

5.4.2 Heteroestructuras n-i-n	209
5.5 Conclusiones.....	210
6. Caracterización de epicapas de GaN plano <i>M</i>	213
6.1 Propiedades estructurales	215
6.2. Fotoluminiscencia polarizada de GaN plano <i>M</i>	219
6.2.1 Resultados teóricos	220
6.2.2 Transiciones intrínsecas.....	222
6.2.3 Transiciones extrínsecas y relacionadas con defectos	230
6.2.4 Determinación de los componentes de deformación en el plano	234
6.3. Caracterización eléctrica.....	241
6.3.1 Determinación de la movilidad y conductividad en el plano	241
6.3.2 Determinación de la concentración residual.....	247
6.3.3 Propiedades de la superficie	250
6.4 Conclusiones.....	256
7. Detectores sensibles a la polarización de la luz.....	259
7.1 Características generales.....	260
7.1.2 Dependencia de la responsividad con el ángulo de polarización de la luz..	261
7.2 Consideraciones de diseño en detectores dicroicos	262
7.2.1 Influencia del espesor de las capas	262
7.2.2 Relación señal a ruido.....	267
7.3 Fotodiodos de barrera Schottky	267
7.3.1 Respuesta espectral.....	268
7.3.2 Detectividad.....	271
7.3.3 Linealidad	272
7.4 Fotodiodos metal-aislante-semiconductor	273
7.5 Configuraciones de detección.....	276
7.6 Conclusiones.....	282
8. Conclusiones y trabajo futuro	285
8.1 Sistemas de baja dimensionalidad basados en nitruros del grupo III	286
8.1.1 Propiedades de los pozos cuánticos de (In,Ga)N/GaN	286
8.1.2 Confinamiento por deformación en sistemas mesoscópicos	287
8.1.3 Dispositivos basados en pozos cuánticos	288

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE ESTRUCTURAS DE BAJA
DIMENSIONALIDAD Y AVANZADAS PARA LA
DETECCIÓN DE RADIACIÓN VISIBLE Y ULTRAVIOLETA
BASADAS EN NITRUROS DEL GRUPO III**

Autor:

D. Carlos Rivera de Lucas
Ingeniero de Telecomunicación

Directores:

D. Elías Muñoz Merino
Catedrático de Universidad

D. José Luis Pau Vizcaíno
Doctor en Ciencias

TESIS DOCTORAL: Estudio de estructuras de baja dimensionalidad y avanzadas para la detección de radiación visible y ultravioleta basadas en nitruros del grupo III

AUTOR: Carlos Rivera de Lucas

DIRECTORES: Elías Muñoz Merino y José Luis Pau Vizcaíno

El tribunal nombrado por el Mgfc. Y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 2 de Julio de 2007, para juzgar la Tesis arriba indicada, compuesto por los siguientes doctores:

Dr. Fernando Calle Gómez (PRESIDENTE)
Dr. Molger T. Grohn (VOCAL)
Dr. Luis López Bouilla (VOCAL)
Dr. Juan Piqueras Piqueras (VOCAL)
Dr. Alvaro de Gamón Fernández González (SECRETARIO)

Realizado el acto de lectura y defensa de la Tesis el día 13 de Julio de 2007 en Madrid acuerda otorgarle la calificación de:

FLB

El Presidente:

El Secretario:

Los Vocales:

Molger T. Grohn

Luis López Bouilla

Resumen

En esta Tesis Doctoral se presenta una contribución al diseño, fabricación y caracterización de estructuras avanzadas para la detección de radiación ultravioleta y visible basadas en nitruros del grupo III. Los nitruros del grupo III se revelan como la familia de semiconductores potencialmente más prometedora para realizar detectores de radiación ultravioleta y visible debido a que, entre otras características, pueden desplazar su borde de absorción desde el infrarrojo (~ 0.7 eV para el InN) hasta el ultravioleta (~ 6.2 eV para el AlN) sin más que variar la composición de la aleación de (Al,Ga,In)N. Las aplicaciones de estos detectores son muy diversas tanto en el ámbito militar como civil, desde instrumentación básica, monitorización de la combustión o astronomía, hasta comunicaciones seguras o detección de misiles, por ejemplo. Por otra parte, las propiedades intrínsecas de estos materiales, como su elevada piezoelectricidad o su simetría cristalina en la fase wurtzita, sugieren la posibilidad de estudiar nuevos tipos de dispositivos aptos para la detección.

