

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS
AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.**

UNIDAD ZACATENCO

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ELECTRÓNICA DEL ESTADO SÓLIDO.**

**“Estudio del efecto de la longitud de compuerta en el desempeño del HEMT
AlGaIn/GaN”**

T E S I S

Que presenta:

Ana Larissa Montiel Rodríguez

Para obtener el Grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

En la Especialidad de Ingeniería Eléctrica

Director de Tesis:

Dr. Jaime Mimila Arroyo

Ciudad de México

Diciembre, 2017

*A quienes me han brindado su amor,
apoyo y confianza incondicional.*

A mi papás, hermanos, Anita y Emmanuel.

*Con mucho cariño
Larissa*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Rubén Montiel y Francis Rodríguez por su amor y apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida; y quienes siempre han sido un ejemplo de honestidad y trabajo arduo.

A mis hermanos por su cariño y aliento en cada momento.

A mi tía Anita, por su cariño y consejos que me han ayudado siempre.

A Emmanuel Gutiérrez por su paciencia, comprensión y apoyo durante estos años a mi lado y por cada uno de tus consejos amor, motivándome cada día a seguir adelante.

A mi asesor Dr. Jaime Mimila Arroyo, por formarme académicamente, pero sobre todo por apoyarme y ayudarme en cada momento.

A Rubén Huerta por su apoyo en el laboratorio y a Yesenia Cervantes por el apoyo en todo momento.

A los respetables miembros del jurado Dr. Alejandro Ávila y Dr. Ramón Peña, por la ayuda otorgada a la revisión de este trabajo.

Al CINVESTAV, por permitirme realizar estudios de posgrado, en esta gran institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el financiamiento otorgado durante dos años.

RESUMEN

El transistor de alta movilidad electrónica (HEMT) AlGaN/GaN tiene excelente desempeño en el manejo de potencia y alta frecuencia, mismo que deriva de las propiedades del gas bidimensional de electrones (2DEG) que constituye su canal de conducción. Éste se forma espontáneamente en la interfase de la hetero-unión GaN-AlGaN, con densidad de electrones promedio de $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, y movilidad de hasta $\sim 2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. De estas propiedades emana la capacidad para manejar densidades lineales de corriente mayores a 1 A/mm (de ancho de compuerta) a alta frecuencia con bajos niveles de ruido. Ambos materiales de esta hetero-unión poseen un elevado campo de ruptura eléctrica ($\sim 2 \times 10^6 \text{ V/cm}$) y gran estabilidad físico-química permitiendo voltajes de ruptura superiores a los 1000 Volts para un solo dispositivo. Además, puede operar a temperaturas hasta de $700 \text{ }^\circ\text{C}$ con excelente desempeño. En la actualidad, sus aplicaciones se dan sobre todo en radares y comunicaciones de gran ancho de banda, así como convertidores AC/DC.

El presente trabajo estudia el efecto de la variación de la longitud de compuerta (L_G) en el desempeño de este HEMT. Para lo cual se realizó la caracterización eléctrica del dispositivo incluyendo; las curvas características I-V y función de transferencia para transistores con $L_G = 1, 2, 4, 8, 16$ y $32 \text{ }\mu\text{m}$ respectivamente. Esto permitió comparar los resultados experimentales con lo reportado en la literatura y lo anticipado por la teoría y sobre todo establecer el potencial intrínseco de la estructura de HEMT aquí estudiada.

Los datos experimentales para las curvas de salida llevan a dos resultados; primero, una vez alcanzado el valor de corriente de saturación I_D ($V_{DS} = V_{DSat}$), ésta no permanece constante. Al aumentar V_{DS} , I_D disminuye como consecuencia del calentamiento del 2DEG y de la red cristalina decreciendo la movilidad de los portadores. Segundo, al disminuir la longitud de compuerta, a partir de 32 hasta $1 \text{ }\mu\text{m}$, la densidad lineal de corriente, como es esperado aumenta de 0.13 A/mm ($L_G = 32 \text{ }\mu\text{m}$) a 0.42 A/mm ($L_G = 2 \text{ }\mu\text{m}$). Sin embargo, el comportamiento observado no corresponde a lo anticipado por la teoría; $I_D \propto 1/L_G$. Se sugiere una explicación considerando que la compuerta del HEMT funciona como si su geometría correspondiese a una compuerta virtual de ancho aumentado, aunque ésta observación plantea la pregunta que se mantiene abierta ¿Qué mecanismo conduce ha dicho comportamiento?

Finalmente, la extrapolación del comportamiento de I_{DS} vs L_G determina que esta estructura de HEMT podría manejar corrientes ligeramente mayores a 0.5 A/mm .

ABSTRACT

The high electron mobility transistor (HEMT) AlGaN/GaN displays excellent performance handling power and high frequency, which stems from the properties of the two-dimensional electron gas (2DEG) that constitutes its conducting channel. Spontaneously formed at the interface of the GaN-AlGaN hetero-union, with average electron density of $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$, and mobility of up to $\sim 2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. From these properties results the ability to handle linear current densities greater than 1 A/mm (gate width) at high frequency with low noise levels. Both materials of this hetero-structure show a high break down field ($\sim 2 \times 10^6 \text{ V/cm}$) and great physical-chemical stability resulting in breakdown voltages beyond 1000 Volts for a single device. In addition, the transistor can operate at temperatures up to 700 °C with excellent performance. Currently, its main applications in radars and high bandwidth communications, as well as AC/DC converters.

In this study we have explored the effect of the gate length (L_G) on the HEMT performance. For this purpose a full electrical characterization comprising; I_D - V_G - V_D curves and the transfer function for devices featuring gate lengths of $L_G = 1, 2, 4, 8, 16$ and $32 \mu\text{m}$ was realized. This allowed to compare the experimental results with those reported in the literature and with what was predicted theoretically and above all to establish the intrinsic potential of the HEMT structure studied here.

The experimental data for the output curves lead to two main results; first, once the saturation current value $I_D(V_{DS} = V_{Dsat})$ has been reached, it does not remain constant. When increasing V_{DS} , I_D decreases because of the heating of 2DEG and the crystal lattice decreasing the free carriers mobility. Second, as the gate length decreases from 32 to 1 μm , the linear current density, as expected, increases from 0.13 A / mm ($L_G = 32 \mu\text{m}$) to 0.42 A / mm ($L_G = 2 \mu\text{m}$). However, the observed behavior does not correspond to what was anticipated by the theory; $I_D \propto 1/L_G$. As explanation it is proposed that the gate of the HEMT behaves as if its geometry corresponded to a wider virtual gate, although this proposition raises the question that remains open. Which mechanism does lead to this this behavior?

Finally, the extrapolation of I_{DS} vs. L_G behavior determines that this HEMT structure could handle currents slightly greater than 0.5 A / mm.

MOTIVACIÓN

Una de las figuras de mérito de cualquier transistor de efecto de campo, es la capacidad que tiene para manejar altas densidades de corriente, y que el manejo de éstas conlleva a que el dispositivo pueda ser utilizado en aplicaciones que requieran el uso de potencias elevadas.

La teoría del transporte de carga del HEMT AlGa_N/Ga_N, establece que la geometría del dispositivo es determinante en su desempeño. Entre los parámetros geométricos más relevantes se tiene la longitud de la compuerta que tiene un importante papel en la corriente de drenador, I_{DSmax} , que el dispositivo puede manejar.

Es por ello que en este trabajo se estudia el comportamiento de la I_{DS} que maneja la estructura aquí trabajada en dispositivos hechos rigurosamente en la misma estructura, es decir misma epitaxia, misma tecnología: mesas, contactos óhmicos, barreras de compuerta, mediante la realización de HEMTs uno al lado del otro, de la misma geometría y compartiendo un contacto. Se busca de esta manera que las inhomogeneidades propias aún a esta tecnología perturben lo menos posible las conclusiones a las que se llega.

OBJETIVO

El objetivo de esta tesis es estudiar el efecto de la longitud de compuerta en el desempeño de dispositivos HEMT AlGaIn/GaN/Si crecidos por MBE, para estimar los límites de su desempeño. Para ello se estudian sus propiedades de transporte de carga en función de la longitud de compuerta; lo que permitiría hacer proposiciones para mejorar el desempeño del dispositivo.

El estudio comprende la caracterización eléctrica detallada del dispositivo; curvas de salida ($I_{DS} - V_{DS} - V_{GS}$) y transconductancia g_m en DC en función de la longitud de compuerta. De la misma forma; a partir de éstas, se obtienen otros parámetros del dispositivo: resistencia de encendido, R_{on} , voltaje de umbral V_{TH} . Finalmente, la extrapolación de algunos de estos parámetros permitirá estimar el desempeño último esperado para las estructuras de trabajo. Estos resultados generan, igualmente, proposiciones para mejorar su desempeño, entre las que se tiene la necesidad de entender el comportamiento de la longitud virtual de la compuerta.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura básica de un transistor HEMT; apilamiento de películas de GaN y AlGaN sobre un sustrato; tres terminales, los electrodos de fuente, compuerta y drenador. En la interfase AlGaN/GaN, presencia del gas bidimensional de electrones (2DEG) que se forma espontáneamente.....	5
Figura 2. Celda Unitaria del Zafiro (Al_2O_3) mostrando los planos más frecuentemente utilizados para crecer GaN (Cortesía de Precision Micro-Optics, http://www.pmoptics.com/sapphire.html)	7
Figura 3. Estructura Wurtzita del GaN mostrando la disposición de los átomos, los enlaces químicos, los ejes cristalográficos a y c, los parámetros de malla, así como los planos C y A (Cortesía de NTT Basic Research Laboratories Atsugi-shi, Japan).	8
Figura 4. El vector de polarización espontánea, piezoeléctrica y la resultante total va en la dirección c positiva, del Ga (catión) al N (anión) [17,19].	9
Figura 5. Ancho de banda del AlGaN en función de la concentración molar de Al (x); la gráfica muestra valores experimentales (símbolos) y calculados (línea azul) [24].	10
Figura 6. Direcciones de P_{SP} y P_{PE} , los planos de carga en la interfase inducida por estas polarizaciones, el movimiento de electrones en relación a la interfase. a) estructura relajada, b) estructura en tensión y c) estructura en compresión [16]	11
Figura 7. Sistema típico de MBE, en el cual es posible introducir sistemas para caracterización in-situ como RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction) [26].	12
Figura 8. Esquema de un sistema horizontal de MOCVD [28].	13
Figura 9. Muestra el decapado de la estructura mesa de los dispositivos estudiados.	17
Figura 10. Procedimiento tecnológico del HEMT, una vez terminada la estructura de capas epitaxiales. a) Decapado de las mesas de aislamiento, b) Metalización de contactos óhmicos (fuente y drenador) y su recocido RTA (750-900 °C) y c) finalmente metalización de la barrera Schottky de compuerta.	18
Figura 11. Heterounión AlGaN/GaN; a) Diagramas de bandas del GaN y el AlGaN en su condición de equilibrio antes del contacto que da lugar a la interacción entre ellos y b) Diagrama de bandas de los materiales en contacto ya alcanzado equilibrio, se considera que en el AlGaN no hay carga fija (la flecha en diagonal apuntando a la interfase muestra la localización del gas bidimensional d electrones).	23
Figura 12. a) Polarización espontánea y piezoeléctrica en la misma dirección en el AlGaN y carga en la interfase debido a esta, b) 2DEG en el GaN, pero confinado en la interfase por la carga neta en esta [21].	24
Figura 13. Diagrama de bandas del GaN, cuando se ha formado la heterounión.	26
Figura 14. Variación del campo eléctrico ($\mathcal{E}y$) en función del potencial superficial (ψ_s). De esta gráfica se determina que para un campo eléctrico de $\sim 2.033 \times 10^6$ V/cm, el potencial superficial deberá tener un valor ~ 0.27 eV.....	27
Figura 15. Densidad de portadores del gas bidimensional de electrones localizado en la interfase AlGaN/GaN en función de la concentración molar de Al(x) en la capa de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ experimentalmente determinados [16].	28
Figura 16. Densidad del 2DEG como una función del espesor de la capa barrera de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ para diferentes valores de concentración molar de Al; a) 19%, b) 24% c) 29% [63].	29

Figura 17. Movilidad de electrones en la estructura $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ en función de la temperatura para diferentes mecanismos de dispersión, [48].	30
Figura 18. Movilidad como función del espesor y la concentración molar de aluminio (x) en la película de AlGaIn [54].	31
Figura 19. Gráfica de la movilidad en función de la concentración de portadores en el 2DEG para estructuras crecidas por MBE. Los valores graficados fueron extraídos de la literatura y pueden consultarse en la Tabla 2 del Apéndice I.	32
Figura 20. Gráfica de la movilidad en función de la concentración de portadores en el 2DEG para estructuras crecidas por MOCVD. Los valores graficados fueron extraídos de la literatura y pueden consultarse en la Tabla 3 del Apéndice I.	33
Figura 21. a) Corte transversal de un HEMT, donde se muestran algunos de los parámetros geométricos que lo caracterizan. b) Imagen de uno de los HEMTs de trabajo crecidos por MBE, con doble compuerta y doble fuente.	34
Figura 22. . Esquema de un HEMT, mostrando sus electrodos, la localización del gas bidimensional de electrones (2DEG) y conexiones propias para la obtención de sus curvas de salida.	34
Figura 23 Estructura HEMT AlGaIn/GaN operando en la región lineal; polarización drenador-fuente (V_{DS}) con $V_{GS}=0$.	35
Figura 24. HEMT AlGaIn/GaN operando en la región de saturación. El HEMT con polarización drenador-fuente (V_{DS}), y polarización compuerta-fuente (V_{GS}).	36
Figura 25. Simulación de la característica corriente-voltaje ($I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$) para diferentes valores de polarización de compuerta (V_{GS}). Para la cual se utilizaron los siguientes parámetros: $Z = 100 \mu\text{m}$, $L_C = 8 \mu\text{m}$, $d_{\text{AlGaIn}} = 20 \text{ nm}$, $\text{Al}(x)=0.30$, $n_s \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ y $\mu_n=1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ Y se realizó a partir de la ecuación (25).	39
Figura 26. Simulación de la característica corriente-voltaje ($I_{DS}-V_{DS}$) para diferentes valores de longitud en la compuerta (L_G). Para la cual se utilizaron los siguientes parámetros: $Z = 100 \mu\text{m}$, $V_{GS} = 0 \text{ V}$, $d_{\text{AlGaIn}} = 20 \text{ nm}$, $\text{Al}(x) = 0.3$ y $\mu_n = 1500 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)}$; y se realizó a partir de la ecuación (25).	40
Figura 27. Se muestra la proporcionalidad inversa de la corriente de saturación ($I_{DS,\text{sat}}$), con respecto al incremento en la longitud de la compuerta; para la cual se utilizaron los siguientes parámetros: $Z = 100 \mu\text{m}$, $V_{GS} = 0 \text{ V}$, $d_{\text{AlGaIn}} = 20 \text{ nm}$, $\text{Al}(x) = 0.3$ y $\mu_n = 1500 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)}$.	40
Figura 28. a) Muestra la transconductancia máxima $g_{m\text{max}}$ vs la distancia entre fuente y compuerta (L_{GS}), para dos espesores del AlGaIn , los datos experimentales no muestran un efecto importante de L_{GS} sobre g_m siendo claro el de la longitud de la compuerta, conforme ésta aumenta la transconductancia disminuye. b) muestra la disminución de R_s cuando L_{GS} es reducida [54].	41
Figura 29. Gráfica de la transconductancia que muestra un pico en $V_{GS}=-1.7 \text{ V}$ con un valor de 332 mS/mm [55]	42
Figura 30. Para definir los contactos de los diferentes transistores, se realiza un proceso de lift-off a base de Au.	45
Figura 31. a) Plano superior de los dados con diferentes estructuras de apoyo para la caracterización de diferentes procesos tecnológicos. Se muestra el dado 2553 el cual será utilizado para el cumplimiento del objetivo de esta tesis. b) Imagen MBE de HEMTs con longitudes de compuerta ($L_G = 1, 2, 4, 8, 16$ y $32 \mu\text{m}$), primeras seis compuertas a partir de la izquierda, ancho de compuerta $100 \mu\text{m}$, (WG) para todos, distancia fuente-compuerta $3 \mu\text{m}$ compuerta-drenador $4 \mu\text{m}$	46

