

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

E.T.S.I.TELECOMUNICACIÓN

**Crecimiento por MBE, fabricación y caracterización
de láseres de AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs (111)B para
emisión óptica con $\lambda > 1\mu\text{m}$.**

TESIS DOCTORAL

D. Jorge Julián Sánchez Martínez
Licenciado Ciencias Físicas

Madrid, Septiembre de 1999

Tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la
Universidad Politécnica de Madrid, el día 14 de
DICIEMBRE de 1999.

Presidente D. ENRIQUE CALLEJA PARDO

Vocal D. IGNACIO BERNILIAS MUOSCARPO

Vocal D. CHANTAL FONTAINE

Vocal D. RAFAEL GARCIA ROSA

Secretario D. JOSE LUIS SANCHEZ DE ROSAS

Realizado el acto de lectura y defensa de la Tesis el día
1 de MARZO de 2000

en MADRID

Calificación SOBRESALIENTE
CUM LAUDE

EL PRESIDENTE



LOS VOCALES



EL SECRETARIO



Resumen.

Esta memoria presenta un estudio del crecimiento por MBE, fabricación y caracterización de láseres de pozo cuántico de AlGaAs/GaAs/InGaAs sobre sustratos de GaAs (111)B con longitudes de onda de emisión por encima de la micra.

Comenzaremos mostrando los diagramas de reconstrucciones superficiales RHEED que presentan las superficies de GaAs (111)B en condiciones dinámicas y estáticas, con el fin de utilizarlos posteriormente en la determinación de las condiciones de crecimiento de las distintas capas epitaxiales que se verán involucradas en el crecimiento final de los dispositivos. Mostraremos a continuación un estudio por microscopía Nomarsky y de fuerza atómica (AFM) de distintas homoepitaxias de GaAs (111)B en sustratos desorientados y nominales donde se evidencia que las condiciones de crecimiento óptimas para cada uno de las distintas desorientaciones son distintas, resultado nada sorprendente habida cuenta de la distinta estructura microscópica de cada superficie. Los sustratos vecinales estudiados son de dos tipos: desorientados hacia las direcciones $\langle -211 \rangle$ y desorientados hacia las direcciones $\langle 2-1-1 \rangle$. Aunque opuestas, dichas direcciones no son equivalentes debido a la simetría de orden 3, y no de orden 2, que poseen los planos $\{111\}$. Una de las contribuciones originales de esta tesis es la consecución de unas condiciones de crecimiento para la homoepitaxia en la superficie desorientada hacia las direcciones $\langle -211 \rangle$ en las cuales no se muestra una morfología en la distribución de sus escalones atómicos en forma de zig-zag, como recoge la bibliografía hasta la fecha, pudiéndose llegar por vez primera a una completa optimización de la homoepitaxia en estas superficies desorientadas. Resultado de ello es que la rugosidad conseguida en este tipo de superficies desorientadas entra en el estado del arte de la homoepitaxia por MBE en superficies (111)B, ya sean nominales o vecinales. Asimismo, se han establecido unas condiciones de crecimiento adecuadas para el $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ ($y > 40\%$) en la misma superficie (111)B vecinal, con las que se minimiza la influencia en heteroestructuras de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ crecidas sobre ellas bajo sus condiciones óptimas. Dicho resultado es de suma importancia en el desarrollo de dispositivos en configuración de guía-onda, pues asegura que las propiedades ópticas de los pozos de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ no se alteran al complicar la estructura de epicapas, abriendo las puertas para el crecimiento de tales dispositivos.

En una fase posterior, compararemos la dinámica de relajación de capas pseudomórficas de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ crecidas sobre las dos superficies (111)B desorientadas mostradas en el apartado anterior. Mostraremos la primera evidencia experimental de que la dinámica de relajación de este tipo de estructuras pseudomórficas es dependiente de la superficie vecinal usada. A la vista de nuestros resultados, mostraremos que éstos nos llevan a esperar la consecución de dispositivos láser pseudomórficos hasta una longitud onda de $1.1\ \mu\text{m}$ utilizando nuestros substratos (111)B desorientados hacia las direcciones $\langle -211 \rangle$. La consecución de estructuras pseudomórficas permite asegurar que las intercaras de las heteroestructuras de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ coherentes al substrato son termodinámicamente estables, inhibiendo de esta manera el desarrollo de defectos en las mismas, cuya génesis degradaría las propiedades de los dispositivos.