El desarrollo de estructuras avanzadas ha seguido dos aproximaciones diferentes. Una consistente en la mejora de los parámetros básicos de los detectores, concretamente, el rango de detección, la selectividad, la sensibilidad y la figura de ruido. Para realizar esta tarea se han empleado estructuras basadas en las propiedades de la baja dimensionalidad. Y otra consistente en la aportación de funcionalidades añadidas a la detección, como son la sensibilidad a la polarización de la luz o la posibilidad de modificar la respuesta espectral de los dispositivos para permitir una detección paso banda. Para cumplir con este objetivo se ha hecho uso de las propiedades de anisotropía óptica de las capas en función de la orientación cristalina y la deformación. La detección en banda estrecha también se ha obtenido por medio del uso de filtros integrados en las estructuras.

Las estructuras de baja dimensionalidad basadas en pozos cuánticos múltiples de (In,Ga)N/GaN fueron propuestas inicialmente para sustituir a los detectores fabricados en capas gruesas principalmente por razones tecnológicas. Este trabajo, sin embargo, se ha enfocado al estudio de las propiedades inherentes de estas estructuras y del material

para la detección desde un punto de vista más fundamental. Las predicciones teóricas y la caracterización tanto eléctrica como óptica demuestran que el comportamiento de los pozos cuánticos de (In,Ga)N/GaN está dominado por el efecto de los campos inducidos por la polarización y por el efecto de la localización originada por la inhomogeneidad en composición del (In,Ga)N. Los campos inducidos por la polarización tienen a su vez dos efectos, uno sobre las propiedades del pozo (intrapozo) y otro sobre la estructura (extrapozo). El efecto intrapozo resulta en la modificación de la estructura de subbandas en el pozo y en la reducción de la fuerza de oscilador de las transiciones observada experimentalmente. El efecto extrapozo da lugar a un campo eléctrico interno que puede oponerse al preexistente en la estructura (el de una unión p-n, por ejemplo) llegando incluso a crear regiones con campo promedio negativo, lo que tiene como consecuencia la formación de mínimos de potencial para la acumulación de portadores. La localización, por otra parte, parece estar relacionada con la captura de huecos en mínimos de potencial ocasionados por la inhomogeneidad en composición del ternario. Esta propiedad es fuente de fotoconductividad persistente y de características de capacidad diferencial negativa. Los resultados experimentales indican que la localización domina en pozos cuánticos de bajo espesor ya para contenidos de In moderados (por encima del 10%).

Se estudiaron también las propiedades de discos cuánticos de (Al,Ga)N/GaN en estructuras nanocolumnares libres de defectos extensos. Este sistema mesoscópico tiene propiedades diferentes a las de su extensión en material compacto. Para explicar los resultados se ha desarrollado un modelo original que explica el mecanismo de confinamiento específico de este tipo de sistemas donde coexisten los efectos de la deformación pura con los campos inducidos por la polarización. El mecanismo, denominado confinamiento por deformación, sugiere que se pueden formar estados separados espacialmente en la dirección del plano de los discos. Por otra parte, los discos cuánticos de (Al,Ga)N/GaN muestran una fenomenología similar a la de los pozos cuánticos de (Al,Ga)N/GaN en lo que se refiere a los campos inducidos por la polarización.