Figura 32. Analizador de parámetros de semiconductor HP 4145B, con el cual se realizaron las mediciones en los HEMTs.	47
Figura 33. Diagrama de conexión, para la obtención de las curvas características I_{DS} (V_{DS} , V_{GS})	48
Figura 34. Curvas de salida de HEMT con longitud de compuerta, $L_G = 1\mu\text{m}$, ancho de compuerta, $W_G = 100\mu\text{m}$, distancia fuente-compuerta, $L_{SG} = 3\mu\text{m}$, y distancia compuerta-drenador, $L_{GD} = 4\mu\text{m}$	49
Figura 35 Muestra la función de transferencia de un HEMT con $L_G = 1\mu\text{m}$. Donde la línea azul corresponde a valores de $I_{DS_{max}}$ provenientes del ajuste matemático y la línea roja corresponde a valores experimentales.	50
Figura 36. La transconductancia que muestra valores máximos para ambas gráficas en $V_G = 0.5\text{ V}$	50
Figura 37. Corriente $I_{DS}(t)$ para el HEMT (T4) con $L_G = 1\mu\text{m}$. Donde la línea azul corresponde al ajuste utilizando la ecuación (31) con 3 exponenciales.	51
Figura 38. Corriente $I_{DS}(t)$ para el HEMT (T4) con $L_G = 1\mu\text{m}$. Donde la línea roja corresponde al ajuste utilizando la ecuación (31) con 3 exponenciales y la línea azul corresponde a los datos experimentales.	52
Figura 39. Constantes de tiempo utilizadas en los ajustes de las curvas de $I_{DS}(t)$ a partir de la ecuación 31. ...	53
Figura 40. Corriente $I_{DS}(t)$ para 6 transistores con diferentes longitudes de compuertas 1, 2, 4, 8, 16 y 32 μm	53
Figura 41. Curvas características I-V, para longitudes de compuerta de 1 hasta 32 μm	54
Figura 42. $I_{DS_{max}}$ como función de L_G , donde la curva negra representa el comportamiento teórico mientras que la curva naranja corresponde a los datos experimentales	55
Figura 43. Muestra una comparativa entre datos de $I_{DS_{max}}$ con respecto a la variación de L_G , recopilados desde la literatura (puntos) y los datos de nuestros resultados experimentales (triángulos). Donde valores de L_G alrededor de los 2 μm muestran un comportamiento congruente a lo reportado en la literatura; mientras que para L_G mayores, el comportamiento es apegado cualitativamente a la teoría.	56

Contenido

AGRADECIMIENTOS	I
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
MOTIVACIÓN	VII
OBJETIVO	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
1. Capítulo I. El HEMT AlGaN/GaN: Tecnología y Estado del Arte.	4
1.1 Introducción	4
1.2 Estructura y Tecnología del HEMT AlGaN/GaN	4
1.2.1 Sustratos Exógenos: Carburo de Silicio, Zafiro (Al_2O_3 , Oxido de Aluminio), Silicio	6
1.2.2 Los Nitruros de Galio y Aluminio	8
1.2.2.1 Polarizaciones Espontánea, Piezoelectrica y Total del GaN, AlGaN y la Heteroestructura AlGaN/GaN	10
1.2.3 Técnicas de Crecimiento Utilizadas para el GaN y AlGaN: MBE y MOCVD	11
1.2.3.1 Epitaxia por Haces Moleculares (Molecular Beam Epitaxy; MBE)	12
1.2.3.2 Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)	13
1.2.4 Contactos Óhmicos y Rectificante.	14
1.3 Fabricación del HEMT AlGaN/GaN; Crecimiento de la Estructura, Mesa y Contactos	15
1.3.1 Crecimiento de la Hetero-unión (Epitaxia)	15
1.3.1.1 Película de Nucleación y Transición.	15
1.3.1.2 Película Buffer y Región Activa	16
1.3.1.3 Película de AlGaN	16
1.3.2 Procesamiento del Dispositivo	17
1.3.2.1 Estructura Mesa	17
1.3.2.2 Metalización	18

1.4	Operación Ideal del HEMT AlGa _N /Ga _N -----	19
1.5	Estado del Arte-----	19
1.5.1	Efecto de la longitud de la compuerta en el desempeño del HEMT -----	20
1.6	Resumen-----	21
2.	Capítulo II. Transporte de carga en el HEMT de AlGa _N /Ga _N -----	22
2.1	Origen del Gas Bidimensional de Electrones (2DEG) -----	22
2.2	El Pozo de Energía Potencial-----	25
2.2.1	Concentración de Electrones en el Gas Bidimensional (2DEG)-----	28
2.2.2	Movilidad de Electrones en el Gas Bidimensional (2DEG)-----	29
2.2.3	Movilidad en el 2DEG; resultados experimentales -----	31
2.3	Transporte de carga en el HEMT AlGa _N /Ga _N -----	33
2.3.1	Curvas de Salida del Transistor: $I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$ -----	33
2.3.1.1	Región Lineal-----	35
2.3.1.2	Regiones de Corte y de Saturación-----	36
2.4	Efecto de la Longitud de Compuerta (L_G)-----	39
2.5	Transconductancia -----	41
2.6	Resumen-----	43
3.	Capítulo III. Desarrollo Experimental.-----	44
3.1	Preparación de Muestras; HEMTs: AlGa _N /Ga _N /Si -----	44
3.2	Caracterización eléctrica-----	47
3.2.1	Curvas de salida $I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$ -----	47
3.2.2	Función de transferencia.-----	49
3.2.3	Curvas I_{DS} ($V_{GS} = -1.0$ V, $V_{DS} = 10$ V) vs t. -----	51
3.2.3.1	Disminución de I_{DS} bajo condiciones de polarización constantes. -----	51
3.2.4	Efecto de la longitud de compuerta en I_{DS} . -----	53
4.	Capítulo IV. Conclusiones y Recomendaciones-----	57

4.1	Conclusiones-----	57
4.2	Recomendaciones-----	57
	Referencias-----	58
	Apéndice I-----	62

1. Capítulo I. El HEMT AlGaN/GaN: Tecnología y Estado del Arte.

En este capítulo se revisará la estructura del transistor de alta movilidad electrónica (HEMT) basado en la hetero-uniión AlGaN/GaN. Se examina en detalle cada una de las capas que forman el dispositivo; sustrato, los nitruros de galio y aluminio. Se aborda la polarización espontánea y piezoeléctrica de estos materiales y la estructura en su conjunto. Los contactos óhmicos y rectificante que conforman las terminales de fuente, drenador y compuerta, respectivamente. Se revisarán las bases experimentales de la Epitaxia por Haces Moleculares (MBE) y Depósito Químico en Fase Vapor por Órgano-Metálicos (MOCVD), las cuales representan las principales técnicas de crecimiento utilizadas para el GaN y AlGaN.

Se describirá la fabricación del HEMT, desde el crecimiento epitaxial de cada película (nucleación, transición, buffer, AlGaN), así como el procedimiento tecnológico para la obtención del dispositivo final; realización de la mesa de aislamiento y la metalización de los contactos óhmicos y de la barrera Schottky.

Habiendo descrito la estructura y procesamiento del HEMT, se presenta una explicación del transporte de carga en este, además del estado del arte.

1.1 Introducción

El primer transistor basado en GaN fue un MESFET fabricado en 1993 de longitud de compuerta de $4\ \mu\text{m}$, manejando una densidad lineal de corriente de $175\ \text{mA/mm}$, transconductancia máxima de $23\ \text{mS/mm}$, frecuencia de corte de $11\ \text{GHz}$ y una frecuencia máxima de operación de $35\ \text{GHz}$, lo que estableció el potencial del dispositivo. Emulando lo realizado con el HEMT AlGaAs/GaAs, se introdujo una barrera de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, para la obtención de un FET de heterounión; el HEMT actual. Desde entonces este dispositivo ha generado un gran interés para aplicaciones tanto ópticas como electrónicas [1,2]. Ahora, este HEMT maneja densidades de potencia, por unidad de ancho de compuerta, de $10.7\ \text{W/mm}$ a $10\ \text{GHz}$ [3] a frecuencia de corte (f_T) de $342\ \text{GHz}$ y frecuencia máxima de operación ($f_{\text{máx.}}$) en torno de $518\ \text{GHz}$ con bajos niveles de ruido [4], además de poder operar a temperaturas elevadas, $\sim 800\ ^\circ\text{C}$ [5].

1.2 Estructura y Tecnología del HEMT AlGaN/GaN

La característica principal del HEMT AlGaN/GaN es la hetero-uniión formada por los semiconductores GaN y AlGaN, materiales diferentes sobre todo en ancho de banda prohibida y parámetro de red.

Hasta ahora, cuando éstos semiconductores se crecen sin impurificar expresamente resultan, sistemáticamente, de conductividad tipo N. La relación entre sus funciones de trabajo es tal que al formar la hetero-unión, ocurre una transferencia de electrones desde el AlGaN hacia el GaN rompiendo la neutralidad eléctrica de cada material dando lugar a una redistribución de carga que genera una distribución de energía potencial en la dirección perpendicular a la interface AlGaN/ GaN formando un pozo de energía potencial cuasi-triangular. En este transistor la intensidad de campo eléctrico perpendicular al plano de la heterounión es tal que los electrones son confinados en la vecindad inmediata a ésta y restringidos a moverse en un estrecho plano paralelo a la hetero-interfase. Se constituye así, un gas bidimensional de electrones, responsable de la conducción eléctrica en este dispositivo, la Fig. (1) muestra su estructura básica; sustrato, película de GaN y sobre ésta una de AlGaN (25-30% de Al), las terminales de *fuente* (S), *drenador* (D) (contactos óhmicos) y *compuerta* (G) (Barrera Schottky). Debido al alto costo de los sustratos nativos, el HEMT es crecido sobre sustratos extrínsecos; silicio (Si), zafiro (Al_2O_3) o carburo de silicio (SiC), principalmente.

En este dispositivo la modulación de la corriente se logra mediante un voltaje entre compuerta y fuente (V_{GS}) que modifica la concentración de portadores en el canal. Este HEMT puede realizarse en ambas condiciones; ya sea normalmente encendido (normally-on) o apagado. La estructura de trabajo de esta tesis está basada en un dispositivo normalmente encendido, a partir de este momento se hará referencia únicamente a este tipo de dispositivos HEMT.

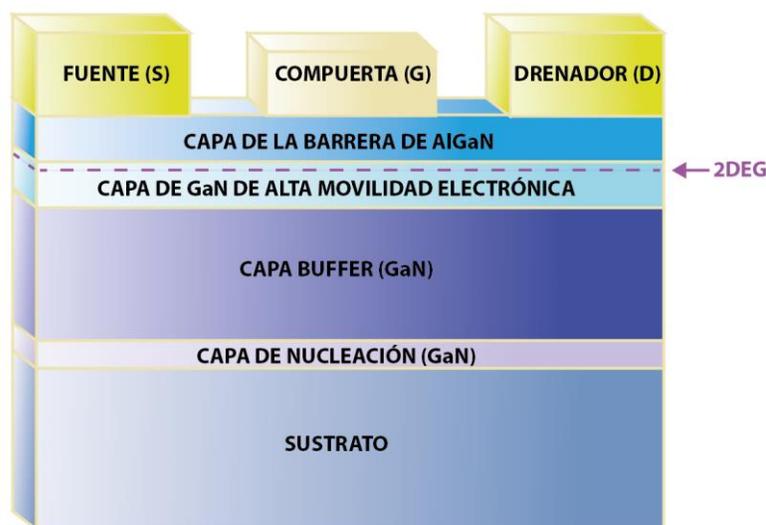


Figura 1. Estructura básica de un transistor HEMT; apilamiento de películas de GaN y AlGaN sobre un sustrato; tres terminales, los electrodos de fuente, compuerta y drenador. En la interfase AlGaN/GaN, presencia del gas bidimensional de electrones (2DEG) que se forma espontáneamente.

El desempeño del dispositivo es función fundamentalmente, aunque no únicamente, de la densidad de portadores en el 2DEG y de su movilidad, parámetros que dependen crucialmente de la calidad cristalográfica y pureza de los materiales, así como de la interfase AlGa_N-Ga_N. Las películas crecidas sobre sustratos extrínsecos contienen una gran densidad de dislocaciones ($\sim 10^8$ - 10^{11} cm⁻²) altamente dispersoras, así como defectos puntuales que degradan fuertemente las propiedades físicas de la estructura y en consecuencia el desempeño del HEMT mismo [6]. Es por ello que a continuación se revisan brevemente las propiedades de éstos materiales y la tecnología de crecimiento de esta estructura.

1.2.1 Sustratos Exógenos: Carburo de Silicio, Zafiro (Al₂O₃, Oxido de Aluminio), Silicio

La calidad cristalina de los materiales que conforman un dispositivo determina de manera crítica su desempeño. Aquella depende de varios factores: el sustrato, su preparación para la epitaxia y las condiciones de crecimiento, sobre todo de las etapas iniciales de la epitaxia. Aunque actualmente existen en el mercado sustratos de Ga_N, su elevado costo obliga al uso de sustratos no nativos, tales como: silicio (Si), zafiro (Al₂O₃) y carburo de silicio (SiC) que son los más utilizados, cada uno con sus propiedades intrínsecas mismas que resultan en ventajas y desventajas, éstas se resumen a continuación.

El carburo de silicio es un semiconductor con propiedades similares a las del Ga_N, de estructura wurtzita y ancho de banda prohibida ~ 3.02 eV, generalmente utilizado en dispositivos de alta frecuencia y potencia [7]. Su constante de red $a=3.08$ Å difiere del Ga_N (3.189 Å) en un $\sim 3.5\%$, lo que constituye un desacople que aunque relativamente reducido, provoca una elevada densidad de dislocaciones deteriorando las propiedades del Ga_N y del AlGa_N crecidos sobre él y por lo tanto la hetero-unión misma. Sin embargo, los HEMTs crecidos sobre SiC presentan mejor desempeño que en otros sustratos no nativos. Sus principales desventajas son el elevado costo, sobre todo el semi-aislante y la falta de disponibilidad de obleas de gran área ($> 4''$) [8].

El zafiro (Al₂O₃) fue utilizado como sustrato en la tecnología pionera del crecimiento de Ga_N y AlGa_N, y en el primer HEMT con estos materiales. Eléctricamente constituye un aislante con bandgap de ~ 8.1 - 8.6 eV a 300K [9], con estructura hexagonal (Fig. (2)); constantes de red de $a = 4.7592$ Å y $c = 12.9915$ Å [10]. El plano C (0001) es el preferido para el crecimiento del Ga_N que rotado 30° con respecto al zafiro conduce a un desacople de red de ~ 15 -16% [9,11] que conlleva a una densidad de dislocaciones en el Ga_N entre 10^8 - 10^{11} cm⁻² [11,12], degradando la movilidad de los electrones y el tiempo de vida de minoritarios. Su coeficiente de expansión térmica ($\sim 7.5 \times 10^{-6}$ / K) [9], más grande

que el del GaN ($\sim 5.6 \times 10^{-6} / \text{K}$) [1], provoca esfuerzos de compresión biaxial en el GaN al regresar éste a temperatura ambiente una vez terminado el crecimiento. Debido a su buena calidad cristalina, estabilidad a temperaturas altas, transparencia a la luz visible, la disponibilidad de obleas de gran área (hasta 6'' de diámetro) y bajo costo, es de los más utilizados para el crecimiento de GaN. Su principal desventaja es su baja conductividad térmica ($0.23 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) [9], que resulta en una pobre disipación del calor, en comparación con el SiC y el Si.

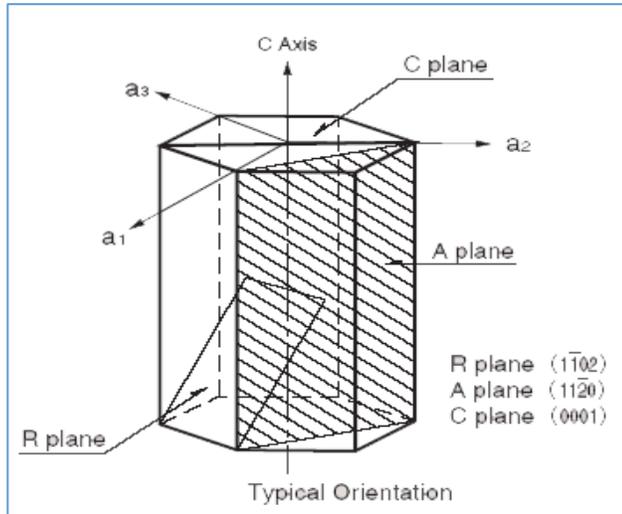


Figura 2. Celda Unitaria del Zafiro (Al_2O_3) mostrando los planos más frecuentemente utilizados para crecer GaN (Cortesía de Precision Micro-Optics, <http://www.pmoptics.com/sapphire.html>)

Typical Orientation-Orientación Típica
axis-eje
plane-plano

El silicio, debido a su disponibilidad en obleas de gran tamaño (hasta 16''), alta calidad cristalina, bajo costo y madurez tecnológica es el material más utilizado para el crecimiento de GaN. Aunque la calidad del GaN crecido sobre él es notablemente inferior que el crecido sobre zafiro y sobre SiC. El Si con una estructura cristalina cúbica de diamante, presenta como principal problema el desacople de red; el Si con 5.43 \AA y el GaN con $a=3.189 \text{ \AA}$, resulta un $\sim 40\%$ en el desacople. Además de la diferencia de los coeficientes de dilatación térmica; 54% [13]. Ambas diferencias dan lugar a material con alta densidad de dislocaciones, pudiendo agrietarse debido al esfuerzo mecánico que aparece al enfriarse. El plano preferencial de crecimiento es el (111), tanto para el GaN cúbico como hexagonal. Crear GaN sobre Si, tiene complicaciones particulares, su exposición al N, puede formar SiN amorfo obteniéndose la presencia de GaN cúbico y hexagonal dando lugar a una gran cantidad de defectos, aunque creciendo una delgada capa de SiC antes de la epitaxia del GaN, se puede disminuir la mezcla de fases [9]. A pesar de los inconvenientes surgidos del crecimiento de GaN sobre silicio, se ha demostrado la factibilidad de lograr dispositivos HEMT AlGaIn/GaN sobre obleas de Si de 8'' con bajo

costo, adecuados para aplicaciones de alta frecuencia y de conmutación de potencia. En él se han realizado HEMTs con $I_{DSmax} = 853 \text{ mA/mm}$ y $g_{mmax} = 180 \text{ mS/mm}$, con frecuencia máxima de oscilación de 64 GHz [14].

