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

" MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO "

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



ING. DAVID ATISHA CASTELLO
 DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
 UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI
 FACULTAD DE INGENIERIA
 DIRECCION



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACION Y ESTUDIOS DE POSGRADO

TECNOLOGIA EN LA FABRICACION DE LASERS
SEMICONDUCTORES EN LA REGION DE 1.3 μm

TESIS PROFESIONAL
que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERIA ELECTRICA
Opción
MATERIALES Y DISPOSITIVOS OPTOELECTRONICOS

PRESENTA:
MARIA ISABEL ORTIZ LIBREROS

Jurado:

DR. IGOR ERICOVICH BERISHEV
DR. SALVADOR GUEL SANDOVAL
DR. FRANCISCO DE ANDA SALAZAR
DR. MIGUEL ANGEL VIDAL BORBOLLA
(Suplente)



*A mi abuelo **Luis**In Memoriam*

*A Concepción Libreros Carmona y
Luis Ortiz Hernández mis padres*

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Igor Ericovich Berishev** por su valiosa asesoría, ya que con su instrucción, colaboración y amistad, se logró el desarrollo de este trabajo.

Al **Dr. Salvador Guel Sandoval**, por su colaboración en el asesoramiento dentro del laboratorio de Fotolitografía.

Al **Dr. Andrei Yu. Gobachev** en la parte de fotoluminiscencia y emisión estimulada.

Al **Dr. Viatcheslav A Mishournyi** por sus consejos y comentarios.

A **Griselda Rodríguez P. e Ivan C. Hernández** por su colaboración en el laboratorio de LPE y deposición de contactos.

Al **Dr. Adrián L. García G.** que con su entusiasmo, amistad y ayuda constante se conjuntó el equipo de trabajo.

A **Martín Hernández Sustaita** por su ayuda en las mediciones de Efecto Hall.

A **José Nieto y Ezequiel Ontiveros** por su ayuda en el diseño, construcción y montaje del Lab. de Fotolitografía.

A los **Drs. Alfonso Lastras, Hugo Navarro y Miguel Angel Vidal** por su apoyo, enseñanza y confianza depositada.

Al **Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO)** la oportunidad de realizar en sus instalaciones esta tesis.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CoNaCyT)**, por su apoyo económico a través de su programas de apoyo a Posgrados de Excelencia. (No. de becario 77446)

A todos los **compañeros y amigos** por su apoyo constante.

ÍNDICE

CAPITULO 1	INTRODUCCIÓN	
<i>1.1 Relevancia de este trabajo</i>		<i>1</i>
<i>1.2 Objetivos</i>		<i>3</i>
<i>1.3 Descripción general</i>		<i>4</i>
CAPITULO 2	METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS OPTOELECTRÓNICOS	
<i>2.1 Tópicos de la física de semiconductores</i>		<i>5</i>
<i>2.2 Emisión espontánea y emisión estimulada</i>		<i>7</i>
<i>2.3 Amplificación, retroalimentación y pérdidas en un láser</i>		<i>8</i>
<i>2.4 Estructuras láser</i>		<i>10</i>
<i>2.5 Crecimiento epitaxial de capas por la técnica de LPE</i>		<i>14</i>
<i>2.5.1 Técnicas de crecimiento</i>		<i>17</i>
<i>2.5.2 Termodinámica</i>		<i>18</i>
<i>2.5.3 Equilibrio en sistemas reales</i>		<i>20</i>
<i>2.5.4 Modelo utilizado</i>		<i>21</i>
<i>2.6 Post-crecimiento</i>		<i>22</i>
<i>2.6.1 Proceso fotolitográfico</i>		<i>22</i>

CAPITULO 3	MONTAJE EXPERIMENTAL	
<i>3.1 Arreglo experimental del laboratorio de Epitaxia en Fase Líquida</i>		29
<i>3.1.1 Bote de grafito</i>		29
<i>3.1.2 Horno</i>		31
<i>3.1.3 Controlador de temperatura</i>		32
<i>3.1.4 Sistema purificador de hidrógeno</i>		32
<i>3.2 Arreglo experimental del laboratorio de Fotolitografía</i>		33
<i>3.2.1 Girador</i>		34
<i>3.2.2 Horno</i>		37
<i>3.2.3 Alineadora</i>		37
<i>3.2.4 Microscopio con lámpara de luz blanca, cámara de video y monitor</i>		39
CAPITULO 4	EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS	
<i>4.1 Problemas en el crecimiento de heteroestructuras</i>		42
<i>4.2 Proceso de crecimiento mediante LPE</i>		43
<i>4.2.1 Limpieza del sustrato</i>		43
<i>4.2.2 Ataques químicos y decapantes</i>		43
<i>4.2.3 Homogeneización</i>		44
<i>4.2.4 Proceso de crecimiento</i>		44
<i>4.3 Resultados experimentales de LPE</i>		45
<i>4.4 Post-crecimiento</i>		52
<i>4.5 Resultados de Fotolitografía</i>		57
CAPITULO 5	CONCLUSIONES	61
<i>Apéndice A</i>	<i>Diagramas de fase de InGaAsP, InGaAs e InP con acoplamiento de red en la cara 100</i>	64
BIBLIOGRAFÍA		67

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. RELEVANCIA DE ESTE TRABAJO

Este trabajo está enmarcado dentro de una de las áreas de mayor interés en la actualidad, como lo es el diseño y fabricación de dispositivos para sistemas de comunicación óptica, que sirven para enviar información de un lugar muy distante a otro. Los elementos principales de estos sistemas incluyen al principio una fuente de información de la cual se introduce el mensaje a un transmisor, el transmisor acopla el mensaje al medio o canal de transmisión en forma de una señal que debe coincidir con las propiedades del canal. El canal es el puente entre el emisor y el receptor.

El gran interés en la comunicación por medios ópticos, renació en los 60's con la invención del láser, el cual es una fuente de luz coherente. Las frecuencias ópticas son del orden de 5×10^{14} Hz, el láser teóricamente tiene una capacidad de información que excede a los sistemas de microondas por un factor de 10^5 , el cual es igual aproximadamente a 10 millones de canales de TV.

Al mismo tiempo que con el estudio en los canales ópticos atmosféricos, se hicieron investigaciones en fibras ópticas, probándose que es más redituable y versátil la fibra óptica que la atmósfera. El interés en el mejoramiento de los sistemas de transmisión con fibras ópticas creció con el desarrollo de la tecnología de semiconductores, la cual proporcionó las fuentes de luz coherente y fotodetectores.

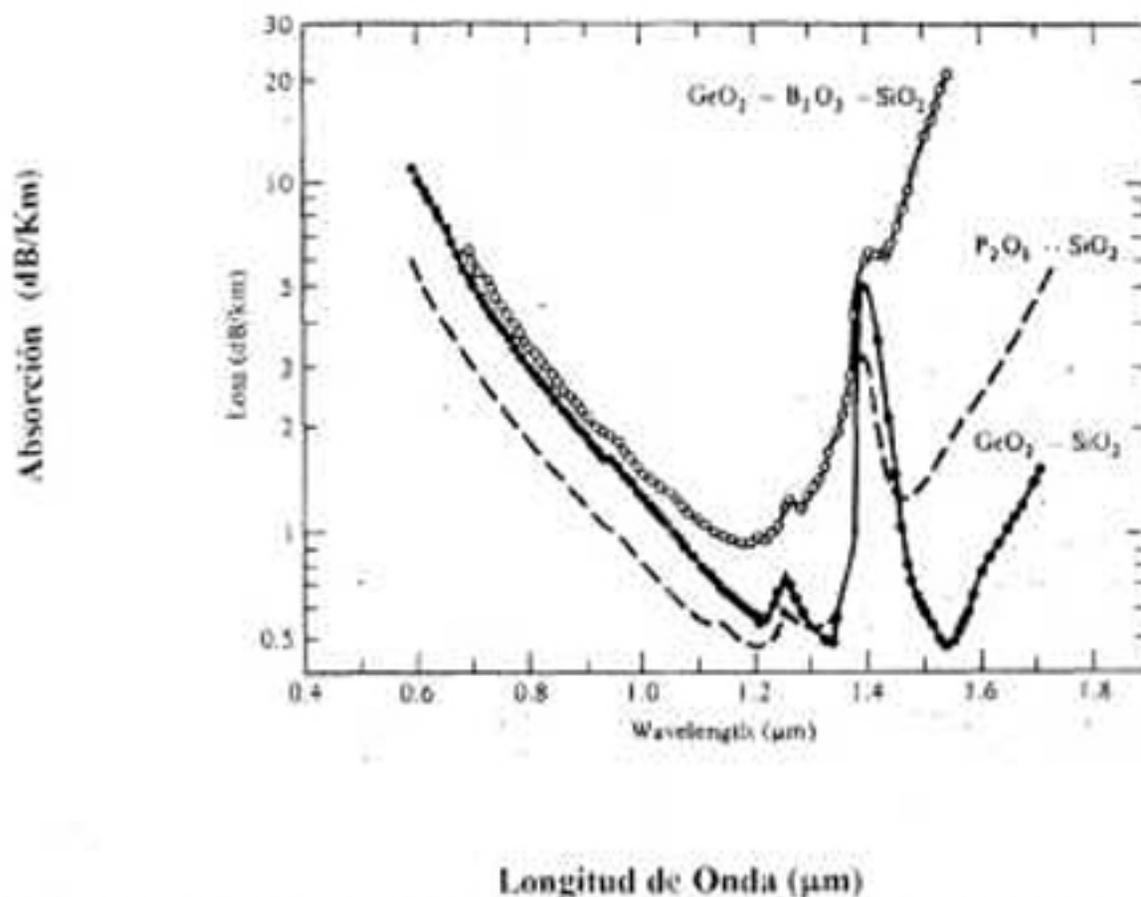


Fig 1.1 Atenuación en una fibra óptica, aquí se observa que la atenuación varía con la concentración de impurezas, tanto como con la longitud de onda, mostrando regiones de mínima absorción.

Una de las principales características en las fibras ópticas es su atenuación como función de la longitud de onda. Al principio se usó solamente la banda de longitud de onda entre 0.8 y 0.9 μm, en esta región las fibras exhibían un mínimo local en la curva de atenuación. Mediante la reducción de concentraciones de iones hidróxidos e impurezas de iones metálicos en los materiales de la fibra,⁽¹⁾ se hizo posible manufacturar fibras con muy bajas pérdidas en la región entre 1.32 (pérdidas bajas) y 1.55 μm (aún más bajas pérdidas), como se muestra en la fig. 1.1. Los diodos semiconductores emisores de luz (LEDs) y los diodos láser, son fuentes utilizadas para introducir la potencia óptica en el corazón de las fibra.

Los principales características que distinguen a un láser semiconductor son:⁽²⁾

- 1) Sus pequeñas dimensiones (300μm x 10μm x 50μm), por lo cual puede incorporarse fácilmente a otros instrumentos.
- 2) Su bombeo directo por una baja corriente eléctrica (15mA a 2 V es típica)
- 3) Su eficiencia que es mayor del 50% en la conversión de potencia eléctrica en luz y es la mas alta que cualquier otro tipo de fuente luminosa.

4) la capacidad para modular su salida directamente mediante una simple variación en la corriente aplicada en rangos que superan los 10 Ghz. Esta es la característica de mayor interés para los sistemas de comunicación.

5) la compatibilidad en las dimensiones de su haz de salida con las dimensiones en las fibras ópticas y la posibilidad de producir la longitud de onda en la región de mínimas pérdidas y dispersión de tales fibras.

En el desarrollo de la construcción de dispositivos que emitan alrededor de $1.3\mu\text{m}$, se involucran una serie de procesos, como crecimiento de las heteroestructuras, fotolitografía, deposición de material aislante, deposición de contactos y la encapsulación, así como una variedad de métodos de medición para la caracterización de materiales y dispositivos terminados (sin encapsular).

1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la construcción de un diodo láser semiconductor InGaAsP/InP el cual se encuentre en el rango de emisión de $1.3\mu\text{m}$. Tal propósito involucra una serie de objetivos particulares, los cuales se enumeran a continuación.

- 1) Aprender y entender la termodinámica del proceso de crecimiento por Epitaxia en Fase Líquida. Así como la tecnología y el método involucrados en el sistema de crecimiento.
- 2) Calcular las cantidades necesarias para el crecimiento de una heteroestructura con emisión láser en el área de $1.3\mu\text{m}$.
- 3) Caracterizar cada capa, realizando fotoluminiscencia, difracción de Rayos-X y efecto Hall.
- 4) Crear la heteroestructura y construir diodos láser de confinamiento separado de pozo cuántico simple (SCH SQW).
- 5) Implementar un laboratorio de fotolitografía, donde se diseñarán y construirán un girador y una alineadora, en la cual contemos con un sistema de alineación con movimientos en x , y , z y un ángulo θ . Además de la caracterización y optimización de los parámetros involucrados en los procesos tanto positivo como negativo para el fotoresist az-5214.

6) La fabricación un láser de área angosta (stripe-laser semiconductor, SCH SQW), con emisión en $1.3\mu\text{m}$, donde se debe depositar material aislante, para posteriormente realizar fotolitografía, abrir ventanas en el aislante (mediante ataque químico) y depositar los contactos metálicos.

1.3 DESCRIPCIÓN GENERAL

En el capítulo 2 se describen algunos antecedentes y tópicos del funcionamiento de los diodos láser semiconductores, características del sistema InGaAsP y sus propiedades. También se describe la técnica de crecimiento por Epitaxia en Fase Líquida, así como los principios termodinámicos fundamentales de ésta y por último el proceso de post-crecimiento, el cual involucra el proceso fotolitográfico como parte fundamental en todo tipo de dispositivo optoelectrónico.

En el capítulo 3 se muestra el arreglo experimental del laboratorio de crecimiento por Epitaxia en Fase Líquida (Liquid Phase Epitaxy) y el montaje experimental del laboratorio de Fotolitografía.

En el capítulo 4 se muestran los resultados experimentales del crecimiento por Epitaxia en Fase Líquida, los resultados del dispositivo láser construido y finalmente los resultados de la caracterización del proceso fotolitográfico.

En el capítulo 5 se dan las conclusiones del presente trabajo.

Se incluye un apéndice, en que se expone un breve resumen de las ecuaciones utilizadas para el cálculo de concentraciones de la solución sólida.

CAPITULO 2

METODOLOGÍA PARA LA FABRICACIÓN DE DISPOSITIVOS OPTOELECTRONICOS

La fabricación de dispositivos optoelectrónicos implica varias etapas. Comenzando por el crecimiento de la estructura, seguido por la fotolitografía para la deposición de los contactos metálicos y finalizando con la caracterización. Cada una de estas etapas a su vez el conocimiento de conceptos básicos útiles para el buen desarrollo del experimento.

En este capítulo se exponen los aspectos fundamentales implicados en la fabricación de un diodo láser semiconductor con las características propuestas.

2.1 TÓPICOS DE FÍSICA DE SEMICONDUCTORES

Los materiales semiconductores tienen propiedades de conducción que los colocan entre los metales y los aislantes. Las propiedades de conducción pueden interpretarse con la ayuda de diagramas de bandas de energía, como los mostrados en la fig 2.1.a. En un cristal ideal, la banda de conducción esta completamente vacía y la banda de valencia se encuentra totalmente llena. Estas dos bandas están separadas por una banda de energía prohibida o brecha de energía (gap), en el cual no pueden existir niveles. Si los electrones son excitados por algún medio (por ejemplo, óptica o térmicamente), una corriente fluirá a través del cristal bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado, de la banda de valencia a la banda de conducción. La energía de excitación debe ser mayor que la brecha de energía. Por cada electrón excitado a la banda de conducción, existe un electrón faltante en la banda de valencia, esta vacancia es llamada hueco. Ambos electrones y huecos contribuyen al flujo de corriente, como se muestra en la fig 2.1.a.

La conducción puede incrementarse grandemente añadiendo impurezas, por ejemplo en el caso del Si, podemos alear con elementos del grupo V, al reemplazar un átomo de Si por uno del grupo V, cuatro electrones son usados para el enlace covalente y uno queda sin enlace electrónico, quedando casi libre para la conducción. Esto hace aparecer un nivel justo abajo de la banda de conducción llamado donador y a este tipo de material se le denomina tipo-n. La conducción también puede incrementarse añadiendo impurezas del grupo III de elementos los cuales tienen tres electrones en la última capa, en este caso se crea un hueco en la banda de valencia, pero este nivel está próximo a la banda de valencia. Este es llamado nivel aceptor y el material se denomina tipo-p, porque la conducción es el resultado de un flujo de huecos.⁽¹⁾

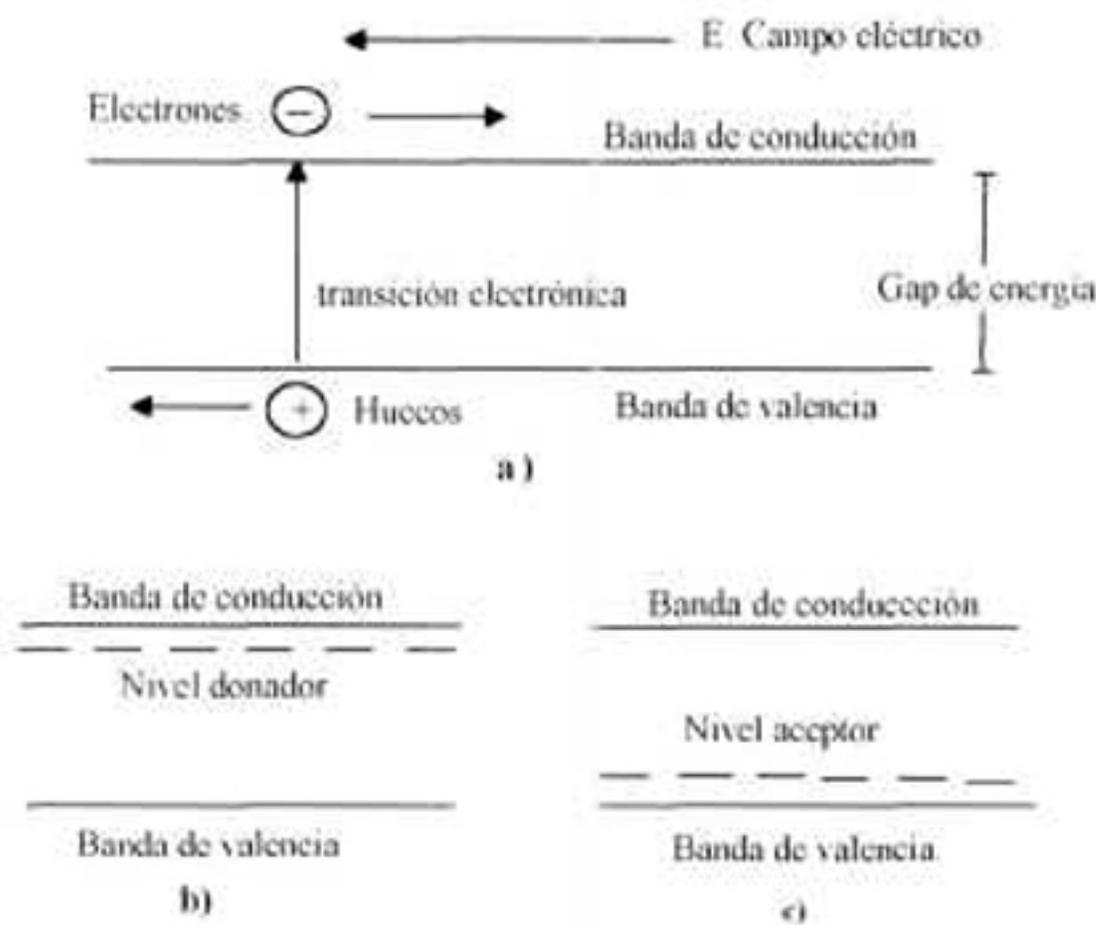


Fig.2.1.(a) Diagrama de niveles de energía mostrando un electrón libre y un hueco moviéndose bajo la influencia de un campo eléctrico externo E; (b) nivel donador en un material tipo-n; (c) nivel aceptor en un material tipo-p.

Cuando un material no contiene impurezas es llamado intrínseco. Debido a vibraciones térmicas de los átomos en el cristal, o radiación electromagnética incidente, etc., algunos electrones en la banda de valencia pueden ganar suficiente energía para ser excitados a la banda de conducción, este proceso de generación produce pares electrón-hueco.

En el proceso de recombinación un electrón libera su energía pasando de la banda de conducción a la de valencia, realizando una recombinación banda-banda. Las razones de generación y recombinación son iguales en condiciones de equilibrio.

Si n es la concentración de electrones y p es la concentración de huecos, entonces, para un material intrínseco⁽¹⁾

$$pn = p_0 n_0 = n_i^2 \quad (1)$$

donde p_0 y n_0 se refieren al equilibrio en la concentración de electrones y huecos respectivamente y n_i es la densidad de portadores del material intrínseco. La introducción de pequeñas cantidades de impurezas químicas en un cristal, produce un semiconductor extrínseco fig.2.1 b) y c). En los que se definen dos tipos de portadores de carga:

1.- Portadores mayoritarios refiriéndose a electrones en un material tipo-n, u huecos para un material tipo-p

2.- Portadores minoritarios refiriéndose de a los huecos en el tipo-n y electrones en el tipo-p.

La operación de un dispositivo semiconductor esta esencialmente basada en la inyección y extracción de portadores minoritarios. La unión entre dos materiales uno dopado tipo-p y el otro dopado tipo-n, conocida como unión p-n, es la responsable de las características eléctricas de un dispositivo semiconductor.⁽¹⁾

2.2. EMISIÓN ESPONTÁNEA Y EMISIÓN ESTIMULADA.

Suponiendo un sistema cuántico con N electrones en el que solamente existen dos niveles de energía E_1 y E_2 , donde E_2 es mayor que E_1 . Si consideramos que la radiación electromagnética interactúa con este sistema, pueden ocurrir tres procesos: a) la energía del fotón es absorbida por el electrón, llevándolo del nivel de menor energía al nivel con mayor energía. b) el electrón excitado libera espontáneamente la energía absorbida emitiendo un fotón, este proceso se conoce como emisión espontánea. (ver fig 2.2), c) Un fotón que se propaga en un medio el cual contiene un electrón excitado, puede interactuar con este, obligándolo a emitir un fotón. Al final de este proceso hay dos fotones en lugar de uno, el cual se propaga con la misma dirección e idénticas

características de fase y polarización, el proceso completo se conoce como emisión estimulada, obteniendo la amplificación del número de fotones inyectados.⁽⁴⁾

Para lograr que la mayoría de los electrones estén en el nivel superior y con esto una amplificación del número de electrones inyectados, se requiere de una influencia externa, como una corriente eléctrica, o la iluminación con una lámpara cuya intensidad sea alta. Cuando la banda de conducción se encuentra más poblada que la banda de valencia, se dice que existe una inversión de población, este es un estado fuera de equilibrio. En la mayoría de los láseres de inyección el estado superior o el estado inferior involucrados en la recombinación radiativa yacen en un continuo. Por tanto no es posible caracterizar el sistema dando un número de estados excitados y desexcitados, como en un láser convencional.

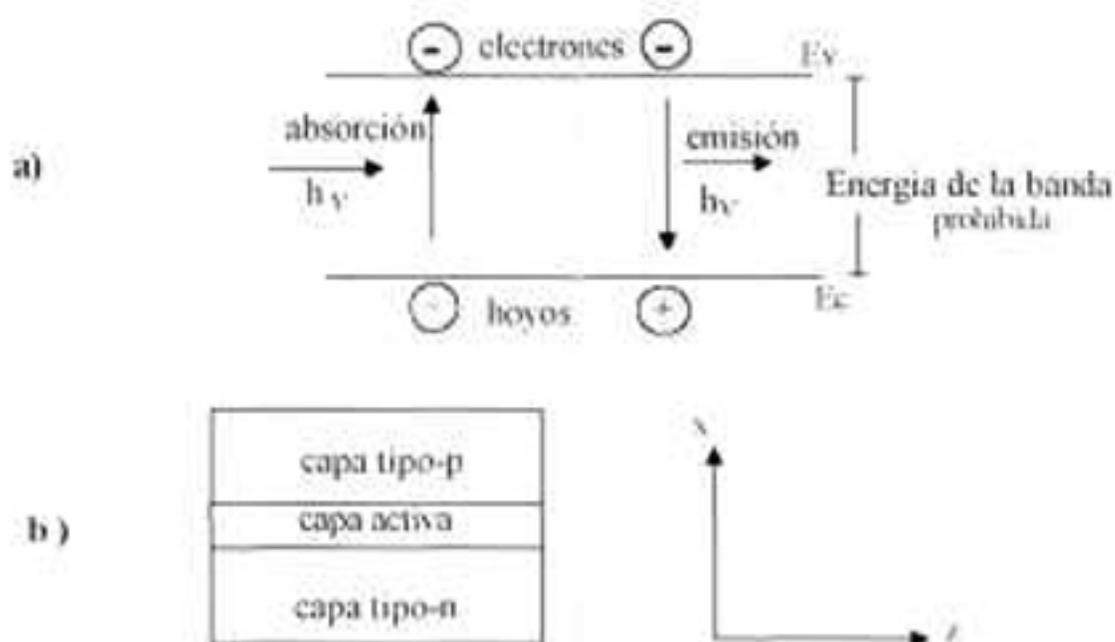


Fig.2.2 a) Representación esquemática de un material semiconductor visto como un sistema de dos niveles. b) Modelo simplificado de un diodo láser

2.3 AMPLIFICACIÓN, RETROALIMENTACIÓN Y PERDIDAS EN UN LÁSER

La amplificación como se dijo en la sección anterior, se logra con un medio el cual tenga una población invertida (es decir, la banda de mayor energía esta más poblada que la de energía menor), para ocasionar la emisión estimulada.

La retroalimentación óptica se logra colocando un medio activo en un resonador óptico, como el resonador de Fabry-Perot. En este dos caras de un paralelepípedo rectangular, paralelas una a otra y perpendiculares al plano de la unión, se hacen ópticamente planas mediante pulido o clivado. Las otras dos caras perpendiculares al plano de la unión son generalmente rugosas para suprimir los modos que compiten viajando entre estas caras, las otras dos caras proveen los contactos eléctricos a los lados tipo-p y tipo-n del diodo. Para algunos propósitos, los extremos de los diodos de Fabry-Perot deben cubrirse en un lado con una película reflejante y en el otro semireflejante; generalmente no se cubren.

El resonador contribuye también a las pérdidas del sistema. La absorción y la dispersión de la luz en el medio dan como resultado una distribución caracterizada por el coeficiente de atenuación α_s . En el viaje a través del resonador de longitud l , la densidad del flujo de fotones se reduce por el factor $R_1 R_2 \exp(-2\alpha_s l)$ donde R_1 y R_2 son las reflectividades en los espejos⁽¹¹⁾, así las pérdidas totales están dadas por

$$\alpha_T = \alpha_s + \alpha_{m1} + \alpha_{m2} = \alpha_s + \frac{1}{2l} \ln \left[\frac{1}{R_1 R_2} \right] \quad (2)$$

donde α_{m1} y α_{m2} representan las contribuciones de los espejos a las pérdidas.⁽¹⁰⁾

Cuando la ganancia (que es una medida de la amplificación), es suficiente para superar las pérdidas del bulbo (las cuales aparecen debido a la absorción de los portadores libres en la capa activa misma y a la parte del campo electromagnético que penetra dentro de las capas absorbentes) $G(\nu) > \alpha_T$, entonces se supera el valor de la densidad de corriente de umbral y la intensidad de la oscilación láser aumenta.

