

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
E.T.S.I. DE TELECOMUNICACIÓN

**Contribución al desarrollo de fotorreceptores de
InGaAs y a la integración de estructuras
metamórficas sobre sustratos de GaAs**

TESIS DOCTORAL

Autor

D. Juan Francisco Valtueña Pablo

Director:

D. José Ignacio Izpura Torres

Dr. Ingeniero de Telecomunicación

Madrid, junio de 1997

Tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la
Universidad Politécnica de Madrid, el día 23 de Julio - 1997

Presidente D. Elias Muñoz-Mendoza

Vocal D. Bernán González Arz

Vocal D. Luisa González Soto

Vocal D. Rafael García Roja

Secretario D. José Luis Sánchez-Rojas

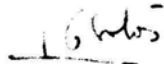
Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 29
de Julio de 1997
en MADRID

Calificación APTO CUM LAUDE (P. U.)

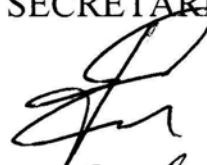
EL PRESIDENTE



LOS VOCALES



EL SECRETARIO


J. L. Sánchez-Rojas

Resumen

El desarrollo de las comunicaciones por fibra óptica con una longitud de onda de trabajo en torno a $1.55\mu\text{m}$ hace necesaria la utilización de materiales como el $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ con $x > 50\%$, que se obtiene por crecimientos epitaxiales sobre sustratos de InP. Sin embargo, la tecnología actual en semiconductores III-V se encuentra más desarrollada sobre sustratos de GaAs. La integración de los dispositivos ópticos activos: detectores, moduladores, emisores..., sobre sustratos de GaAs supone un avance en cuanto a su utilización con etapas de amplificación y control desarrolladas en una tecnología más consolidada como la de circuitos de microondas sobre GaAs.

La dificultad de esta integración radica en la diferencia de parámetro de red entre el GaAs y el InGaAs con alto contenido de Indio. El InGaAs de alta calidad (libre de defectos) sobre GaAs solamente se puede conseguir cuando su parámetro de red en el plano se adapta al del sustrato infiriendo una deformación de la red cristalina. Esto sólo es posible por debajo de un espesor crítico, determinado por el balance energético entre la deformación elástica y la energía para crear una dislocación. Para conseguir altos contenidos de Indio es necesario controlar el proceso de relajación y aislar de dislocaciones la región superior.

El desajuste se acomoda por medio de dislocaciones en la interfase entre el material deformado y el sustrato (relajación plástica) o por medio de un cambio de forma asociado con la aparición de rugosidad en forma de islas o estrías (relajación elástica). Para controlar el proceso de relajación, es necesario que la multiplicación de dislocaciones sea el mecanismo dominante, ya que no produce inhomogeneidades en la morfología superficial (planaridad superficial) y posibilita la integración de dispositivos sobre la estructura de adaptación.

Se han utilizado capas con una variación lineal del contenido de In (graduales) que satisfacen una relajación por multiplicación de dislocaciones. Sin embargo, cuando aumenta el contenido final de In en el gradual se observa una transición tanto en el modo de crecimiento como en el mecanismo dominante en relajación. Aparecen estrías claramente definidas orientadas en la dirección $[1-10]$ asociadas a una densidad de dislocaciones que ascienden hasta la superficie en los valles de la rugosidad. Este fenómeno, en oposición al comportamiento en capas sencillas, no se produce por un exceso de deformación por encima de un cierto valor crítico.

El estudio del proceso ha permitido asociar el crecimiento de las estrías con una velocidad no nula del crecimiento hacia un frente rugoso bajo condiciones de baja deformación (dependiente del gradiente de composición utilizado). La velocidad de la transición del modo de crecimiento viene determinada por la movilidad de las especies (átomos de Ga e In en condiciones de saturación de As) en la superficie hasta su adsorción en posiciones de la red durante el crecimiento. Se ha estudiado la influencia de los parámetros estructurales de diseño (perfil de composición) y de crecimiento (principalmente la temperatura) sobre la morfología y distribución de dislocaciones en la estructura de adaptación. Para crecimientos optimizados realizados a baja temperatura se han conseguido estructuras hasta el 60% de contenido de In cuasi-especulares de alta calidad, potenciales de ser utilizadas como sustratos de parámetro de red ajustable en futuros crecimientos de dispositivos haciendo posible su integración sin la pérdida de sus cualidades.

Por otro lado y como campo emergente en el desarrollo de aplicaciones y dispositivos optoelectrónicos, se han estudiado estructuras de InGaAs sobre sustratos de GaAs con orientación $\langle 111 \rangle_B$. La estructura cristalina zincblenda (propia de los semiconductores III-V analizados) es una estructura polar, que presenta una polarizabilidad nula cuando la red cristalina se encuentra no deformada. En el caso de que la red se encuentre deformada y dependiendo de la orientación del tensor de esfuerzos, aparece un campo eléctrico interno sobre las capas deformadas (campo piezoeléctrico). En concreto, la utilización de capas pseudomórficas de InGaAs crecidas sobre sustratos de GaAs con orientación $\langle 111 \rangle$ maximizan el campo piezoeléctrico, que aparece únicamente en el interior de los pozos cuánticos. Esta particularidad ha sido utilizada como parámetro de diseño en diversas aplicaciones, dando lugar a configuraciones con propiedades muy alentadoras para el desarrollo de nuevos dispositivos. En particular su aplicación sobre fotodetectores (estructuras p-i-n de múltiples pozos cuánticos) da lugar a configuraciones de potencial con mínimos relativos de las bandas de conducción y valencia espacialmente separados dentro de la región activa del dispositivo (región intrínseca). Estas configuraciones permiten el almacenamiento de portadores en el dispositivo con una pequeña probabilidad de recombinación. Esta carga puede introducirse óptica o eléctricamente, haciendo de éstos unos dispositivos muy versátiles para aplicaciones electro-ópticas, especialmente si consideramos el mayor espesor crítico obtenido para esta orientación respecto a la "standard" $\langle 001 \rangle$.

