

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE  
TELECOMUNICACIÓN



**TESIS DOCTORAL**

FABRICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DE  
TRANSISTORES DE HETEROUNIÓN DE EFECTO CAMPO  
BASADOS EN AlGaN/GaN.

Autor:

**D. Jose Antonio Garrido Ariza**  
*Ingeniero de Telecomunicación*

Directores:

**D. Jose Luis Sánchez de Rojas Aldavero**  
*Profesor titular de Universidad*

**D. Elías Muñoz Merino**  
*Catedrático de Universidad*

Madrid, Junio de 2000

Tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día 2 de Junio de 2000

Presidente D. José Ignacio Izpura Torres  
Vocal D. Jesús A. del Alamo  
Vocal D. Fernando González Sainza  
Vocal D. Jose Sanchez-Dehesa Moreno  
Secretario D. Felix Perez-Martínez

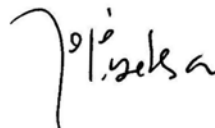
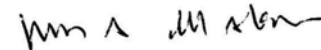
Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día 13 de Julio de 2000 en Madrid.

Calificación: SUBRESALIENTE CUM LAUDE

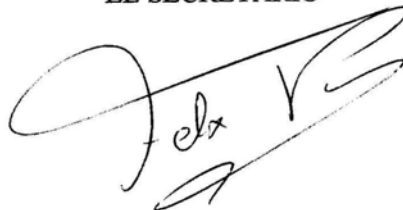
EL PRESIDENTE

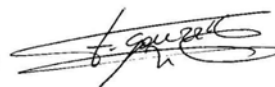


LOS VOCALES

EL SECRETARIO





## Resumen

Los transistores de heterounión (HFET) basados en el sistema AlGaIn/GaN presentan unas características muy prometedoras para su utilización en aplicaciones de alta potencia (1W-100W) en el rango de las microondas. Sin embargo, aún quedan muchos aspectos, tanto tecnológicos como de caracterización básica (campos de polarización, ruido de baja frecuencia, etc.), que no han sido estudiados en profundidad. En este trabajo se investigan algunos de estos aspectos.

En primer lugar se ha desarrollado una herramienta de simulación autoconsistente que permite analizar la influencia de los parámetros de diseño de las heterouniones, tales como espesores y composiciones de las capas utilizadas, niveles de dopaje, etc. Una de las características más importantes de las heterouniones basadas en AlGaIn/GaN es la presencia de unos campos de polarización (piezoeléctrica y espontánea) muy intensos, que hacen que la carga acumulada tenga una magnitud del orden de  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ . Estos campos de polarización se han incluido en los cálculos autoconsistentes de la herramienta de simulación. Sin embargo, se ha comprobado que la carga que resulta de utilizar los valores teóricos de los campos de polarización es mucho menor que la carga real medida. En este sentido, y mediante el análisis de estructuras HFET y de pozos cuánticos, se ha deducido una relación cuantitativa entre los campos de polarización y la composición de Al.

Se ha desarrollado una tecnología básica de fabricación de transistores HFET de AlGaIn/GaN. Para ello se han estudiado los procesos relacionados con los contactos óhmicos, los contactos Schottky y los ataques secos (RIE) para el aislamiento de los dispositivos (ataque *mesa*). Utilizando dicha tecnología, se han fabricado transistores y estructuras de barra Hall con puerta sobre muestras de AlGaIn/GaN crecidas por MOCVD sobre sustratos de zafiro. En las estructuras de barra Hall se han realizado estudios de transporte a bajos campos magnéticos, mediante medidas de efecto Hall, variando la temperatura y la polarización de la puerta. Se han llegado a medir movilidades de  $1200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  con densidades de carga de  $9 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ . El análisis ha demostrado la enorme importancia de los mecanismos de dispersión asociados a las dislocaciones. También se ha encontrado que cuando la carga en el canal es del orden de

$10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , aparecen otros mecanismos de dispersión que podrían estar relacionados con la rugosidad en la intercara de la heterounión.

Los transistores fabricados se han caracterizado tanto en DC como en alta frecuencia. Se han comparado las características de transistores con longitudes de puerta entre  $2\mu\text{m}$  y  $20\mu\text{m}$ . Para dispositivos de  $2\mu\text{m}$  de longitud de puerta se han medido corrientes cercanas a  $300\text{mA/mm}$  y transconductancias intrínsecas de  $80\text{mS/mm}$ . En el análisis de alta frecuencia se han medido los parámetros S de los dispositivos hasta  $3\text{GHz}$ , y en dispositivos de  $2\mu\text{m}$  de longitud de puerta se han calculado frecuencias de corte de  $1.5\text{GHz}$  y una frecuencia máxima de  $3.3\text{GHz}$ . Analizando la dependencia de estos parámetros con la longitud de puerta, se ha extrapolado una frecuencia de corte entre  $33$  y  $50\text{GHz}$  para un dispositivo de  $0.3\mu\text{m}$ .