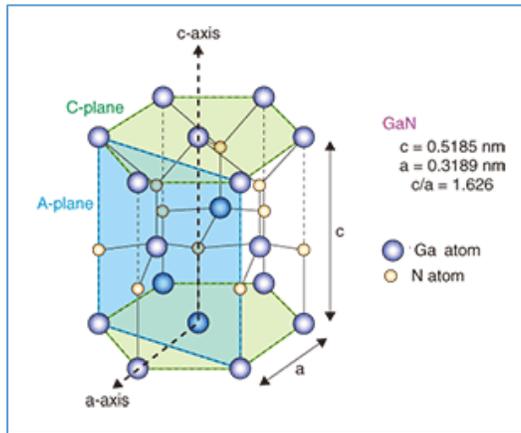


Figura 3. Estructura Wurtzita del GaN mostrando la disposición de los átomos, los enlaces químicos, los ejes cristalográficos a y c , los parámetros de malla, así como los planos C y A (Cortesía de NTT Basic Research Laboratories Atsugi-shi, Japan).

axis-eje
plane-plano
atom-átomo

1.2.2 Los Nitruros de Galio y Aluminio

Los nitruros GaN, AlN y sus aleaciones han mostrado potencial para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, y dispositivos para alta potencia y alta frecuencia [8]. El Nitruro de Galio (GaN), es un semiconductor de banda directa; $E_g = 3.44 \text{ eV}$ que cristaliza en las fases cúbica y wurtzita; siendo ésta, a temperatura ambiente, la más estable, con constantes de red a (3.189 \AA) y c (5.185 \AA) (hexagonal, Fig. (3)) [15]. En este los planos subsecuentes a lo largo de la dirección c están constituidos por átomos de galio o nitrógeno dispuestos en forma alternada; Ga-N-Ga-N-Ga-N... Estos compuestos poseen *polarización espontánea* (P_{sp}), debido a la asimetría del enlace [16,17,18]. La fuerte electronegatividad del nitrógeno, al producirse el enlace del galio con los cuatro nitrógenos a su alrededor resulta un momento dipolar en la dirección c (Fig. (4)) [19]. El GaN es, en consecuencia, un material piezoeléctrico igualmente en la dirección c .

$Al_xGa_{1-x}N$ es un compuesto ternario cuyas propiedades físicas dependen fuertemente de la composición que cristaliza también en estructura wurtzita con constantes de red dependientes de la concentración de aluminio. Esta aleación posee también una fuerte polarización espontánea y piezoeléctrica a lo largo del eje c [18,21]. El ancho de banda prohibida depende de la concentración molar de aluminio (x) y va de 3.4 a 6.1 eV (Fig. (5)), de acuerdo con la expresión [22,23,24]:

$$E_g(x) = (1 - x)E_g(\text{GaN}) + xE_g(\text{AlN}) - bx(1 - x) \quad (1)$$

donde $E_g(\text{GaN}) = 3.4 \text{ eV}$ y $E_g(\text{AlN}) = 6.1 \text{ eV}$, b es el parámetro de doblamiento de la banda cuyo valor es $\sim 1 \text{ eV}$ para todo el rango de composición de aluminio ($0 \leq x \leq 1$) [22,23].

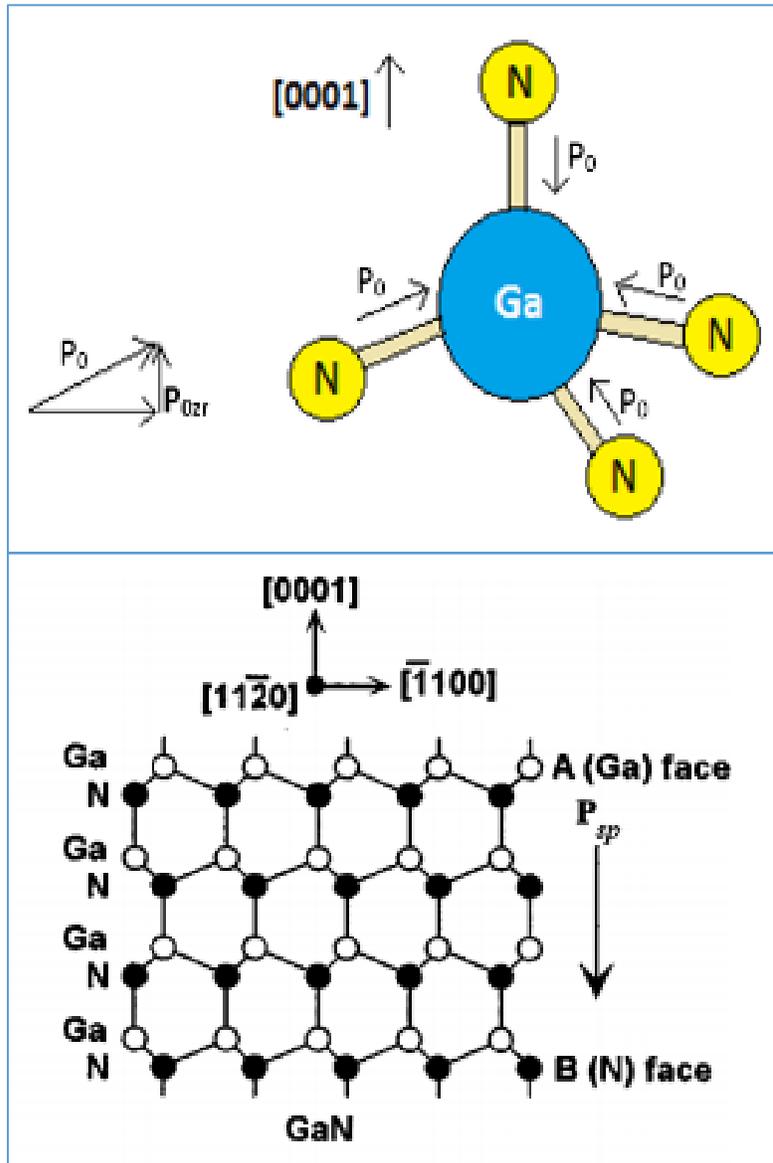


Figura 4. El vector de polarización espontánea, piezoeléctrica y la resultante total va en la dirección c positiva, del Ga (catión) al N (anión) [17,19].

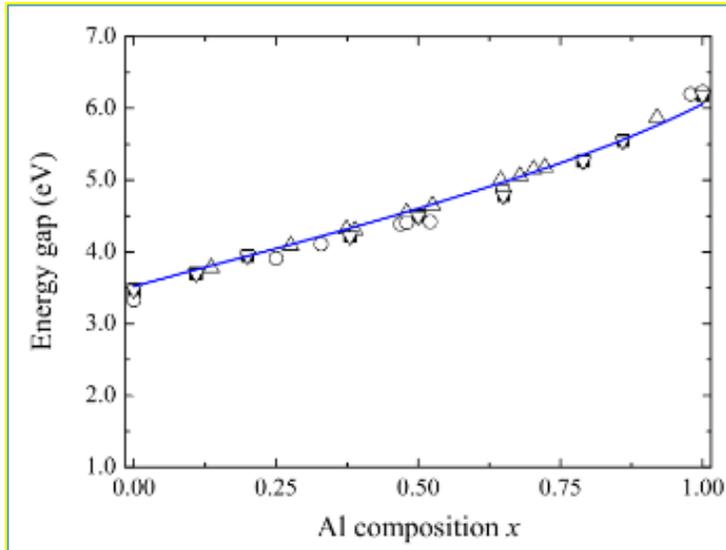


Figura 5. Ancho de banda del AlGaIn en función de la concentración molar de Al (x); la gráfica muestra valores experimentales (símbolos) y calculados (línea azul) [24].

Energy gap-energía del ancho de banda prohibida
Al composition-fracción molar de Al

1.2.2.1 Polarizaciones Espontánea, Piezoelectrica y Total del GaN, AlGaIn y la Heteroestructura AlGaIn/GaN

Una estructura cristalina se encuentra bajo esfuerzos mecánicos cuando sus constantes de red son diferentes a las de equilibrio termodinámico. En los materiales piezoelectricos tal deformación induce una polarización, llamada *polarización piezoelectrica* (P_{PE}). El GaN es un material piezoelectrico en el cual, bajo tensión biaxial, se observa un incremento de la constante de red a y un decremento en c , la razón c_0/a_0 (en equilibrio, ~ 1.633) [16] decrece apareciendo la polarización piezoelectrica con la misma dirección que la espontánea adicionándose a ésta [28,31].

Sin presencia de un campo eléctrico externo, el *total de la polarización macroscópica* (P) en la capa de GaN o AlGaIn es la suma de P_{SP} y P_{PE} . Habitualmente la hetero-unión AlGaIn/GaN crece en el plano [0001], perpendicular al eje c , en la "cara de Galio", Figs. (3) y (4), la polarización espontánea resultante apunta en dirección al sustrato. El $Al_xGa_{1-x}N$ (para todo valor de x) relajado presenta únicamente la polarización espontánea en la misma dirección que el GaN. Sin embargo, en esta estructura la deformación elástica que muestra es contraria a la del GaN, tensión y compresión, respectivamente. Por ello las polarizaciones piezoelectricas son en direcciones opuestas. La del AlGaIn se adiciona a la espontánea; es decir, P_{SP} y P_{PE} son paralelas, la Fig. (6) muestra estas direcciones para varias condiciones de la estructura (con estrés en tensión y compresión). En La hetero-unión de $Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ en cara-Ga con el AlGaIn en tensión se ha calculado que $P_{SP} = -4.5 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$ y $P_{PE} =$

$-1.1 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$, resultando una densidad de carga en la interfase de $\sigma = 2.7 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$, es decir $\sim 1.7 \times 10^{13} \text{ e/cm}^2$ [16].

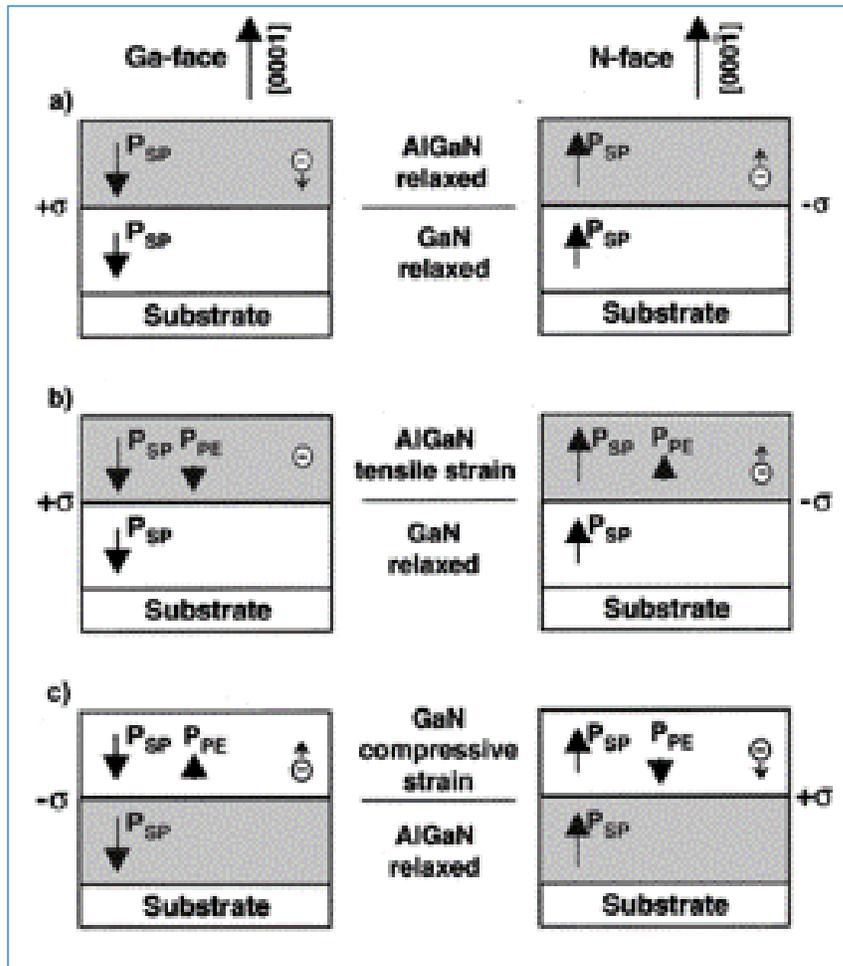


Figura 6. Direcciones de P_{SP} y P_{PE} , los planos de carga en la interfase inducida por estas polarizaciones, el movimiento de electrones en relación a la interfase. a) estructura relajada, b) estructura en tensión y c) estructura en compresión [16]

face-cara
relaxed-relajada
tensile strain-esfuerzo por tensión
compressive strain-esfuerzo por compresión
substrate-substrato

1.2.3 Técnicas de Crecimiento Utilizadas para el GaN y AlGaN: MBE y MOCVD

La Epitaxia por Haces Moleculares (MBE, Molecular Beam Epitaxy) y el Deposito Químico en Fase Vapor por Órgano-Metálicos (MOCVD, Metal-Organic Chemical Vapor Deposition) son las principales técnicas de crecimiento de películas de GaN y AlGaN y en particular de la estructura del HEMT aquí estudiada. El GaN crecido por cualquiera de ellas en sustratos extrínsecos presenta una elevada densidad de dislocaciones que deterioran la movilidad electrónica, la cual puede tomar valores entre 10 y 2000 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ para una concentración de electrones típica en el rango de 10^{14} - 10^{19} cm^{-3} , a temperatura ambiente [7,15]. Estos materiales, para la fabricación del HEMT, normalmente no son impurificados intencionalmente, sin embargo, presentan sistemáticamente conductividad tipo N

debida a donores residuales, con frecuencia asignados al oxígeno [6]. A continuación, se presentan brevemente estas técnicas de crecimiento.

1.2.3.1 Epitaxia por Haces Moleculares (Molecular Beam Epitaxy; MBE)

MBE es una técnica de crecimiento epitaxial que consiste en enviar hacia un sustrato cristalino haces moleculares de cada uno de los elementos químicos que constituyen el sólido creciendo, donde reaccionan incorporándose al sólido. Esto tiene lugar en una cámara a presión muy baja, típicamente 10^{-9} - 10^{-11} Torr. (Fig. (7)) [11,25]. La cámara contiene fuentes individuales para cada elemento a partir de las cuales se genera el haz molecular requerido para el crecimiento. Debido a la forma en que interactúan los elementos (Ga, N y Al) sobre la superficie del sustrato durante el crecimiento, las características de éste son altamente dependiente de la temperatura, la relación III/V y la velocidad de crecimiento [1].

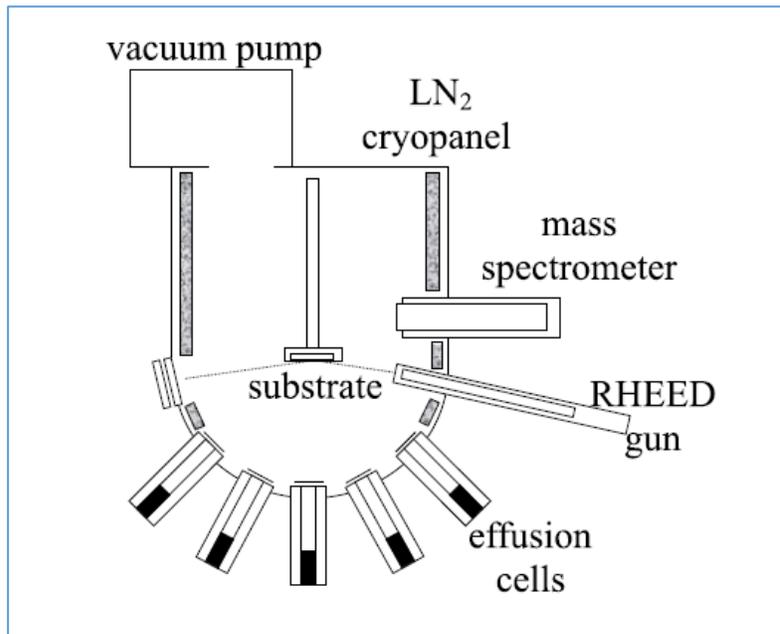


Figura 7. Sistema típico de MBE, en el cual es posible introducir sistemas para caracterización in-situ como RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction) [26].

vacuum pump-bomba de vacío
LN₂ cryopanel-Cryo-panel de nitrógeno líquido,
mass spectrometer-
espectrómetro de masas
substrate-sustrato
RHEED gun-cañón RHEED
(Difracción Reflexión de
Electrones de Alta Energía)
effusion cells-células de efusión

El ultra alto vacío (UHV, Ultra High Vacuum) propio del sistema de crecimiento permite utilizar varias técnicas de caracterización in-situ; como DMS (Desorption Mass Spectroscopy) y RHEED (Reflection High Energy Electron Diffraction) [11,26,27]. Esta última permite monitorear la velocidad de crecimiento mediante la observación de las oscilaciones de intensidad en el patrón de RHEED. Debido al preciso control que se puede tener del flujo de los haces moleculares, mediante la apertura y cierre de las válvulas mecánicas, esta técnica permite realizar crecimientos con transiciones de composición

tan abruptos como una mono-capa, lo cual ofrece la posibilidad de controlar la composición y el dopaje de la estructura capa por capa atómica [25,26,27].