La densidad de corriente de umbral es un parámetro clave en la caracterización de los diodos láser, la reducción en la corriente de umbral nos indica un mejoramiento del dispositivo y está definida por

$$J_T = \frac{\alpha_s + \alpha}{\alpha} J_T \quad (3)$$

donde α_s es el coeficiente de absorción de umbral, α representa el coeficiente de absorción del medio en ausencia de corriente aplicada y J_T es la densidad de corriente que hace justamente al medio transparente^(13 pp 622).

En esta estructura, durante el viaje a través del medio se produce un cambio de fase por unidad de longitud igual al número de onda, este es llamado coeficiente de cambio de fase^{(13) (14)}

$$k = \frac{2\pi\nu}{c} \quad (4)$$

Por tanto, la segunda condición de oscilación láser requiere que el cambio de fase de la onda de luz que completa el viaje a través del resonador, deba multiplicarse por 2π , es decir

$$2kl + 2\phi(\nu)l = 2\pi q, \quad \text{donde } q = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

$2\phi(\nu)l$ es la contribución de la capa activa al cambio de fase

2.4 ESTRUCTURAS LÁSER

La eficiencia total η de un láser para convertir la potencia eléctrica suministrada en potencia óptica esta definida como la razón de la luz emitida por el láser a la potencia eléctrica de entrada iV , donde i es la corriente aplicada y V es el voltaje aplicado. La expresión para un láser semiconductor esta dada por

$$\eta = \eta_d \left(1 - \frac{i_c}{i}\right) \frac{h\nu}{eV} \quad (12)$$

donde η_d representa la razón entre los fotones emitidos y los electrones inyectados arriba del umbral e i_c la corriente de umbral⁽¹⁵⁾.

Para el sistema que tiene $Ga_{1-x}In_xAs_yP_{1-y}$ como región activa, los láseres emiten entre $1.1\mu\text{m} < \lambda < 1.6\mu\text{m}$ dependiendo de los valores de x y y . Un láser genérico de este tipo, esta descrito en la figura 2.3.

La región activa como se observa en la fig.2.3 tiene un espesor aproximadamente de $0.2\mu\text{m}$ y está entre dos regiones de InGaAsP, esta estructura se conoce como doble heteroestructura láser. La estructura es crecida epitaxialmente usando como base un substrato de InP, de tal manera que la red cristalina no se interrumpe. Las técnicas favoritas de crecimiento son Epitaxia en Fase Líquida (LPE) y Deposición Química a partir de Vapores Metalorgánicos (MOCVD), otra técnica importante es Epitaxia por Haces Moleculares (MBE), que utiliza haces atómicos en

una cámara de ultra-alto vacío para depositar capas extremadamente finas en cuanto a grosor y dopaje.

La delgada región activa, generalmente no es dopada intencionalmente. En esta estructura se observa una capa delgada, llamada anti-redisolución, mientras que las capas contiguas están dopadas una tipo-n y la otra dopada tipo-p. La diferencia entre los índices de refracción entre las capas que yacen a ambos lados de la capa activa y la capa activa misma, forman una guía de onda como se ilustra en la fig 2.4. para el caso de una heteroestructura láser n_1 y n_1 pueden ser iguales. El modo de menor orden tiene la mayor parte de su energía concentrada en la capa activa n_2

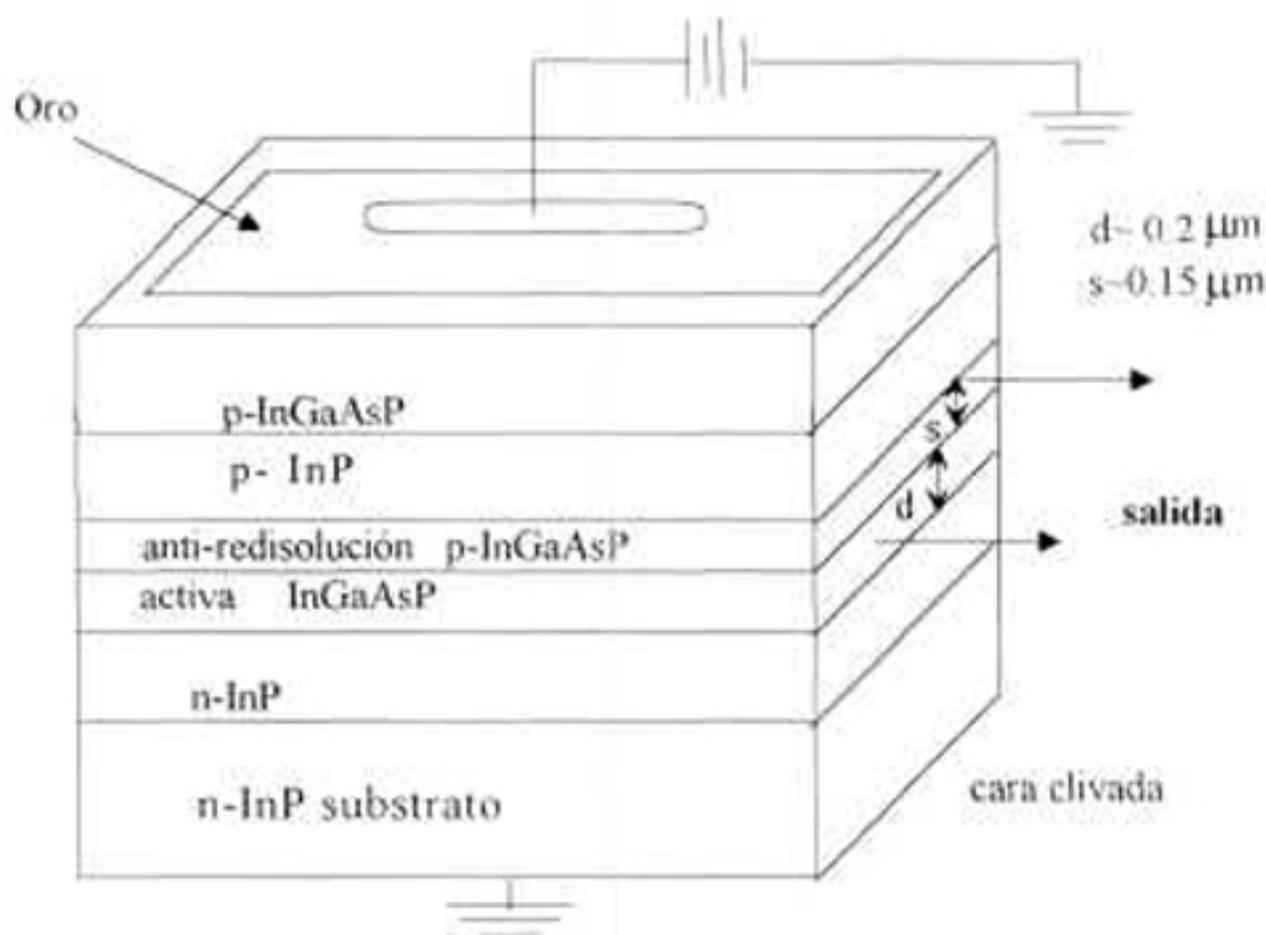


Fig 2.3 Una heteroestructura doble típica de un láser de InGaAsP/InP, los electrones y huecos son inyectados a la capa activa de ambos lados n y p., frecuencias cercanas a $\nu = \frac{E_g}{h}$ son amplificadas por la estimulación de recombinaciones electrón-hueco.

(mayor índice de refracción). La distribución del índice y la gráfica de un modelo típico de intensidad para el modo más bajo se muestra en la fig 2.5

Los electrones inyectados dentro de la región activa no pueden difundirse dentro del lado tipo-p, debido a la barrera de potencial debida a la diferencia ΔE_g entre la brecha prohibida de la capa activa y de la región tipo-p, de tal manera que los electrones y huecos están efectivamente confinados.

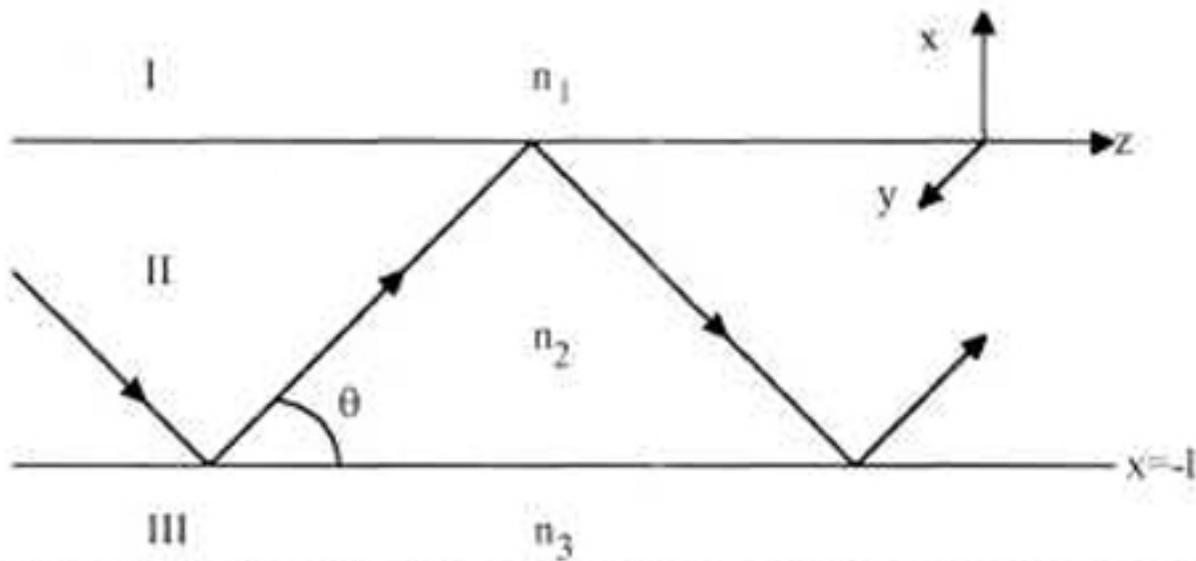


Fig.2.4. Guia de onda dieléctrica en la cual se muestra el confinamiento de un haz luminoso, debido a diferencias en el índice de refracción.

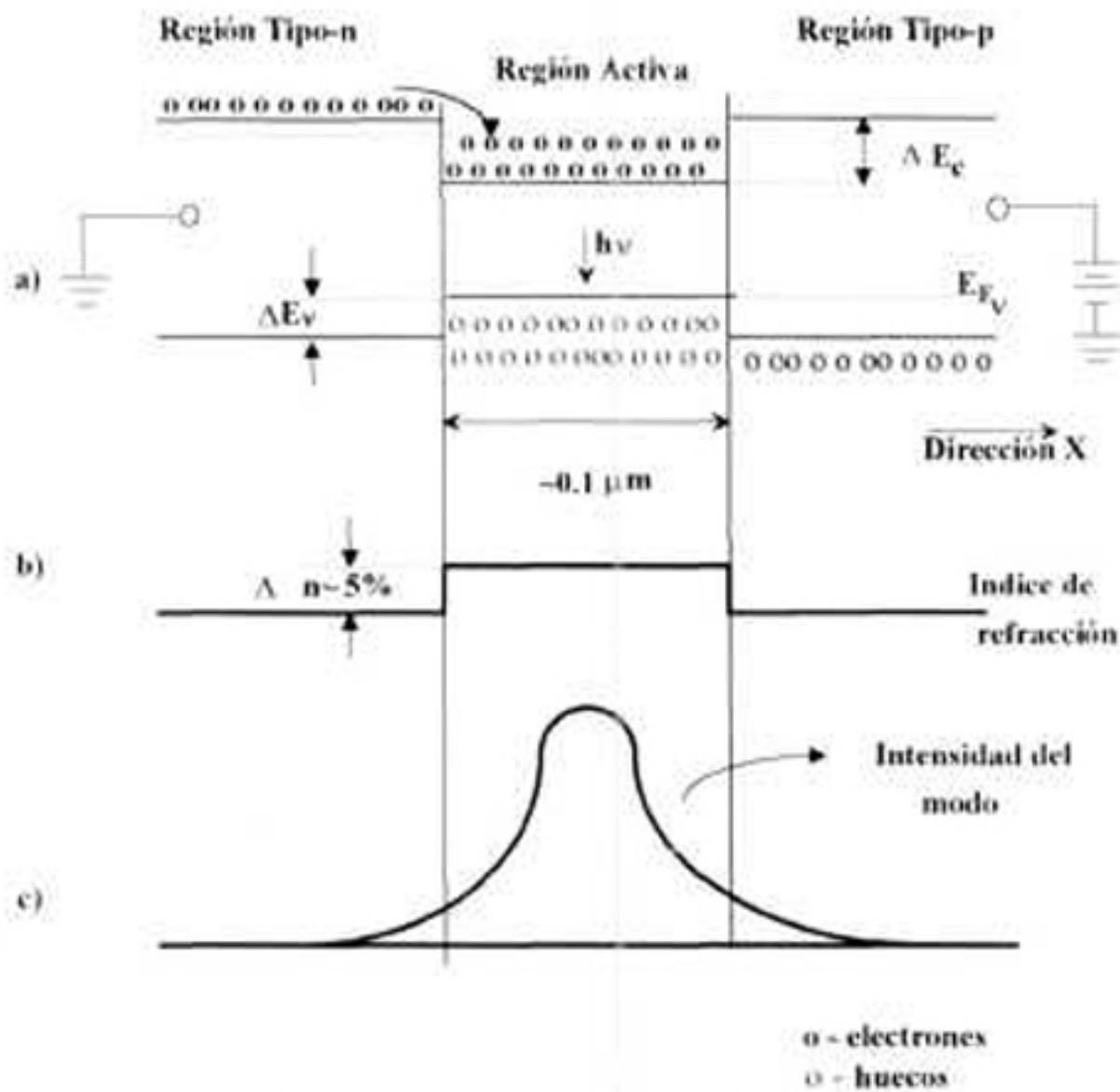


Fig.2.5a) Perfil de bandas de energía de un voltaje fuerte aplicado a un laser de heteroestructura doble. b) Perfil del índice de refracción responsable de la guía de onda dieléctrica en la región activa. c) Perfil de la intensidad en la dirección x para el modo más bajo en la guía.

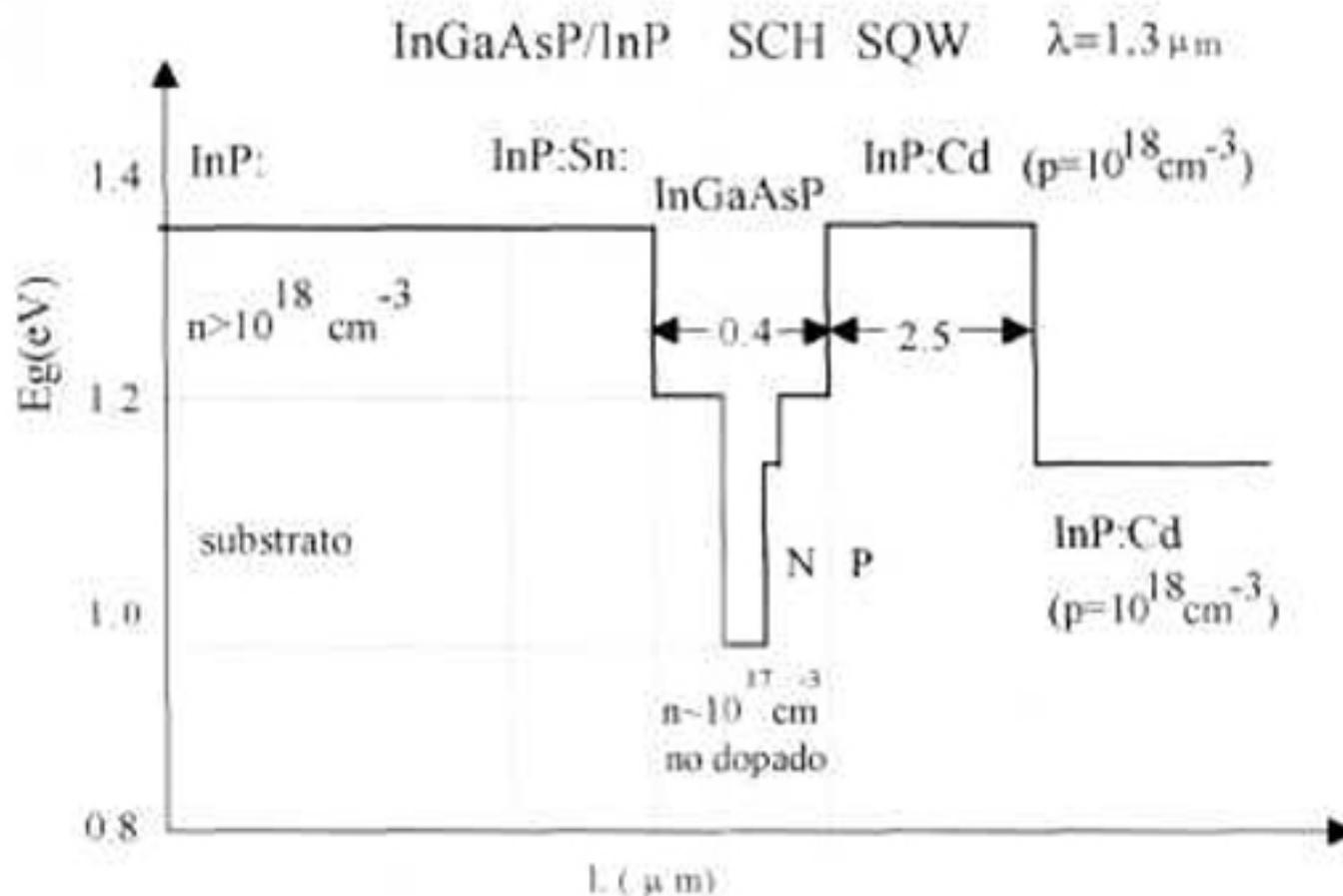


Fig.2.6 Diagrama de bandas de una estructura láser de InGaAsP/InP, en el cual se muestran las capas crecidas mediante Epitaxia en Fase Líquida.

Los láseres semiconductores para comunicación óptica más importantes están basados en los compuestos III - V. Históricamente el primer sistema está basado en GaAs y AlGaAs, estos emiten en la región espectral de 0.75 a 0.8 μm . Esta región es conveniente para distancias cortas (<2 km), a través de comunicación por fibras ópticas. El segundo sistema InGaAsP, tiene su rango de emisión entre 1.3 y 1.55 μm y es más favorable para mayores distancias de comunicación.

Una heteroestructura láser cuenta con una capa activa, la cual no está intencionalmente dopada. En algunos casos cuenta con una capa denominada anti-redisolución. Estas a su vez se encuentran entre dos regiones, las cuales nos sirven como guías de onda, estas están a su vez entre dos capas altamente dopadas, una tipo-n y la otra tipo-p. En la fig 2.6 se muestra una estructura conocida como heteroestructura de confinamiento separado de pozo cuántico simple.⁽¹⁾

2.5 CRECIMIENTO EPITAXIAL DE CAPAS POR LA TÉCNICA DE LPE

El dispositivo a fabricar consistirá de una heteroestructura crecida por el método de Epitaxia en Fase Líquida, la cual se describe a continuación.

La Técnica de Epitaxia en Fase Líquida, EFL (Liquid Phase Epitaxy, LPE) en la cual se crece una capa epitaxial sobre un sustrato monocristalino, mediante deposición en la interfaz desde una mezcla líquida sobresaturada, la cual es usada para crecer capas monocristalinas de semiconductores basados en compuestos III-V. La técnica tiene la ventaja de fijar en buena aproximación la composición de las capas, debido a que sólo se tienen pocos parámetros por variar como son: orientación del sustrato, composición de la solución, temperatura, razón de enfriamiento y tiempo de crecimiento. Adicionalmente LPE produce capas con menor densidades de dislocaciones que los sustratos donde están crecidos, además la mayoría de los diodos láser y emisores de luz crecidos por LPE tienen las más altas eficiencias cuánticas, debido a que las condiciones de crecimiento son muy cercanas al equilibrio termodinámico. Una limitación importante es la dificultad de crecer capas que difieran en constantes de red por más del 1% del sustrato⁽⁸⁾.

La mayoría de los dispositivos semiconductores con capas crecidas por LPE para aplicaciones prácticas se obtienen por crecimiento heteroepitaxial utilizando en muchas de estas capas aleaciones ternarias o cuaternarias, cuyas soluciones requieren tres o cuatro componentes.

Dos requerimientos para que exista crecimiento son el acoplamiento de la constante de red y la compatibilidad química entre la solución y el sustrato (es decir igualdad en potenciales químicos para el sólido y la solución sólida). El grosor del crecimiento para capas con más de dos componentes, generalmente, no están relacionados por expresiones analíticas simples⁽⁹⁾, ya que los modelos termodinámicos dependen de un gran número de parámetros.

Nueve compuestos III-V: Al, Ga e In con P, As y Sb todos tienen estructura de Zinc-Blenda, así que su estructura cristalina no presenta obstáculo para el crecimiento epitaxial involucrando estos componentes y sus soluciones sólidas. Debido a las diferencias entre las constantes de red de los compuestos, sólo puede realizarse un número limitado de combinaciones de crecimiento de capas epitaxiales y sustratos. En general, capas razonablemente lisas pueden

crecerse solo si el desacoplamiento de red es menor del 1% y aun este grado de desacoplamiento puede causar defectos.⁽⁶⁾

Las relaciones entre las constante de red para los compuestos III-V se muestran en la fig 2.7. Para cada uno de estos componentes se observa la constante de red (a) contra la brecha de energía (E_g) y la longitud de onda (λ) correspondiente a esta energía, como se observa en la gráfica de constante de red vs. Brecha de energía, el utilizar más de dos componentes permite variar la brecha de energía variando las concentraciones.

Para incrementar la variedad de heteroestructuras III-V crecidas por LPE se usan compuestos cuaternarios, lo que adiciona un grado de libertad debido a la incorporación de un cuarto componente. Esto hace posible obtener aleaciones cuyas composiciones se acoplan con la red de los substratos binarios, manteniendo un cierto valor de E_g . Las capas crecidas por LPE de InGaAsP sobre substratos de InP, y viceversa, son de interés porque permiten la fabricación de heteroestructuras láser y detectores en la región de longitud de onda de 1.1-1.6 μ m. Los brechas de energía prohibida y los rangos de constantes de red para las aleaciones de InGaAsP se observan en la fig 2.7, cuyos limites se muestran con líneas que muestran las relaciones entre las Brechas de energía y las constantes de red para los compuestos ternarios.

Las líneas sólidas y punteadas indican si la brecha de energía tiene transiciones directas o indirectas, respectivamente. Cualquier par de valores de la brecha de energía y constante de red, corresponden a un punto dentro de esta área y pueden obtenerse usando aleaciones de InGaAsP. Así aleaciones de InGaAsP pueden tener empates de red con substratos de InP, cuya brecha de energía puede variar entre 1.35 y 0.78 eV, correspondiendo a las longitudes de onda entre 0.92 y 1.6 μ m.

En el crecimiento por LPE de InGaAsP sobre InP, la composición de la capa epitaxial no depende solamente de la solución de crecimiento, también depende de la orientación del substrato.

Capas con alta calidad no pueden creerse directamente sobre los substratos de InP, debido a la vaporización de P antes de poner en contacto la solución y el substrato. Pero pueden obtenerse capas con alta calidad de InGaAsP si se crece una capa base (buffer) de InP sobre el substrato de InP y entonces crecer la capa de InGaAsP. Para realizar la deposición, existen cuatro técnicas: crecimiento en rampa, superenfriamiento, técnica de solución en dos fases y enfriamiento-escalón. Las cuales se describen en la siguiente sección.

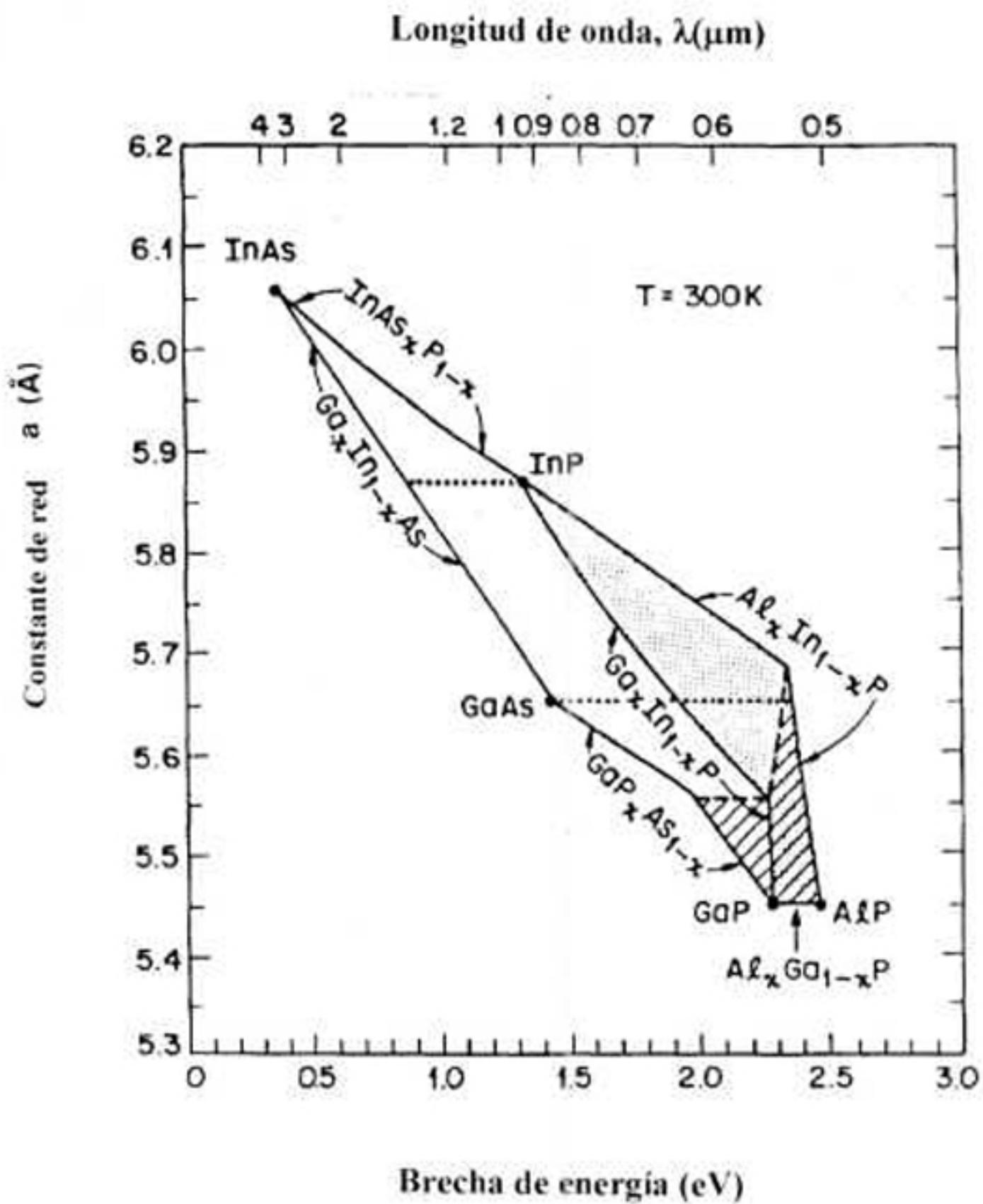


Fig. 2.7. Brecha de energía contra constante de red para $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$

2.5.1 TÉCNICAS DE CRECIMIENTO

Las capas crecidas mediante LPE usadas en la mayoría de los dispositivos, son muy delgadas y sus grosores van desde $\sim 0.1 \mu\text{m}$ hasta unos cuantos micrómetros. Para el crecimiento de tales capas se utilizan técnicas de estado transitorio, las cuales permiten capas de grosores mucho más uniformes que las del método de estado estacionario⁽⁶⁾. Para describir las técnicas de estado transitorio, las cuales son: crecimiento en rampa (o enfriamiento en equilibrio), superenfriamiento, solución en dos fases y enfriamiento-escalón, se hará uso de la fig 2.8, la cual muestra un esquema de la temperatura durante crecimiento por LPE en función del tiempo (se asume que el sustrato y la solución se encuentran a la misma temperatura), al principio de cada proceso el sustrato y la solución no están en contacto, el sistema es calentado a una temperatura más alta que la temperatura de líquidus (T_l) que corresponde a la composición inicial de la solución y entonces se enfría. Para cada técnica (en la fig. 2.8) las flechas muestran el tiempo y temperatura en los que el sustrato y la solución se ponen en contacto.