Estas características han sido aprovechadas en los dispositivos basados en pozos cuánticos múltiples con objeto de mejorar los parámetros de detección, fundamentalmente ganancia y corriente en oscuridad. En este sentido se ha propuesto y demostrado un mecanismo de ganancia de fotocorriente propio de materiales piezoeléctricos que requiere de la existencia de un campo promedio negativo. Se

fabricaron y caracterizaron detectores de tipo fotocoductivo, diodos de barrera Schottky y diodos p-i-n con pozos cuánticos como parte activa. Cada tipo de dispositivo se investigó haciendo énfasis en la eficiencia de colección y la reducción de la corriente en oscuridad. Se ha demostrado que la eficiencia de colección disminuye en gran medida para pozos que se encuentran en la zona cuasi-neutra con respecto a pozos que se encuentran en la zona de carga espacial de un diodo p-i-n, debido a la drástica caída en la relación entre el tiempo de recombinación y escape para los primeros pozos.

El segundo bloque de esta Tesis trata el diseño, la fabricación y la caracterización de detectores sensibles a la polarización de la luz basados en GaN orientado según el plano M y crecido sobre sustratos de $\gamma\text{-LiAlO}_2$. El cambio de orientación cristalina (normalmente se crece con orientación según el plano C) produce una modificación de las reglas de selección para luz incidente en la dirección perpendicular al plano de la muestra. Esta modificación se ve reforzada por el uso de sustratos que generan una deformación anisótropa en las capas. En la memoria se presentan cálculos basados en el formalismo $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ para estructuras wurtzita que predicen las reglas de selección y las propiedades ópticas de dicroísmo encontradas en los experimentos. Los resultados de la caracterización eléctrica y óptica revelan algunas particularidades de este material, tales como la evolución de la deformación con la temperatura o las propiedades de las superficies del GaN plano M .

Finalmente, se ha demostrado la realización de detectores cuya fotorrespuesta depende del ángulo de la polarización de la luz incidente cerca del borde de detección, es decir, en torno a la energía de la banda prohibida. Además de los resultados experimentales se ha desarrollado una metodología de diseño específica para este nuevo tipo de detectores donde la principal herramienta es el espesor de las capas. El espesor de las capas afecta al grado de relajación presente en el material y, por tanto, a la separación de las bandas de valencia inducida por la deformación y a las reglas de selección, así como a la cantidad de luz absorbida. Por último, se ha propuesto la construcción de sistemas que mejoran el contraste a la polarización de la luz y permiten conseguir detección en banda estrecha.

Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Fotodetectores basados en nitruros del grupo III.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estructura de la Tesis.....	4
2. Propiedades básicas de los nitruros del grupo III	7
2.1 Estructura cristalina	8
2.2 Conceptos básicos de teoría de la elasticidad.....	15
2.2.1 Tensor de deformación	16
2.2.2 Tensor de esfuerzos	17
2.2.3 Densidad de energía elástica.....	18
2.2.4 Propiedades de los nitruros del grupo III	19
2.3 Campos de polarización.....	20
2.4 Estructura de bandas	23
2.4.1 Derivación del Hamiltoniano para estructuras wurtzita por el método $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$...	24
2.4.2 Modificación del Hamiltoniano por efecto de la deformación.....	30
2.4.3 Efecto de la orientación cristalina	32
2.4.4 Estructura de bandas de los nitruros del grupo III.....	33
2.5 Heteroestructuras basadas en nitruros del grupo III	39
2.5.1 Pozos cuánticos de GaN/(Al,Ga)N.....	42
2.5.2 Pozos cuánticos de (In,Ga)N/GaN.....	44
2.6 Defectos	47
2.6.1 Fenómenos lentos asociados a defectos.....	48
3. Caracterización de estructuras de pozos cuánticos	59
3.1 Cálculos autoconsistentes en estructuras de baja dimensionalidad	60
3.2 Descripción de las estructuras usadas en los experimentos.....	63
3.3 Comportamiento en estática y cuasiestática	66
3.3.1 Campos de polarización.....	66
3.3.1.1 Medidas de transmisión y reflexión.....	67
3.3.1.2 Efectos de campo promedio negativo.....	70