El crecimiento coherente al substrato de las heteroestructuras de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ (111)B desarrolla un campo eléctrico intrínseco en los pozos cuánticos: el campo piezoeléctrico. Hemos caracterizado el valor de tal parámetro en función del contenido de indio presente en los pozos pseudomórficos en un amplio rango de temperaturas. Por primera vez, se evidencia un efecto piroeléctrico dependiente de la concentración de indio, al menos en las composiciones estudiadas.

Finalmente, hemos conseguido fabricar en nuestro Departamento dispositivos láser operando en continua ("*cw operation*") con unas longitudes de onda de $1.055\ \mu\text{m}$ a temperatura ambiente, unas densidades de corriente umbral mínimas del orden de $110\ \text{A}/\text{cm}^2$ y unas eficiencias cuánticas internas en torno al 70%. Estos valores no están lejanos de los mejores publicados para estructuras láser de diseño similar crecidas sobre la dirección (001) y probablemente se acercarán a ellos con una ulterior optimización del diseño de tales dispositivos.

Índice general

I.- Introducción a la Tesis.....	1
I.1.- Motivación y objetivos.....	1
I.2.- Fundamentos del crecimiento epitaxial pseudomórfico.....	4
I.2.a.- Deformación de capas epitaxiales.....	4
I.2.b.- Efecto de la deformación en la estructura de bandas, dirección (111)...	9
I.2.b.1- Caso de la banda de valencia.....	10
I.2.b.2- Caso de la banda de conducción.....	11
I.2.b.3- Balance energético de los efectos de la deformación.....	12
I.2.c.- El campo piezoeléctrico.....	13
I.2.d.- Dislocaciones en semiconductores III-V con estructura zinc-blenda.....	16
Referencias capítulo I.....	21
II.- Generalidades del crecimiento por MBE sobre superficies GaAs (111)B.....	23
II.1.- Introducción a la cristalografía de las capas epitaxiadas sobre GaAs (111)..	23
II.1.a.- Superficies vecinales sobre GaAs (111)B.....	26
II.2.- Visión general de los procesos de crecimiento.....	30
II.3.- Análisis de las superficies (111)B mediante RHEED.....	33
II.3.a.- Principios de estabilidad de una reconstrucción.....	33
II.3.b.- Modelos propuestos para las reconstrucciones de la superficie GaAs (111)B.....	35
II.3.b.1.- La reconstrucción 2x2.....	35
II.3.b.2.- La reconstrucción $\sqrt{19} \times \sqrt{19}$	38
II.3.b.3.- Las reconstrucciones (1x1).....	41
II.3.c.- Observación por RHEED y análisis de los dominios de las reconstrucciones en GaAs (111)B.....	42
II.3.c.1.- Reconstrucciones bajo condiciones estáticas.....	43
II.3.c.2.- Reconstrucciones bajo condiciones dinámicas.....	46
II.4.- Defectos sobre las superficies (111)B desorientadas.....	49
II.4.a.- Las maclas.....	49
II.4.b.- Las pirámides.....	50
II.5.- Conclusiones.....	54
Referencias capítulo 2.....	55
III.- Optimización del crecimiento de compuestos III-V por Epitaxia de Haces Moleculares sobre sustratos de GaAs (111)B.....	57
III.1.- Presentación del sistema MBE.....	57
III.1.a.-Principios.....	57
III.1.b.-Presentación del sistema experimental.....	64
III.1.c.-Los medios de control de los parámetros y estado del crecimiento.....	67
III.2.- Optimización del crecimiento de GaAs sobre sustratos (111)B vecinales.....	71
III.2.a.-Crecimientos a 600°C.....	73
III.2.a.1.-Influencia del cociente V/III.....	73
III.2.a.2-Influencia de la velocidad.....	79
III.2.a.3-Condiciones óptimas de crecimiento de superficies GaAs (111)B: dependencia con la desorientación.....	82
III.2.a.4-Defectos característicos de las superficies de GaAs(111)B $\rightarrow$ [-211].....	86