La temperatura de crecimiento en MBE, típicamente entre 700-800 °C, es baja en comparación con MOCVD, lo que hace que el crecimiento se realice lejos del equilibrio termodinámico y que la calidad de las películas se degrade teniendo una mayor densidad de dislocaciones típicamente en el rango de 10^8 - 10^{11} cm⁻² [38,39,41]. La velocidad de crecimiento ofrecida por MBE es alrededor de 0.4 μm/h [11,37].

1.2.3.2 Metal-Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)

En la técnica de MOCVD se hace llegar a la superficie del sustrato cristalino, una mezcla de compuestos gaseosos en la que cada especie contiene un átomo de los elementos químicos que constituyen el sólido creciendo, esto generalmente bajo un vacío primario transportados por un gas, usualmente hidrógeno (Fig. (8)) [25,28].

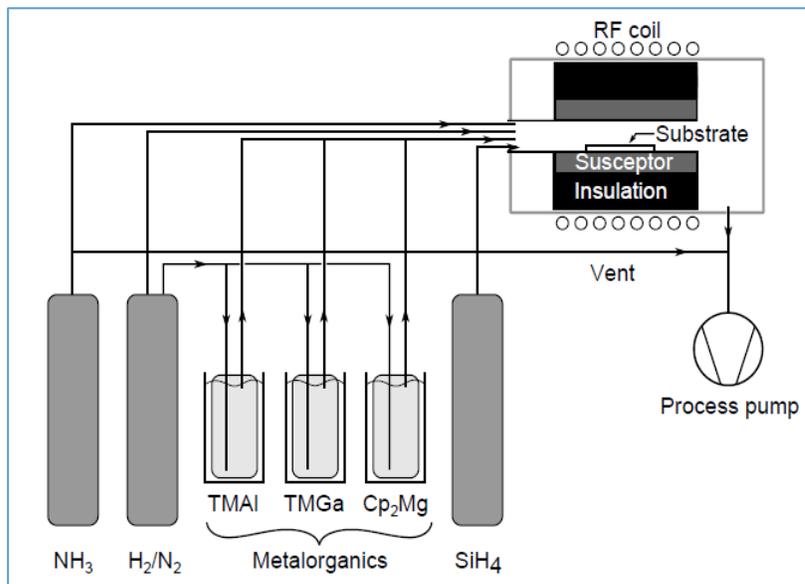


Figura 8. Esquema de un sistema horizontal de MOCVD [28].

RF coil-bobina de RF
substrate-substrato
susceptor-susceptor
insulation-aislante
vent-respiradero
process pump-bomba de Vacío
metalorganics-
metal_ orgánicos

Esta técnica maneja temperaturas más elevadas que MBE, para GaN generalmente superiores a 900 °C [11,28,29]. Las altas temperaturas de crecimiento y el flujo de los gases utilizados limitan el crecimiento de interfaces abruptas contrariamente a lo que ocurre en MBE, esto a pesar de las velocidades de crecimiento más elevadas [11,29]. En MOCVD es difícil utilizar técnicas de caracterización in situ de las capas epitaxiales, como RHEED [25]. Los gases precursores son

normalmente compuestos órgano-metálicos junto con un hidruro (NH₃), estos compuestos son volátiles y tóxicos, lo que es una desventaja [36,43].

1.2.4 Contactos Óhmicos y Rectificante.

En el HEMT los contactos de fuente y drenador deben ser óhmicos, su calidad afecta directamente el desempeño del dispositivo; es decir, que una alta resistencia de éstos lo deteriora. Un contacto óhmico está constituido por la unión de un metal o aleación de metales y un semiconductor, en la que la relación entre voltaje y corriente a través de ella sigue la ley de Ohm. Sin embargo, difícilmente esta unión resulta ser óhmica, debido a la presencia de estados superficiales del semiconductor que dan lugar a una barrera de energía en su superficie. Un tratamiento térmico apropiado elimina esta barrera. La resistencia específica de contacto (R_c [$\Omega \cdot \text{cm}^2$]) es el parámetro que cuantifica la calidad de un contacto óhmico. Además de una baja resistividad, el contacto óhmico debe ser estable y generar el menor ruido eléctrico, lo que es de suma importancia para aplicaciones en potencia y altas frecuencias [13]. En un buen contacto óhmico, la caída de potencial a través de él, debe ser despreciable comparada con la caída a través de la región activa del dispositivo [30].

En general, conseguir contactos óhmicos con baja resistencia específica en materiales con ancho de banda grande como el AlGa_N y el GaN de conductividad N es difícil, ya que no existen muchos metales con la función de trabajo apropiada, es decir aquellos que al realizar el contacto transfirieran electrones al semiconductor. Los metales más utilizados son; Ti ($\phi_M=4.33$ eV) y Al ($\phi_M=4.28$ eV). Como se ha dicho, después de depositados los metales, los contactos no son óhmicos, requiriendo un recocido térmico generalmente rápido (RTA, Rapid Thermal Annealing). Debido a las altas temperaturas utilizadas en el RTA (750-900 °C) la superficie puede degradarse aumentando su rugosidad y perdiendo definición de los bordes de los contactos, degradando al dispositivo [1,8]. Los metales más utilizados para los contactos ohmicos de este HEMT son: Ti/Al, recocidos por RTA a temperaturas; 750-900 °C que generalmente se estabiliza adicionando películas de Ni y Au resultando: Ti/Al/Ni/Au [31]. Con ellos se han obtenido resistencias específicas de contacto $\rho_c = 7 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$, utilizando espesores de 35nm/200nm/40nm/50nm respectivamente [8].

La compuerta, mediante la aplicación de un campo eléctrico perpendicular al plano del gas bidimensional en la región ocupada por éste bajo la primera, controla la carga libre en él y entonces la corriente que por él circula. En este HEMT aquella es una barrera Schottky, idealmente con pequeñas corrientes de fuga, baja resistencia en serie y elevada estabilidad físico-química. Para el caso de un semiconductor tipo N, una barrera Schottky se constituye con un metal con función de

trabajo; ϕ_M , mayor a la del semiconductor ($\phi_M > \phi_{sc}$). Así, para alcanzar el equilibrio se transfieren electrones del semiconductor hacia el metal, resultando en una barrera de energía (ϕ_b) en la interfaz metal-semiconductor. Para superficies ideales la altura de la barrera depende de ϕ_M y la afinidad electrónica del semiconductor (χ_{sc}), dada por [30]:

$$\phi_b = \phi_M - \chi_{sc} \quad (2)$$

De acuerdo con la ecuación (2), para obtener barreras Schottky elevadas es indispensable utilizar metales con grandes ϕ_M como el Au (5.32 eV), Ni (5.15 eV), Pt (5.4 eV) o Pd (5.1 eV) [32]. El Platino exhibe las barreras más altas hasta ahora reportadas (~ 1 eV), seguidas por el Au (~ 0.91 - 1.15 eV) y ligeramente inferiores las obtenidas con Ni (~ 0.66 - 1 eV) y Pd (~ 0.94 eV) [1,8].

1.3 Fabricación del HEMT AlGaIn/GaN; Crecimiento de la Estructura, Mesa y Contactos

La fabricación del transistor de alta movilidad de electrones (HEMT) a hetero-unión AlGaIn/GaN comprende dos etapas principales: el crecimiento de la estructura y el proceso tecnológico del dispositivo; mesas, contactos óhmicos de fuente y drenador y contacto rectificante de compuerta y finalmente la pasivación.

1.3.1 Crecimiento de la Hetero-unión (Epitaxia)

1.3.1.1 Película de Nucleación y Transición.

Se ha mencionado ya que las principales técnicas de epitaxia para crecer GaN y AlGaIn son: MOCVD y MBE, así como sobre la necesidad y consecuencias negativas de utilizar sustratos exógenos. Estos, debido a las diferencias de coeficientes de dilatación térmicos y constantes de red, ocasionan tensiones mecánicas que se liberan introduciendo dislocaciones, orientadas principalmente a lo largo de la dirección [0001] [33]; dirección en la cual crece el GaN. En ocasiones se llega hasta la ruptura de la película, lo que puede disminuirse creciendo una película semilla para favorecer la nucleación del GaN, típicamente AlN con espesor de 20 a 100 nm, [15-18]. Adicionales a esta capa se pueden crecer una o varias películas de transición, habitualmente en multicapas AlGaIn/AlN, AlGaIn/GaN, que sirven para mitigar la diferencia en los coeficientes de dilatación térmicos y mejorar las propiedades físicas de la estructura HEMT [20].

Obtener GaN con baja concentración de dislocaciones es sumamente importante para dispositivos de voltaje de ruptura alto, así como en dispositivos que manejan potencias elevadas. Los átomos en

el borde de las dislocaciones poseen enlaces sueltos que forman una línea de estados aceptores los cuales completan su enlace suelto capturando electrones [19]. Un método para determinar la densidad de dislocaciones en las películas de GaN tipo N, es el conteo de puntos negros en imágenes de cátodo-luminiscencia. Sin embargo, tiene la desventaja de que los puntos negros asociados a las dislocaciones pueden aparecer no solo por el efecto de una de éstas sino también como efecto de micro-precipitados de impurezas [34].

La actividad eléctrica de las dislocaciones también puede ser determinada mediante TEM combinado con holografía de electrones fuera de eje. Este método consiste en la reconstrucción del cambio de fase de la onda de electrones provocada por la carga en la dislocación que es medida con respecto a la fase de una onda de referencia, lo que permite deducir el potencial eléctrico generado por la carga en la dislocación (V_{dis}). Por este método se determinó que la densidad de carga en una dislocación puede alcanzar valores de densidad de carga, $\rho_{dis} = 7.2 \times 10^{19} \text{ e-cm}^{-3}$ [33].

1.3.1.2 Película Buffer y Región Activa

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores algunos grupos crecen una capa de GaN o AlGaN (con una fracción molar de Al pequeña), llamada *película buffer* o *colchón* con un espesor típico $>500 \text{ nm}$ [31,35]; con el objetivo de disminuir la densidad de dislocaciones y que además sea de alta resistividad para brindar aislamiento eléctrico entre el sustrato y la región activa; evitando corrientes de fuga a través de esta capa [37]. Sin embargo, debido a que el GaN no intencionalmente impurificado resulta tipo N, para algunas aplicaciones, se introducen impurezasceptoras (carbono (C) o Hierro (Fe)) para compensar la considerable cantidad de electrones [38]. En la parte superior de esta película es donde se habrá de alojar el 2DEG, por lo que una manera de disminuir las tensiones mecánicas y, por lo tanto, tener una menor densidad de defectos; es aumentando el espesor de la capa *buffer*. La región de la película de GaN donde se aloja el 2DEG es la denominada *región activa*.

1.3.1.3 Película de AlGaN

La función principal de la película de AlGaN, no intencional o intencionalmente impurificada tipo N, es dar lugar a la discontinuidad de la banda de conducción que producirá el pozo de potencial y aportar los electrones que constituyen el 2DEG. Típicamente posee una fracción molar de aluminio entre 15 y 30% y espesores entre 10 y 30 nm [17]. En algunas estructuras, entre las películas de GaN y AlGaN, se agrega una delgada capa de AlN de unos cuantos nanómetros de espesor ($\sim 2\text{-}3 \text{ nm}$) que aumenta la concentración de electrones y su movilidad en el 2DEG, debido al aumento de los efectos de polarización piezoeléctrica [19]. Para finalizar, se ha observado que una capa superior de GaN

(cap) con espesores de $\sim 2-3$ nm, mejora el estado de la superficie disminuyendo la corriente de fuga en la compuerta [18,20,35,36,40].

1.3.2 Procesamiento del Dispositivo

La fabricación del HEMT se realiza mediante tecnología planar cuyo procesamiento consta de tres pasos principales: el aislamiento de los dispositivos mediante una mesa, metalización de los contactos fuente y drenador, su recocido y depósito del metal de compuerta.

1.3.2.1 Estructura Mesa

La mesa de aislamiento interrumpe la conductividad del 2DEG con el entorno aislando, eléctricamente, HEMTs vecinos. La profundidad del decapado tiene que rebasar la posición del 2DEG, esto es entre 25 y 40 nm aproximadamente. La técnica consiste en cubrir con una máscara la región que será activa y, decapar el material en la parte no protegida por la resina en torno a la región activa. Dada la estabilidad química de los nitruros, el ataque húmedo es impracticable, por lo que se recurre a ataque seco mediante algún tipo de plasma. La técnica más utilizada es el ataque por iones reactivos (RIE, Reactive Ion Etching) basados en compuestos de cloro (SiCl_4) [1,8], la Fig. (9) muestra el borde de la mesa decapada.

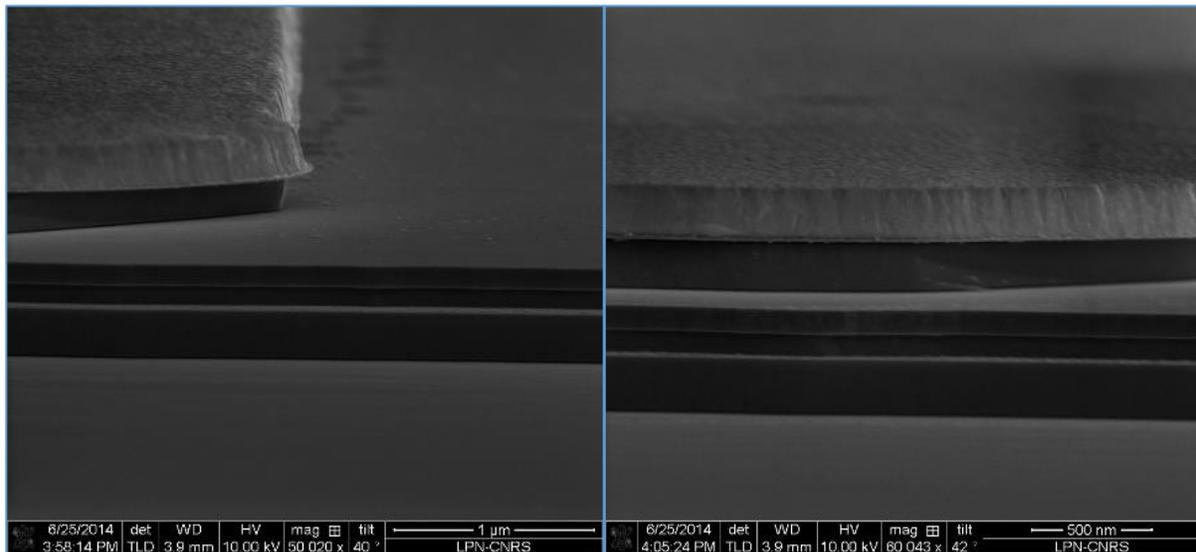


Figura 9. Muestra el decapado de la estructura mesa de los dispositivos estudiados.

1.3.2.2 Metalización

Habiendo realizado las mesas de aislamiento, se depositan los metales que constituirán los contactos óhmicos, evidentemente después del respectivo proceso fotolitográfico; a continuación, se efectúa el lift-off (desprendido) y eliminado de la resina para continuar con el recocido térmico, generalmente rápido (RTA). Finalmente, después del proceso fotolitográfico respectivo se efectúa el depósito del (los) metal(es) que dan lugar a la barrera Schottky que constituye la compuerta, en el caso de los dispositivos aquí estudiados; Ni. La Fig. (10) muestra las etapas del proceso de fabricación de los dispositivos, posterior a la epitaxia de la estructura de la hetero-unión AlGaN/GaN.

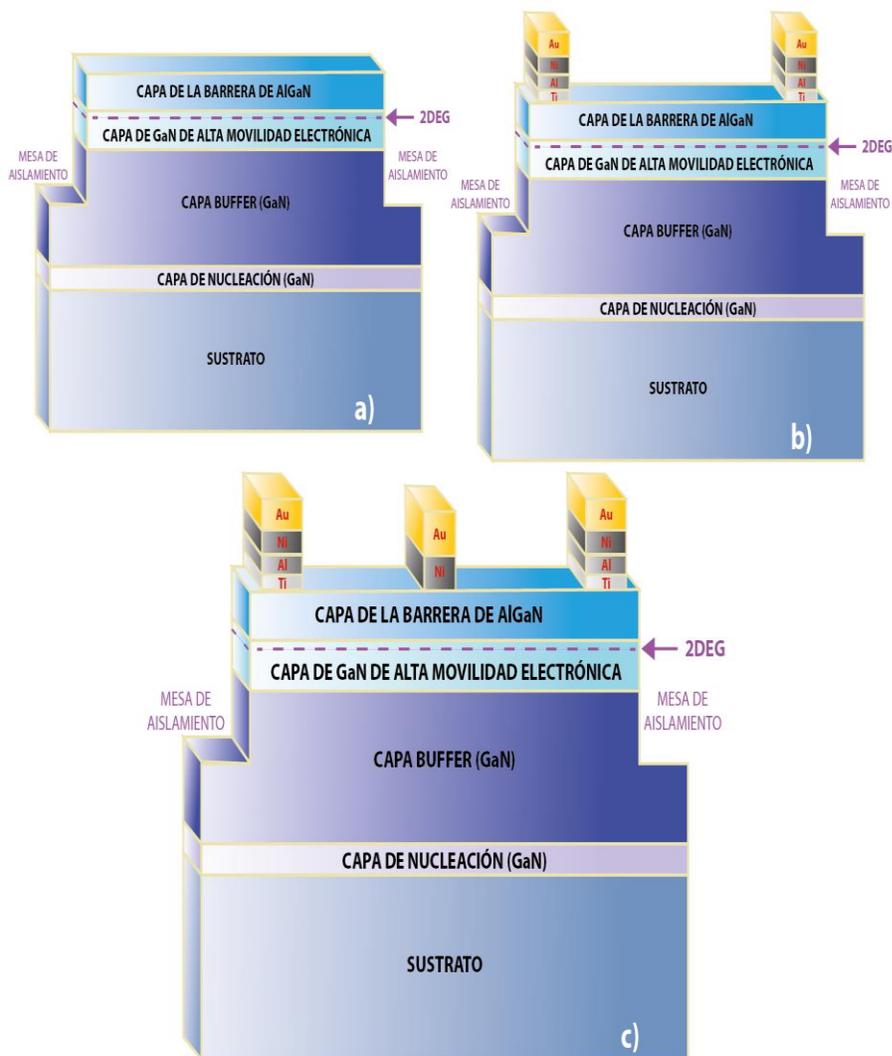


Figura 10. Procedimiento tecnológico del HEMT, una vez terminada la estructura de capas epitaxiales. a) Decapado de las mesas de aislamiento, b) Metalización de contactos óhmicos (fuente y drenador) y su recocido RTA (750-900 °C) y c) finalmente metalización de la barrera Schottky de compuerta.