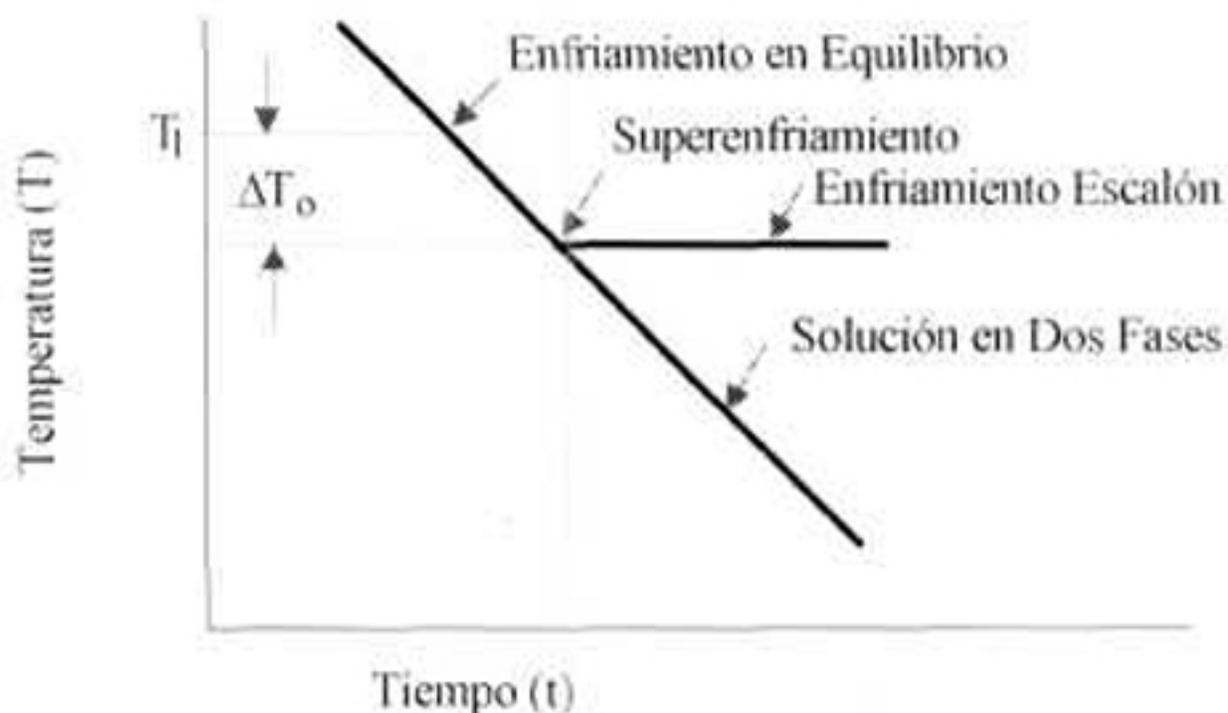


Fig.2.8 Esquema del procedimiento del enfriamiento de la solución para las cuatro técnicas diferentes de crecimiento por LPE. Las flechas indican los tiempos en los cuales la solución de crecimiento se pone en contacto con el sustrato.

La técnica de enfriamiento en equilibrio o rampa, emplea una razón de enfriamiento constante durante el proceso. El substrato y la solución binaria se ponen en contacto cuando la temperatura alcanza T_1 (es decir cuando la solución alcanza la saturación), así están en equilibrio en el momento del contacto. Existe una variación de este método usando dos obleas, en el principio de la corrida la temperatura se mantiene constante y la solución se coloca en contacto con la oblea fuente. Después la solución se equilibra y la oblea fuente se reemplaza por el substrato y se comienza el enfriamiento.

En la técnica de enfriamiento escalón, el substrato y la solución son enfriados a una razón constante hasta una temperatura por debajo de la temperatura de liquidus, pero no lo suficientemente abajo para que ocurra la nucleación espontánea y se mantiene en esta temperatura. Entonces se ponen en contacto solución y substrato, y se mantienen a la misma temperatura hasta que se termina el crecimiento. Esta técnica es llamada enfriamiento-escalón, porque es equivalente a equilibrar el substrato y la solución en T_1 y después enfriarlos abruptamente a una temperatura mucho menor.

En la técnica de superenfriamiento, como en la técnica de enfriamiento escalón el substrato y la solución son enfriados a una razón constante a una temperatura abajo de T_1 (sin nucleación espontánea), entonces se ponen en contacto. En este caso se continúa el enfriamiento sin interrupción a la misma razón hasta terminar el crecimiento.

En la técnica, solución en dos fases, la temperatura se disminuye por abajo de la temperatura T_1 para que ocurra la nucleación espontánea en la solución, la solución y el substrato se ponen en contacto y se continúa el enfriamiento a la misma razón sin interrupción.⁽⁸⁾

2.5.2 TERMODINÁMICA

El equilibrio entre una solución sólida y una aleación en estado sólido partiremos de la función de Gibbs para un sistema multicomponente, considerando la temperatura T constante y una presión P constante

$$dG = SdT + VdP + \sum \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} dn_i \quad (1)$$

donde G es la energía de Gibbs, S es la entropía, T es la temperatura y P es la presión y dn_i es la concentración del componente i . Cualquier sistema estará en estado de equilibrio si $dG=0$, si se considera que existen ϕ fases y en todas T y P son constantes entonces

$$T = T' = \dots = T^\phi = \text{constante}$$

y
$$P = P' = \dots = P^\phi = \text{constante} \quad (2)$$

por tanto de (1), para una sistema con k componentes

$$dG = \sum \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right) dn_i \quad (3)$$

para una sistema con k componentes

$$dG = \left[\frac{\partial G}{\partial n_1} \right]_{T,P,n_2,\dots,n_k} \delta n_1 + \left[\frac{\partial G}{\partial n_2} \right]_{T,P,n_1,n_3,\dots,n_k} \delta n_2 + \dots + \left[\frac{\partial G}{\partial n_k} \right]_{T,P,n_1,n_2,\dots,n_{k-1}} \delta n_k \quad (4)$$

definiendo el potencial químico como la energía de Gibbs para una partícula

$$\frac{\partial G}{\partial n_i} = \mu_i \quad (5)$$

$$dG = \mu_1 dn_1 + \mu_2 dn_2 + \dots + \mu_k dn_k = 0 \quad (6)$$

para que un sistema de ϕ fases este en equilibrio, se necesita

$$dG|_{T,P} = dG^I|_{T,P} + dG^{II}|_{T,P} + \dots + dG^\phi|_{T,P} \quad (7)$$

$$dG = \mu_1^I dn_1^I + \dots + \mu_k^I dn_k^I + \mu_1^{II} dn_1^{II} + \dots + \mu_k^{II} dn_k^{II} + \dots + \mu_1^\phi dn_1^\phi + \dots + \mu_k^\phi dn_k^\phi = 0 \quad (8)$$

donde μ_i^I es el potencial químico del componente i -ésimo para la fase I , μ_i^{II} , corresponde al componente i -ésimo de la fase II , etc. Si no existe intercambio del substrato con el ambiente o si el intercambio sólo se lleva a cabo entre las diferentes fases, tenemos

$$\begin{aligned} dn_1^I + dn_1^{II} + \dots + dn_1^{\phi} &= 0 \\ dn_2^I + dn_2^{II} + \dots + dn_2^{\phi} &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

.....

$$dn_k^I + dn_k^{II} + \dots + dn_k^{\phi} = 0$$

donde se observa que los dn_i no son independientes por tanto

$$\mu^I = \mu^{II} \quad (10) \text{ así}$$

dos o más fases que están en equilibrio, tienen el mismo potencial químico para los componentes de estas fases.¹¹⁶

2.5.3 EQUILIBRIO EN SISTEMAS REALES

Tomando como referencia la ec. que nos describe el potencial químico para soluciones ideales

$$\mu_i^{\text{ideal}} = \mu_i^{\circ} + RT \ln \chi_i \quad (11)$$

donde μ_i^{ideal} es el potencial químico para un sistema ideal μ_i° es el potencial químico para un sistema con presión de una atmósfera, R es la constante molar de los gases, T es la temperatura y χ_i es la concentración del elemento i en el sistema, definiendo para un sistema no ideal o un sistema real donde a_i es la actividad del componente i

$$\mu_i^{\text{real}} = \mu_i^{\circ} + RT \ln a_i \quad (12)$$

definiendo $\gamma_i = a_i / \chi_i$ como el coeficiente de actividad y realizando la diferencia entre (11) y (12) obtenemos

$$\mu_i^{\text{real}} - \mu_i^{\text{ideal}} = RT \ln(a_i / \chi_i) = RT \ln \gamma_i \quad (13)$$

$RT \ln \gamma_i$ muestra la desviación del sistema real con respecto al ideal, γ_i es función de la composición.

Para soluciones ideales la entalpia y el volumen de mezcla no cambian, ya que no se genera calor cuando los constituyentes se combinan, por tanto la energía de mezcla es cero

$$H^m = 0 \quad U^m = H^m - PV^m = 0 \quad (14)$$

mientras que la entropía esta definida por

$$S^m = -R \ln \chi_i \quad (15)$$

si una de estas condiciones no se mantiene el sistema no es ideal.⁽⁹⁾

Para semiconductores se utiliza el modelo para soluciones regulares, en estas soluciones (principalmente líquidos), la entalpia de mezcla es diferente de cero, pero la entropía de mezcla en algunos casos es la misma que para una solución ideal

$$S_{\text{reg}}^m = S_{\text{ideal}}^m \quad \Delta H_{\text{reg}}^m \neq 0 \quad (16)$$

así, si el potencial químico

$$\mu = \bar{G} = H - TS^m \quad (17)$$

$$\mu_i^{\text{reg}} - \mu_i^{\text{ideal}} = H^m = RT \ln \gamma_i \quad (18)$$

2.5.4 MODELO UTILIZADO

Debido a que la determinación de los diagramas de fase por experimentación es muy laboriosa para sistemas ternarios y cuaternarios, Jordan e Ilegems⁽⁷⁾ proponen un modelo para estos diagramas de fase, a través de un tratamiento termodinámico con interpolación y extrapolación de condiciones de equilibrio. Sin embargo, basándose en datos experimentales Kuphal⁽¹²⁾ encontró ecuaciones para el sistema InGaAsP, mediante las cuales se calculan fácilmente las concentraciones en la fase líquida y en la fase sólida; utilizando substratos (100)InP. Estas ecuaciones se exponen en el apéndice A y se utilizan en este trabajo para calcular las masas de los compuestos para cada capa.

2.6 POST-CRECIMIENTO.

Dentro del post-crecimiento existen diversos procesos que deben llevarse a cabo para fabricar los diversos dispositivos optoelectrónicos, la deposición de materiales aislantes se utiliza para crear líneas de conducción delgadas o separar los diferentes dispositivos, esto se logra gracias al empleo de la fotolitografía.

Mediante la fotolitografía se logra la integración de microcomponentes, sin ésta no se lograrían dimensiones tan pequeñas en los microcircuitos. Además de utilizarse en nuevos diseños de dispositivos, como son los diodos láser semiconductores y detectores. La necesidad de contar con un laboratorio para procesos fotolitográficos, es la de llevar a cabo tareas como cortar aislante, abrir ventanas o realizar ataques químicos selectivos, gracias a los cuales se investigan nuevos diseños de dispositivos semiconductores. En la siguiente sección se describe el proceso fotolitográfico completo.

Otro de los procesos de post-crecimiento es la deposición de metales, este proceso se realiza en una cámara para metalización, en esta cámara se depositan capas muy delgadas de oro (Au) el cual es aleado con diferentes materiales y concentraciones, dependiendo del semiconductor sobre el cual se este depositando el contacto. Todos los procesos de

post-crecimiento son importantes, ya que contribuyen a las características de emisión o absorción de los dispositivos.

2.6.1 PROCESO FOTOLITOGRAFICO

A la técnica de reproducir patrones predeterminados en superficies arbitrarias se le conoce como litografía. En el trabajo con semiconductores, los patrones dependen de los dispositivos a fabricar en las obleas semiconductoras para realizar trabajos como procesos de difusión, líneas metálicas, cortar óxidos, etc. Algunas ventajas del uso de la litografía en la micro-electrónica son:

- Lograr alta resolución, patrones libres de defectos, controlar dimensiones críticas (como en los circuitos integrados).
- Alinear imágenes con rasgos característicos, en la superficies de las obleas.
- Realizar tareas sin dañar los dispositivos⁽¹⁴⁾.

La **Fotolitografía o litografía óptica** es básicamente un proceso fotográfico, en el cual un polímero sensible a la luz, llamado *fotoresist*, se deposita sobre un sustrato, que después se expone a radiación ultravioleta y se revela para formar una imagen.⁽¹⁵⁾

2.6.1.1 FOTORESIST

El resist o fotoresist es el primer medio en el cual se transfieren las imágenes, con muy buena resolución de la imagen; este debe resistir ataques químicos (decapantes), o implantación de bloques (contactos, etc). Los requerimientos del fotoresist se muestran en la tabla 2.1. Existen dos principales tipos de fotoresist: positivo y negativo.⁽¹⁴⁾ Además se encuentra en el mercado un tipo de fotoresist el cual puede usarse para ambos procesos, como es el AZ-5214, que es el adquirido para este laboratorio. El proceso de crear una imagen negativa se llama Inversión de Imagen (Image Reversal). La importancia del proceso positivo y negativo (Image reversal), radica en los perfiles obtenidos, ya que la deposición de los contactos metálicos y el proceso de retirar el fotoresist se facilita con el proceso de inversión de imagen, como se muestra en la fig 2.9.

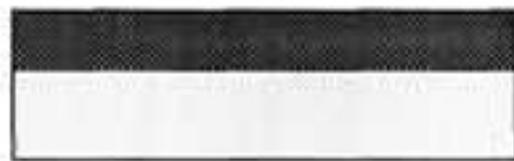
SECUENCIA TIPICA DEL PROCESO DE FOTOLITOGRAFIA



Limpieza de la oblea



Cubierta con fotoresist



Prehorneado



Exposición



Revelado



Ataque químico o implantación de iones, etc.



Retiro de fotoresist

TABLA 2.1 CARACTERÍSTICAS DEL FOTOESIST.

FUNCIONALIDAD	PROCESO DE MANUFACTURA
-Adhesión a las superficies -Puede reproducir patrones con tiempos de exposición consistentes	-Tiene un número mínimo de pasos (al menos fáciles)
-Superficies libres de hoyos	-No requiere retoque
-Cubre escalones	-Tiene una razonable vida útil
-No contamina los dispositivos	-Tiene mínima toxicidad
-Resiste reacciones químicas o iónicas -Tiene suficiente contraste como para proveer un buen resultado con mínimos efectos de ondas estacionaria (ver fig. 2.10)	

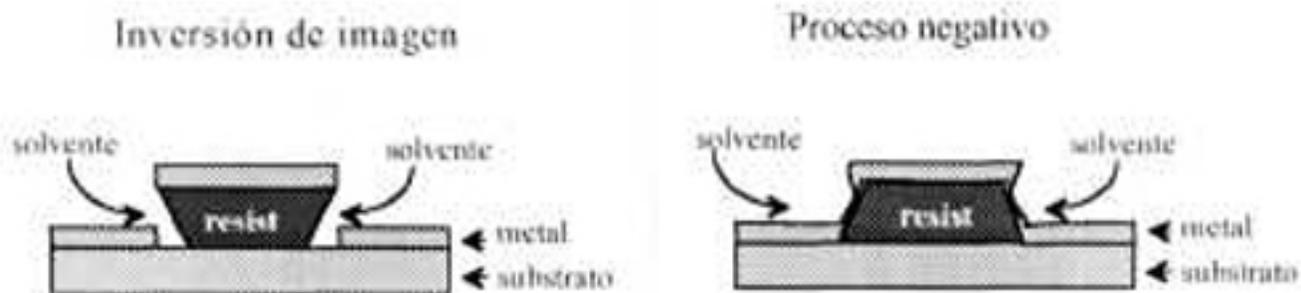


Fig. 2.10 Proceso de retirado de fotoresist para los casos de inversión de imagen y proceso negativo, en donde se muestra que el solvente actúa mejor con el proceso de inversión de imagen.

El principio básico de la operación del fotoresist es el cambio en solubilidad del resist en el revelador, después de la exposición a la luz. En el caso del fotoresist positivo (diazonaphthoquinone), el compuesto fotoactivo, el cual no es soluble en un revelador de base agua, se convierte en un ácido carboxilo después de la exposición a la luz ultravioleta (en el rango de 350 a 450 nm.), el cual es muy soluble en un revelador de base agua.

En la fig 2.10 se observa un perfil de fotoresist, el cual muestra un patrón de ondas estacionarias.⁽¹³⁾ Estas son causadas por la difracción de la luz a la cual se expone el resist y son causantes de rugosidad en el borde, lo cual afecta la definición.

En la fig.2.11 se muestran las reacciones químicas del fotoresist, que se llevan a cabo con la exposición de la fuente ultravioleta.⁽¹⁴⁾ En la secc. 3.2 se describe el montaje experimental, así como los resultados de la optimización del fotoresist.

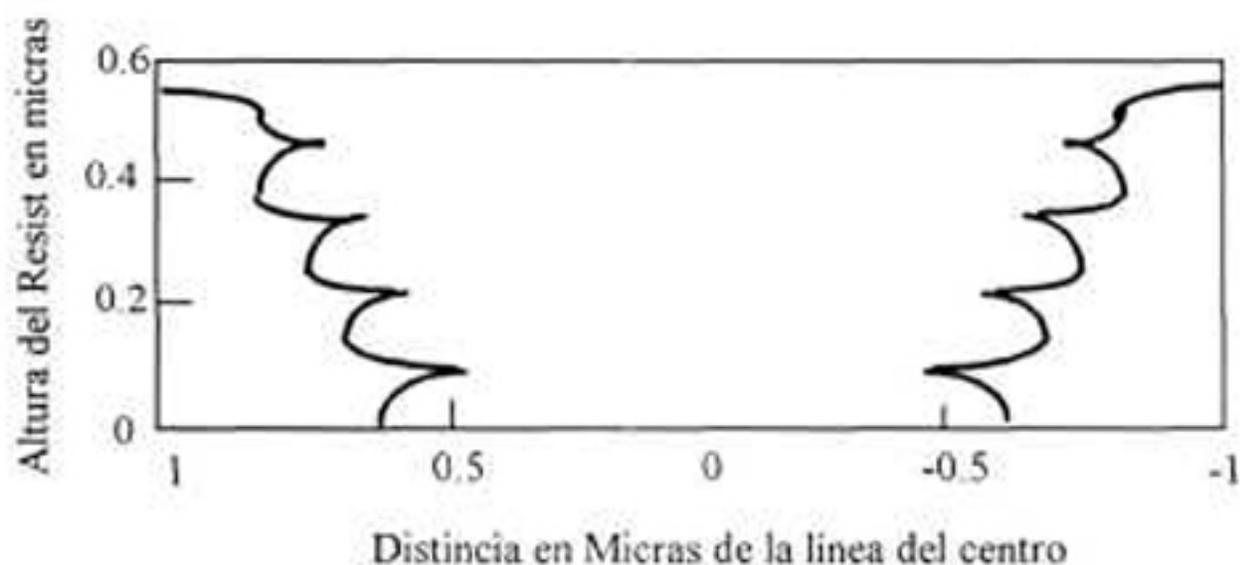


Fig. 2.10 Patrón de Ondas Estacionarias en el perfil del Fotoresist

Caracterización de la Exposición del Resist

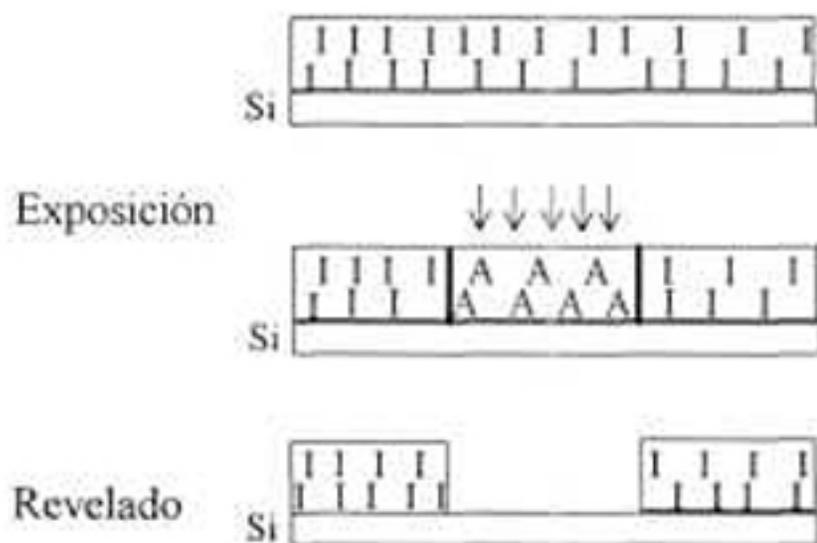
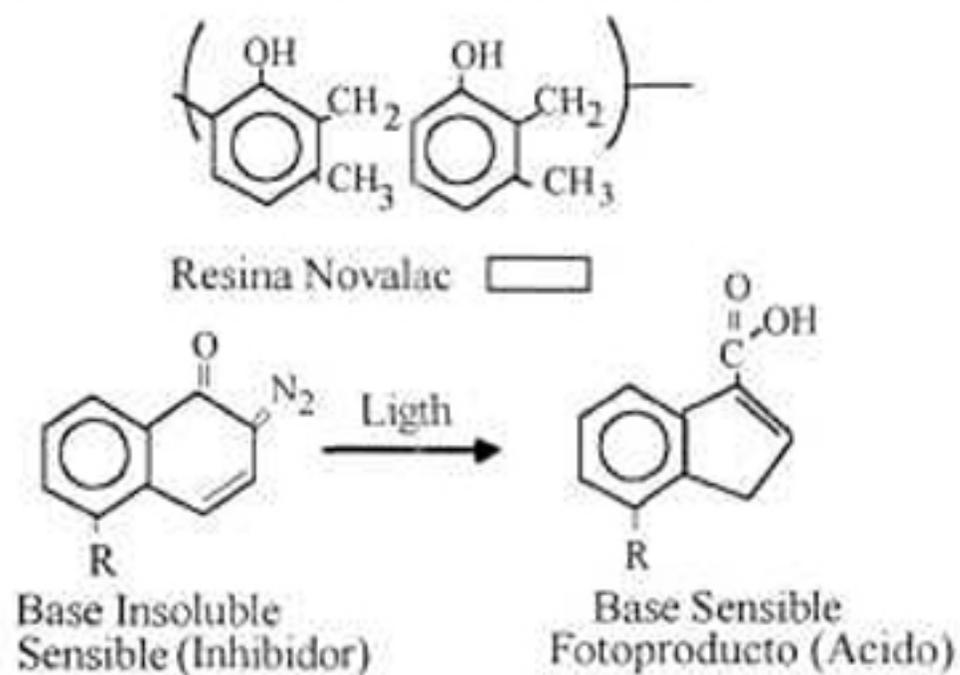


Fig. 2.11 Acción de Sintetización del Resist Positivo en el cual se parte de una resina la cual es sensible a la luz ultravioleta, que al exponerse se transforma de un inhibidor a un acido soluble en un revelador de base agua.

2.6.1.2 LIMPIEZA DE LA OBLEA O SUBSTRATO.

En la preparación del substrato se intenta mejorar la adhesión del fotoresist, mediante la limpieza del substrato removemos contaminación. La limpieza mecánico-química se usa para remover partículas, películas orgánicas como aceites polímeros e hidrocarburos, y películas inorgánicas como óxidos nativos y sales que también pueden removerse por plasmas. Los contaminantes que absorben agua pueden ser removidos mediante alta temperatura y el proceso se llama deshidratación por horneado. Una vez limpia se realiza la deposición del fotoresist⁽¹⁴⁾.

2.6.1.3 CUBIERTA CON FOTORESIST.

El grosor y la uniformidad son los parámetros más importantes en la cubierta con el fotoresist mediante el centrifugado en el girador. Este proceso aunque parece muy simple de hecho tiene un gran número de parámetros, los cuales tienen un impacto significativo: como la velocidad y el tiempo de rotación, el volumen de resist depositado, las propiedades del resist (tales como viscosidad, porcentaje de sólidos y composición de los solventes, los cuales están caracterizados por el fabricante) y el substrato (material y topología).⁽¹⁴⁾

En este sistema sólo se tiene una velocidad de rotación. Una vez depositado el fotoresist, se lleva al horno.

2.6.1.4 PRE-HORNEADO.

El proceso de pre-horneado (también llamado horneado suave), involucra el secado del fotoresist, removiendo el exceso de solvente, esto sirve para estabilizar la película del resist. Hay cuatro efectos principales en la remoción del solvente son⁽¹⁴⁾:

1) reducción del grosor de la película. 2) cambian las propiedades del revelado. 3) mejora la adhesión. 4) la película es menos sensible a la contaminación por partículas y por ende menos susceptible a manchas.

2.6.1.5 EXPOSICIÓN

Una vez horneado, es necesario alinear la orientación cristalográfica del substrato o la heteroestructura con la mascarilla, la cual en este caso consta de una serie de franjas claras y oscuras fig.3.9. La proyección litográfica deriva su nombre del hecho de que la imagen de la mascarilla es proyectada sobre la oblea con una fuente de luz ultravioleta.