III.2.a.4.1-Cociente $V/III = 1.0$	86
III.2.a.4.2-Cociente $V/III \geq 1.5$	87
III.2.b.-Discusión de los resultados obtenidos.....	89
III.3.- Optimización del crecimiento de capas de $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ sobre sustratos (111)B vecinales.....	91
III.3.a.- Influencia del cociente V/III en las propiedades morfológicas.....	93
III.3.b.- Influencia del cociente V/III de las capas de $AlGaAs$ en las propiedades ópticas de las heteroestructuras de $InGaAs/GaAs$	99
III.4.- Crecimiento de heteroestructuras de $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ sobre sustratos (111)B vecinales.....	102
III.4.a.- Condiciones de crecimiento.	102
III.4.b.- Heteroestructuras de $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ en otros sustratos (111)B vecinales.....	106
III.5.- Conclusiones.....	110
Referencias capítulo 3.....	111
IV.- Espesor crítico y mecanismos de relajación en capas de $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ (111)B.....	115
IV.1.- Noción de espesor crítico.....	115
IV.1.a.- Generación de dislocaciones de desajuste.....	116
IV.1.b.- Comienzo del crecimiento tridimensional: modo Stranski-Krastanov.	123
IV.2.- Perspectivas de dispositivos optoelectrónicos por encima de la micra: pozos pseudomórficos de 100 Å.....	126
IV.2.a.- Caracterización óptica.....	127
IV.2.b.- Caracterización estructural.....	132
IV.3.- Relajación de heteroestructuras de $InGaAs/GaAs$ (111)B.....	134
IV.3.a.- Perspectiva bibliográfica.....	134
IV.3.b.- Resultados experimentales: caso de un solo pozo.....	137
IV.3.c.- Resultados experimentales: caso de más de un pozo.....	143
IV.4.- Perspectivas de longitud de ondas largas para dispositivos optoelectrónicos con pozos pseudomórficos de $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ (111)B.....	150
IV.5.- Conclusiones.....	154
Referencias capítulo 4.....	155
V.- Determinación de campos piezoeléctricos en heteroestructuras pseudomórficas de $In_xGa_{1-x}As/GaAs$ (111)B.....	159
V.1.- Aspectos experimentales generales: Introducción a las espectroscopías de modulación.....	159
V.2.- Análisis de la forma de línea de la fotocorriente diferencial.....	161
V.2.a.-Forma espectral asociada a transiciones electrónicas.....	161
V.2.b.-Forma de línea de la fotocorriente modulada.....	165
V.3.- Descripción del sistema experimental usado.....	167
V.4.- Análisis e interpretación de los espectros obtenidos.....	171
V.5.- Resultados experimentales.....	177
V.5.a.- Perspectiva bibliográfica.....	177
V.5.b.- Determinación experimental de campos piezoeléctricos.....	182
V.5.b.1- Resultados para el 12% de Indio.....	185
V.5.b.2- Resultados para el 17% de Indio.....	187
V.5.b.3- Resultados para el 21% de Indio.....	190
V.5.b.4- Resultados para el 24% de Indio.....	191

V.5.b.5- Resultados para el 30% de Indio.....	193
V.6.- Análisis y discusión de los resultados experimentales.....	195
V.7.- DP como técnica de caracterización ex-situ de la calidad de pozos cuánticos de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$	198
V.8.- Conclusiones.....	200
Referencias capítulo 5.....	201
VI.- Crecimiento, tecnología y caracterización de láseres piezoeléctricos de $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (111)B.....	205
VI.1.- Aspectos generales: introducción a los fundamentos de los láseres de semiconductor.....	206
VI.1.a.-Procesos ópticos en semiconductores.....	206
VI.1.b.- Dispositivos láser de semiconductor.....	212
VI.2.- Crecimiento y tecnología de fabricación de diodos láser de pozo cuántico coherente de $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (111)B para longitudes de onda superiores a la micra...	215
VI.2.a.-Crecimiento de diodos láser.....	215
VI.2.b.-Tecnología de fabricación de diodos láser.....	218
VI.3.- Caracterización de dispositivos láser.....	225
VI.3.a.- Presentación de las muestras.....	226
VI.3.b.- Caracterización óptica.....	227
VI.3.c.- Caracterización P_s -I-V de dispositivos láser en la dirección (111)B con emisión por encima de la micra.....	229
VI.3.d.- Discusión de los resultados obtenidos.....	235
VI.4.- Conclusiones.....	239
Referencias capítulo 6.....	241
VII.- Conclusiones y trabajo futuro.	245