El estado de apantallamiento del campo piezoeléctrico, dependiente de la carga acumulada, determina las máximas no linealidades tanto ópticas (por medio del desplazamiento del borde de absorción o emisión) como eléctricas (apantallamiento de las barreras internas de potencial) de estos dispositivos. El número de pozos, su espesor y el de las barreras, se han utilizado como elementos de diseño en la implementación de aplicaciones novedosas como células de memoria con largos periodos de refresco y conmutadores electroópticos biestables.

Indice

CAPITULO I

I Conceptos básicos de relajación

I 1 Deformación y Dislocaciones en la estructura zinc-blenda.	1
i) Relajación. Balance Energético.	3
ii) Relajación de estructuras de composición gradual.	8
I 2 Relajación por frentes rugosos.	13
I 3 Cálculo del espesor crítico en $\langle 111 \rangle$, método de minimización de la energía.	23

CAPITULO II

II Estructuras de adaptación del parámetro de red. Rugosidad superficial.

II 1 Introducción.	29
II 2 Rugosidad superficial: antecedentes.	30
II 3 Resultados de los graduales hasta el 30% de In.	33
II 4 Resultados de los nuevos graduales hasta el 60% de In.	37
II 5 Modelos de formación de la rugosidad.	42
II 6 Influencia del perfil de composición.	46
II 7 Influencia de la velocidad de crecimiento.	50
II 8 Influencia de la temperatura de crecimiento.	54
II 9 Estabilidad térmica.	57
II 10 Discusión de los resultados de rugosidad superficial.	58
II 11 Interacción rugosidad-dislocaciones.	60
II 12 Existencia de frentes facetados.	63
II 13 Nucleación de dislocaciones.	64

CAPITULO III

III Caracterización electro-óptica de estructuras de adaptación del parámetro de red

III 1 Introducción y objetivos.	67
III 2 Fotoluminiscencia.	68
i) Resultados experimentales.	69
III 3 Fotoconductividad resuelta en frecuencia.	74
i) Modelos de conductividad. Interpretación de los espectros.	75
ii) Espectros en presencia de zonas de carga espacial.	79
iii) Resultados de PCFRS en muestras de GaAs.	82
iv) Resultados PCFRS en graduales de $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$.	84
III 4 Caracterización eléctrica.	93
i) Introducción.	93
ii) Activación térmica de la conductividad.	93
III 5 Espectroscopía de Ruido en baja frecuencia.	97
i) Modelos de ruido $1/f$.	98

III 6 Resultados experimentales.	101
i) Fuentes de ruido.	101
III 7 Conclusiones.	112

CAPITULO IV

IV Relajación en estructuras de pozos cuánticos múltiples

IV 1 Introducción.	113
IV 2 Relajación de multicapas InGaAs/GaAs sobre sustratos de GaAs.	115
i) Condiciones de equilibrio energético.	115
ii) Estructuras Metaestables.	118
iii) Resultados experimentales.	120
iv) Morfología superficial.	124
IV 3 Nucleación de dislocaciones en sustratos desorientados.	125
i) Giro elástico.	126
ii) Giro plástico.	129
iii) Muestras sin desorientar.	133
iv) Efecto de la desorientación en la dirección [110].	133
v) Efecto de la desorientación en la dirección [100].	138
vi) Nucleación Anisótropa de dislocaciones.	139
vii) Conclusiones del efecto de la desorientación.	141
IV 4 Caracterización eléctrica y óptica de estructuras p-i-n de múltiples pozos cuánticos.	142
IV 5 Análisis de fotocorriente.	144
IV 6 Espectroscopia de fotocapacidad.	149
IV 7 Espectroscopia de Electroluminiscencia.	155
IV 8 Corrientes de fugas.	159

CAPITULO V

V Estructuras de pozos cuánticos múltiples (MQW) sobre sustratos de GaAs <111>.

V 1 Introducción.	163
V 2 Deformación y campo piezoeléctrico.	164
V 3 Dispositivos PIN de múltiples pozos cuánticos.	166
V 4 Configuraciones de la envolvente de potencial.	167
V 5 Propiedades ópticas.	169
V 6 Fotocorriente resuelta en el tiempo. Respuesta impulsional.	173
V 7 Dinámica de extinción del dipolo interno. Bombeo óptico-pueba eléctrica.	181

CAPITULO VI

VI Estructuras de Envolvente de potencial negativa

VI 1 Introducción.	189
VI 2 Respuesta capacitiva a baja temperatura.	189
VI 3 Transitorios capacitivos: proceso de descarga.	199
VI 4 Aplicación como dispositivos de memoria electro-óptica.	200
VI 5 Comportamiento en polarización directa. Emisión óptica.	204
i) Prodesos de biestabilidad en directa.	204

ii) Barreras de potencial para la inyección de corriente.	205
iii) Evolución de la barrera de potencial.	207
VI 6 Efectos de biestabilidad en I-V resulta en el tiempo.	208
VI 7 Característica I-V bajo iluminación.	210
VI 8 Comportamiento general	215
VI 9 Conclusiones	225

Conclusiones y trabajo futuro	227
-------------------------------	-----

APENDICE Y

Estudio de la relajación y el espesor crítico en orientaciones arbitrarias.	233
---	-----

APENDICE II

Efecto del giro elástico sobre la nucleación de dislocaciones en frentes rugosos.	237
---	-----

REFERENCIAS