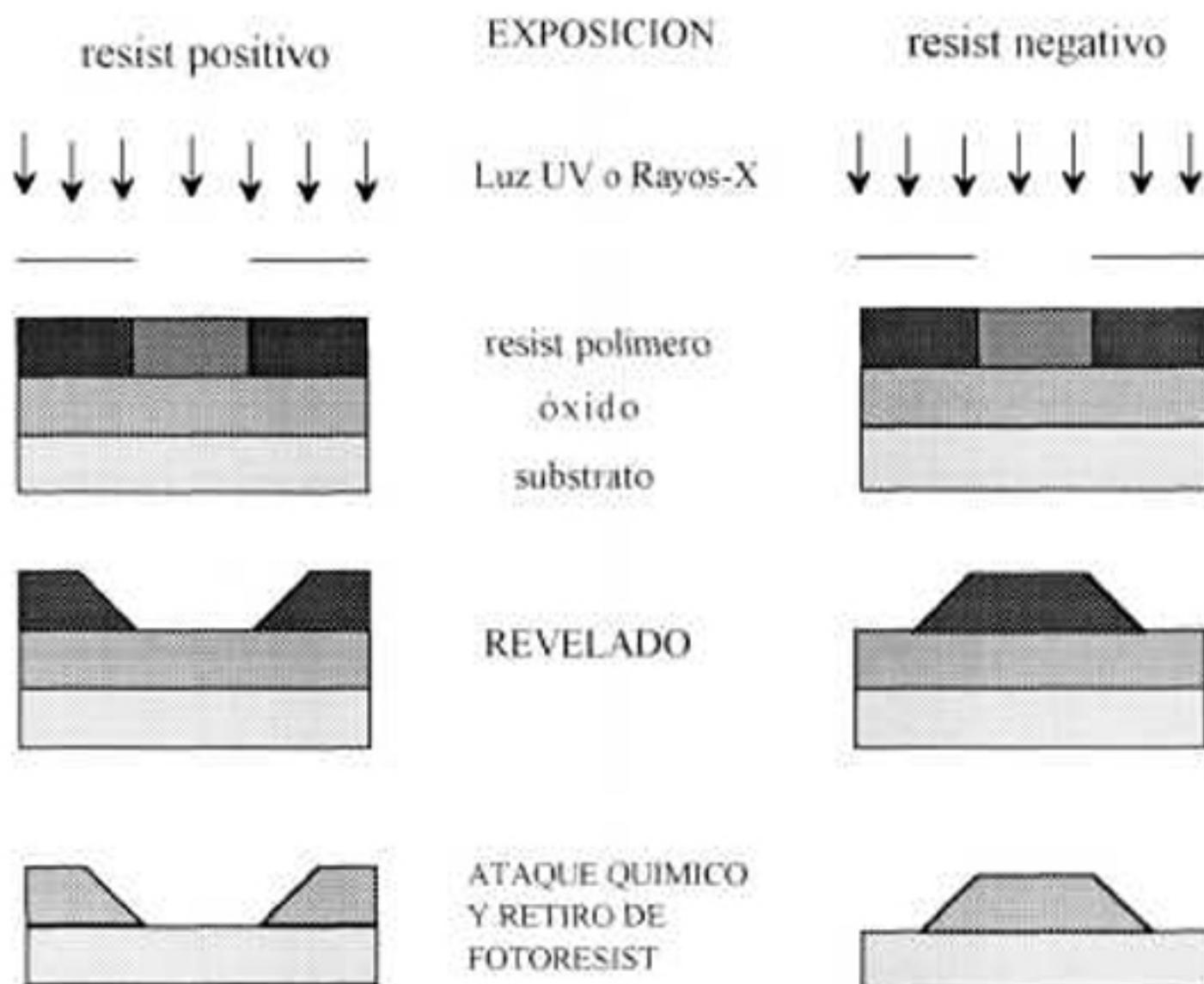


Fig 2.12 Perfiles para los procesos positivo y negativo.

2.15.5 REVELADO.

Una vez expuesto el fotoresist debe revelarse. Como se mencionó anteriormente el fotoresist usa un revelador de base agua y es indudablemente el paso más crítico en el proceso del

fotore sist. Las interacciones resist-revelador determinan en gran medida el perfil del fotore sist y el control del ancho de línea, es decir, que el tiempo de revelado es crucial en el perfil del fotore sist.⁽¹⁶⁾

2.6.1.7 LIMPIEZA DEL FOTORESIST

Este proceso se emplea para que una vez hecha la deposición de contactos, implantación de iones, etc., sea retirado el fotore sist para continuar con la fabricación del dispositivo. En el retiro del fotore sist, se requiere de la aplicación de un solvente para el resist, con el propósito de retirar el fotore sist y lo que se encuentre arriba de éste, como se aprecia en la figura 2.9.⁽¹⁶⁾

CAPITULO 3 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

3.1 ARREGLO EXPERIMENTAL DEL LABORATORIO DE EPITAXIA EN FASE LIQUIDA

La parte central del laboratorio de LPE es el horno, en cuyo interior se coloca el bote de grafito, a través del horno circula un flujo de hidrógeno, el cual pasa previamente por un purificador. Dicho purificador cuenta con un controlador de temperatura, que se auxilia de un termopar que mide la temperatura en el centro del horno. En la figura 3.1 podemos observar un esquema general del montaje experimental.

3.1.1 BOTE DE GRAFITO

El bote de grafito es el instrumento en el cual se colocan los componentes de las capas epitaxiales como se muestra en la fig.3.2. Este bote se sostiene por la guía núm.1, la cual es fija y sólo se usa como soporte. El deslizador inferior tiene una cavidad de 16x10 mm, en la cual se coloca el sustrato, éste se sujeta a la guía núm.2, mediante la cual se desliza para poner en contacto el sustrato con cada una de las soluciones. El bote cuenta además con una base y un deslizador superior con tapa. El deslizador superior se desliza a través de la guía núm. 3. La base y el bote se fijan con un pequeño perno, al igual que la cubierta y el deslizador superiores. El bote esquematizado cuenta con nueve pozos, tres de los cuales tienen rejillas de 3, 2 y 3 mm, respectivamente.

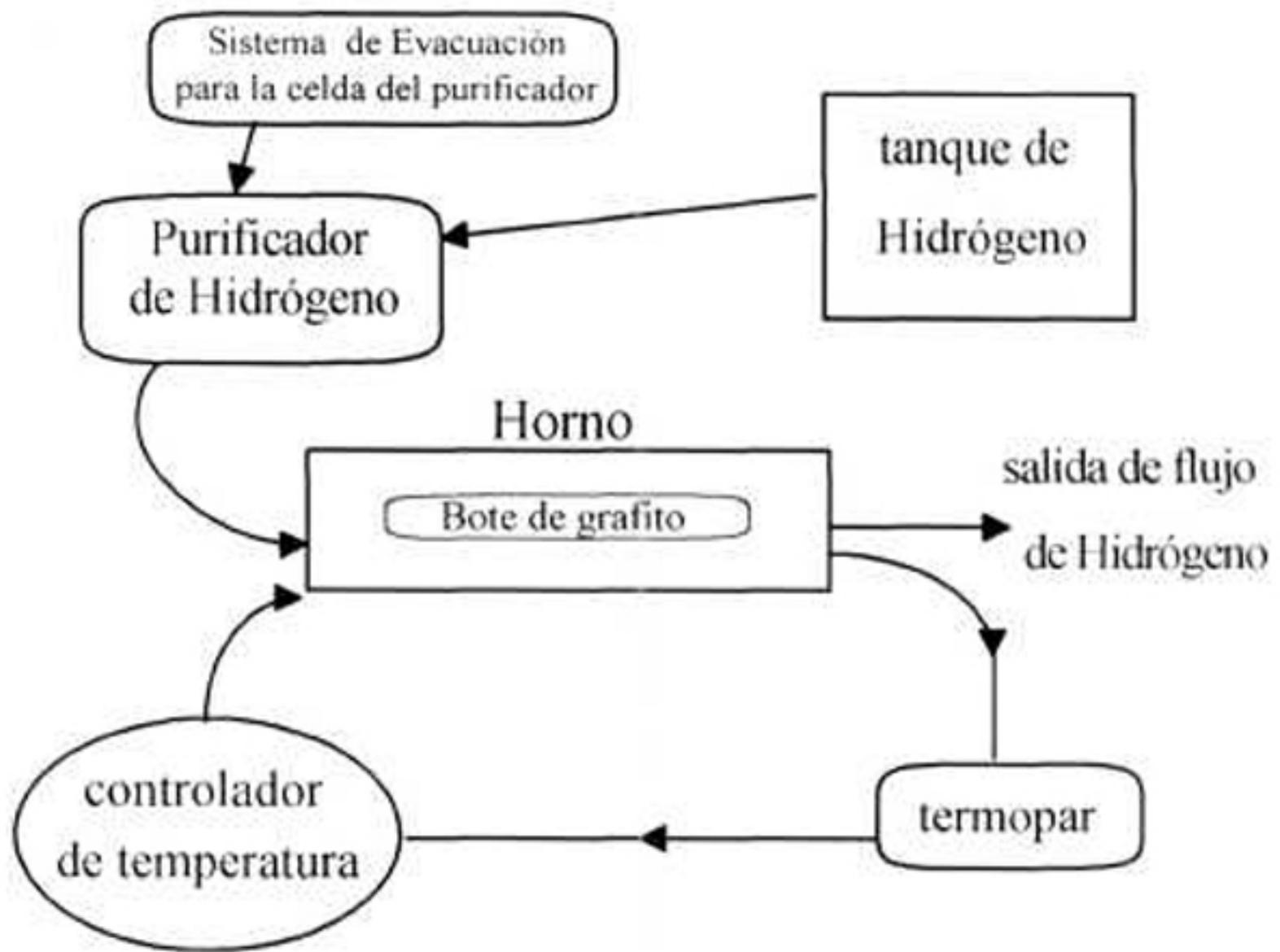


Fig 3.1. Arreglo experimental del sistema de Epitaxia en Fase Líquida

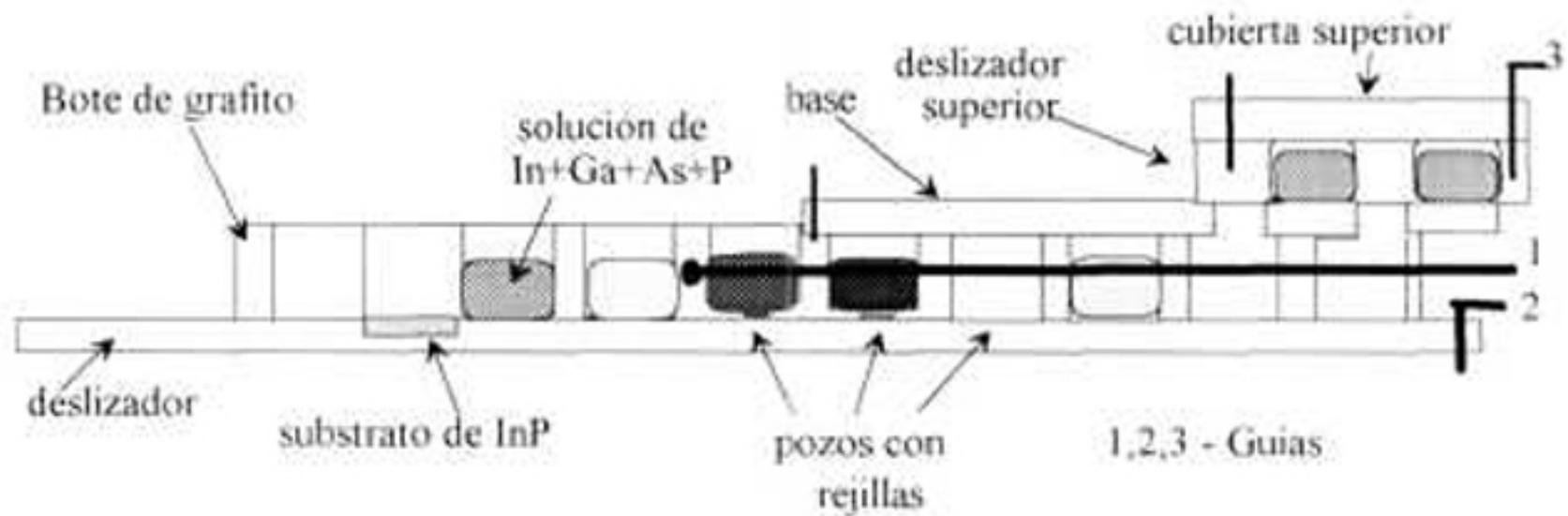


Fig. 3.2. Esquema de el bote de grafito utilizado para el crecimiento de las heteroestructuras láser de confinamiento cuántico

Las tres guías están hechas de molibdeno y sujetas a una base inoxidable mediante un sistema de tuercas de presión, junto con un termopar, el cual está conectado al controlador de temperatura. Este sistema sirve para introducir el bote en el horno.

3.1.2 HORNO

El horno consta de tres tubos de cuarzo colocados en forma concéntrica. El más largo forma el reactor y está fijo en los extremos, el otro de diámetro mayor sirve para lograr una temperatura más homogénea y puede deslizarse. En el tubo externo contiene una resistencia en forma de resorte que es la fuente de calor y están soportados por sus extremos como se muestra en la fig.3.3. Los soportes están fijos en una base la cual se desliza en un sistema de rieles. La parte interior de este tubo se encuentra cubierta con una capa de oro que refleja el calor de la resistencia hacia el centro de los tubos.

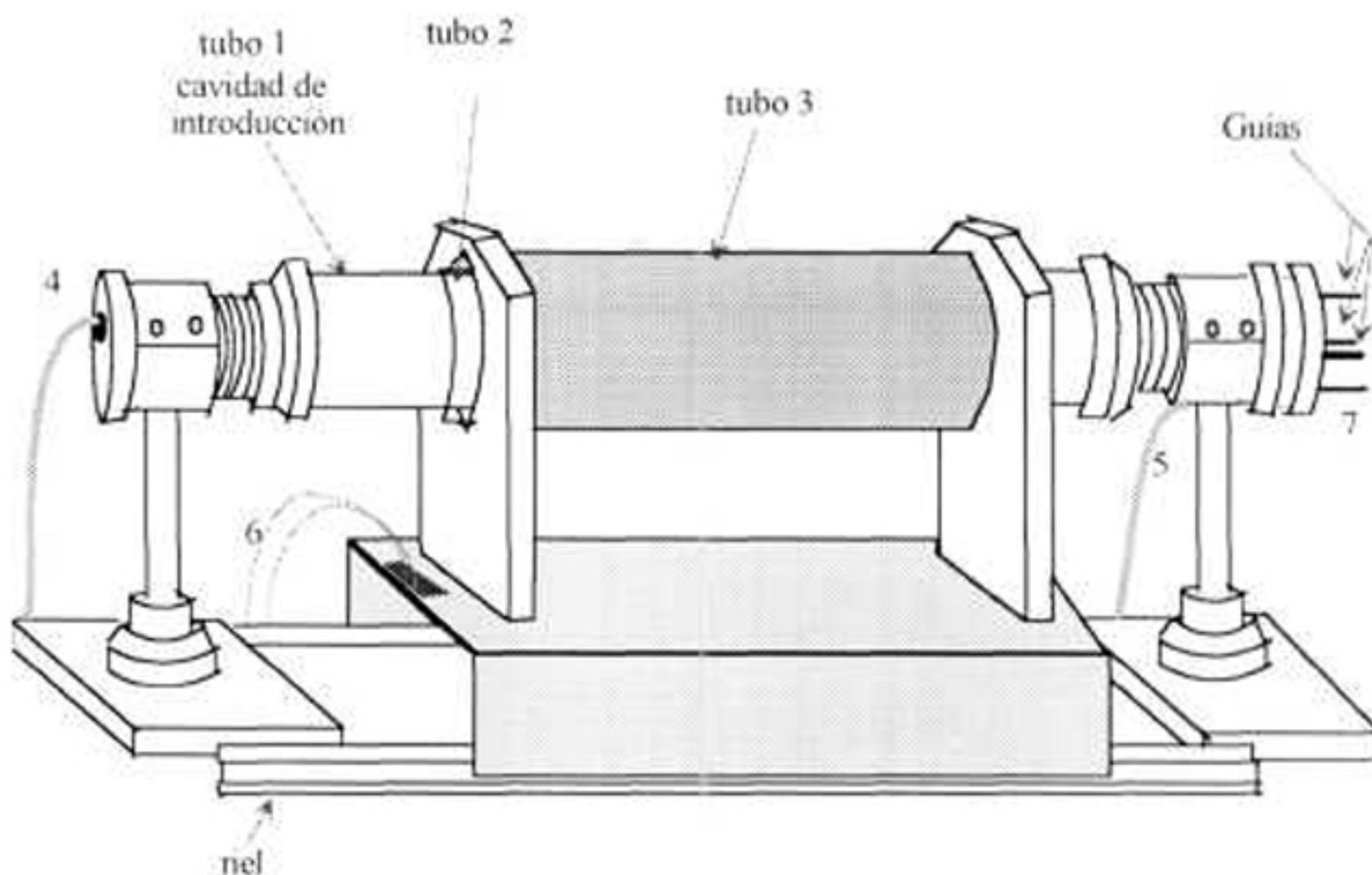


Fig.3.3 Esquema general del horno. 4 y 5 entrada y salida de hidrógeno, respectivamente. 6 cables conectores de corriente, 7 salida del termopar.

El tubo central está sostenido en sus extremos por soportes hechos con aluminio y acero inoxidable; en uno se encuentra colocada la entrada del flujo de Hidrógeno y en el otro la salida del mismo. Este extremo se utiliza para introducir el bote con las guías y se cierra con tres mariposas.

3.1.3 CONTROLADOR DE TEMPERATURA

El controlador de temperatura es un modelo comercial de la marca EURO THERM CORPORATION, TEMPERATURE CONTROLLER MODELO 818, ASSEMBLIE PANEL MOUNTING SCRS, MODELO 831.

Este funciona con corriente alterna, el rango de corriente va de 0A a 20 A. Es capaz de tener ciclos rápidos de encendido/apagado o descargas en pulsos de entrada. La presencia de la señal se muestra en un panel frontal de LEDs y está protegido contra picos de voltaje. Este sistema cuenta con un panel programable, en el cual podemos almacenar cuatro programas de variación de temperatura.⁽¹⁷⁾

3.1.4 SISTEMA PURIFICADOR DE HIDROGENO

Es un sistema Hydrogen Purifier Johnson Matthey HP Series, modelo HP-25, el cual provee un flujo de gas hidrógeno extra-puro. Contiene un elemento difusor, un calentador y un ventilador. En el panel frontal se encuentra montado un controlador de temperatura digital, un indicador de sobrecalentamiento, una válvula de control del hidrógeno, un medidor de flujo con válvula de control y un interruptor con luz de encendido.

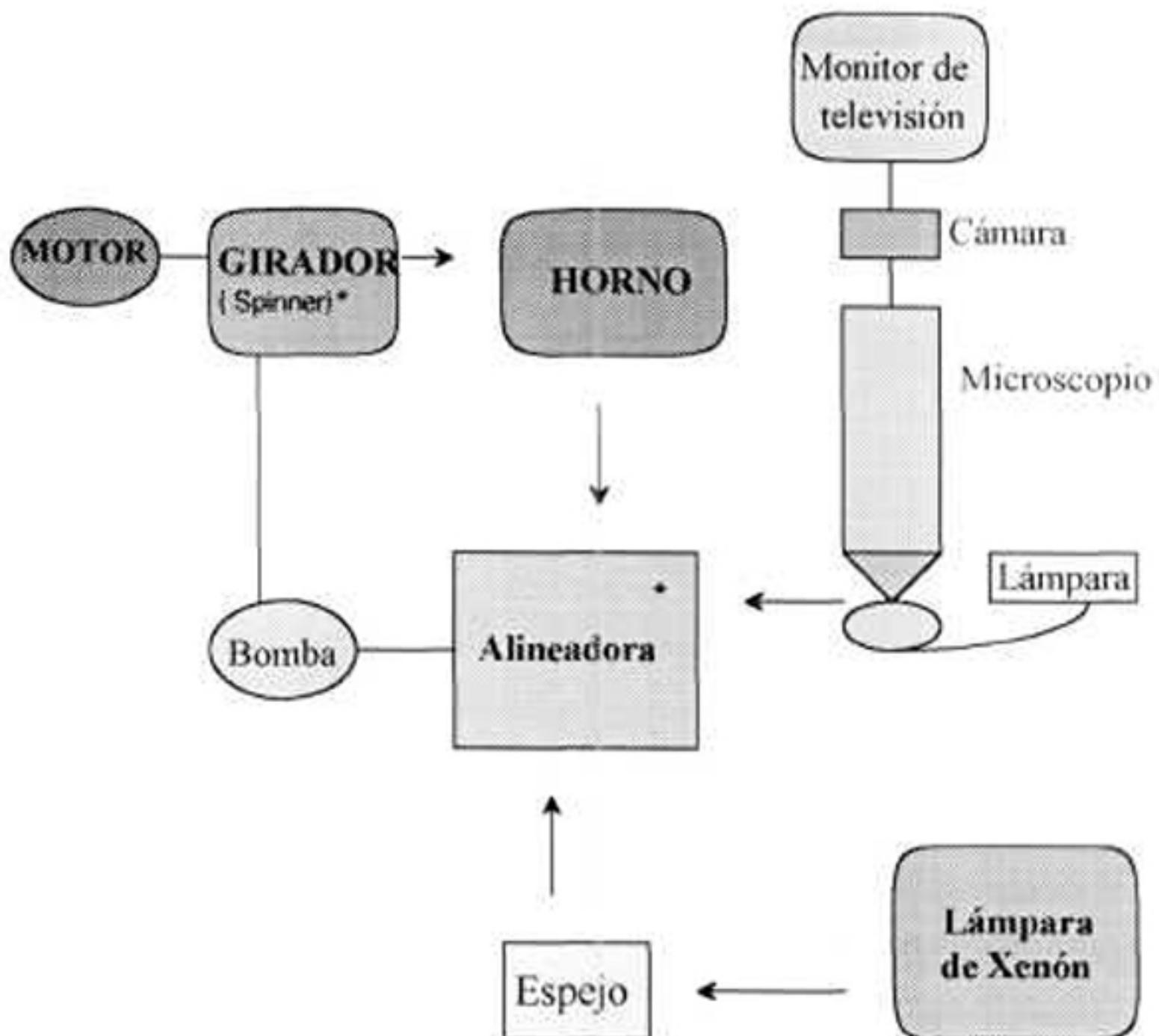
El corazón de este sistema es una celda de difusión contenida en un tubo hecha a base de una aleación de plata que actúa como membrana de difusión, la cual debe ser utilizada con presión de 200 psig o menos y una temperatura máxima de 400°C.⁽¹⁸⁾

También cuenta con un sistema evacuador para la celda, este genera vacío en la celda, limpiando así la membrana. Esto evita fracturas por partículas atrapadas, al apagar el sistema.

3.2 ARREGLO EXPERIMENTAL LABORATORIO DE FOTOLITOGRAFÍA

El montaje experimental del laboratorio de fotolitografía se muestra completo en este trabajo debido a que es de reciente creación y este trabajo contribuye en parte al montaje y caracterización de dicho laboratorio.

Como se observa en el esquema de la fig. 3.4 este laboratorio cuenta con diferentes instrumentos para llevar el proceso fotolitográfico, que se describirán a continuación.



NOTA: el girador y la alineadora se construyeron en el taller de torno del IICO.

Fig. 3.4 Esquema del montaje experimental

3.2.1 GIRADOR

Como ya se mencionó en el capítulo 2, el grosor y la uniformidad en el fotoresist son los parámetros más importantes en la cubierta con el fotoresist mediante el girador.

El girador consiste de una base giratoria dentro de una cámara, la base giratoria esta conectada a una bomba mecánica de vacío, la cual se utiliza para que una vez colocado el substrato se mantenga en el centro de dicha base, esto tiene como objetivo sujetar el substrato evitando que se caiga debido a la velocidad de rotación. En este sistema sólo se tiene una velocidad de rotación, por lo que no podemos variar dicho parámetro. El sistema de rotación es movido por un motor de 3450 rpm, con una entrada de 127 V y 60Hz.

La velocidad de rotación se modifica de 3450 a 3000 rpm mediante una sistema de poleas. En la fig.3.5 se muestra una fotografía del girador completo. En las figs.3.6 y 3.7, se observan las partes principales que componen el girador. El volumen de resist depende del área a cubrir y es dispensado mediante un gotero, el tiempo de deposición es uno de los parámetros por optimizar.