Una vez terminado el dispositivo se puede pasivar, una manera de hacerlo es mediante el depósito de una capa de SiN; la cual además puede mejorar el desempeño del dispositivo, probablemente debido a la pasivación de defectos por la difusión de hidrógeno [41].

1.4 Operación Ideal del HEMT AlGaN/GaN

Como se ha mencionado, éste transistor de efecto de campo, como todos los de esta familia, tiene tres terminales; dos que manejan la corriente; fuente y drenador, y el tercero que la modula controlando la conductividad del canal (compuerta). En él, un voltaje positivo en el drenador respecto a la fuente (V_{DS}), da lugar a una corriente, I_{DS} , que circula a través del 2DEG cuya magnitud es controlada por el voltaje entre compuerta y fuente (V_{GS}). Valores de V_{GS} negativos sobreponen un campo eléctrico perpendicular al plano del canal que expulsa los portadores de éste modulando así su conductividad. Esta polarización puede llegar a desarrollar una zona de deserción bajo la compuerta que se extiende hacia el sustrato interrumpiendo el canal, apagando el dispositivo. El V_{GS} para el cual se inicia la interrupción u oclusión del canal se denomina voltaje de pinch-off (V_T).

Para voltajes de compuerta mayores a V_T la continuidad del canal se mantiene y el aumento de la polarización de V_{DS} incrementa la corriente I_{DS} , inicialmente con una relación lineal, para V_{DS} mayores el incremento de la corriente es sub-lineal alcanzando la saturación, que se presenta en detalle más adelante. El valor máximo de corriente de saturación (I_{DSmax}) depende de la densidad de portadores libres en el canal, n_s (e^-/cm^2), de su movilidad, μ_e [$cm^2/V\cdot s$], de la longitud de la compuerta (L_G) y la distancia fuente-drenador.

Será en el siguiente capítulo en el que se describa de manera cuantitativa el principio de operación de este dispositivo HEMT AlGaN/GaN.

1.5 Estado del Arte

Después de 25 años de su aparición éste HEMT ha evolucionado muy rápidamente, varias versiones de él se encuentran ya en el mercado. A continuación, se dan algunos parámetros que establecen su estado actual de desarrollo: densidad de corriente I_{DSmax} de 1.4 A/mm con longitud de compuerta (L_G) 0.2 μm [42] y transconductancia (g_m) superiores a 354 mS/mm con L_G de 0.25 μm crecidos sobre zafiro [43], I_{DSmax} de 1.18 A/mm y g_m de 245 mS/mm crecidos sobre SiC [44] y en sustratos de Si, I_{DSmax} de 1.13 A/mm y g_m de 388 mS/mm con L_G de 100 nm [45]. En cuanto a las características de RF, se han reportado frecuencias de corte (f_T) de 342 GHz y una frecuencia máxima de operación ($f_{m\acute{a}x.}$) de 518 GHz con una L_G de 20 nm sobre SiC [4]. El dispositivo ha mostrado capacidad para operar a 750

°C, a altas frecuencias con bajos niveles de ruido [1,2,26,27,49,51]. Resumiendo, el dispositivo maneja densidades lineales de corriente del orden de 1.4 A/mm y frecuencias superiores a la centena de GHz.

Finalmente, después de la revisión de la estructura y sus características eléctricas es evidente que es el 2DEG, que se forma de manera espontánea en la heterounión AlGaN/GaN, la componente fundamental de este dispositivo. Y que tanto el crecimiento epitaxial de cada una de las capas como el procesamiento tecnológico tienen un impacto directo en el desempeño del HEMT.

1.5.1 Efecto de la longitud de la compuerta en el desempeño del HEMT

Transistores GaN HEMT para amplificadores de potencia MMIC (circuito integrado de microondas monolítico), con longitudes de compuerta de $0.15 \mu\text{m}$ tuvieron picos de transconductancia extrínseca superiores a 360 mS/mm para $V_{DS} = 10\text{V}$, $I_{DS\text{máx}}$ de 1.2 A/mm , f_T de 90 GHz y $f_{\text{máx}}$ superior a 200 GHz , además ganancia de señal pequeña de 19.6 dB a 84 GHz [7].

Aplicaciones a dispositivos de electrónica de potencia para RF, basados en este tipo de transistores han alcanzado densidades de potencia de $30 - 40 \text{ W/mm}$, un orden de magnitud más que para sus pares de GaAs, en dispositivos con L_G del orden de los submicrones [53].

Como se verá más adelante, el manejo de corriente de este dispositivo está determinado por las propiedades del 2DEG; concentración de electrones libres, su movilidad y entre los geométricos se tiene la longitud del canal que depende de la longitud de la compuerta (Ec. (29)). En la literatura se encuentran cantidad de reportes que dan las propiedades de transporte de carga de la estructura para una geometría determinada. Sin embargo; no hemos encontrado ningún reporte en el que se estudie en la misma estructura; es decir misma oblea, la capacidad de manejo de corriente de HEMTs realizados en ella, pero variando únicamente la longitud de la compuerta. Estudio que constituye el objetivo principal de esta tesis.

1.6 Resumen

Debido a los altos costos de sustratos nativos de GaN, este debe ser crecido en sustratos exógenos como SiC, Al₂O₃ y Si cada uno con sus ventajas y desventajas, siendo el Si el utilizado para crecer las estructuras aquí estudiadas.

La calidad de los nitruros GaN y AlGaIn, es determinante para obtener un 2DEG con alta concentración de electrones y movilidad, características medulares en el desempeño de este dispositivo, además de la fabricación de contactos óhmicos (fuente y drenador) con baja resistencia y una compuerta (barrera Schottky) idealmente con pequeñas corrientes de fuga, son fundamentales.

El crecimiento de la heterounión se puede realizar por MOCVD o MBE, los transistores que se analizan en este trabajo corresponden a estructuras crecidas mediante esta última técnica. Y la fabricación del dispositivo estructuras mesa y la metalización son primordiales para un buen rendimiento de los dispositivos.

2. Capítulo II. Transporte de carga en el HEMT de AlGaIn/GaN

En este capítulo se presenta la descripción cuantitativa del origen del gas bidimensional de electrones (2DEG) contenido en un pozo de potencial cuasi-triangular presente en la heterounión AlGaIn/GaN. Éste constituye el canal de conducción, a través del cual se realiza el transporte de carga que da lugar a las curvas de salida del transistor, $I_{DS}-V_{DS}$ con V_{GS} como parámetro; que son analizadas tanto en la región lineal como en la de saturación. La profundidad del pozo de potencial, así como los primeros niveles permitidos dentro de él; son calculados teóricamente y comparados con los valores reportados en la literatura. Se revisa el concepto de transconductancia como figura de mérito del HEMT. Lo anterior con el fin de entender los parámetros que determinan las características del transistor y los efectos que conllevan la variación en la longitud de la compuerta (L_G), para dar cumplimiento teórico al objetivo de esta tesis.

2.1 Origen del Gas Bidimensional de Electrones (2DEG)

El transporte de carga en este transistor (HEMT) ocurre a través del gas bidimensional de electrones (2DEG) que se forma espontáneamente en esta heterounión. Una de sus singularidades es que ninguna de las películas que lo conforman requiere de dopaje alguno para tener la alta densidad de electrones observada en el 2DEG, ya que tanto el AlGaIn como el GaN, resultan de conductividad N aún sin impurificarlos expresamente.

Una heterounión se forma con dos semiconductores de composición química diferente, lo que implica diferencias en: ancho de banda (E_g), funciones de trabajo ($q\phi$), afinidad electrónica (χ) y permitividades eléctricas (ϵ_s) entre otras. En la Fig. (11a) se muestra los diagramas de bandas del AlGaIn y del GaN en equilibrio, sin interacción entre ellos. La diferencia en las afinidades electrónicas (χ_{AlGaIn} y χ_{GaN}) establece una discontinuidad en la banda de conducción ΔE_C . Ésta, aunada a los diferentes valores de banda prohibida ΔE_g , puede conducir a otra discontinuidad en la banda de valencia ΔE_V . Al ponerlos en contacto la diferencia en sus funciones de trabajo; $\phi_{AlGaIn} < \phi_{GaN}$, es tal que electrones son transferidos del AlGaIn al GaN hasta alcanzar el equilibrio; es decir, cuando los respectivos niveles de Fermi se alinean, Fig. (11b). Los electrones transferidos se localizan en el GaN en la vecindad de la interfase AlGaIn/GaN. Esta carga negativa compensa inclusive a la carga fija (positiva) ($+\sigma_i^{POL}$) inducida en el plano inicial (conforme al crecimiento) del AlGaIn resultado de la polarización espontánea y piezoeléctrica, constituyendo así el gas bidimensional de electrones (2DEG), (Fig. 11b).

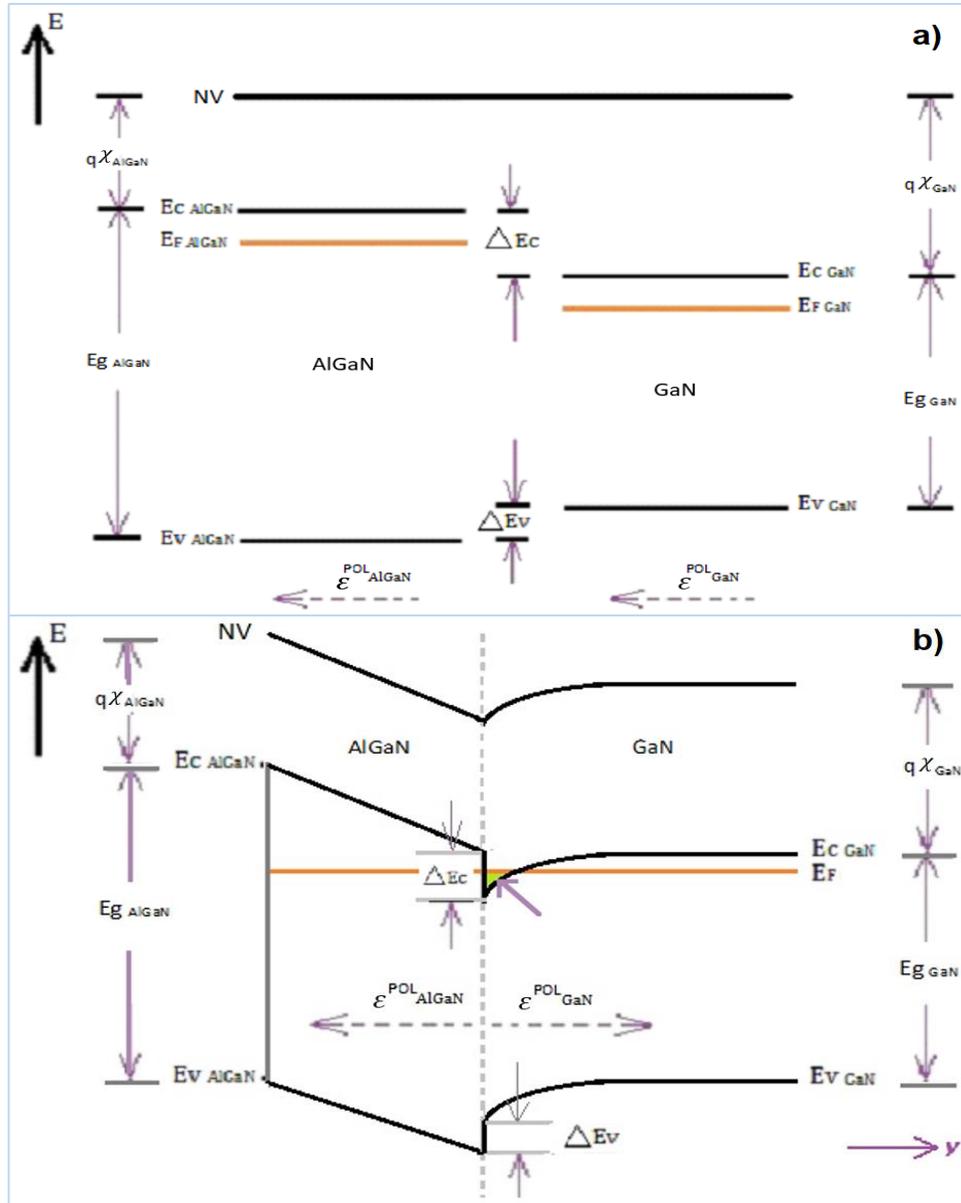


Figura 11. Heterounión AlGaN/GaN; a) Diagramas de bandas del GaN y el AlGaN en su condición de equilibrio antes del contacto que da lugar a la interacción entre ellos y b) Diagrama de bandas de los materiales en contacto ya alcanzado equilibrio, se considera que en el AlGaN no hay carga fija (la flecha en diagonal apuntando a la interfase muestra la localización del gas bidimensional d electrones).

Se ha propuesto que el origen de los electrones que dan lugar al 2DEG son donores en la superficie del AlGaN con una concentración al menos igual a la densidad típica de electrones en el 2DEG ($1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) [1]. Tales defectos donadores pueden ser nativos, impurezas no intencionalmente agregadas y estados superficiales, desde los cuales los electrones pasan a niveles de menor energía en el GaN. Sin

embargo, de ellos no se sabe su origen, localización ni energía en la banda prohibida del AlGaN, Por lo que el origen del 2DEG, sigue siendo una pregunta abierta [1,19,46].

Se ha visto antes que tanto el GaN como el AlGaN son asimétricos a lo largo del eje c, lo que genera una polarización espontánea y establece la propiedad de ser piezoeléctricos. Además, sobre los sustratos exógenos más utilizados, ambos crecen en estructura wurtzita y orientación [0001], donde se manifiesta la piezoelectricidad. En la estructura del HEMT debido a la diferencia de las constantes de red, el AlGaN se encuentra tensado y dado que la película de GaN es de mucho mayor espesor que la primera, ésta última se puede considerar relajada, lo que da lugar a una polarización piezoeléctrica en el AlGaN en la misma dirección que la espontánea Fig. (12 a). La diferencia de las polarizaciones del GaN y el AlGaN en la interfase da lugar a una carga neta positiva en la superficie del AlGaN que constituye la interfase de la heterounión. Esta carga contribuye a la localización de los electrones que forman el 2DEG, Fig. (12 b). La densidad de carga fija positiva (σ_i^{POL}) inducida por la polarización piezoeléctrica, está dada por:

$$\sigma_i^{POL} = P_{GaN} - P_{AlGaN} = P_{SP}(GaN) - [P_{SP}(AlGaN) + P_{PE}(AlGaN)] \quad (3)$$

donde P_{GaN} , es la polarización total en el GaN, P_{AlGaN} es la polarización total en el AlGaN. Estimaciones teóricas dan un valor de $\sigma_i^{POL} = 2.7 \times 10^{-6} \text{ C/cm}^2$, para una heterounión $Al_{0.3}Ga_{0.7}N/GaN$ lo que equivale a $1.7 \times 10^{13} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ [16].