Por otra parte, se ha realizado un análisis detallado del ruido de baja frecuencia en dispositivos HFET de AlGaIn/GaN. Se ha encontrado que el ruido dominante en este material es del tipo  $1/f$  o ruido "flicker". Se ha estudiado la dependencia de este tipo de ruido con la polarización del dispositivo, y se ha podido determinar la contribución de las diferentes fuentes de ruido  $1/f$  al ruido total medido entre drenador y fuente. Por un lado se ha confirmado la enorme importancia de los contactos óhmicos como fuentes de ruido  $1/f$ . Incluso en dispositivos con una resistividad de contacto menor de  $1\Omega\text{mm}$ , el ruido producido por los contactos es el dominante en un rango muy amplio de polarización. Por otro lado, se ha estudiado la dependencia del ruido intrínseco del dispositivo (el producido en el canal) con la carga acumulada. De este estudio se ha demostrado que son las fluctuaciones de la movilidad asociada a las dislocaciones las que producen el ruido  $1/f$  en este material. Además se han medido parámetros de ruido de Hooge entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$ , lo que abre las posibilidades de utilización de estos dispositivos para amplificadores de alta potencia y bajo ruido.

**Índice**

<b>Capítulo 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación y objetivos.....	3
1.2 Muestras, técnicas experimentales y colaboraciones.....	9
Bibliografía .....	11
<b>Capítulo 2: Modelado y diseño de heterouniones de AlGaIn/GaN .....</b>	<b>13</b>
2.1 Introducción.....	15
2.2 La heterounión AlGaIn/GaN.....	15
2.3 Campos de polarización en la estructura AlGaIn/GaN.....	19
2.4 Cálculos autoconsistentes.....	24
2.5 Efecto de los parámetros de diseño sobre la carga en el canal.....	29
2.5.1 Campos de polarización.....	29
2.5.2 Variación de la composición de Al.....	31
2.5.3 Variación del espesor de la barrera.....	32
2.5.4 Variación del dopaje en la barrera.....	33
2.6 Conclusiones.....	34
Bibliografía .....	36
<b>Capítulo 3: Tecnología de fabricación de transistores de heterounión de AlGaIn/GaN.....</b>	<b>37</b>
3.1 Introducción.....	39
3.2 Máscaras utilizadas.....	41
3.3 Aislamiento de dispositivos: ataques secos.....	43

3.3.1 Ataque seco basado en <i>Ion Beam Milling</i> .....	45
3.3.2 Ataque mediante <i>RIE</i> .....	47.
3.4 Contactos óhmicos de drenador y fuente.....	49
3.5 Contactos Schottky de puerta.....	58
3.6 Conclusiones.....	62
Bibliografía.....	65
<b>Capítulo 4: Caracterización básica del material y de dispositivos.....</b>	<b>67</b>
4.1 Introducción.....	69
4.2 Caracterización básica del material semiconductor.....	70
4.2.1 Composición de Al en la barrera.....	70
4.2.2 Espesor de la barrera de AlGaN.....	72
4.3 Caracterización eléctrica de la heterounión.....	74
4.3.1 Densidad de portadores.....	74
4.3.2 Movilidad Hall de portadores.....	79
4.4 Caracterización DC básica de transistores HFET.....	85
4.4.1 Curvas DC de dispositivos: $I_{DS}-V_{DS}$ , $g_m-V_{GS}$ .....	86
4.4.2 Medidas C-V en dispositivos.....	93
4.4.3 Resistencia del canal frente a $V_{GS}$ . Movilidad de arrastre.....	96
4.5 Caracterización RF de transistores HFET.....	105
4.6 Conclusiones.....	115
Bibliografía.....	117

---

<b>Capítulo 5: Caracterización del ruido de baja frecuencia</b> .....	119
5.1 Introducción.....	121
5.2 Técnicas de medida.....	124
5.3 Resultados y análisis de las medidas de ruido.....	126
5.3.1 Contribución de las diferentes regiones de un transistor HFET al ruido $1/f$ .....	126
5.3.2 Ruido $1/f$ y fluctuaciones de la movilidad.....	148
5.4 Conclusiones.....	155
Bibliografía.....	156
<b>Capítulo 6: Polarización y análisis del control de carga en heterouniones de AlGaIn/GaN</b> .....	159
6.1 Introducción.....	161
6.2 Control de carga en transistores de heterounión de AlGaIn/GaN.....	161
6.3 Efecto de la polarización en pozos cuánticos de AlGaIn/GaN.....	166
6.4 Conclusiones.....	171
Bibliografía.....	174
<b>Capítulo 7: Conclusiones</b> .....	175
<b>Apéndice A: Efecto Piezoeléctrico</b> .....	183
<b>Apéndice B: Descripción de las muestras utilizadas</b> .....	191