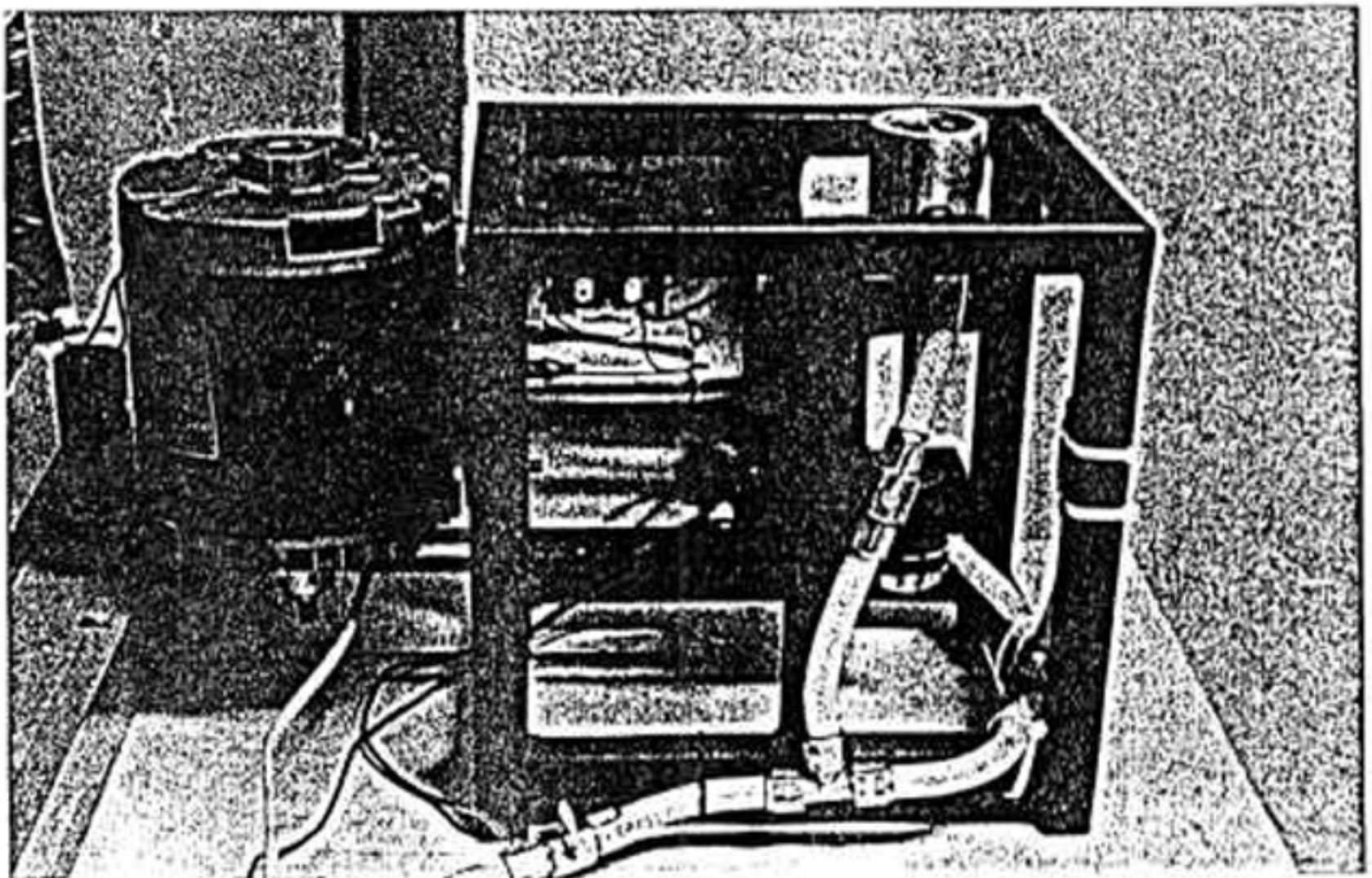
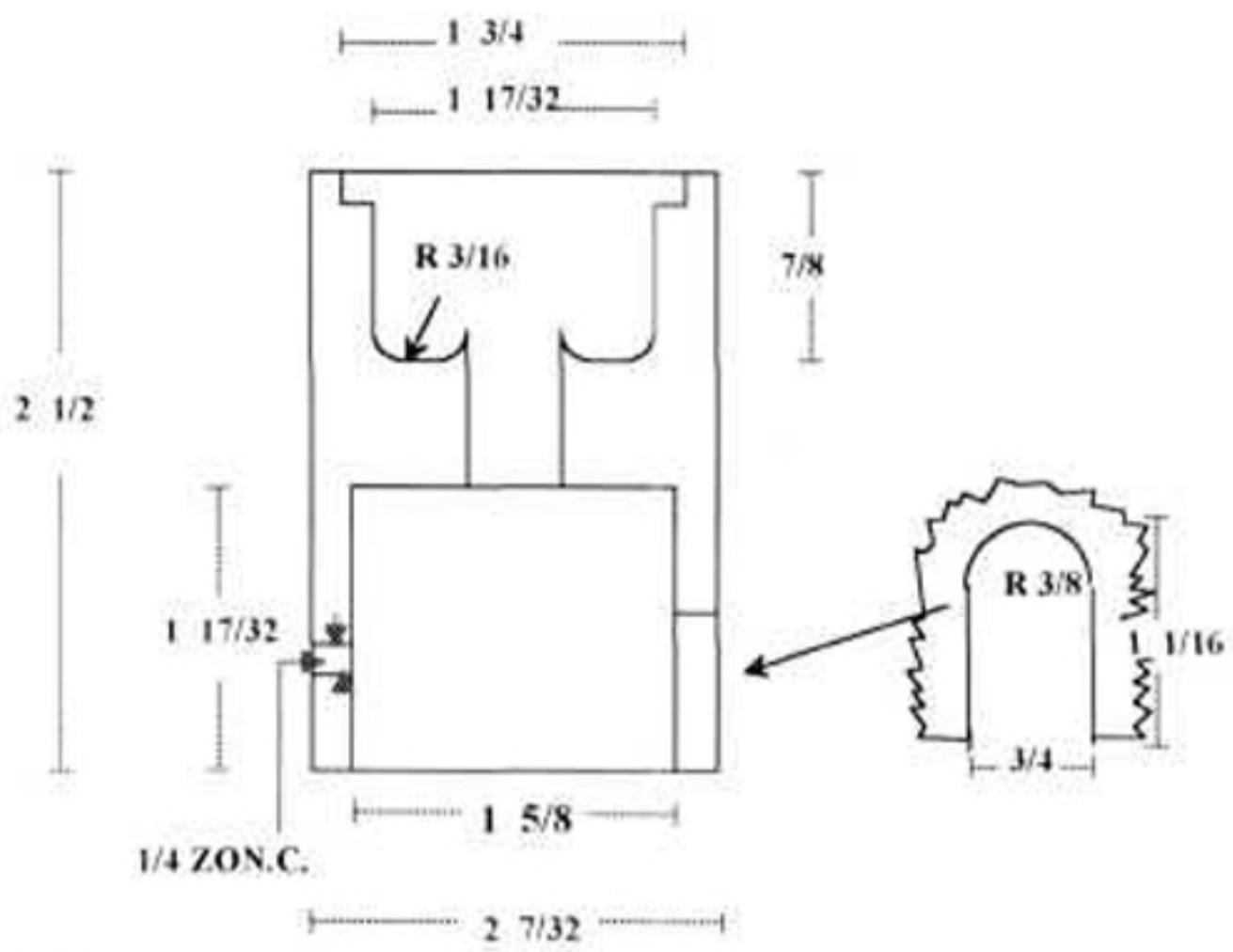
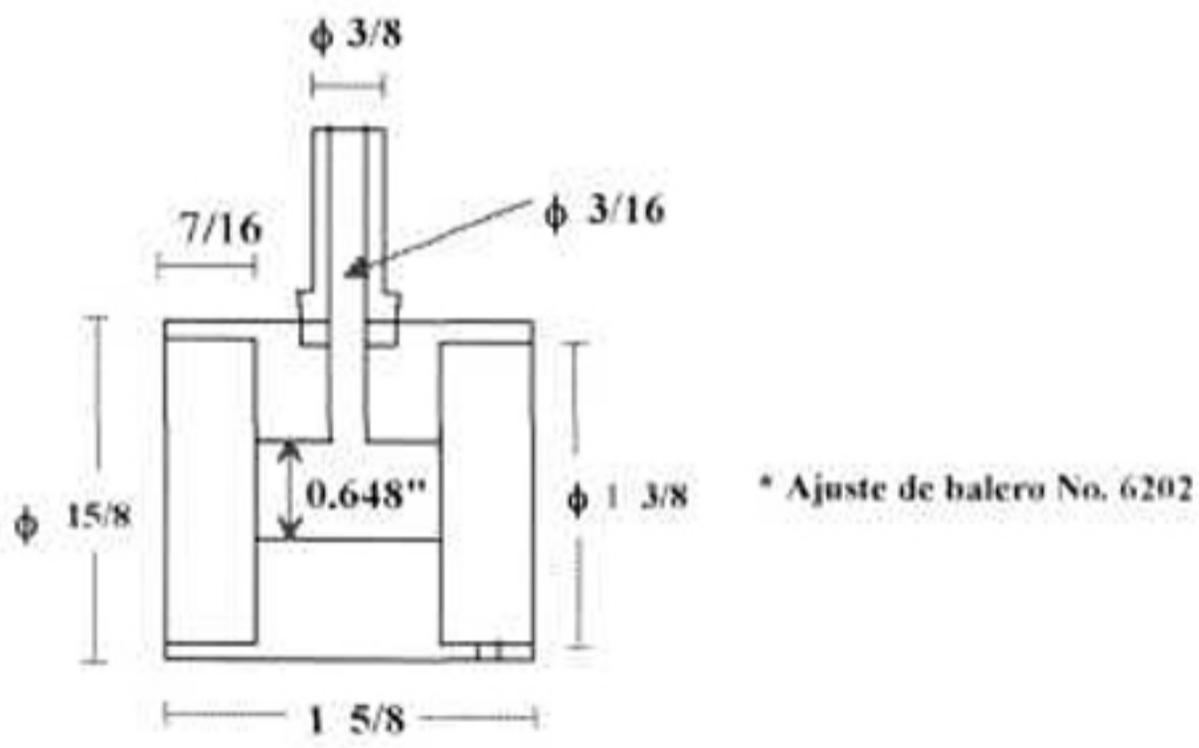


Fig. 3.5 Fotografía del girador completo



a)



b)

Fig. 3.6 Esquema de la cavidad del girador. a) parte superior. b) parte inferior

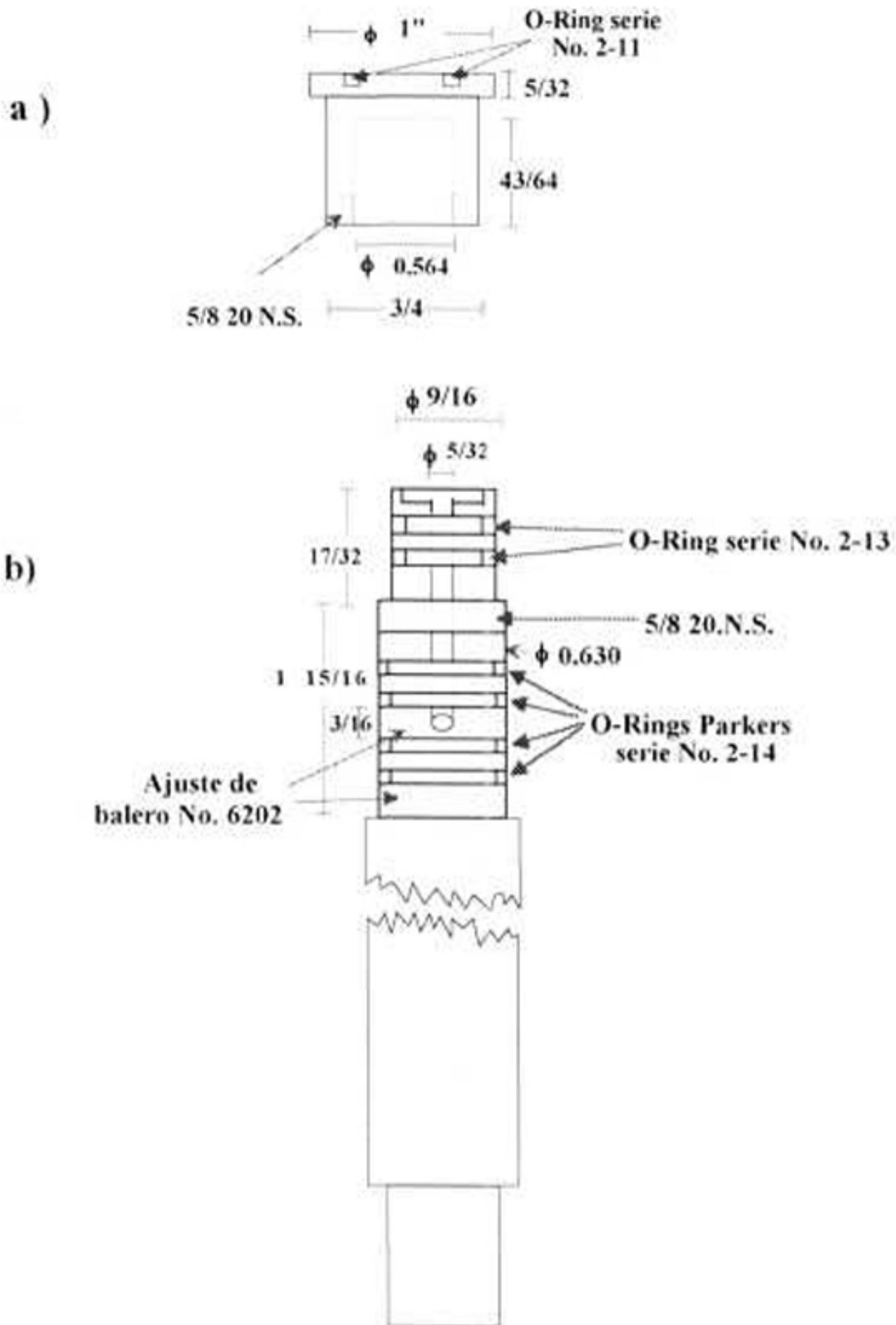


Fig. 3.7: a) base para depositar el sustrato. b) eje central del girador.

3.2.2 HORNO.

El horneado se lleva a cabo en un horno convencional de laboratorio, en el cual introducimos una placa de aluminio. En esta placa se colocan las obleas, y es conocida como plato caliente, tiene la particularidad de mantenerse prácticamente a temperatura constante, así al abrir y cerrar el horno (lo cual significaría una pérdida de temperatura), el plato caliente conserva la temperatura para garantizar la estabilidad térmica. El plato cuenta con un termómetro el cual mide la temperatura directamente en la placa.

3.2.3 ALINEADORA.

En la alineadora contamos con una base la cual tiene movimientos en X, Y, Z y un ángulo θ con el fin de orientar los ejes cristalográficos, otras impresiones, etc. con el patrón de la mascarilla (líneas, puntos, cuadros, etc.). Esta alineadora cuenta además con un sistema de nivelación el cual nos permite mejorar el contacto entre el sustrato y la mascarilla a imprimir. Este se encuentra en la parte superior de la tapa y toca tres puntos en la mascarilla, el sistema de nivelación se ajusta con tres tornillos muy finos ver fig. 3.8. Este sistema es muy importante ya que el contacto con la oblea es determinante ya que disminuye el efecto de difracción en el resist fig. 2.10, que logra una mejor reproducción en los patrones a imprimir.

La base de la alineadora cuenta con un sistema similar al de la base del girador, es decir esta conectada a una bomba de vacío, el cual nos permite ubicar el sustrato con mayor exactitud, sin tener que utilizar algún tipo de adhesivo; en la fig. 3.8 podemos observar las partes principales que integran la alineadora.

Los movimientos en X, Y, Z, y θ se controlan a través de una serie micromanipuladores comerciales. Este ensamble tiene en la parte superior una placa con orificios, los cuales sirven para fijar la base del sustrato. Esta base está conectada a la misma bomba de vacío que el girador.

La mascarilla como se aprecia en la figura, está colocada en la parte superior de la alineadora y es el patrón o imagen que se desea imprimir en la oblea, la mascarilla usada para este

estudio fue elaborada en Colorado Springs por la compañía Microphase, consta de una serie de patrones de franjas claras y oscuras cuyas dimensiones se muestran en la fig 3.9.

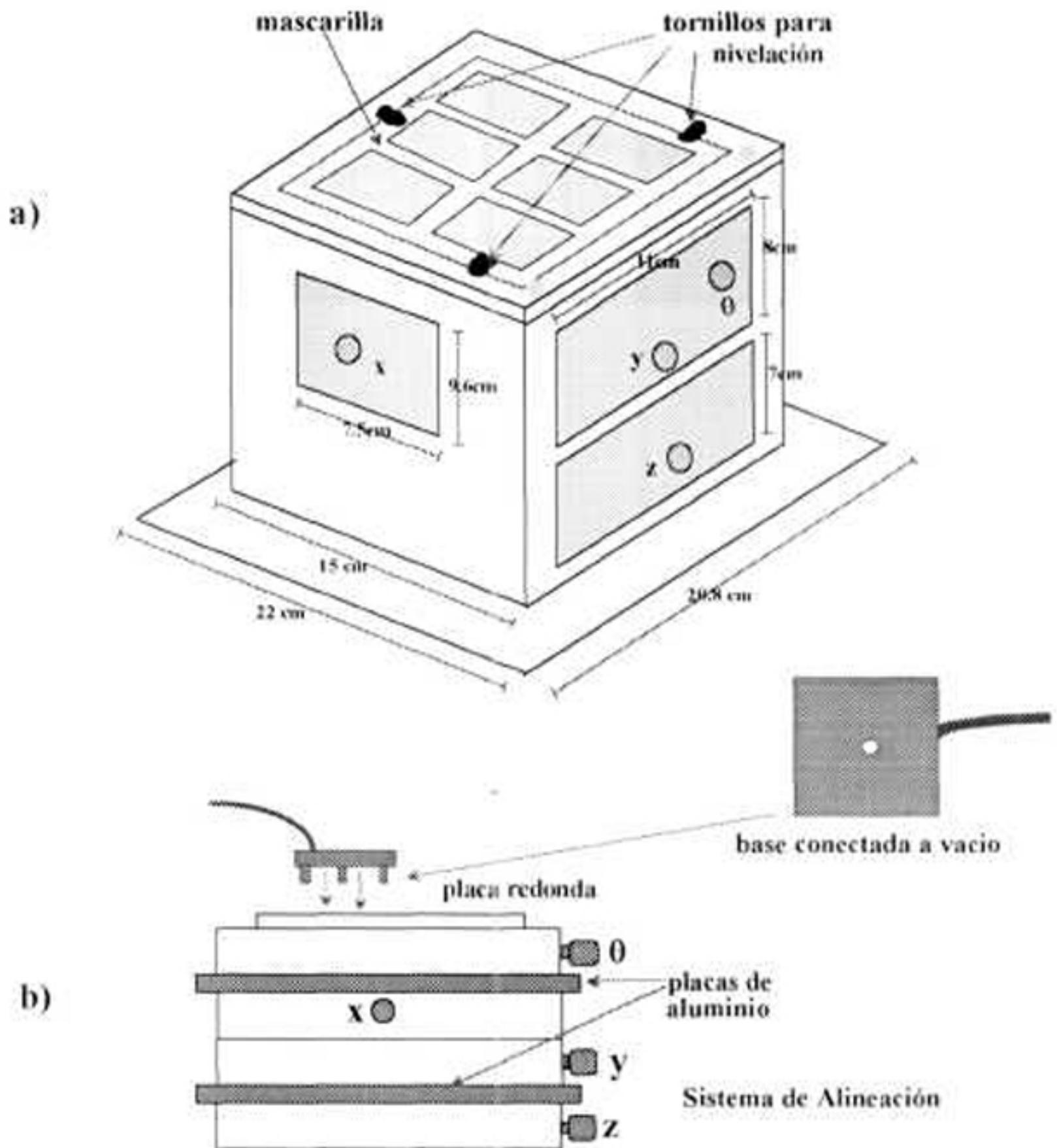
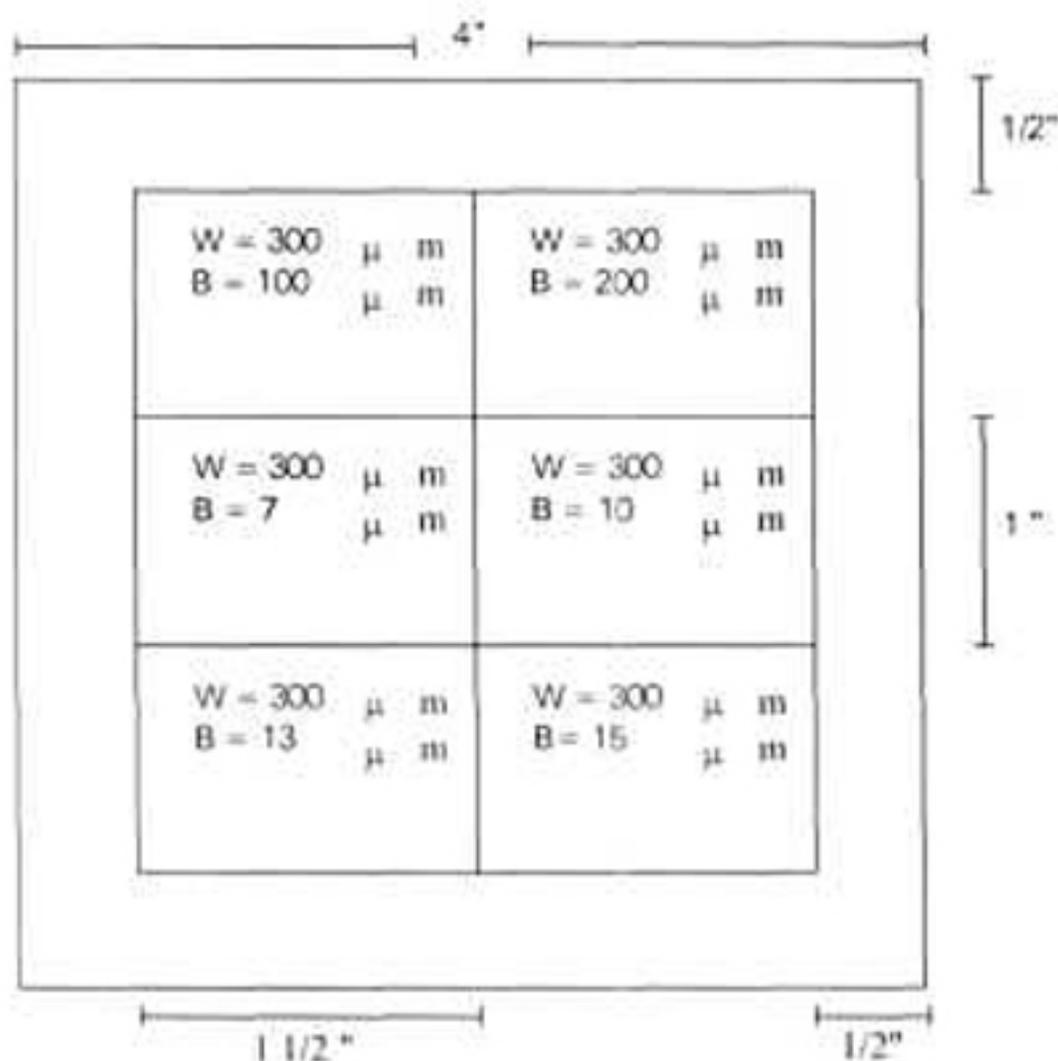


Fig. 3.8 Alineadora. a) en la parte superior vemos el montaje general de la alineadora. b) se muestra, el ensamble del sistema de alineación y la base para colocar el sustrato.



W = franja clara. B = franja obscura. El grosor del substrato es de 0.06 pulgadas.

Fig. 3.9 Esquema de la mascarilla fabricada por la compañía Microphase en Colorado Springs.

3.2.4 MICROSCOPIO CON LAMPARA DE LUZ BLANCA, CÁMARA DE VIDEO Y MONITOR.

Este instrumento es un microscopio de Infinity Photo Optical Company, modelo InfiniVar-Video Microscope, el cual en la parte inferior cuenta con un sistema que permite la entrada de luz de una lámpara de luz blanca, a través de una fibra óptica, esta luz se utiliza para observar la muestra. La imagen es recibida por una cámara de video C.C.D. Video Camera Module modelo XC-75 a través del microscopio y proyectada a un monitor de televisión HR Trinitron de Sony.

La lámpara usada en este caso, es una lámpara de arco de Xenón fig.3.10 en vez de una lámpara de mercurio, pero ambas caen dentro del rango de sensibilidad (UV) para el compuesto fotoactivo. Para dirigir la luz ultravioleta a la mascarilla y el substrato, se adaptó un espejo plano común como se muestra en la figura 3.11.

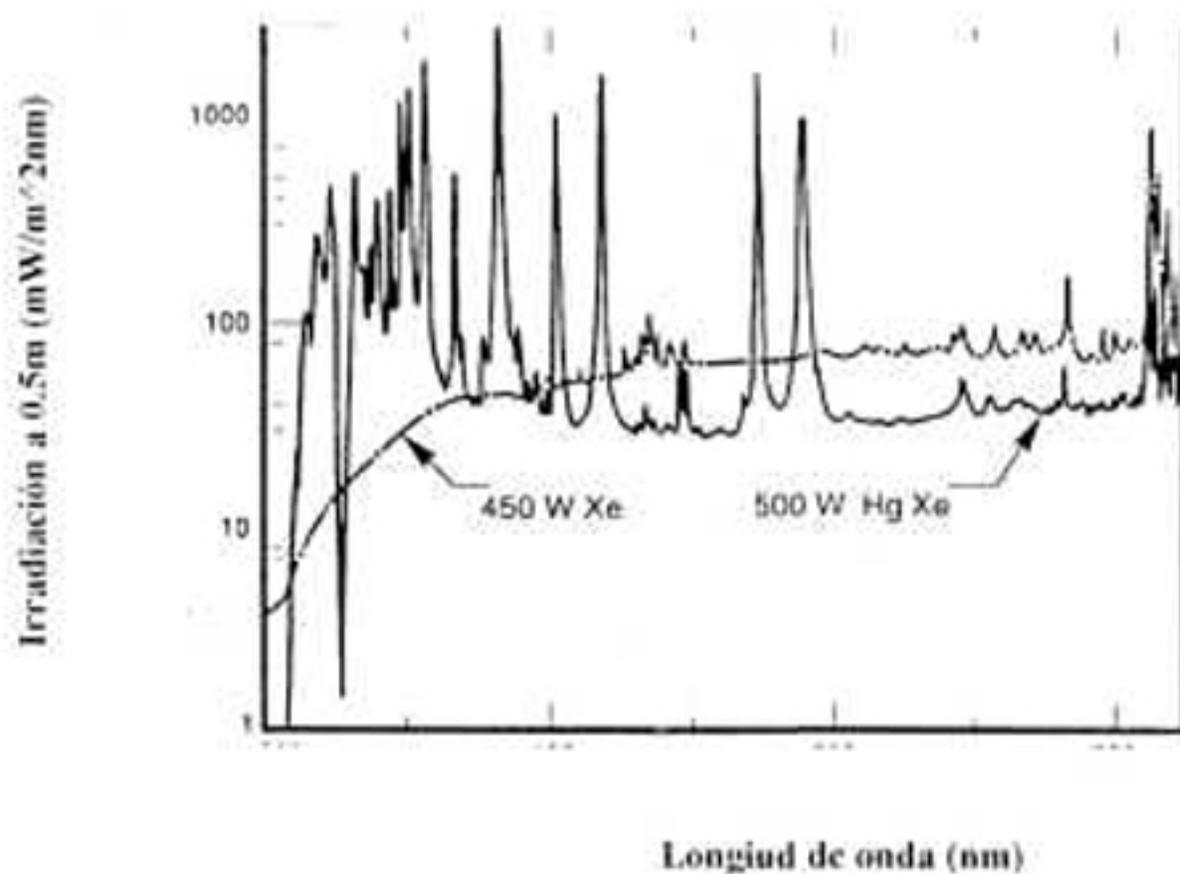


Fig 3.10 Irradiación contra longitud de onda para una lámpara de Mercurio y otra de Xenón, ambas lámparas se consideran buenas para el rango sensibilidad de fotoresist.

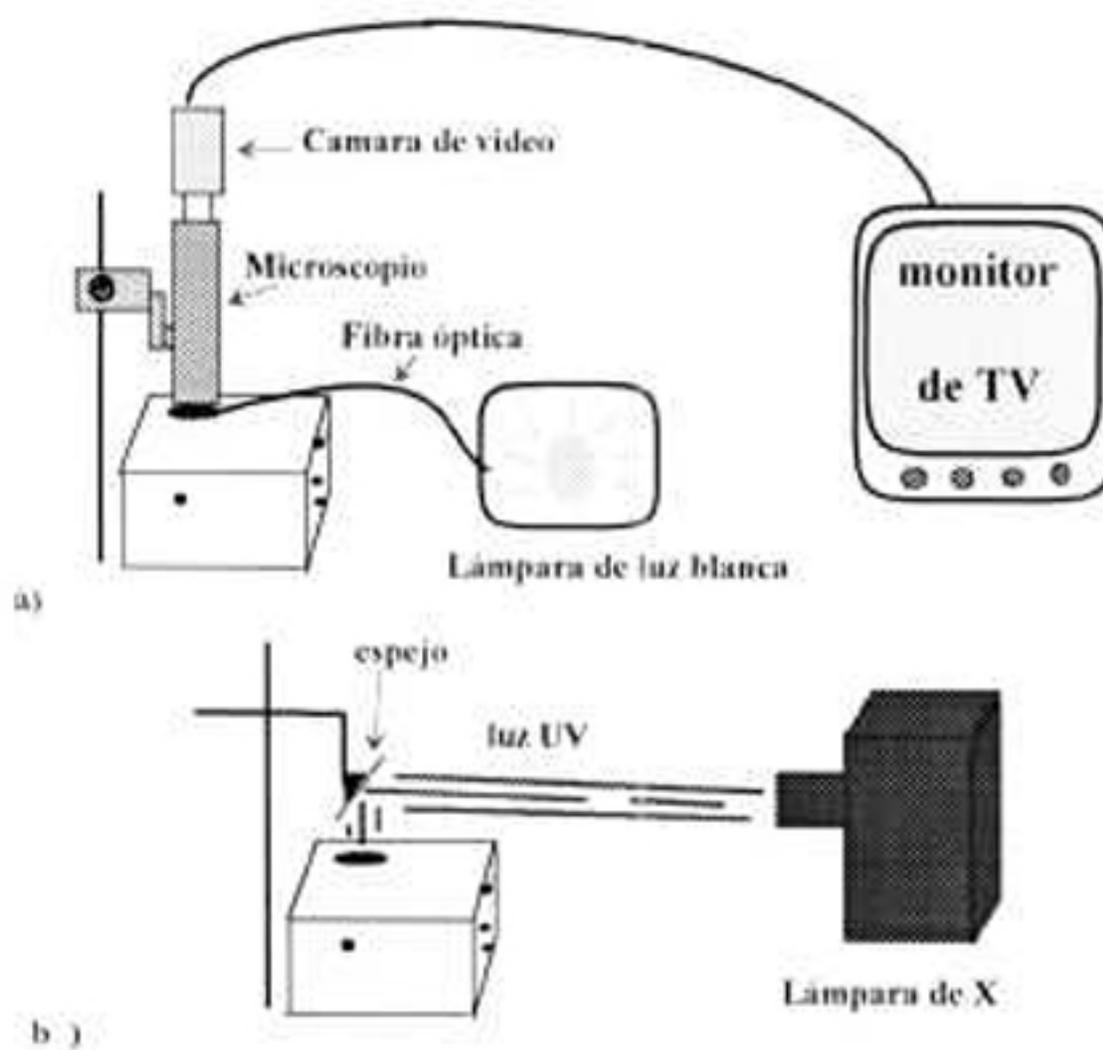


Fig.3.11 a) esquema del montaje durante la alineación, b) esquema del montaje durante la exposición. Nota: El microscopio y el espejo se encuentran en el mismo soporte, sólo se giran sobre el mismo eje.