3.3.1.2.1 Fotoluminiscencia en función del voltaje aplicado	71
3.3.1.2.2 Catodoluminiscencia en función del voltaje aplicado	75
3.3.1.2.3 Corriente inducida por haz de electrones en función del voltaje aplicado.....	76
3.3.1.3 Localización.....	79
3.3.1.3.1 Características corriente-voltaje	79
3.3.1.3.2 Espectroscopía de fotocapacidad.....	81
3.3.1.3.3 Ruido en almena	88
3.4 Comportamiento dinámico	89
3.4.1 Fotoluminiscencia resuelta en el tiempo	90
3.4.1.1 Modelo de recombinación	90
3.4.1.2 Pozos de (In,Ga)N/GaN.....	92
3.4.2 Respuesta temporal de la fotocorriente	94
3.4.3 Efecto de la localización en la capacidad	96
3.5 Metaestabilidad.....	100
3.6 Conclusiones.....	103
4. Confinamiento por deformación en sistemas mesoscópicos basados en materiales piezoeléctricos	105
4.1 Principios físicos del modelo.....	106
4.1.1 Condiciones del modelo	107
4.1.2 Expresión general del modelo	107
4.1.3 Propiedades de los estados confinados por deformación	110
4.2 Estructuras nanocolumnares formadas por discos cuánticos de (Al,Ga)N/GaN	111
4.2.1 Modelo fenomenológico.....	114
4.2.2 Estructuras reales	116
4.2.3 Cálculo de la distribución de deformación.....	119
4.2.4 Cálculo de la estructura electrónica.....	124
4.2.5 Caracterización óptica	133
4.2.5.1 Catodoluminiscencia	134
4.2.5.2 Fotoluminiscencia resuelta en el tiempo	141
4.2.6 Discusión	143
4.2.6.1 Intensidad de luminiscencia	144
4.2.6.2 Anchura espectral de la luminiscencia	145

4.2.6.3 Localización.....	146
4.2.6.4 Modelo de recombinación radiativa	146
4.3 Conclusiones.....	148
5. Detectores basados en pozos cuánticos	151
5.1 Fotoconductores	152
5.1.1 Tecnología de fabricación	153
5.1.2 Respuesta espectral.....	154
5.1.3 Características eléctricas	155
5.1.4 Discusión	156
5.2 Diodos de barrera Schottky	157
5.2.1 Tecnología de fabricación	158
5.2.2 Mecanismo de ganancia de fotocorriente	159
5.2.2.1 Campo promedio negativo.....	159
5.2.2.2 Modelo de generación de ganancia	161
5.2.2.3 Características I-V bajo iluminación.....	165
5.2.3 Respuesta espectral.....	168
5.2.4 Características eléctricas	172
5.2.5 Efectos de la localización	175
5.2.6 Discusión	176
5.3 Diodos de unión p-n	177
5.3.1 Tecnología de fabricación	178
5.3.2 Respuesta espectral.....	179
5.3.3 Características eléctricas	184
5.3.4 Efecto del número de pozos	189
5.3.5 Efecto de la barrera de AlGaIn	197
5.3.6 Mecanismos de ganancia	199
5.3.6.1 Filtrado de masa efectiva.....	200
5.3.6.2 Extensión del filtrado de masa efectiva.....	202
5.3.7 Determinación del campo inducido por efecto piezoeléctrico	204
5.3.8 Aplicaciones	207
5.3.9 Discusión	207
5.4 Otros dispositivos	208
5.4.1 Fototransistores HEMT	208

8.2 Efecto de la orientación cristalina en las propiedades de fotodetección	289
8.2.1 Caracterización de material GaN plano <i>M</i>	290
8.2.2 Detectores sensibles a la polarización de la luz.....	291
8.3 Trabajo futuro	292
8.4 Conclusions and future work.....	294
8.4.1 Low dimensional systems based on group III nitrides	294
8.4.1.1 Properties of (In,Ga)N/GaN quantum wells.....	294
8.4.1.2 Strain-confinement mechanism in mesoscopic systems.....	295
8.4.1.3 Quantum well-based devices	296
8.4.2 Crystal orientation effects on photodetection properties of GaN	298
8.4.2.1 <i>M</i> -plane GaN characterization.....	298
8.4.2.2 Polarization-sensitive photodetectors	299
8.4.3 Future work	300
 Apéndice 1: Definiciones útiles en la caracterización de fotodetectores	 303
 Bibliografía.....	 307