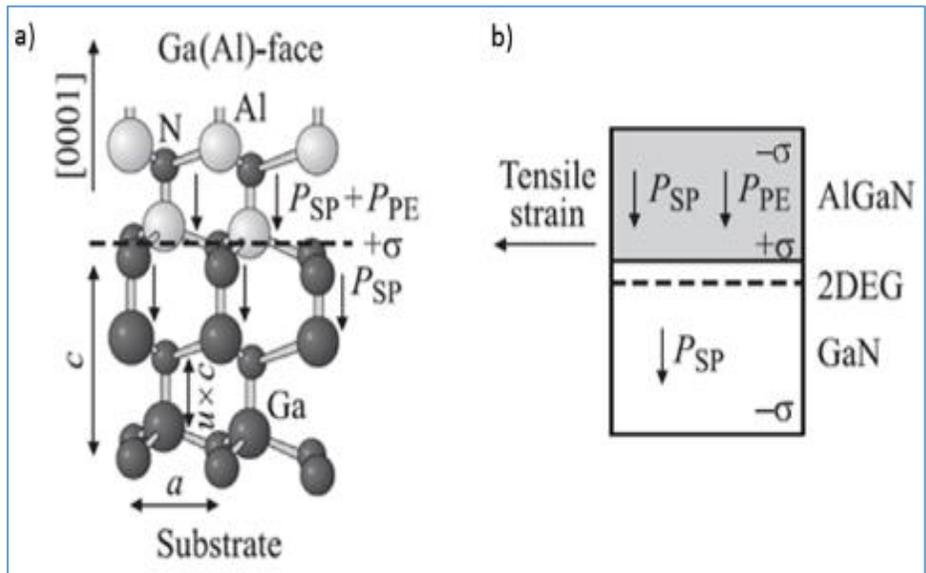


Figura 12. a) Polarización espontánea y piezoeléctrica en la misma dirección en el AlGaN y carga en la interfase debido a esta, b) 2DEG en el GaN, pero confinado en la interfase por la carga neta en esta [21].

face-cara
substrate-substrato
tensile strain-
deformación por
tensión

Rigurosamente, la densidad superficial de carga fija positiva (σ_i^{POL}) está compensada por una densidad equivalente de carga negativa, Q_n , de electrones libres; n_s y aceptores ionizados, N_A , es decir que se tiene la siguiente igualdad:

$$Q_n = qn_s + qN_AW_n \quad (4)$$

donde n_s es la densidad superficial de electrones libres en el 2DEG [e^-/cm^2], N_A , es la concentración de aceptores en el GaN [átomos/ cm^3] y W_n es el ancho de la región de carga espacial en el GaN. La distribución de carga en la interfase y su vecindad produce una distribución de campo eléctrico transversal; \mathcal{E}_y , perpendicular al plano de la interfase. Así como una distribución de energía potencial conformando un pozo de potencial cuasi-triangular en la interfase pero enteramente contenido en el GaN que mantiene los electrones localizados en éste, Fig. (11 b). La película de GaN no está impurificada intencionalmente; sin embargo, generalmente presenta una conductividad tipo N y considerando que N_A es pequeña; se tiene $qn_s \gg qN_AW_n$. Por lo que (4) puede reescribirse como:

$$Q_n \approx qn_s \quad (5)$$

2.2 El Pozo de Energía Potencial

A partir de la ley de Gauss y la carga neta en el GaN se puede determinar el campo eléctrico en la interfase, producido por tal densidad de carga, \mathcal{E}_c (6).

$$Q_n = -\epsilon_s \mathcal{E}_y \quad (6)$$

Considerando $n_s \sim 10^{13} cm^{-2}$ [16], lo que es igual a una densidad de carga superficial $Q_n \sim 1.602 \times 10^{-6} C/cm^2$; en la interfase de la heterounión $\mathcal{E}_y \sim 2.033 \times 10^6 V/cm$, dirigido hacia el sustrato. Lo que da lugar a una distribución de energía potencial “doblamiento de las bandas” que con la discontinuidad en la banda de conducción (ΔE_c), conforma un pozo de potencial cuasi-triangular, donde son confinados los electrones libres Fig. (11).

La profundidad del pozo de potencial puede ser determinada a partir de la solución de la ecuación de Poisson unidimensional, para el capacitor MIS [30]. La Fig. (13), muestra el diagrama de bandas únicamente del GaN y sobre todo el potencial $\psi(y)$ a través de éste, medido el potencial con respecto al nivel de Fermi intrínseco (E_i). El valor del potencial se considera cero para valores de y alejados de la interfase, es decir en el volumen de la película de GaN; $\psi(y \rightarrow \infty) = 0$. En la superficie

del GaN, en la interfase AlGaIn/GaN, $\psi_S(y = 0) = \psi_S$, lo que significa que ψ_S es la caída total de potencial en el GaN. Entonces, ψ_S , determina la profundidad total del pozo que alberga al 2DEG.

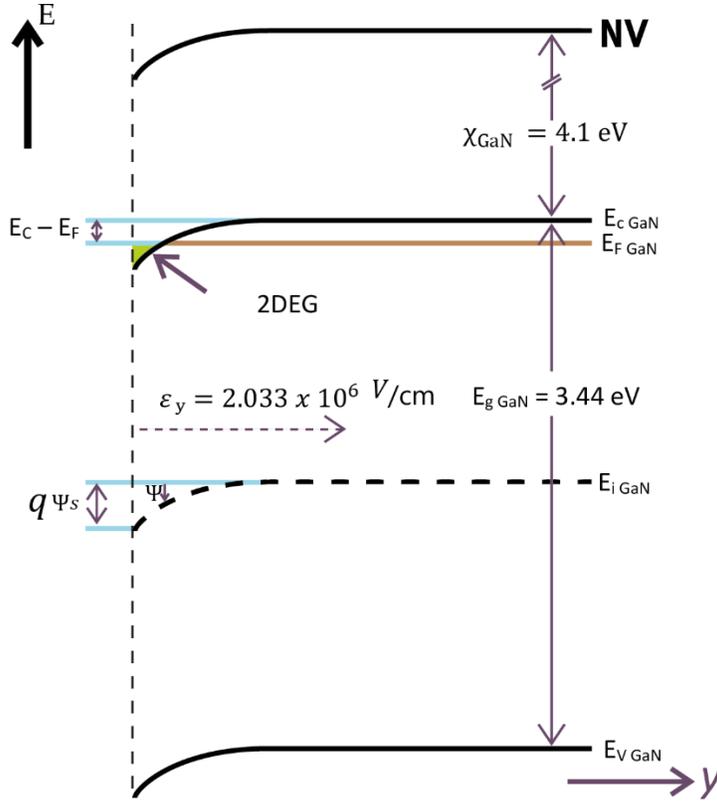


Figura 13. Diagrama de bandas del GaN, cuando se ha formado la heterounión.

Ahora bien, el potencial ψ es función de la posición "y" y puede determinarse a partir la ecuación de Poisson unidimensional en y :

$$\frac{d^2\psi}{dy^2} = -\frac{\rho(y)}{\epsilon_s} \quad (7)$$

donde $\rho(y)$, es la densidad de carga neta en el GaN, dada por:

$$\rho(y) = q[n_{n0}(e^{-\beta\psi(y)} - 1) - p_{n0}(e^{\beta\psi(y)} - 1)] \quad (8)$$

donde n_{n0} y p_{n0} son las densidades de electrones y huecos en la capa de GaN en equilibrio, $\beta = \frac{q}{kT}$, q , es la carga del electrón, k , es la constante de Boltzmann y T , es la temperatura.

Integrando la ecuación de Poisson desde la región eléctricamente neutra de la capa de GaN hasta la superficie en la interfase AlGaIn/GaN, se obtiene la relación entre el campo eléctrico, $\mathcal{E}_y(y)$ y el

potencial $\psi(y)$. En la superficie del GaN adyacente a la interfase de la hetero-unión, tiene que $\psi = \psi_s$, por lo tanto, el campo eléctrico ahí está dado por:

$$\mathcal{E}^2(\psi_s) = \frac{2qn_{n0}}{\epsilon_s\beta} \left[\left(\frac{p_{n0}}{n_{n0}} \right) (e^{-\beta\psi_s} + \beta\psi_s - 1) + (e^{\beta\psi_s} - \beta\psi_s - 1) \right] \quad (9)$$

Como ya se mencionó, la profundidad del pozo de energía potencial corresponde al valor ψ_s . Entonces, considerando un valor aproximado del campo eléctrico en la superficie, antes encontrado ($\mathcal{E}_y \sim 2.033 \times 10^6$ V/cm), es posible determinar un valor aproximado de $q\psi_s$. Esto se puede realizar graficando el campo eléctrico (Ec. 9), en función del potencial superficial. De ésta gráfica se obtiene, a partir del valor aproximado del campo eléctrico en la superficie del GaN, el valor correspondiente para $q\psi_s$. Esto se ilustra en la Fig. (14) de la que se obtiene $q\psi_s \cong 0.27$ eV.

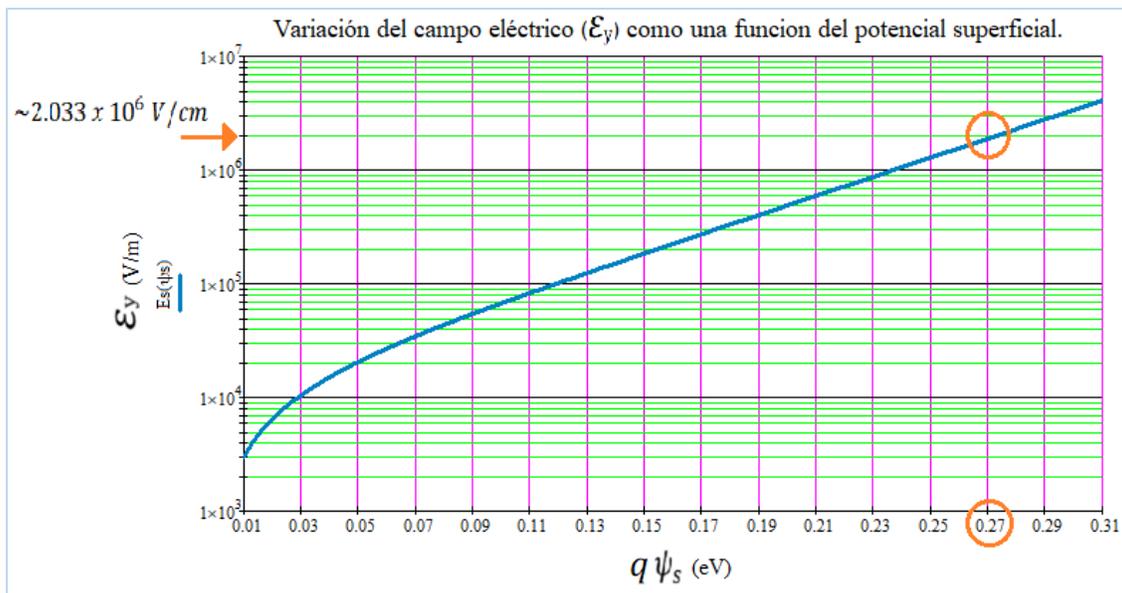


Figura 14. Variación del campo eléctrico (\mathcal{E}_y) en función del potencial superficial (ψ_s). De esta gráfica se determina que para un campo eléctrico de $\sim 2.033 \times 10^6$ V/cm, el potencial superficial deberá tener un valor ~ 0.27 eV.

Dado que el pozo de potencial alberga los electrones del 2DEG, es imprescindible entonces, conocer la posición del nivel de Fermi (E_F) para el GaN; y de esta manera confirmar la acumulación de carga libre en el pozo. De la función de distribución de Fermi-Dirac, N_C la densidad efectiva de estados en la banda de conducción del GaN y la concentración de portadores n_{n0} , que sabemos es $\sim 10^{16}$ cm⁻² [11], es posible determinar la posición de E_F , respecto a la banda de conducción, de acuerdo a la Ec. (10) [30]:

$$n_{n0} = N_C e^{-\left(\frac{E_C - E_F}{kT}\right)} \quad (10)$$

$$N_C = 4.3 \times 10^{14} \cdot T^{3/2}$$

Obteniéndose $E_C - E_F = 0.14$ eV. Como la profundidad antes estimada del pozo de energía potencial es ~ 0.27 eV, el nivel de Fermi en la superficie del GaN en la interfase AlGaN/GaN, se encuentra dentro del pozo cuasi-triangular, confirmando la acumulación de electrones en este, formando el gas bidimensional (2DEG).

2.2.1 Concentración de Electrones en el Gas Bidimensional (2DEG)

La densidad de electrones en el gas bidimensional ha sido determinada teórica y experimentalmente, encontrándose que ésta depende tanto de la composición de la película de AlGaN; es decir, de la cantidad de aluminio (Fig. (15)), como del espesor del AlGaN hasta unos 20 nm aproximadamente, para espesores mayores la concentración resulta independiente del espesor Fig. (16) [16].

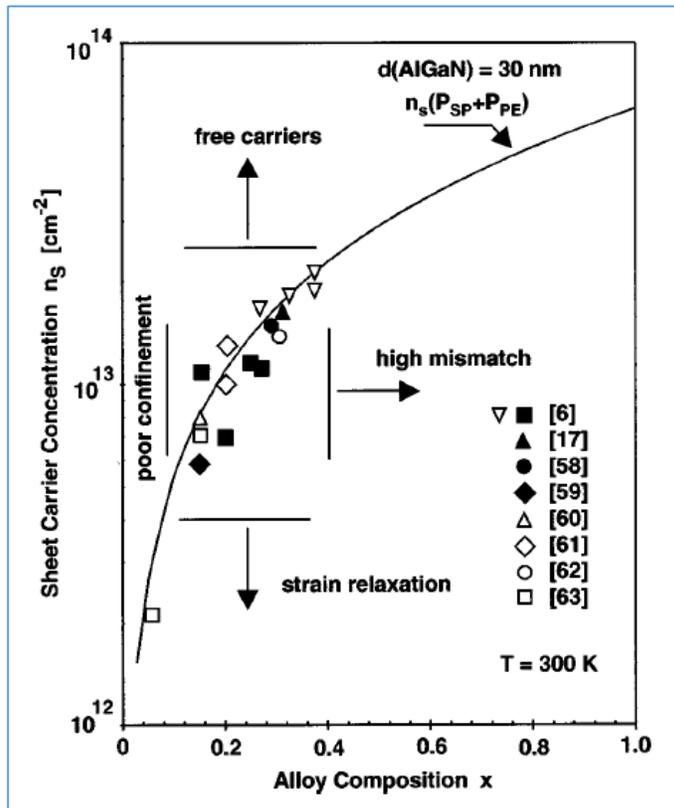


Figura 15. Densidad de portadores del gas bidimensional de electrones localizado en la interfase AlGaN/GaN en función de la concentración molar de Al(x) en la capa de $Al_xGa_{1-x}N$ experimentalmente determinados [16].

sheet carrier concentration-
concentración de hoja de portadores
free carriers-portadores libres
poor confinement-confinamiento
pobre
high mismatch-alto desajuste
strain relaxation-relajación de
tensión
alloy composition-composición de la
aleación

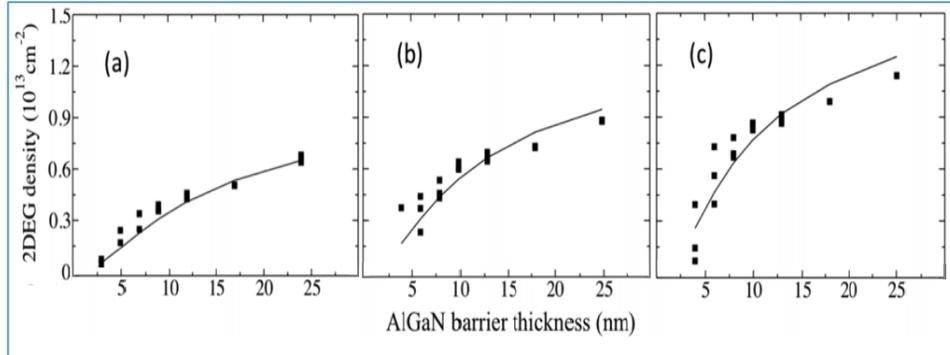


Figura 16. Densidad del 2DEG como una función del espesor de la capa barrera de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ para diferentes valores de concentración molar de Al; a) 19%, b) 24% c) 29% [63].

2DEG density-
densidad del
2DEG
AlGaN barrier
thickness-
espesor de la
barrera de
AlGaN

2.2.2 Movilidad de Electrones en el Gas Bidimensional (2DEG)

A temperatura ambiente dos son los mecanismos de dispersión dominantes que limitan el valor de la movilidad en el gas bidimensional de electrones; la dispersión debida a la red por fonones y la dispersión debida a los defectos en la red cristalina de la estructura, dislocaciones principalmente, Fig. (17). Estas se presentan brevemente a continuación. [1,46,48].

Dispersión por fonones: una red con potencial periódico perfecto permite que los electrones se muevan a través de ella sin colisiones que los dispersen; sin embargo, debido a la temperatura los átomos en la red oscilan respecto a su posición de equilibrio, causando una perturbación en el potencial dando lugar a un mecanismo de dispersión debido a la interacción entre los portadores y esas perturbaciones o fonones [1]. La movilidad debida a dispersión por fonones, está dada por [48]:

$$\mu_{opt}^{2D} \propto e^{E_0/kT} \left[1 - \frac{5kT}{E_g} \right] \quad (11)$$

donde E_g , es la energía de la banda prohibida del GaN y $E_0 = 90.5 \text{ meV}$, es la energía del fonón óptico en el GaN. La Fig. (17) muestra que ésta domina para T superiores a 200 K.