CAPITULO 4 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este trabajo se utilizó el método de crecimiento enfriamiento-escalón. Como se mencionó en la sección 2.5, el sustrato y la solución de crecimiento son enfriados una cantidad de temperatura ΔT_s abajo de la temperatura de saturación de la solución antes de crecimiento. Posteriormente la solución se pone en contacto con el sustrato y se mantiene a una temperatura constante hasta terminar el crecimiento (ver fig. 2.8)

Para realizar el crecimiento de capas epitaxiales por LPE es necesario conocer los diagramas de fase de las soluciones cuaternarias, ya que las condiciones de crecimiento se derivan de éstos (composición de la solución de crecimiento, temperatura estacionaria de crecimiento y grado de supersaturación). Estos diagramas de fase deben cubrir los rangos de temperatura y composición que permiten el crecimiento bajo ciertas condiciones, proporcionando información acerca de los desacoplamientos en las constantes de red de las capas.

Se han utilizado diversos modelos para predecir el tipo de diagrama de fase cuaternario. Aquí se utiliza el modelo expuesto por E. Kuphal⁽¹²⁾ (ver apéndice A). En este modelo se utilizan diagramas de fase empíricos, usando composiciones líquidas tomadas de los diagramas de fase,

estableciendo valores que muestran que es posible mediante LPE realizar crecimientos para todas las composiciones y acoplamientos de red del sistema InGaAsP sobre (100)InP en un rango de temperatura entre 570 y 660°C. Aunque existe una brecha de miscibilidad.

Para crecer capas de InGaAsP sobre InP con alta calidad en los acoples de red, deben determinarse las composiciones correctas. La composición en las soluciones para un buen acoplamiento de red en el crecimiento por LPE se encuentra de los resultados de los diagramas de fase y las medidas de la constante de red de las capas crecidas de las soluciones con composiciones en las isotermas líquidas, las medidas de las constantes de red pueden encontrarse con la técnica de difracción de rayos-X.

4.1 PROBLEMAS EN EL CRECIMIENTO DE HETEROESTRUCTURAS.

La doble heteroestructura InP/InGaAsP/InP como la que debe creerse para la fabricación de dispositivos ópticos tales como el láser (fig. 2.6), presenta un problema en el crecimiento por el método de LPE, en la región de grandes longitudes de onda ($>1.3\mu\text{m}$), este problema es la disolución de la capa InGaAsP al ponerla en contacto con la solución de InP, debido a que el As tiene una gran solubilidad en la solución de InGaAsP que está en equilibrio con la capa de mayor longitud de onda. Esto es debido a que una capa es cuaternaria en fase sólida y la otra es binaria, por tanto existe una diferencia entre las entalpías de mezcla de InGaAsP e InP. Existen varias estrategias para prevenir la disolución, como el disminuir la temperatura de crecimiento de la última capa o usando una delgada capa anti-redisolución entre la capa delgada y la siguiente.⁽¹²⁾

El control de la composición de la aleación y el grosor de las capas son otros problemas importantes en la fabricación de dispositivos. La composición de las capas de LPE varía cada vez debido al error en el pesaje. También se requiere el control en capas muy delgadas, para esto se utilizan botes en los cuales, los pozos que sirven para crecer la capa activa y la anti-redisolución (para nuestro caso), o capas muy delgadas, en vez de estar perforados totalmente, sólo tienen rendijas cuyos anchos son 3 y 2mm respectivamente, fig. 3.2, a través de las cuales se deposita la solución al deslizar el substrato bajo éstas, generando capas muy delgadas.

4.2 PROCESO DE CRECIMIENTO MEDIANTE LPE

4.2.1 LIMPIEZA DEL SUBSTRATO.

Después de cortar el substrato se debe limpiar, es decir, debe eliminarse de su superficie todo tipo de grasas y partículas de polvo, que hubiesen podido adherirse, debido al almacenamiento o al manejo de las obleas. Para esto se utiliza una torunda de algodón impregnado con etanol, este procedimiento de pasar suavemente la torunda sobre la oblea se repite varias veces cambiando la torunda, con el objetivo de eliminar todo rastro de grasa y dejar la superficie lista para realizar cualquier ataque químico pertinente.

4.2.2 ATAQUES QUÍMICOS Y DECAPANTES

AGENTE ATACADO	AGENTE ATACANTE	CONDICIONES	CARACTERÍSTICAS USO
1) Substrato de InP-n	In	T+ 658.6°C t= 2 seg H ₂ - 15%	se utiliza para garantizar la limpieza substrato sobre el que se va a depositar la capa epitaxial.
2) Substrato de InP-n	H ₂ O+K ₂ Cr ₂ O ₇ HBr prop. 1:1	solución saturada de H ₂ O con K ₂ Cr ₂ O ₇ . se prepara justo antes t-variable. decapa aprox. 7µm/min.	decapante suave el tiempo varia dependiendo del grosor del substrato desde 10 seg a 10 min.
3) GaAs e InP	H ₂ SO ₄ H ₂ O-deionizada H ₂ O ₂ - 30% prop. 3:1:1	se prepara justo antes del ataque t-variable. decapa aprox. 10µm/min	ataque de pulido se utiliza como segundo ataque para preparación del substrato tiempo utilizado de 10 seg hasta 10 min.
4) InP	HCl	decapa aprox. 10 µm/min t-variable	ataque fuerte se utiliza para adelgazar los substratos. después de crecer las estructuras el tiempo depende del grosor del substrato
5) In	HNO ₃ HF - 48 a 52% H ₂ O prop. 10:15:300	puede prepararse y almacenarse t-variable	se utiliza para retirar el exceso de In de las estructuras crecidas. tiempo necesario para retirar por completo el In

AGENTE ATACADO	AGENTE ATACANTE	CONDICIONES	CARACTERÍSTICAS USO
6) In	HNO ₃ HF - 48 a 52% prop. 8:2	se prepara justo antes. la pastilla de In debe cortarse antes de realizar el ataque	se utiliza para eliminar impurezas adheridas a la superficie se observan vapores de tono rojizo y aprox. un min. después vapores de tono amarillo. en ese momento se detiene la reacción
7) Cd y Zn	HNO ₃ H ₂ O prop. 1:1	cambia de un color opaco a un tono brillante 1-10 seg	se utiliza para eliminar impurezas de la superficie
8) Hetero-estructura.	K ₂ Fe(CN) ₆ KOH H ₂ O deionizada 16gr:24gr:140ml	se disuelven separadamente cada uno de los componentes en 70 ml de agua y posteriormente se combinan. puede prepararse y almacenarse. La estructura por atacar debe ser clivada. t= 5 seg	se utiliza como un revelador ya que las capas son atacadas a distintas razones el poder observar un perfil

Nota: Para parar el proceso de ataque se utiliza agua deionizada.

4.2.3 HOMOGENEIZACIÓN

Proceso: Una vez pesados los componentes de cada capa se colocan en el bote y se introducen en el horno, se hace circular un flujo de H₂ al 30% durante media hora a una atmósfera de presión, con el propósito de limpiar la superficie de óxidos, que pudiesen existir en los materiales. Posteriormente se cambia el flujo de H₂ a 5%, se coloca el horno en la posición adecuada y se comienza a elevar la temperatura, hasta los 660°C que es 5°C arriba de la temperatura de liquidus utilizada para el cálculo de las masas. Una vez alcanzada dicha temperatura, se mantiene por 30 min. para garantizar la homogeneización. posteriormente se enfrían las mezclas.

4.2.4 PROCESO DE CRECIMIENTO

Para crecer capas epitaxiales sobre un substrato se colocan en el bote el substrato (bajo el grafito), la cubierta de GaAs en el primer pozo y las mezclas ya homogeneizadas de las capas a crecer fig 4.1. Se coloca el flujo de H₂ en 30% durante 30 min. y posteriormente se cambia a 15%

para comenzar a elevar la temperatura, al alcanzar los 350°C se desliza el sustrato bajo la cubierta de GaAs y se continúa con el incremento de la temperatura hasta los 660°C. Se mantiene por 5 min. y se corre el programa de control de temperatura, es decir, se disminuye la temperatura hasta los 645°C (que es la temperatura de crecimiento) para realizar el crecimiento, se ponen en contacto el sustrato y la primera solución durante un periodo de tiempo determinado experimentalmente a través de la razón de crecimiento. Posteriormente desliza hacia la siguiente solución dejándolo nuevamente el periodo calculado, y se continúa así con las demás soluciones cuaternarias hasta completar el total de capas por depositar.

Posteriormente se desliza el sustrato, se apaga el horno y se recorre. Se coloca un ventilador bajo el tubo de cuarzo y se enfria todo el sistema. Una vez frio se saca el bote, se retiran las soluciones sólidas y se retira la estructura.

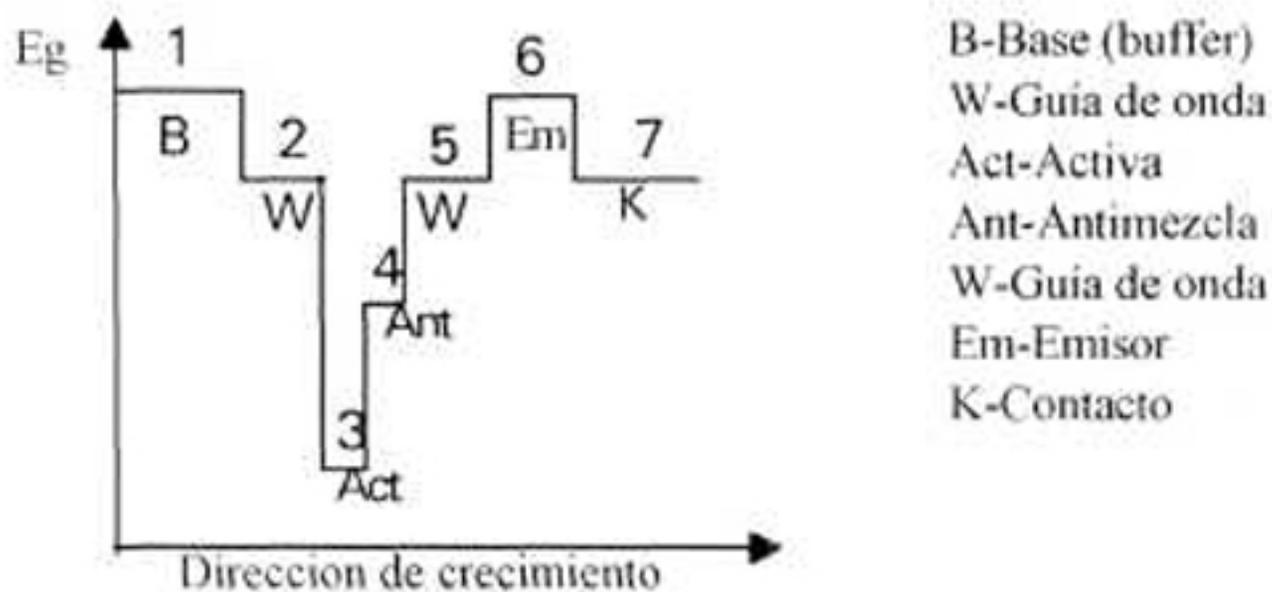


fig.4.1. Dirección del crecimiento de capas epitaxiales contra energía de la brecha prohibida.

4.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LPE.

Cálculo de la temperatura real en el bote.

Una vez cortado y limpio el sustrato, se realizan en este caso dos ataques químicos, el no. 2 y el no. 3, para nuestro caso, debido a que las obleas tienen un grosor adecuado, sólo se atacan 15 seg. con cada solución. En algunos casos se han usado tiempos mayores, en los cuales se hará la aclaración.

Para este experimento se realizó una saturación de InP en In, para tal efecto se conocían las masa iniciales del substrato y el In, se colocaron en el bote, para posteriormente introducirse en el horno, se elevó la temperatura hasta 640.5°C (lectura en el termostato del horno) y se pusieron en contacto el In con el substrato, manteniéndolo 30 minutos, se deslizó el substrato y se enfrió. Se retiraron y se pesaron nuevamente, conociendo así la pérdida de masa del substrato. Posteriormente, se utiliza la curva de concentración contra temperatura, localizando así la temperatura real del bote. La diferencia entre la temperatura del termostato y la temperatura real en el bote fue 1°C menor ($T_{\text{horno}} > T_{\text{real}}$).

Se calcularon las cantidades para realizar crecimiento de heteroestructuras (consultar apéndice), tomando la temperatura de líquidus (T') de 654°C y la temperatura de crecimiento (T'') de 644°C. Las cantidades son las siguientes:

	Q (buffer)	Q(1.3)	Q(1.03)	Q(1.11)	Q(1.3)
InP	45.5	13	36.5	28	13
GaAs		60.5	10.8	21.5	60.5
InAs		357.5	151.5	237.4	357.5
In	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
Sn	30				
Cd				85/25	227/75

Tabla 4.1 *Nota: las cantidades están dadas en miligramos.

Una vez pesados los componentes de cada capa se realizó la homogeneización de acuerdo al proceso descrito en la secc.4.2.3. Posteriormente se crecieron capas epitaxiales sobre un substrato tipo n de InP, con el propósito de conocer las razones de crecimiento.

Se creció la capa base (buffer) (MX83) sobre un substrato tipo-n de acuerdo al proceso de crecimiento descrito en la secc.4.2.4 y el tiempo de crecimiento fue de 2 min. Se realizaron los crecimientos MX84, MX85 y MX86, los cuales tienen dos capas, la base y una de las capas calculadas, $Q_{1.3}$, $Q_{1.03}$ y Q_K respectivamente. Se utilizó el mismo proceso, con la diferencia que después de crecer la capa buffer (misma del proceso anterior) durante 2 min, la estructura se pone en contacto con la capa Q_i durante 1 min.

Una vez crecidas (MX83, Mx84, MX85 y MX86), se clivaron y se les hizo el ataque no.8, para poder observar en el microscopio metalográfico las capas crecidas, de lo anterior se detectó que no hubo crecimiento.

Debido a lo anterior se realizó el cálculo de la temperatura de saturación encontrando $T=653.6^{\circ}\text{C}$, lo cual sirvió para corroborar que la temperatura utilizada era correcta. Posteriormente se realizó una serie de experimentos, con el propósito de encontrar la cantidad de InP necesaria para saturar las soluciones. Se utilizaron las siguientes cantidades de InAs, GaAs, In y los substratos, los cuales se pesaron previamente, con el fin de conocer cuanto InP se disolvía en la mezcla de InP-semiaislante.

Se colocó en el bote, al igual que las otros componentes, se hizo circular el flujo de H_2 al 30% por media hora, después se cambió a 2% y se incrementó la temperatura hasta la temperatura de saturación, para homogeneizar la mezcla, se mantuvo por 30 min, después se pusieron la mezcla y el substrato en contacto, mantiniéndolos por 30 min. más. Después se retiró el substrato dejándose enfriar el sistema, para posteriormente pesar tanto el substrato, como la mezcla.

	MX87	MX89	MX90	MX91
	Q(1.3)	Q(1.11)	Q_c	Q(1.03)
InAS	347.26	337.4	347.5	151.5
GaAs	60.5	21.5	60	10.8
In	4,500	4,500	4,500	4,500
Cd			225	
InP-substrato (antes)	178.71	208.93	205.22	214.74
InP-substrato (después)	168.8	183.64	192.5	246.2
Δ InP	9.61	25.29	12.75	31.46

Tabla 4.2 Cantidades usadas para los experimentos de saturación y cantidades calculadas.

Se realizaron los crecimientos con las mezclas obtenidas (MX87) MX88. Se preparó el substrato de InP-n, utilizando el ataque no.2 por 2min. y el ataque no.3 por 30 seg., se colocaron en el bote y se realizó el crecimiento (mismo procedimiento que MX83), sólo que el tiempo de

crecimiento fue de 1 min (para observar razones de crecimiento) posteriormente se clivó, se reveló y se observó en el microscopio metalográfico, obteniendo que la capa crecida fue aproximadamente $1\mu\text{m}$ de espesor.

Se realizó análisis de Rayos-X, observando que el desacople de red es tan pequeño que no se pudo obtener $\Delta a/a$. fig. 4.2

Se realizó el crecimiento con la mezcla (MX91) MX92 (mismo procedimiento que MX83), sólo que el tiempo de crecimiento fue de 1 min. posteriormente se clivó, se reveló y se observó en el microscopio metalográfico, obteniendo que la capa crecida fue aprox. $1\mu\text{m}$ de espesor. En la fig. 4.3 se muestra el desacoplamiento de red, que al igual que en el anterior no se pudo medir

Crecimiento con la mezcla de (MX89) MX93

Se realizó el crecimiento (mismo procedimiento que el anterior), sólo que el tiempo de crecimiento fue de 1 min. posteriormente se clivó, se reveló y se observó en el microscopio metalográfico, obteniendo que la capa crecida fue aprox. $0.5\mu\text{m}$ de espesor la fig. 4.4 se muestra el análisis de Rayos-X, donde se observa un desacoplamiento mayor que los anteriores pero aún sin poder medirlo.

Crecimiento con la mezcla (MX90) MX94

Se le agregaron 85 mg. de Cd a la mezcla, debido a que se sabe que el Cd se evapora con facilidad y esta fue la cantidad faltante en el peso total de los componentes (debido al proceso de disolución). Se realizó el crecimiento (mismo procedimiento que MX83), sólo que el tiempo de crecimiento fue de 1 min. posteriormente se clivó, se reveló y se observó en el microscopio metalográfico, obteniendo que la capa crecida fue aprox. $1\mu\text{m}$ de espesor. En la fig. 4.5 se muestra la gráfica del análisis de Rayos-X. Del análisis de rayos-X en las muestras MX88, MX92, MX93 y MX94, se observa que el desacople de red es mínimo en las tres primeras (figs. 4.2, 4.3 y 4.4), aquí sólo se observa un hombro o un ensanchamiento asimétrico. Para MX94, podemos diferenciar dos picos, como se observa en la fig. 4.5, logrando medir el desacoplamiento de la red, pero éste es muy pequeño. También se realizaron medidas de efecto Hall, obteniéndose los siguientes resultados.

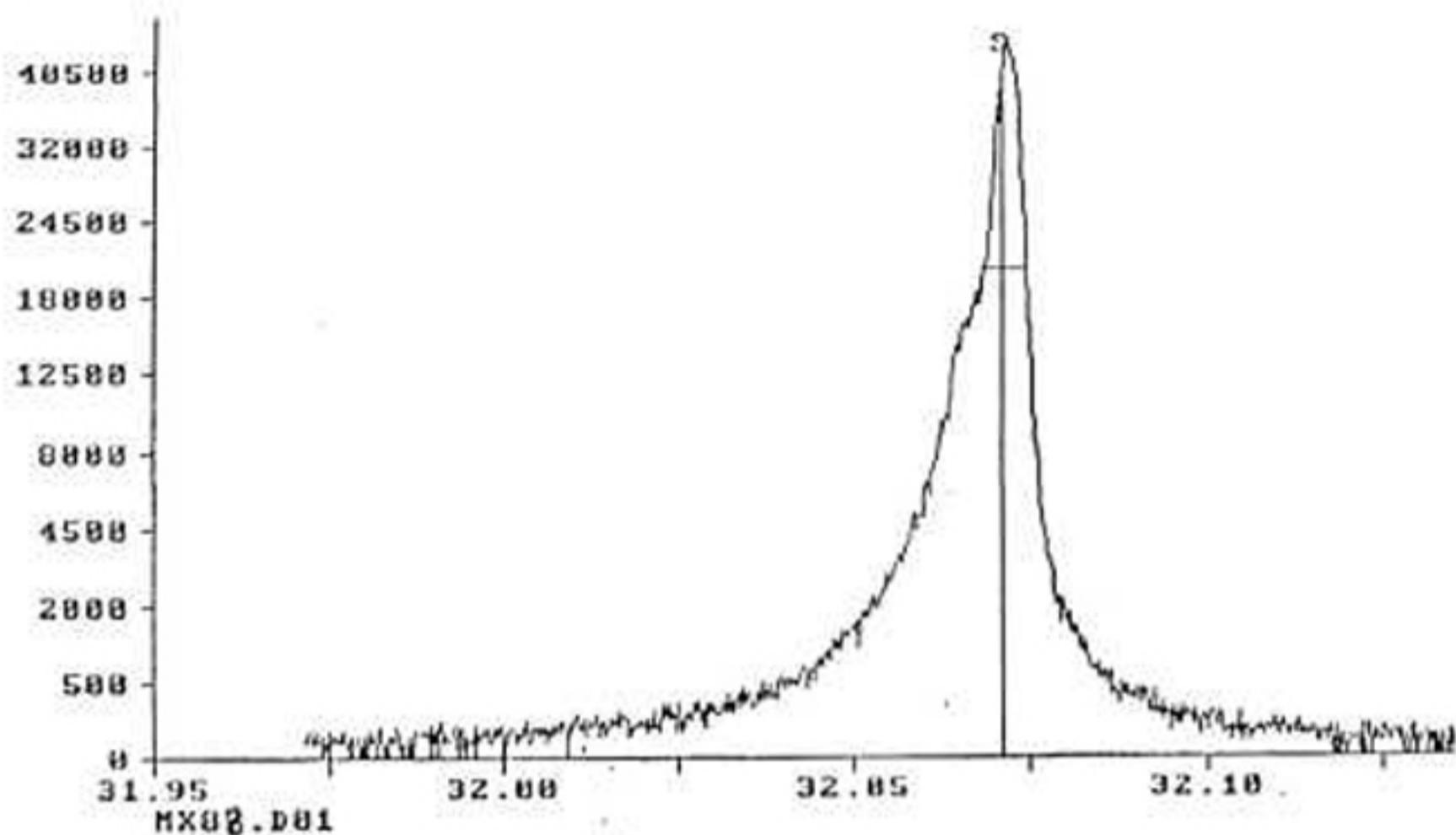


Fig. 4.2 Se muestra el análisis de Rayos-X de la muestra MX88 en la cual podemos observar que el desacoplamiento de red es mínimo, se observa solo un pequeño hombro causado por la capa crecida.

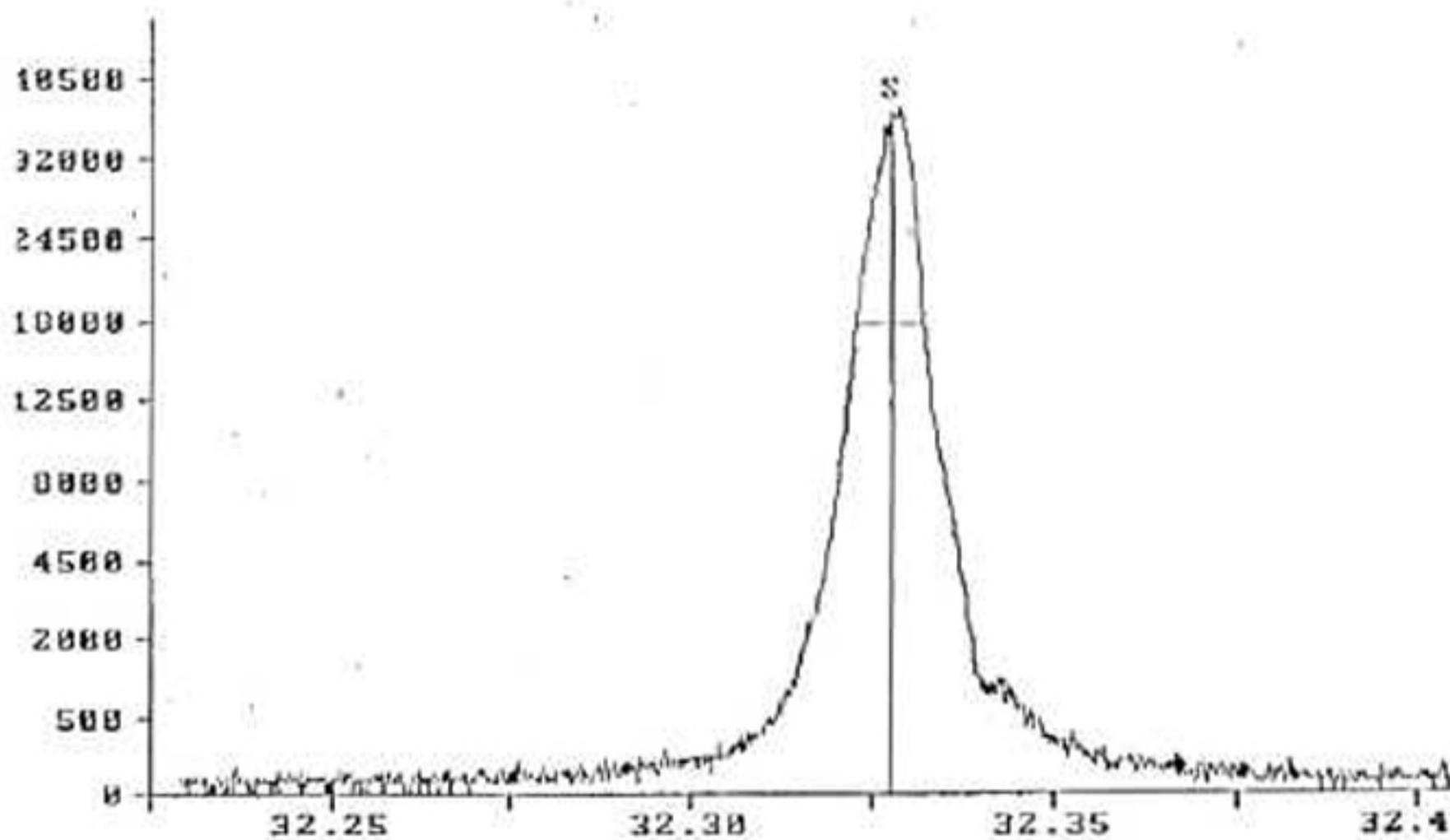


Fig. 4.3. Se muestra el análisis de Rayos-X de la muestra MX92 en la cual podemos observar que el desacoplamiento de red es mínimo, se observa solo un pequeño hombro al lado derecho causado por la capa crecida.