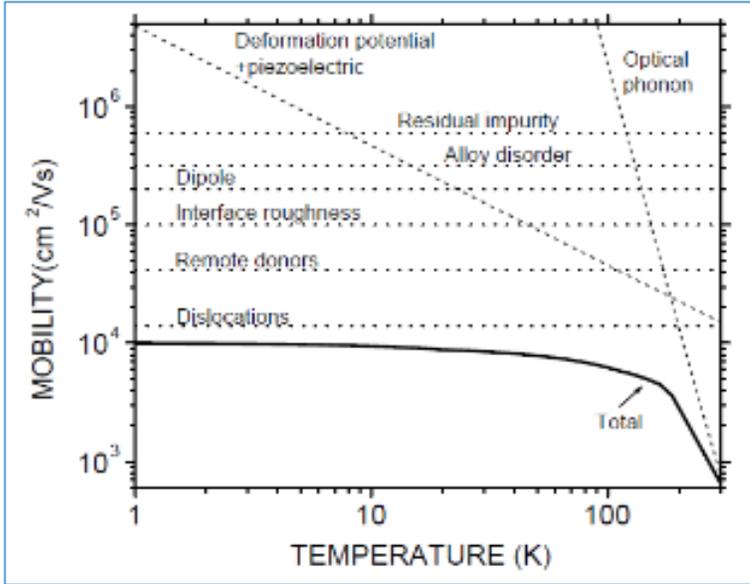


Figura 17. Movilidad de electrones en la estructura $Al_{0.15}Ga_{0.85}N/GaN$ en función de la temperatura para diferentes mecanismos de dispersión, [48].

mobility-movilidad
temperature-temperatura
deformation potential
piezoelectric-potencial de
deformación piezoeléctrico
optical phonon-fonones
ópticos
residual impurity-impurezas
residuales
alloy disorder-desorden por
aleación
dipole-dipolo
interface roughness-rugosidad
de la interfase
remote donors-donores
remotos
dislocations-dislocaciones

Dislocaciones: Las dislocaciones son defectos extendidos constituidos por la inserción de un semiplano. Los enlaces incompletos a lo largo del borde del semiplano constituyen estados aceptores, dando lugar a una línea de carga que desarrolla una zona de deserción a su alrededor y una barrera de energía que dispersa los electrones libres reduciendo su movilidad, y que está dada por: [19,49],

$$\mu_{disl} = \frac{30\sqrt{2\pi}(\epsilon a)^2 (kT)^{3/2}}{N_{dis} q^3 f^2 \lambda_D m^{*1/2}} \quad (12)$$

donde N_{dis} , es la concentración de dislocaciones por unidad de área, a , es la separación entre estados aceptores a lo largo de la línea de dislocaciones que tanto en el GaN como en el AlGaN están en la dirección C, f es la fracción de llenado de esos estados aceptores, [46], ϵ , es la constante dieléctrica del material, m^* , es la masa efectiva del electrón, k , es la constante de Boltzmann, T , es la temperatura, q , es la carga del electrón y λ_D es la longitud de apantallamiento de Debye y está dada por:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon kT}{q^2 n} \right)^{1/2} \quad (13)$$

donde n , es la concentración de electrones libres.

La movilidad resultante en el 2DEG, es función de cada uno de los mecanismos de dispersión, determinada por la regla de Matthiessen [46,48,49]:

$$\frac{1}{\mu_{tot}} = \sum_i \frac{1}{\mu_i} \quad (14)$$

Experimentalmente se ha comprobado que el mecanismo de dispersión que mayormente afecta la movilidad de los electrones son las dislocaciones cuando están presentes en concentraciones $\geq 10^8$ cm^{-2} , La Fig. (17) muestra la dependencia de la movilidad para cada mecanismo antes descrito y el total para una estructura $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}/\text{GaN}$ [48] y la Fig. (18) muestra resultados experimentales en función del grosor de la película de AlGaN y del contenido de Al; donde la movilidad permanece constante para espesores por arriba de los 10 nm .

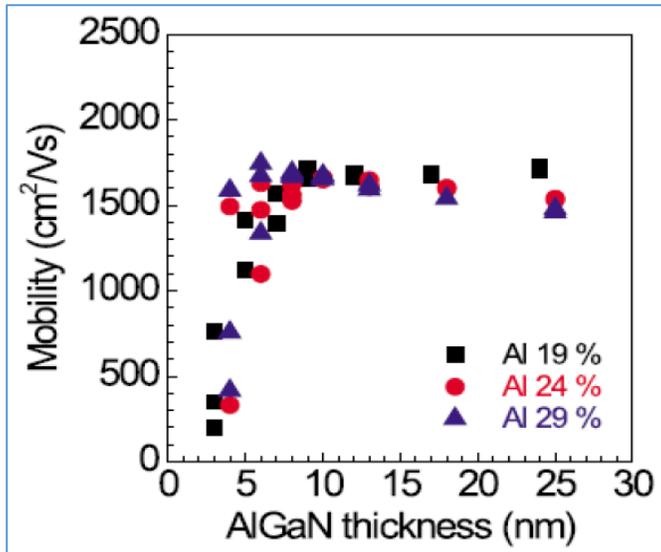


Figura 18. Movilidad como función del espesor y la concentración molar de aluminio (x) en la película de AlGaN [54].

mobility-movilidad
AlGaN thickness-espesor del AlGaN

2.2.3 Movilidad en el 2DEG; resultados experimentales

Como se ha mencionado la hetero-unión AlGaN/GaN puede ser crecida tanto por MBE como por MOCVD y en muy diferentes condiciones de crecimiento en cada una de ellas, resultando concentraciones de portadores y su movilidad muy variadas. Las Figs. (19) y (20) resumen los resultados más relevantes reportados en la literatura los cuales son muy próximos, aunque ligeramente mejores para las estructuras crecidas por MOCVD. En promedio se observa una mayor movilidad para las estructuras crecidas por MOCVD que las crecidas por MBE: con valores promedio de $1560.42 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ y $1477.78 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ respectivamente.

Para ambas técnicas existe una dependencia de la movilidad en función de la concentración de electrones libres en el 2DEG. Los valores tanto para n_s (e^-/cm^2) como para μ_e [$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$] sugieren que por ambas técnicas es posible realizar dispositivos con valores aceptables tanto de densidad de portadores como de movilidad; teniendo como única ventaja, las propias de cada una de las técnicas.

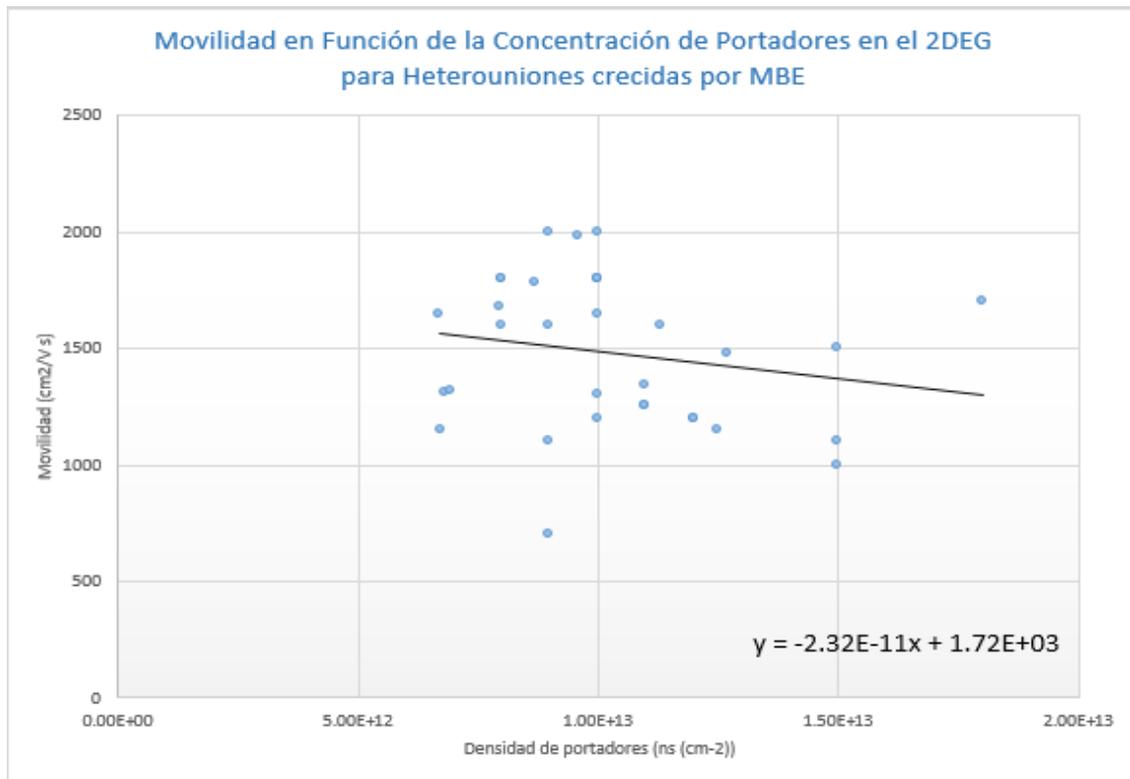


Figura 19. Gráfica de la movilidad en función de la concentración de portadores en el 2DEG para estructuras crecidas por MBE. Los valores graficados fueron extraídos de la literatura y pueden consultarse en la Tabla 2 del Apéndice I.

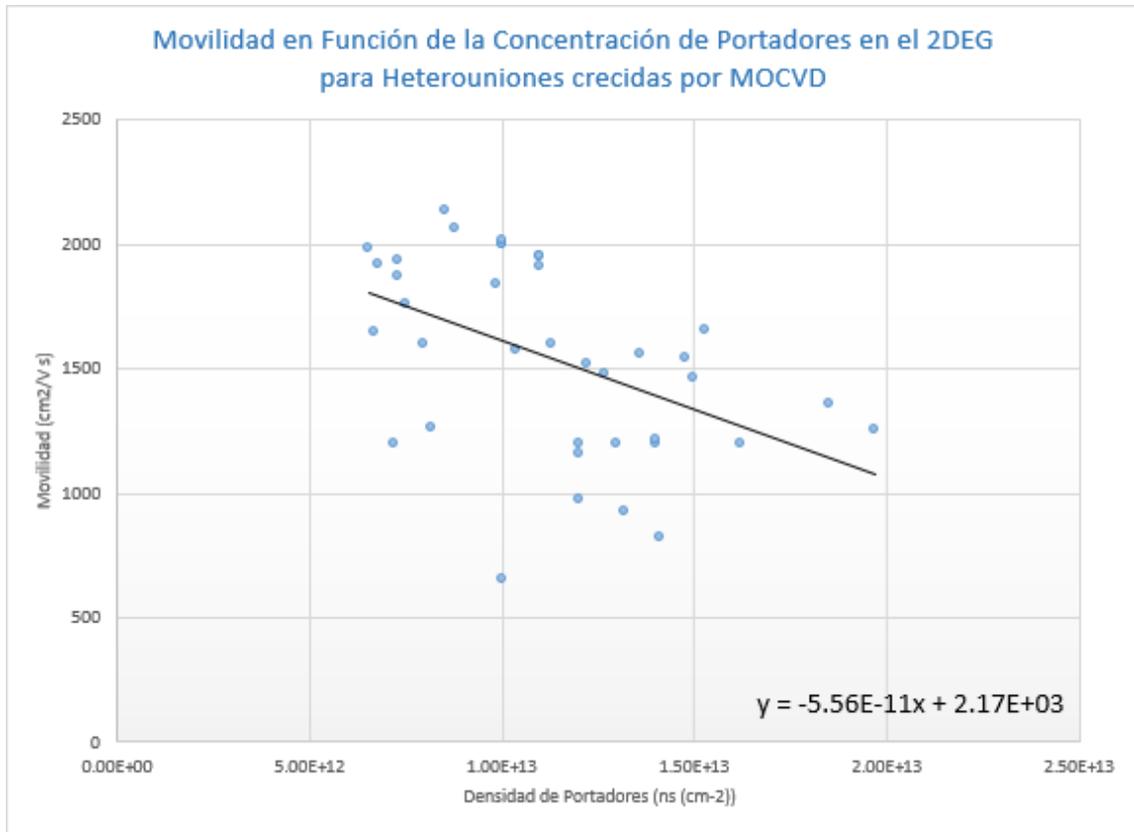


Figura 20. Gráfica de la movilidad en función de la concentración de portadores en el 2DEG para estructuras crecidas por MOCVD. Los valores graficados fueron extraídos de la literatura y pueden consultarse en la Tabla 3 del Apéndice I.

2.3 Transporte de carga en el HEMT AlGaIn/GaN

La Fig. (21 a), muestra el corte transversal de un HEMT AlGaIn/GaN, con las características geométricas más importantes que se refieren para el transporte de carga; además la Fig. (21 b) muestra una de las estructuras de trabajo crecidas por MBE.

2.3.1 Curvas de Salida del Transistor: $I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$

El transporte de la carga, como en todo FET, ocurre a través de un canal conductor cuya conductividad es modulada por un voltaje aplicado en la compuerta. La corriente en el canal se establece polarizando el drenador con respecto a la fuente; V_{DS} , produciendo un *campo eléctrico longitudinal* (\mathcal{E}_x) paralelo a la interfase de la hetero-unión. Las curvas de salida del HEMT; es decir, *corriente de drenador en función del voltaje fuente-drenador, con el voltaje fuente-compuerta como parámetro*; $I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$, resultan de la modulación de la densidad de portadores en el 2DEG por efecto

de V_{GS} (Fig. 22) [47]. Estas curvas, generalmente se dividen en dos regiones; la lineal y la de saturación. A continuación, se detalla el mecanismo físico que las genera.

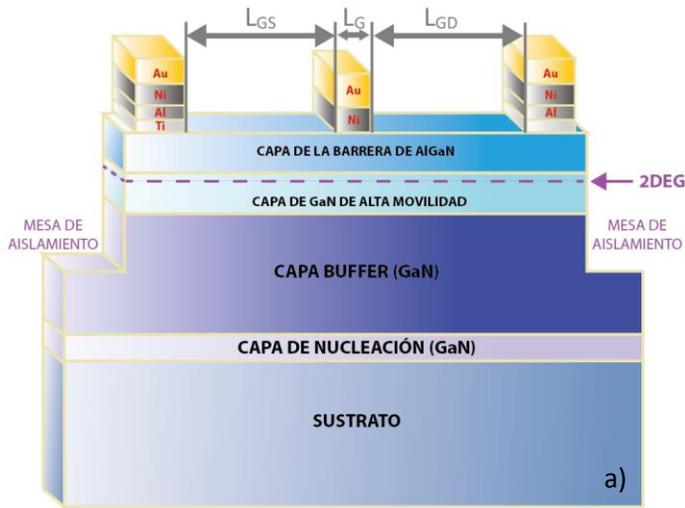


Figura 21. a) Corte transversal de un HEMT, donde se muestran algunos de los parámetros geométricos que lo caracterizan. b) Imagen de uno de los HEMTs de trabajo crecidos por MBE, con doble compuerta y doble fuente.

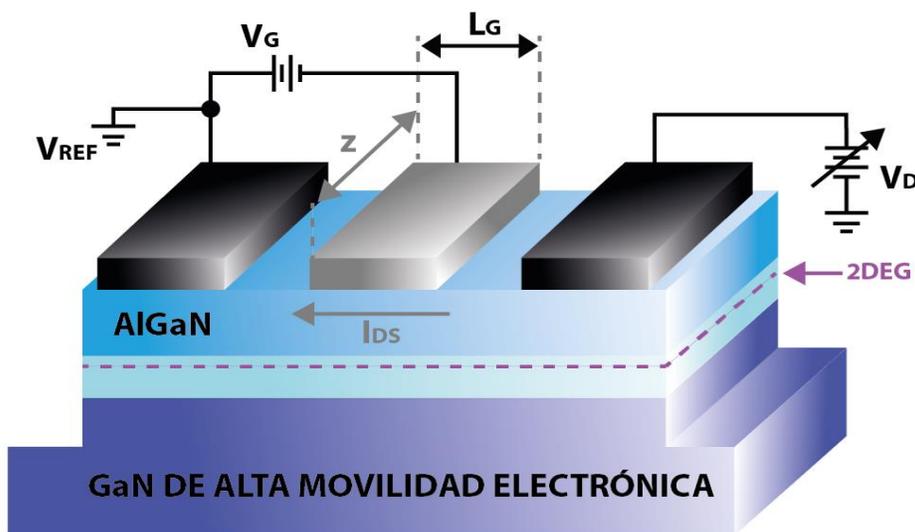
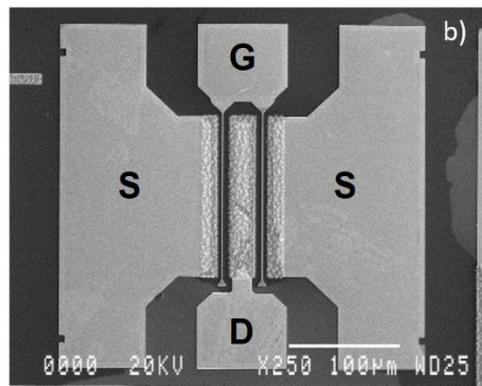


Figura 22. Esquema de un HEMT, mostrando sus electrodos, la localización del gas bidimensional de electrones (2DEG) y conexiones propias para la obtención de sus curvas de salida.