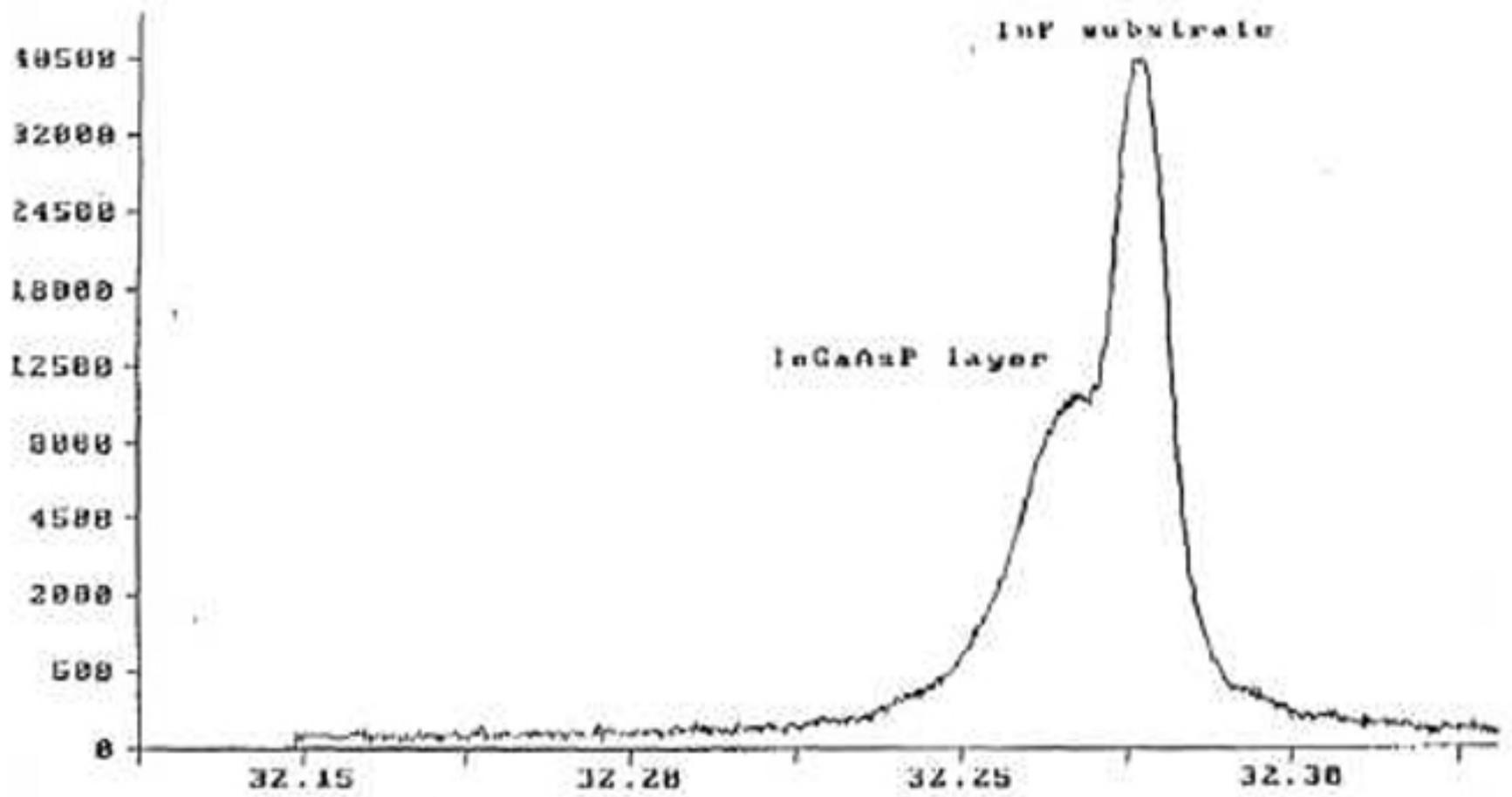


Fig. 4.4 Análisis de Rayos-X de la muestra MX93 en la cual podemos observar que el desacoplamiento de red es mínimo, se observa solo un hombro al lado izquierdo causado por la capa crecida.

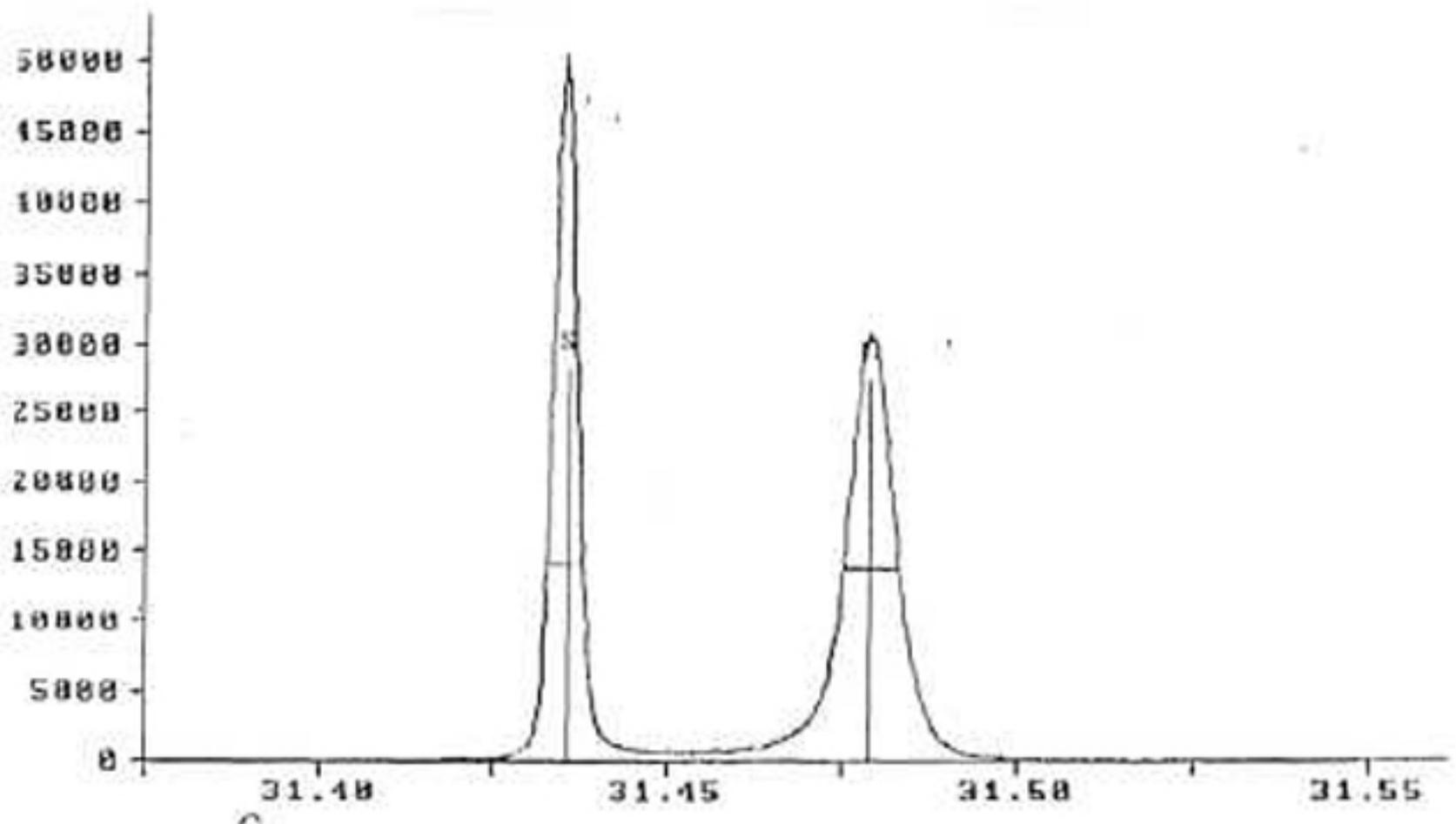


Fig. 4.5 Análisis de Rayos-X de la muestra MX94 en la cual podemos observar que el desacoplamiento de red es pequeño, se observan dos picos claramente separados, los cuales corresponden a la capa crecida (derecha) y al substrato (izquierda).

	Resistividad (volt cm)	Movilidad (cm ² /V seg)	Densidad de portadores (cm ⁻³)
MX88	4.185×10^{-3}	2.51×10^3	5.95×10^{17}
MX92	5.365×10^{-3}	1.56×10^3	7.448×10^{17}
MX93	9.877×10^{-3}	1.41×10^3	4.493×10^{17}
MX94	4.395×10^{-2}	3.873×10	3.667×10^{16}

Tabla 4.3*Nota: Las mediciones de efecto Hall se hicieron a 300 K.

Se realizaron cálculos para una estructura de pozo cuántico separado (SQW SCH), esta heteroestructura consta de siete capas, cuyos pesos se resumen en la tabla 4.4

	Buffer	Guia de onda (1.3)	Activa (1.3)	Anti-rediseño lución (1.11)	Guia de onda (1.3)	Emisor	Contacto
InP	45.5	31.5	10.5	25.5	31.5	46	12.7
InAs		10.8	60.5	21.5	10.8		60.5
GaAs		151.5	347	237.4	151.5		347.5
In	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
Cd						85/25*	225/75*
Sn	30						

Tabla 4.4 Nota: las unidades están dadas en miligramos. *Estas cantidades se agregan para los segundos crecimientos.

Crecimiento (MX97)

Se pesaron los componentes y se realizó la homogeneización. Se limpió el sustrato para proceder al crecimiento, de acuerdo con la fig 4.1. Los tiempos de crecimiento fueron:

$$t_{\text{buffer}} = 2 \text{ min}$$

$$t_{\text{wg}} = 1 \text{ seg}$$

$$\text{Act} = \text{deslizarla suavemente}$$

$$\text{Ant} = \text{deslizarla suavemente}$$

$$t_{\text{wg}} = 1 \text{ seg}$$

$$t_{\text{emisor}} = 2 \text{ min}$$

$$t_{\text{contacto}} = 1 \text{ min}$$

Se clivó, se reveló y se observó en el microscopio metalográfico, donde no se pudo ver la capa activa. Al parecer no se dio una adecuada sobresaturación en la mezcla. Por tal motivo, se agregaron 2 mg. a la mezcla de la capa activa y se procedió a realizar otro crecimiento. Crecimiento (MX98) en este caso el grosor de la capa activa fue grande y se observó una corriente de umbral alta. Debido a lo anterior, para encontrar la cantidad correcta de InP, se prepararon distintas mezclas de capa activa variando la concentración de la capa activa, las cantidades utilizadas para dichos crecimientos fueron: 10.5, 11.5, 12.5 mg. de InP respectivamente, manteniendo constantes los demás componentes. Sólo se crecieron la capa base, la capa activa y el emisor, esto se hizo con el objetivo de observar el crecimiento de la capa activa. Se determinó que 12.5 fuese la concentración adecuada para el crecimiento de la capa activa.

Posteriormente, de acuerdo con los experimentos anteriores se pesaron nuevamente las cantidades necesarias (tabla 4.5).

	Buffer	Guia de onda (1.3)	Activa (1.3)	Anti-redisolución (1.11)	Guia de onda (1.3)	Emisor	Contacto
InP	45.5	31.5	12.5	25.5	31.5	46	12.7
InAs		10.8	60.5	21.5	10.8		60.5
GaAs		151.5	347	237.4	151.5		347.5
In	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
Cd						85/25*	225/75*
Sn	30						

Tabla 4.5 *Cantidad que debe agregarse para un segundo crecimiento.

De acuerdo con la tabla 4.5 se realizaron una serie de crecimientos (MX102, MX103, MX104), utilizando las mismas mezclas. Se hicieron de la misma forma que el crecimiento MX97.

4.4 POST-CRECIMIENTO

Se construyeron lasers de área amplia, en este tipo de dispositivos los contactos metálicos cubren el área de los lados tipo-p y tipo-n. Para construir estos lasers de las estructuras crecidas

se cortó una parte para colocar contactos metálicos, con el fin de realizar pruebas de emisión. Esto se realiza de la sig. manera:

Antes de realizar la metalización, se deben adelgazar las estructuras, para tener entre 80 y 100 μm de grosor. Inicialmente los grosores del sustrato y la heteroestructura son del orden de 280 y 8 μm respectivamente, así que para proteger la heteroestructura se pegaron sobre un vidrio usando cera. Posteriormente se limpiaron con etanol retirando el exceso de cera de la superficie para poder atacar solamente el sustrato. Para esto se utiliza el ataque no.4, una vez alcanzado el grosor deseado, se retiran las estructuras del vidrio y para eliminar todo rastro de cera, se introducen en tetracloruro de carbono (CCl_4), en ebullición, hasta evaporar 1/3 de la solución original, esto se realiza dos veces, para después sumergirlas en acetona caliente, realizando el mismo proceso.

Para la deposición de contactos se utilizaron 30mg de Au (por lado), aleado con 8 mg de Zn para el lado tipo-p y para el lado tipo-n se hizo la aleación con 5mg de Ge. Posteriormente se recocieron a una temperatura de 390°C durante 1min. y se volvieron a depositar 25 mg. de Au en cada lado.

Las mediciones de corriente de umbral y densidad de umbral se pueden observar en las gráficas (figs. 4.6, 4.7, 4.8), donde observamos que la heteroestructura con mejores parámetros es la MX103, para la cual en $\lambda = 1.35\mu\text{m}$ se obtuvo emisión láser, con una corriente de umbral de 350mA y una intensidad de 370 A/cm^2 , como se observa en la gráfica (fig.4.7). En la MX104 se obtuvo emisión láser en $\lambda = 1.38\mu\text{m}$, pero su corriente de umbral fue alta, como puede observarse en la gráfica (fig.4.8).

Para saber si se tiene repetitividad se crecieron estructuras con las mismas características de las muestras anteriores, en las que se depositó silicio amorfo, para construir lasers de área angosta.

Para construir los láser de área angosta, se adelgazaron las estructuras con el mismo procedimiento expuesto anteriormente, posteriormente se depositó una capa de silicio amorfo de aproximadamente 0.2 μm MX102, MX103, MX104, MX105, MX106 y MX107, mediante el sistema de pulverización catódica, este material es un aislante, cuya resistividad medida mediante efecto Hall es del orden de 10^{-4} volt cm. Posteriormente se realizó fotolitografía utilizando la mascarilla de 100Å.

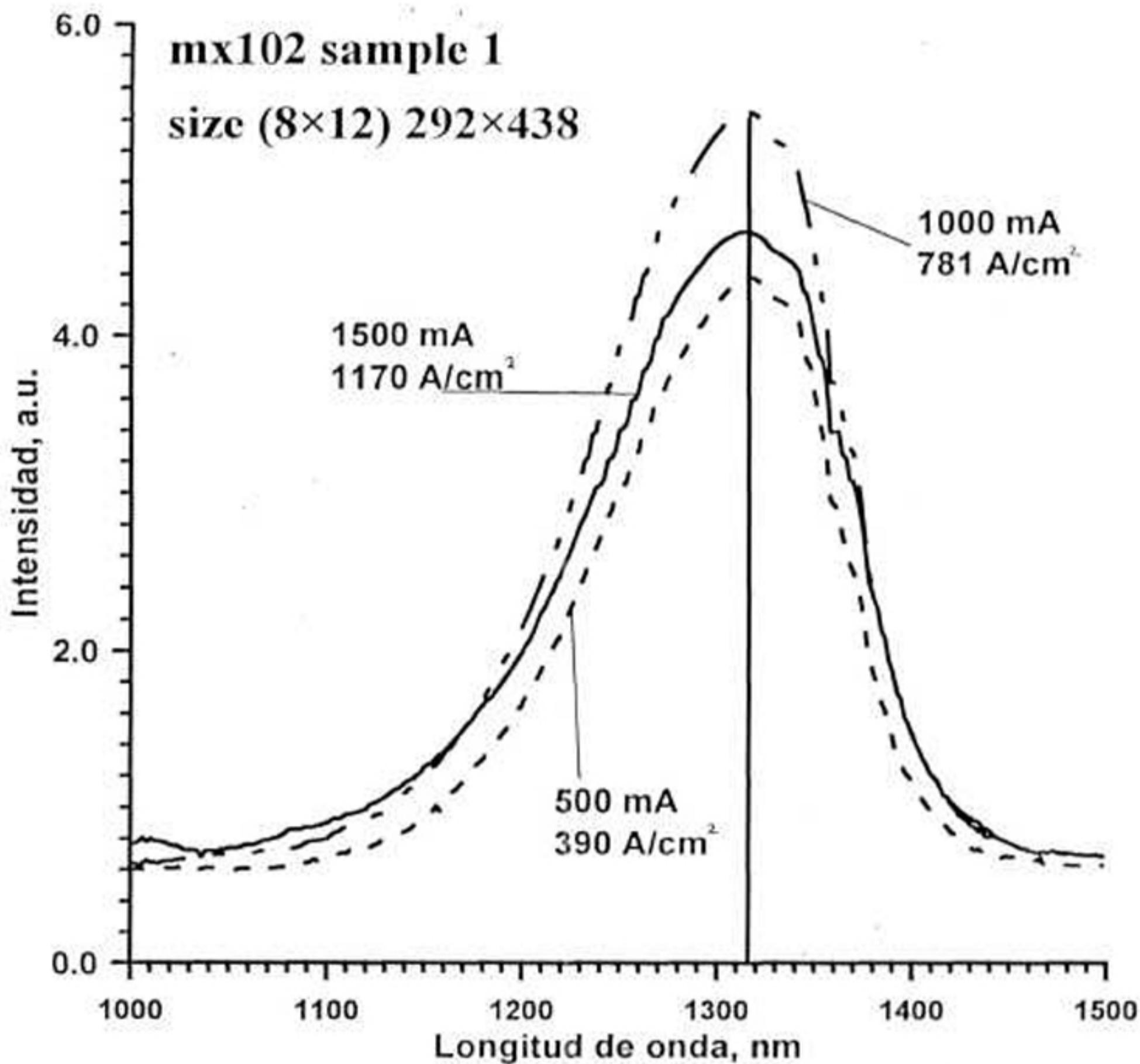


Fig. 4.6 Intensidad contra longitud de onda para la muestra mx102, en la cual no se observa el efecto laser.

mx103 sample 3

size (9.5×7.5) 346×273

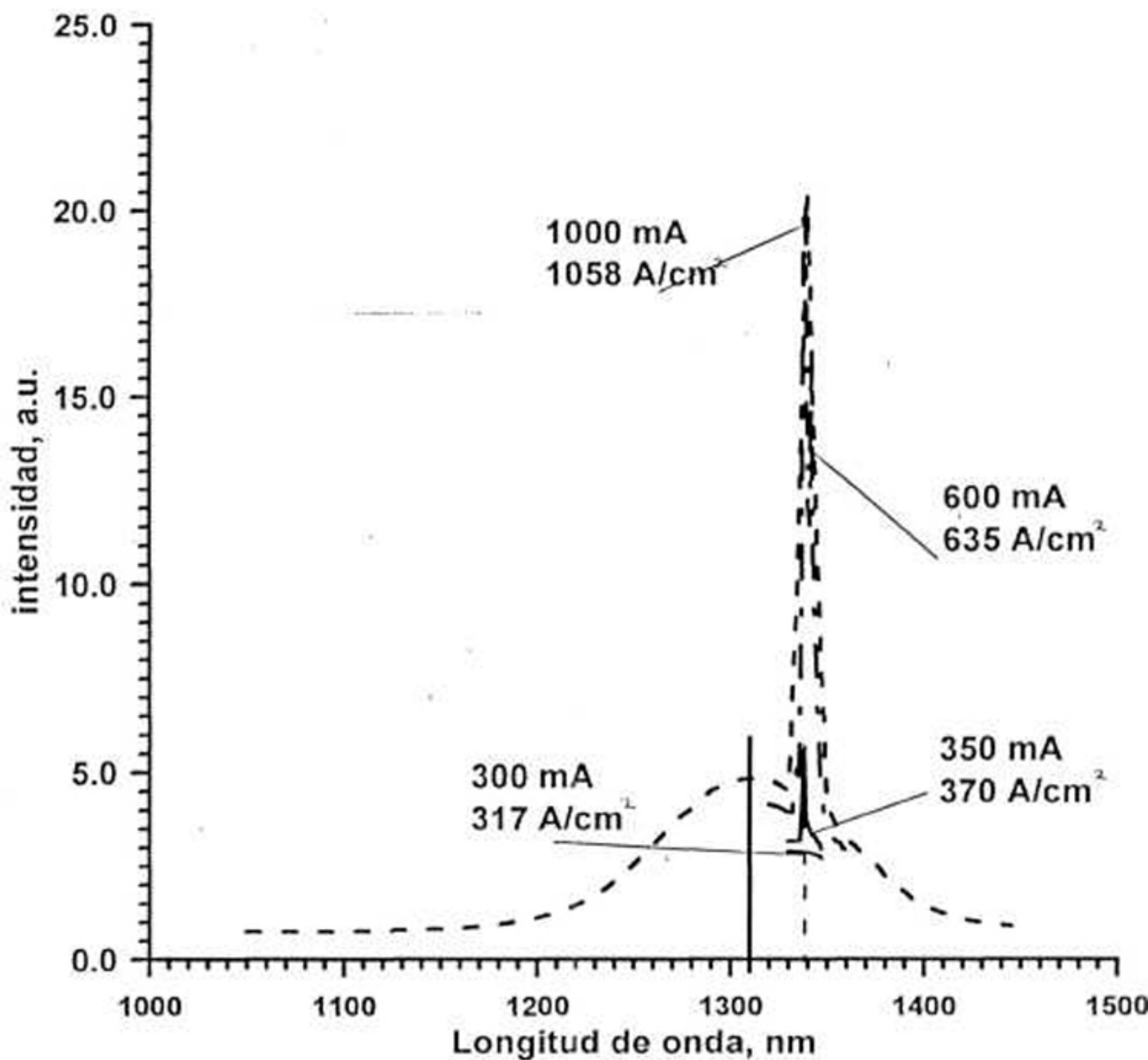


Fig. 4.7 Intensidad de corriente contra longitud de onda para la muestra mx103, en la cual no se observa la emisión laser, cuyo pico se encuentra de 1340 nm.

mx104 sample 2 (lasing)

size (8×8) 292×292

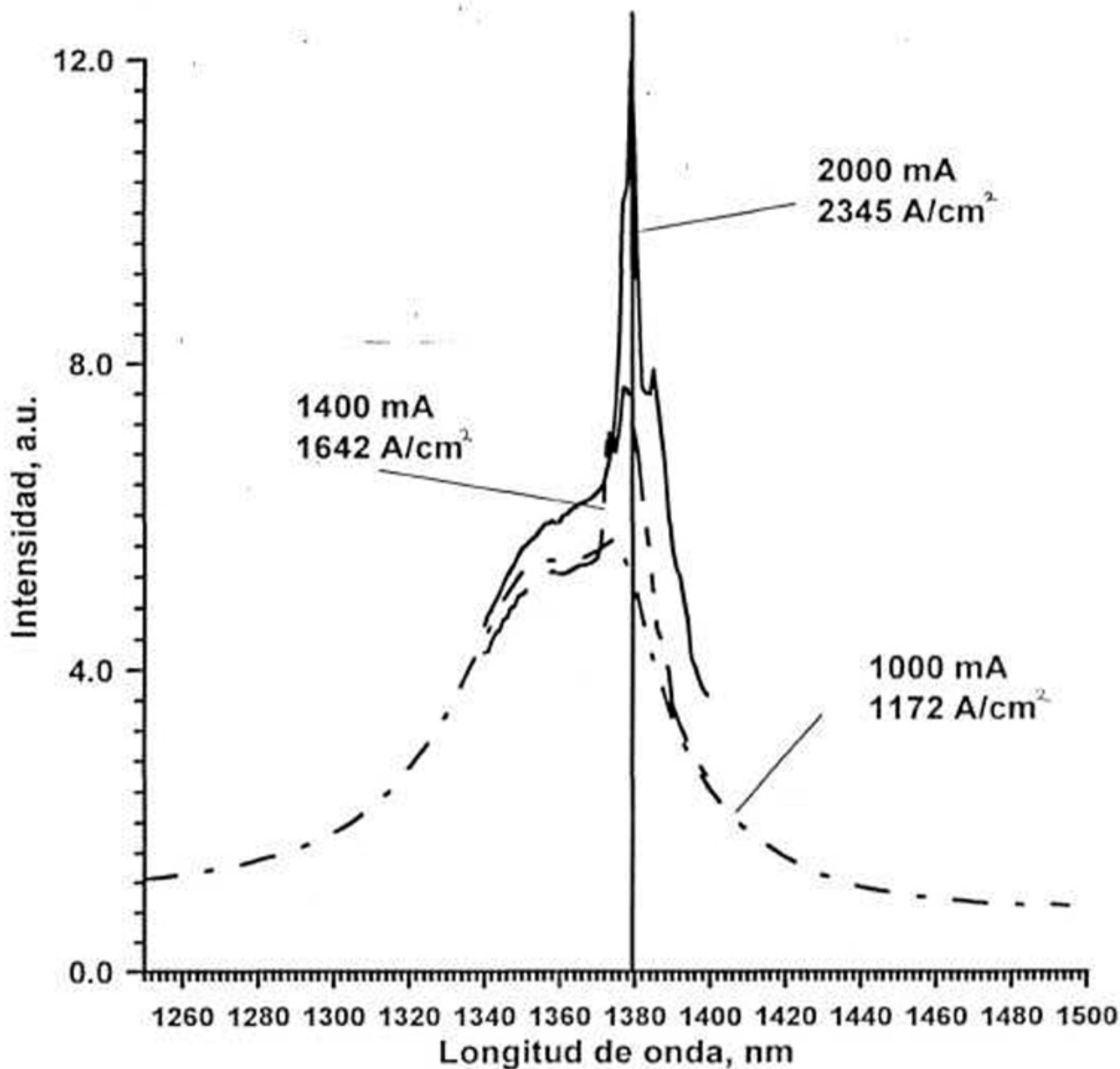


Fig. 4.8 Intensidad de corriente contra longitud de onda para la muestra mx104, en la cual no se observa la emisión laser, cuyo pico se encuentra de 1380 nm.

Se atacó químicamente el silicio amorfo para abrir ventanas y depositar los contactos metálicos de Au aleado con Zn o Ge, posteriormente se retiró el fotoresist quedando las bandas alternadas de silicio amorfo y Au. Se cortaron los dispositivos mediante clivaje, auxiliándose con un microscopio, cuidando que se tengan cortes paralelos, quedando así los dispositivos terminados (sin encapsular). Las mediciones realizadas a estos dispositivos, mostraron una alta resistividad en los contactos metálicos, lo cual puede deberse a varias razones, como la limpieza al depositar contactos, un ataque químico deficiente, el tipo de material usado como aislante, etc., lo cual queda por determinarse.

4.5 RESULTADOS DE FOTOLITOGRAFÍA

Como se mencionó anteriormente los parámetros importantes en la deposición del fotoresist son el grosor y la uniformidad de la capa depositada. Para el laboratorio de fotolitografía, se diseñó y construyó un girador, el cual sólo tiene una velocidad de rotación. En las figs. 3.6 y 3.7, se muestran algunas partes que conforman este aparato.

Debido a que sólo se cuenta con una velocidad de rotación fija, en este caso sólo se hicieron variaciones en el tiempo de deposición del fotoresist, en el rango entre 15 y 40 seg con pasos de 5 segundos, para ambos procesos (positivo y negativo), observando tanto el grosor de la capa como la uniformidad de la misma.

Otros de los puntos importantes en el procesado de dispositivos es la precisión del alineamiento y es tan importante como la resolución del instrumento usado. Para tal efecto, se diseñó y se construyó una alineadora, con las características expuestas en la sección 3.2.3, en la fig. 3.8, se muestran las partes que la conforman, así como su estructura general.

Para la optimización del proceso positivo, además de la variación del tiempo de rotación, se hicieron variaciones en el tiempo de pre-horneado, el tiempo de exposición y el tiempo de revelado. Para la variación del tiempo de horneado se utilizó el rango entre 15 y 90 seg, con pasos de 5 seg. El rango utilizado para la exposición fue de los 30 a los 90 seg. con pasos de 15 seg., por último el rango del revelado de 15 a 40 seg., con pasos de 5 seg.

Para el proceso negativo (Inversión de Imagen), además de las variaciones anteriores, se estudiaron variaciones en el tiempo del post-horneado y la segunda exposición (flood exposure). Los periodos de tiempo estudiados se determinaron partiendo de las recomendaciones hechas por el fabricante del fotoresist y revelador utilizados. Para todo este análisis se contó con el auxilio de un microscopio metalográfico, el cual nos permitió de manera aproximada medir los grosores y los anchos de las capas de fotoresist. En las fotografías se muestran algunos de los resultados (figs 4.9 y 4.10).

De los experimentos realizados en los parámetros de los procesos de fotolitografía, encontramos que la uniformidad de la capa varía con el tiempo de deposición, encontrándose la mayor uniformidad entre los 25 y 35 seg. de deposición, el grosor de la capa depositada varía con los tiempos de deposición y horneado, para el proceso positivo. Mientras que para el proceso negativo, el grosor depende además del tiempo de post-horneado.

Además de intervenir en el grosor de la película de resist, el tiempo de pre-horneado afecta la estabilidad del resist, observando que para tiempos mayores de pre-horneado, la película se hace menos sensible y llega a fracturarse, mientras que para periodos más cortos, la película no logra eliminar la cantidad de solvente necesaria permitiendo que se puedan incrustar partículas de polvo u otras impurezas que afectan la película.

Se encontró que para ambos el procesos (positivo y negativo) con la temperatura de 94°C y el intervalo de rotación antes mencionado, el tiempo óptimo de pre-horneado es de 30 seg., el cual muestra para el proceso positivo un grosor entre 1.2 y 1.3 μm . Con los mismos parámetros anteriores para el proceso negativo (Inversión de Imagen), con un tiempo de post-horneado de 1 min. 30 seg., el grosor se encuentra entre 0.5 y 0.7 μm . El proceso de post-horneado, aparte de cambiar la estructura química del resist, también puede afectar la película, observándose que para tiempos grandes la película es menos sensible al revelador, y para tiempos menores de post-horneado, la película no logra una reacción completa, dando como resultado películas inhomogéneas o residuos de fotoresist.

El tiempo de exposición, básicamente determina la pendiente del perfil en el fotoresist, encontrando que para un tiempo de exposición de 45 seg. la pendiente tiene aproximadamente un ángulo de 45° , mientras que para un tiempo de 1 min. 15 seg., la pendiente tiene aproximadamente un ángulo de 90° , esto es válido para ambos procesos. Por último, la variación

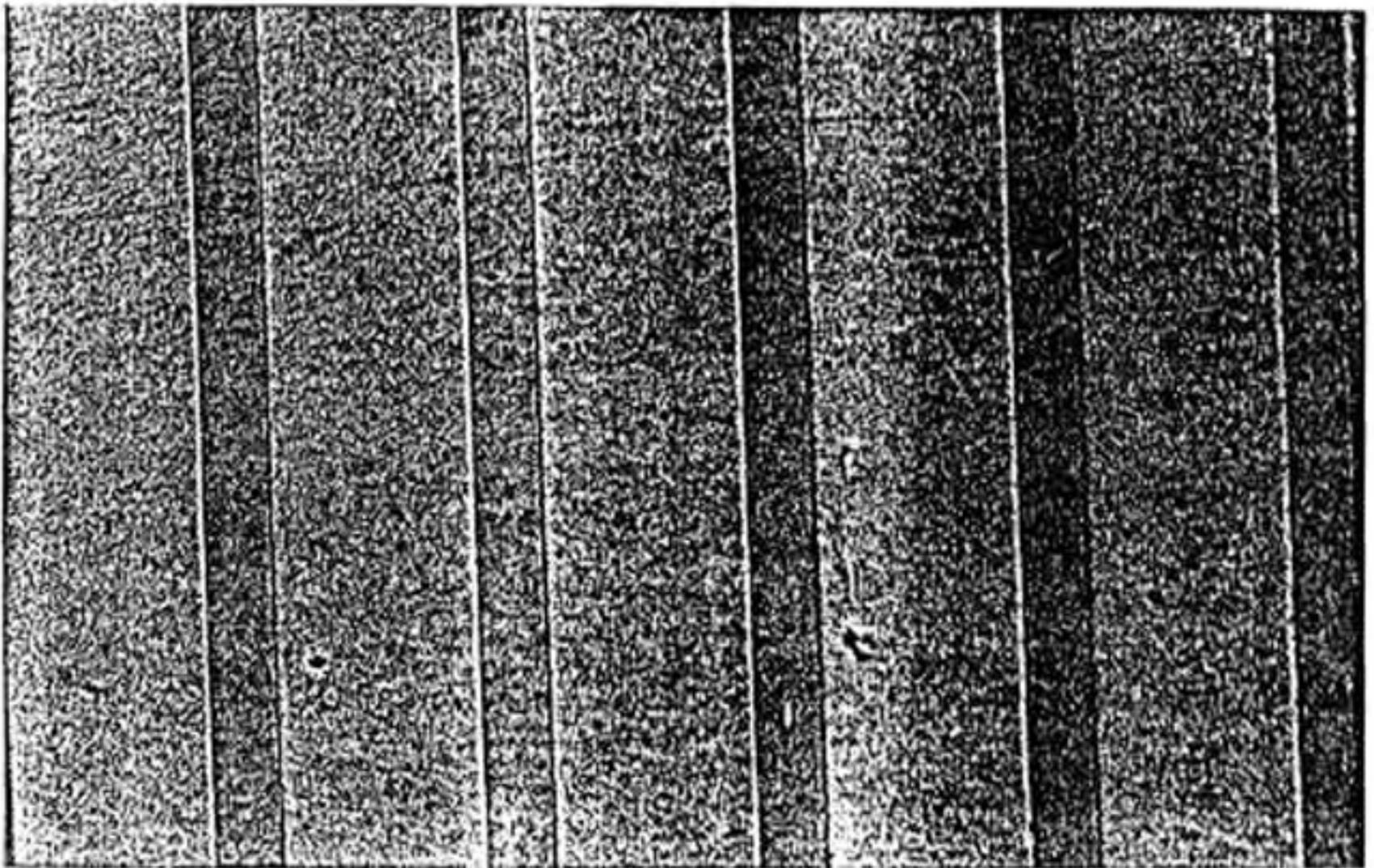


Fig. 4.9 Fotografía de una serie de bandas de fotoresist de $100\mu\text{m}$ de ancho y $300\mu\text{m}$ entre ellas. Esta fotografía fue tomada del resultado del proceso positivo.

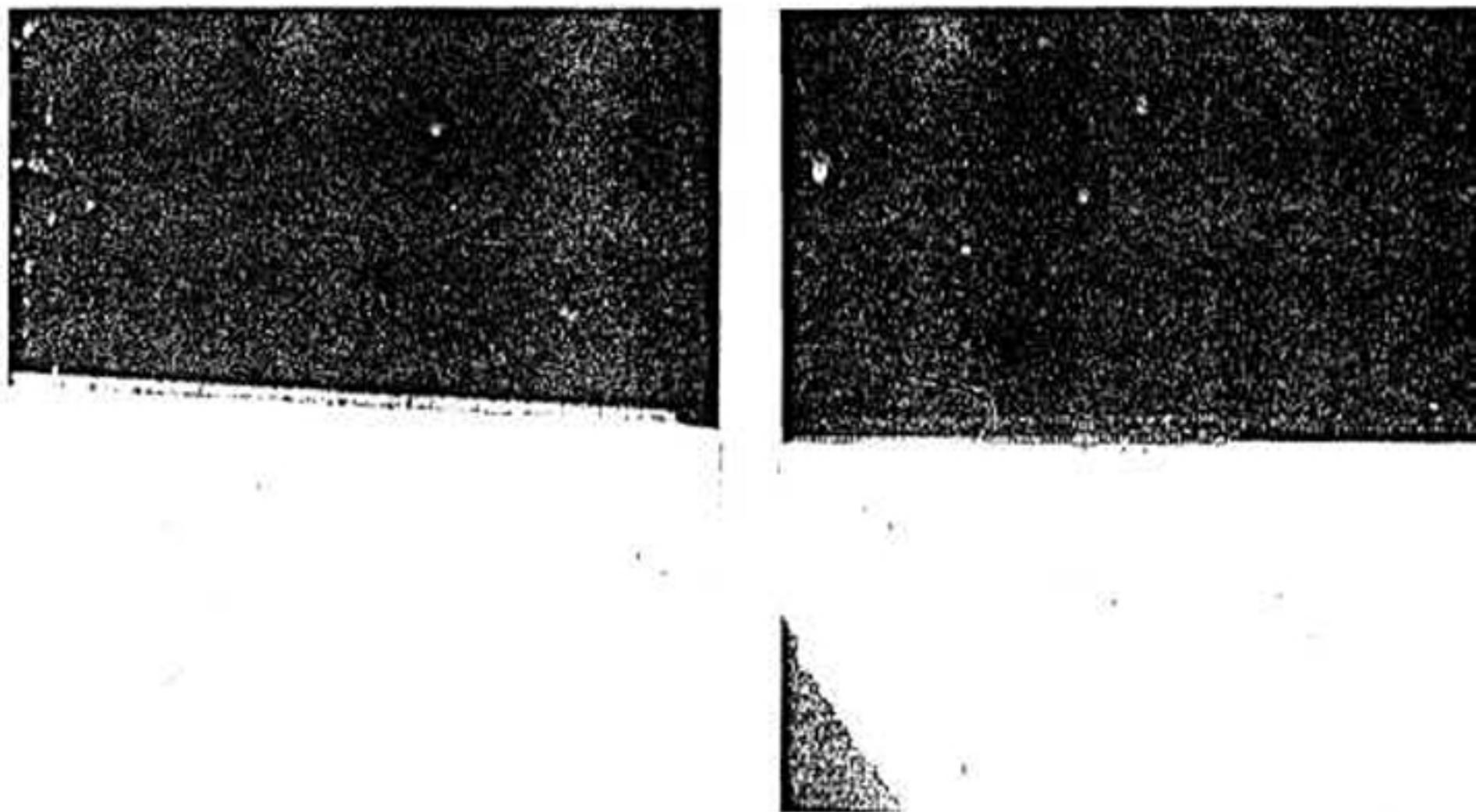


Fig. 4.10 Fotografías de perfiles de fotoresist. procesos negativo (izq) e inversión de imagen (der) ejemplos del esquema mostrado en la fig. 2.9.

en el tiempo de revelado nos proporciona la definición en la película. Observando las barras pudimos determinar que con 30 seg. de revelado las barras muestran un borde aserrado, mientras que para 25 seg. el borde muestra un aserramiento menor, pero existen residuos de fotoresist, donde no debían existir. Aunque el aserrado del perfil también está determinado por la limpieza del proceso y debido a que se ha estado trabajando en un ambiente de atmósfera normal y no en un ambiente de cuarto limpio, no se ha podido determinar si el aserrado del borde se deba solamente a la limpieza del proceso

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

1. Mediante las caracterizaciones de las películas crecidas con sólo una capa, a través de Rayos-X, se demostró que la técnica de LPE es capaz de crecer películas con mínimos desacoplamientos de red.
2. Se calcularon las cantidades necesarias para el crecimiento de las heteroestructuras mediante el modelo expuesto por E. Kuphal.
3. Se crecieron estructuras cuaternarias de $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ sobre sustratos de InP tipo-n con orientación $\langle 100 \rangle$, cuyas densidades de portadores van desde 10^{17} a 10^{18} cm^{-3} . Dichas estructuras constan de 7 capas con las sig. características:

	Composición	Banda de Energía (eV)	Longitud de Onda (μm)	Tipo de conductividad	Grosor de la capa (μm)
Buffer	InP			n	$\sim 1 \mu\text{m}$
Guía de onda	$\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.09}\text{As}_{0.21}\text{P}_{0.79}$	1.2	1.03	n	$\sim 0.3 \mu\text{m}$
Activa	$\text{In}_{0.71}\text{Ga}_{0.23}\text{As}_{0.62}\text{P}_{0.38}$	0.93	1.3	n	$\sim 300 \text{ \AA}$
Anti-redisolución	$\text{In}_0\text{Ga}_0\text{As}_0\text{P}_0$	1.11	1.11	n	entre 200 y 300 \AA
Guía de onda	$\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.09}\text{As}_{0.21}\text{P}_{0.79}$	1.2	1.03	n	$\sim 0.3 \text{ \AA}$
Emisor	InP			p	$\sim 1 \mu\text{m}$
Contacto	$\text{In}_{0.78}\text{Ga}_{0.22}\text{As}_{0.55}\text{P}_{0.45}$	1.34	0.92	p- altamente dopado	$\sim 1 \mu\text{m}$

4. Se crecieron heteroestructuras en el rango de longitud de onda entre 1.3 y 1.4 μm . Las estructuras tienen un máximo desacoplamiento de red de $\pm 0.002 \text{ \AA}$ y la densidad de corriente de umbral se encuentra entre 300 y 400 A/cm^2 a temperatura ambiente (300 K). Estas mediciones fueron realizadas en lasers de área amplia.
5. Se construyeron los dispositivos láser de área angosta (stripe-laser), haciendo la deposición de silicio amorfo, posteriormente se realizó fotolitografía y la deposición de contactos, en los cuales se observa una alta resistividad. La causa de la alta resistividad aún queda por investigarse.
6. Se diseñaron y construyeron un girador y una alineadora para el laboratorio de fotolitografía.
7. Se optimizaron los parámetros fotolitográficos del perfil del fotoresist para ambos procesos positivo y negativo, quedando pendiente la rugosidad de los bordes. Encontrándose la mayor uniformidad entre los 25 y 35 seg. de deposición.
8. Se encontró que para ambos el procesos (positivo y negativo) con la temperatura de 94°C y el intervalo de rotación antes mencionado, el tiempo óptimo de pre-horneado es de 30 seg., el cual muestra para el proceso positivo un grosor entre 1.2 y 1.3 μm . Con los mismos parámetros anteriores para el proceso negativo, con un tiempo de post-horneado de 1 min. 30 seg., el grosor se encuentra entre 0.7 y 0.5 μm .
9. Se determinó que el tiempo de exposición, básicamente determina la pendiente del perfil en el fotoresist, encontrando que para un tiempo de exposición de 45 seg. la pendiente tiene aproximadamente un ángulo de 45°, mientras que para un tiempo de 1 min. 15 seg., la pendiente tiene aproximadamente un ángulo de 90°, esto es válido para ambos procesos.
10. Por último, con la variación en el tiempo de revelado pudimos observar que con 30 seg. de revelado las bandas muestran un borde aserrado, mientras que para 25 seg. el borde muestra un aserramiento menor, pero existen residuos de fotoresist, donde no debían existir. Aunque el aserrado del perfil también está determinado por la limpieza del proceso y debido a que se ha estado trabajando en un ambiente de atmósfera normal y no en un ambiente de cuarto limpio, no se ha podido determinar si el aserrado del borde se deba sólo a la limpieza del proceso.

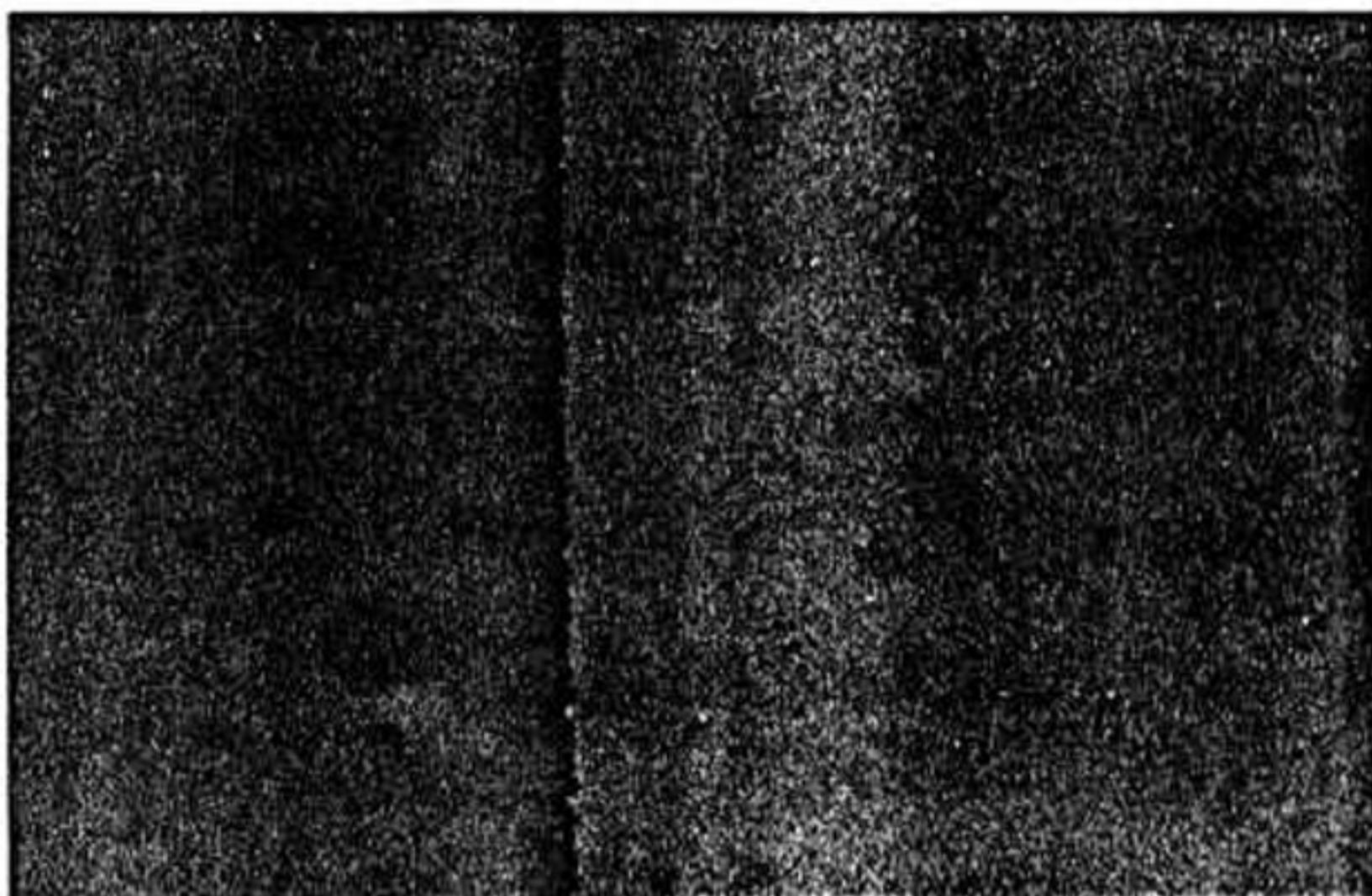


Fig. 5.1 En esta fotografía se aprecia el borde aserrado de una banda de fotoresist. Esta fotografía fue tomada del resultado del proceso positivo.



Fig. 5.2 Fotografía de un perfil de fotoresist, mostrando inversión de imagen, en la cual podemos apreciar lo esquematizado en la fig. 2.10.

APÉNDICE A

DIAGRAMAS DE FASE DE InGaAsP, InGaAs E InP CON EMPATE DE RED EN LA CARA (100)InP.

Los cálculos de los diagramas de fase de InGaAsP/(100)B InP utilizan el modelo de Jordan e Ilegems, pero los resultados experimentales, resultan pobres para los datos experimentales, o requieren parámetros adicionales para obtener un resultado satisfactorio. Los modelos de equilibrio son incapaces de predecir la dependencia de los datos medidos con respecto a la orientación del sustrato⁽¹⁷⁾. Ante esta dificultad, E Kuphal, encontró funciones ajustadas a datos experimentales para la orientación (100). Denotando estos como diagramas de fase empíricos

A.1 MEDIDAS DE LOS DATOS DEL DIAGRAMA DE FASE.

Un punto del diagrama de fase sólido-líquido incluye el conocimiento de las fracciones atómicas de los elementos en el líquido, $\chi_{Ga}^l, \chi_{As}^l, \chi_{In}^l, \chi_P^l$, (donde la suma es unitaria). La temperatura líquido T^l , los parámetros de composición x y y del sólido en equilibrio con el líquido, la orientación del sustrato y la temperatura de crecimiento T^c .

A.2 DATOS DEL LÍQUIDO

Las fracciones atómicas en el líquido, fueron calculadas pesando los componentes de la mezcla In, GaAs, InAs e InP. Las temperaturas de líquido fueron calculadas usando la técnica de la disolución de la semilla.

A.3 DATOS DEL SÓLIDO.

Los parámetros de composición x y y de las capas epitaxiales, fueron medidos por pruebas de análisis electrónico. Deduciéndose el desacoplamiento de red $\Delta a/a$ a temperatura ambiente por difracción de rayos-X y la brecha de energía por medio de fotoluminiscencia. Encontrando la siguiente expresión

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\alpha(x,y) - \alpha(\text{InP})}{\alpha(\text{InP})} = 0.03227y - 0.07128x + 0.002214xy \quad (\text{A.1})$$

Para las relaciones entre x y y son

$$x = 0.4527y / (1 - 0.0311y) \quad (\text{A.2})$$

$$y = x / (0.4527 + 0.0311x) \quad (\text{A.3})$$

Asumiendo $\Delta a/a = 0$ se encuentran los siguientes límites

$$0 \leq y \leq 1, \quad 0 \leq x \leq 0.47 \quad (\text{A.4})$$

Para la brecha de energía se utiliza la sig. expresión

$$\frac{E_g}{eV} = 1.35 - 0.738y + 0.138y^2 \quad (\text{A.5})$$

Diagrama de fase de $\text{InP}(x=y=0)$

Este es calculado por la fórmula

$$\frac{\Delta a}{a} = 0 \quad x'_p = 1.76 \times 10^3 \exp\left(-\frac{31411}{T' K}\right) \quad (\text{A.6})$$

Diagrama de Fase de $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ ($y=1$)

El parámetro de composición x está determinado por $\Delta a/a$, de la ec (A.1)

$$\Delta a/a = 0.0691(0.467 - x) \quad (\text{A.7})$$

Para el rango de temperatura de 570 a 660 °C se pueden usar las siguientes expresiones

$$\chi'_{\text{Ga}} = 1.204 \exp\left(-\frac{3584}{T' K}\right) \quad (\text{A.8})$$

$$\chi'_{\text{As}} = 213.9 \exp\left(-\frac{7519}{T' K}\right)$$

Diagrama de Fase para $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$

Para la epitaxia en fase líquida, se ha aplicado el método de solución en dos fases, donde una solución de $\text{In} + \text{InP} + \text{GaAs}$ es saturada en T^1 por un exceso de InP y el crecimiento se realiza en T^2 , debido a la diferencia en disoluciones la diferencia entre T^1 y T^2 debe ser 15°C (en $T^2 = 630^\circ\text{C}$). Para el límite ternario donde la dependencia de la temperatura es mejor conocida. La función es

$$\chi_{Ar}^I = \exp(-7181/T^I) [3.8451 \times 10^{14} \chi_{Ga}^I - 5.6805 \times 10^6 (\chi_{Ga}^I)^2 + 5.0985 \times 10^8 (\chi_{Ga}^I)^3 - 2.6191 \times 10^{10} (\chi_{Ga}^I)^4 + 7.0231 \times 10^{11} (\chi_{Ga}^I)^5 - 7.6075 \times 10^{12} (\chi_{Ga}^I)^6] \quad (A.9)$$

Para la solución en dos fases dependiente de x es

$$\chi_{Ga}^I = \exp(-3584/T^I) (0.70694x + 3.4624x^2 - 8.7492x^3 + 36.554x^4 - 32.878x^5) \quad (A.10)$$

Para la concentración de fósforo:

$$\chi_P^I = \exp(-11411/T^I) \times 10^2 [13.305(1-y) - 4.7256(1-y)^2 + 12.417(1-y)^3 - 3.3953(1-y)^4] \quad (A.11)$$

BIBLIOGRAFIA

- (1) **Keiser, Gerald.** *Optical Fiber Communications*. McGraw-Hill. 1984 pp. 1-8, 302-306.
- (2) **Yariv, Amnon.** *Optical Electronics Third Edition*. CBS. College Publishing. 1985. pp.
- (3) **Garbuzov, D.Z. and Khalfin, V.B.** *Quantum Well Lasers*. Academic Press. 1993. pp. 277-322
- (4) **Mishournyi-Gorbachev-Berishev.** *Lasers Semiconductores I, Principios de Funcionamiento*. I.I.C.O., U.A.S.L.P., 1996
- (5) **Sze, S. M.** *Physics of Semiconductor Devices, 2nd. Edición*. John Willey & Sons. 1981
- (6) **Willarson Beer.** *Semiconductors and Semimetals Vol 2, Physics of III-V Compounds*. Academic-Press, 1996. pp. 371-378.
- (7) **Jordam and Hegems.** *Solid-Liquid Equilibria for Quaternary Solid Solutions Involving Compound Semiconductors in the Regular Solution Approximation*. *J. Phys. Chem. Solids*, 1975, Vol. 36, pp 329-342, Pergamon Press.
- (8) **Keller, Seymour P.** *Handbook Semiconductors 3*, North-Holland Publishing Company, 1983, pp. 415-496
- (9) **Swalin, R.A.** *Termodinamics of Solids*, John Willey & Sons. 1972. pp. 141-186
- (10) **White, William B.** *Crystal Growth A Tutorial Aproch.*, North Holland Publishing Company. 1979
- (11) **Shigehisa Arai, Masahiro Asada, et al.** *1.6mm Wavelength GaInAsP InP*

BH Lasers, I.E.E.E. Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-17 NO. 5, May 1981

- (12) **Kuphal, E.**, *Phase diagrams of InGaAsP, InGaAs and InP Lattice-Matched to (100)InP. Journal of Crystal Growth 67(1984) 441-457, North-Holland, Amsterdam*
- (13) **Saleih B. E. A., Teich Malvin Carl.** *Fundamentals of Photonics, John Willey & Sons, 1991, pp. 497-501*
- (14) **Murarka Shyam P., Peckerer Martin C.**, *Electronic Materials, Science and Tecnology. Academic Press, 1989, pp. 405-410, 459-490*
- (15) **Chris A. Mack.** *Theory and Techniques in Optical Litigraphy, (Pre-plublished edition) SEMATECH, 1991*
- (16) *Az Product Bulletin "Positive Resit with AZ5200 Series", Microphase.*
- (17) *Manual del controlador Eurotherm*
- (18) *OperaTing Instructions, Johnson Matthey HP series, Hidrogen Purifier y Instruction manual for vacuum Measuring Intruments*
- (19) **Allen, Foster and Yung-Tsaig Yen,** *Deep U.V. Hardering of Positive Photoresit Patterns, Journal of Electrochemical Society, Acelerated Brief Comunications*
- (20) **Willarson Beer.** *Semiconductors and Semimetals Vol 22, Lightwave Communications Tecnology. Academic Press, 1985, pp. 2-58*
- (21) **Willarson Beer.** *Semiconductors and Semimetals Vol 14, Lasers, Junctions, Transport. Academic Press, 1979, pp. 65-130*
- (22) **Casey, Jr. H.C., Panish, M.B.** *Heterostructure Lasers: Part A y B, Academic Press, 1978*