2.3.1.1 Región Lineal

Los HEMTs basados en GaN no intencionalmente impurificado están normalmente encendidos, es decir, el canal de conducción está formado sin aplicar un voltaje a la compuerta. Entonces, al aplicar un pequeño $V_{DS} > 0$, el campo eléctrico \mathcal{E}_x a través del canal provoca un flujo de electrones de fuente a drenador. La densidad lineal de corriente eléctrica J_{DS} [A/cm] en el canal en estas condiciones de campos eléctricos débiles, está dada por la ley de Ohm,

$$J_{DS} = qn_s\mu_n\mathcal{E}_x \quad [\text{A/cm}] \quad (15)$$

Entonces se dice que el *transistor opera en la región lineal* (Fig. (23)). La cantidad $qn_s\mu_n$ corresponde a la conductancia de hoja (G_{sheet}) del canal:

$$G_{sheet} = qn_s\mu_n \quad [\text{S}] \quad (16)$$

Su inverso es la resistencia de hoja del canal en estas mismas condiciones de polarización:

$$R_{sheet} = \frac{1}{G_{sheet}} = \frac{1}{qn_s\mu_n} \quad [\Omega] \quad (17)$$

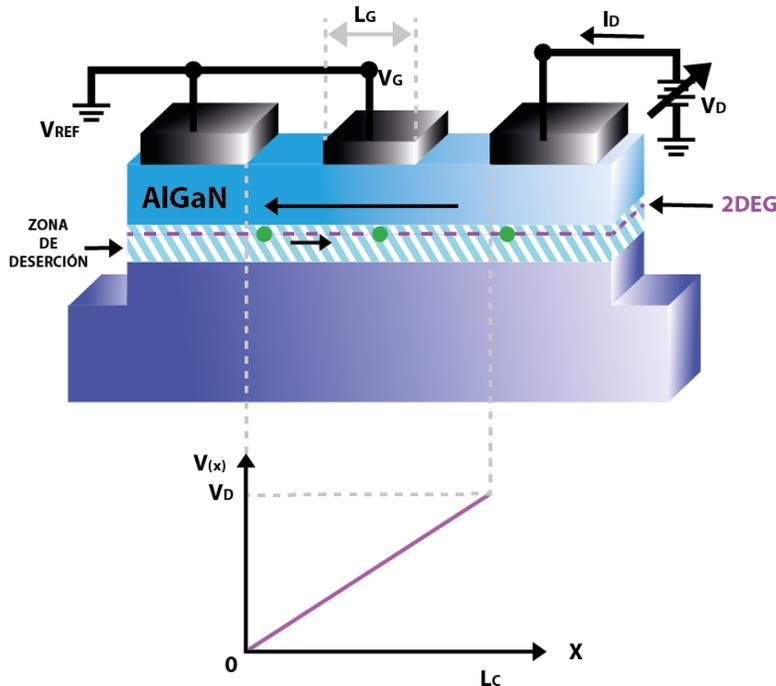


Figura 23 Estructura HEMT AlGaIn/GaN operando en la región lineal; polarización drenador-fuente (V_{DS}) con $V_{GS}=0$.

2.3.1.2 Regiones de Corte y de Saturación

Al aplicar un voltaje a la compuerta ($V_{GS} \neq 0$) se produce un cambio en el campo eléctrico transversal, el cual se superpone al presente en equilibrio, \mathcal{E}_{y0} , y se adiciona el causado por la polarización ($\mathcal{E}(V_{GS})$) \mathcal{E}_y , (la coordenada y está explicitada en la Fig. 11) la densidad de portadores libres (n_s) en el canal se modifica. Así, el campo eléctrico transversal total en la interfase está dado por

$$\mathcal{E}_y(V_{GS}) \approx \begin{cases} \mathcal{E}_{y0} + \mathcal{E}_{yG}(V_{GS}), & V_G > 0 \\ \mathcal{E}_{y0} - \mathcal{E}_{yG}(V_{GS}), & V_G < 0 \end{cases} \quad (18)$$

Dado que $n_s \propto \mathcal{E}_y$, entonces para $V_G > 0$, \mathcal{E}_y y n_s aumentan y para $V_G < 0$, disminuyen, ambos con respecto a los valores en equilibrio n_{s0} y \mathcal{E}_{y0} [47]. Un voltaje negativo aplicado en la compuerta cae parcialmente a través de la capa barrera de AlGaIn y el resto en la película de GaN cerca de la interfase, modificando la distribución del potencial electrostático en la estructura bajo el electrodo de compuerta, disminuyendo la profundidad del pozo y la cantidad de electrones en el 2DEG en la región bajo la compuerta. Si se aumenta dicha polarización, el pozo disminuye aún más y con ello la densidad de electrones hasta que eventualmente, ambos desaparezcan. Al voltaje de compuerta para el cual esto ocurre es el voltaje de umbral o apagado: $V_{GS} = -V_T$, es decir, el transistor se ha apagado [30,46,51] o también se dice que se encuentra en corte.

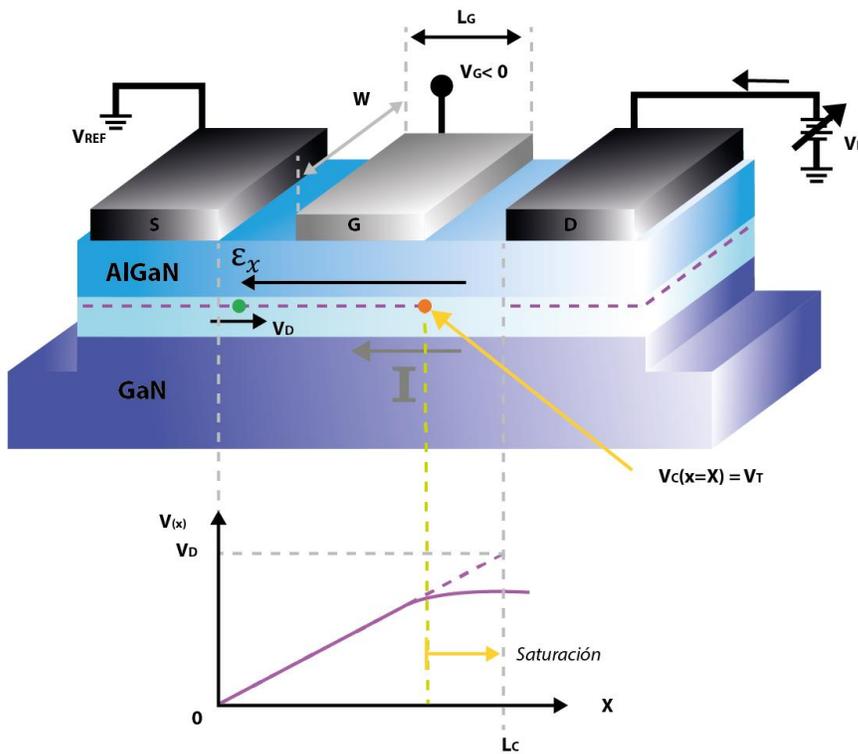


Figura 24. HEMT AlGaIn/GaN operando en la región de saturación. El HEMT con polarización drenador-fuente (V_{DS}), y polarización compuerta-fuente (V_{GS}).

Considerando polarizaciones de compuerta y drenador; V_{GS} , V_{DS} , y que la caída de potencial en AlGaN es despreciable y resistencias parásitas de fuente y drenador nulas, la caída de potencial, V_C a lo largo del canal bajo la compuerta, varía de acuerdo con:

$$V_C(x) = V_G - V(x) \quad (19)$$

donde, $V(x)$ es la fracción de V_{DS} (> 0) que cae en el punto X a través del canal, cuyo valor varía de $V(x=0) = 0$, en la fuente hasta $V(x=L_c) = V_D$ en el drenador. Si $|V_G - V(x)| \geq |V_T|$ y $V_D \geq V_T$, entonces existe un punto X ($0 < X \leq L_c$) en el canal donde $V_C(x = X) = V_{TH}$. Este es el punto de oclusión del canal, a partir del cual la región del mismo a la derecha de ese punto está vacía de portadores de carga libre. Entonces, una vez alcanzado el punto de oclusión, aunque se incremente V_{DS} , la corriente de drenador no se incrementa Fig. (24).

Entonces se dice que el transistor ha entrado en saturación, y a partir de esa condición, para cualquier V_{DS} mayor el **transistor opera en la región de saturación**. Dada la condición $|V_G - V(x)| \geq |V_T|$ y $V_D \geq V_T$ para cada valor de V_{GS} existe un valor de V_{DS} para el que se alcanza la saturación.

El análisis teórico del transporte de carga a través del canal de conducción del HEMT en función de V_{DS} , con V_{GS} como parámetro, frecuentemente se realiza por la solución simultánea de las ecuaciones de Schrödinger y Poisson. A continuación, se presenta un modelo extremadamente sencillo pero suficiente para los propósitos de este estudio.

En la región óhmica o lineal la corriente en el canal del HEMT es función de $n_s(x)$ y la velocidad de arrastre promedio ($v_d(x)$) de los electrones del 2DEG consecuencia del campo eléctrico aplicado (\mathcal{E}_x). En condiciones de polarización tales que el canal no se ha deformado geoméricamente por la polarización, esa corriente está dada por [46,47]:

$$I_d(x) = -Zqn_s(x)v_d(x) \quad [A] \quad (20)$$

donde, Z , es el ancho del canal, $v_d(x)$, la velocidad de arrastre promedio que para una movilidad constante está dado por Ec. 21 y $qn_s(x)$, es la densidad de carga superficial en el canal bajo la compuerta inducida por la polarización a ella aplicada, dada por Ec. 22. Carga que está acoplada capacitivamente al voltaje de compuerta, dicha capacitancia es debida únicamente a la película de AlGaN y está dada por Ec. 23. Dicho capacitor se tiene debido a la variación de $qn_s(x)$ con respecto a la polarización en la compuerta.

$$v_d(x) = -\mu_n \mathcal{E}_x \quad (21)$$

$$qn_s(x) = \frac{\varepsilon_{AlGaN}}{d_{AlGaN}} (V_{GS} - V(x) - V_T) \quad (22)$$

donde

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{AlGaN}}{d_{AlGaN}} \quad (23)$$

Sustituyendo (21), (22) y (23) en (20), se obtiene:

$$I_{DS} = ZC_0\mu_n[V_G - V(x) - V_T] \frac{dV(x)}{dx} \quad (24)$$

donde, $\frac{dV(x)}{dx} = \mathcal{E}_x$, que es campo eléctrico en X.

Considerando que no hay separación fuente-compuerta y compuerta-drenador, entonces $L_C = L_G$ y dado que la corriente no se interrumpe ni modifica su valor a través del canal, integrando (24) entre la fuente ($x = 0$ y $V = 0$) y el drenador ($x = L_G$ y $V = V_D$) se obtiene directamente una expresión para la $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$; modelo característico de las curvas de salida; I_{DS} - V_{DS} - V_{GS} del transistor dada por: [30]

$$I_{DS}(V_D) = \frac{Z}{L_G} C_0 \mu_n \left[(V_G - V_T) V_D - \frac{V_D^2}{2} \right] \quad (25)$$

Esta ecuación es válida únicamente para valores de V_{DS} menores al voltaje de saturación, es decir para $0 \leq V_D \leq V_{DSsat}$, para valores por arriba de V_{DSsat} la corriente permanecerá constante (I_{DSsat}), donde

$$V_{DSat} = V_G - V_T \quad (26)$$

Para la región lineal donde $V_D \ll V_G - V_T$, (25) se reduce a una relación óhmica [30,47]:

$$I_{DS}(V_D) = \frac{Z}{L_G} C_0 \mu_n (V_G - V_T) V_D \quad (27)$$

Para la región de saturación donde $V_D \geq V_{DSat}$, (25) conduce a:

$$I_{DS} = \frac{Z}{L_G} C_0 \mu_n \frac{(V_G - V_T)^2}{2} \quad (28)$$

La Fig. (25) muestra una simulación de la característica corriente-voltaje (I_{DS} - V_{DS}) para diferentes valores de polarización de compuerta (V_{GS}), partiendo de las ecuaciones antes descritas. Esta característica corresponde a una estructura HEMT ideal, es decir, sin anomalías quizás presentes en este tipo de dispositivos como mala calidad de los contactos o una muy alta densidad de dislocaciones en las películas que conforman la hetero-unión.

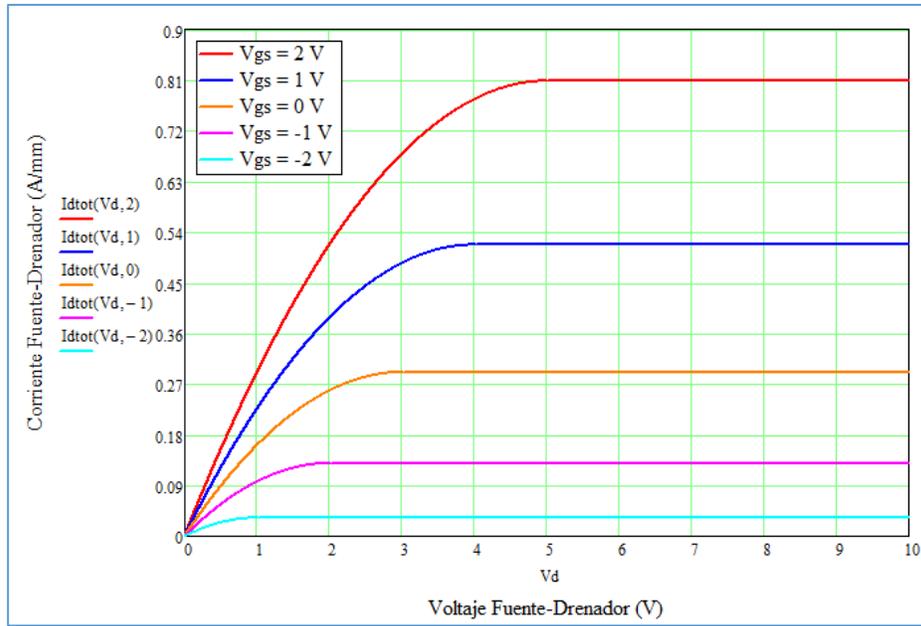


Figura 25. Simulación de la característica corriente-voltaje ($I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$) para diferentes valores de polarización de compuerta (V_{GS}). Para la cual se utilizaron los siguientes parámetros: $Z = 100 \mu\text{m}$, $L_c = 8 \mu\text{m}$, $d_{\text{AlGaIn}} = 20 \text{ nm}$, $\text{Al}(x)=0.30$, $n_s \sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ y $\mu_n=1500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ Y se realizó a partir de la ecuación (25).

Como se puede notar de Ec. 25 la corriente I_{DS} tiene una dependencia clara con los parámetros geométricos que describen al tamaño del canal de electrones, es decir, que I_{DS} es directamente proporcional al ancho del canal (Z) e inversamente proporcional a la longitud del mismo (L_C). Por lo tanto, la corriente de drenador disminuye al aumentar la longitud del canal, por lo que el uso de longitudes cortas en la compuerta debería de ser una forma adecuada de mejora en el transporte de carga en los dispositivos HEMT.

2.4 Efecto de la Longitud de Compuerta (L_G)

La ecuación Ec. 25 es el resultado del modelo aquí resumido que permite obtener las curvas de salida del transistor, de ella se observa que la reducción en la longitud de compuerta incrementa la corriente manejada por la misma estructura (Fig. (26)). Ya que:

$$I_{DS} \propto \frac{1}{L_G} \quad (29)$$

Estudios experimentales realizados sobre el efecto de longitud de compuerta muestran que efectivamente L_G menores conducen a I_{DS} más elevadas (Fig. 27), pero tales resultados no siguen realmente lo predicho por la ecuación (29), tal como se verá en la sección 3.2.4.

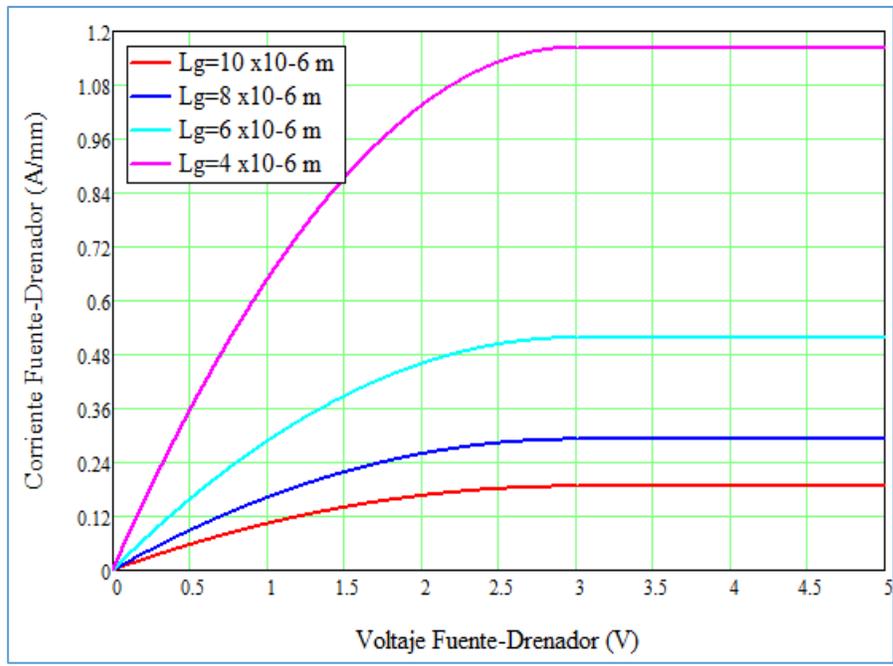


Figura 26. Simulación de la característica corriente-voltaje ($I_{DS}-V_{DS}$) para diferentes valores de longitud en la compuerta (L_G). Para la cual se utilizaron los siguientes parámetros: $Z = 100 \mu\text{m}$, $V_{GS} = 0 \text{ V}$, $d_{\text{AlGaN}} = 20 \text{ nm}$, $\text{Al}(x) = 0.3$ y $\mu_n = 1500 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)}$; y se realizó a partir de la ecuación (25).

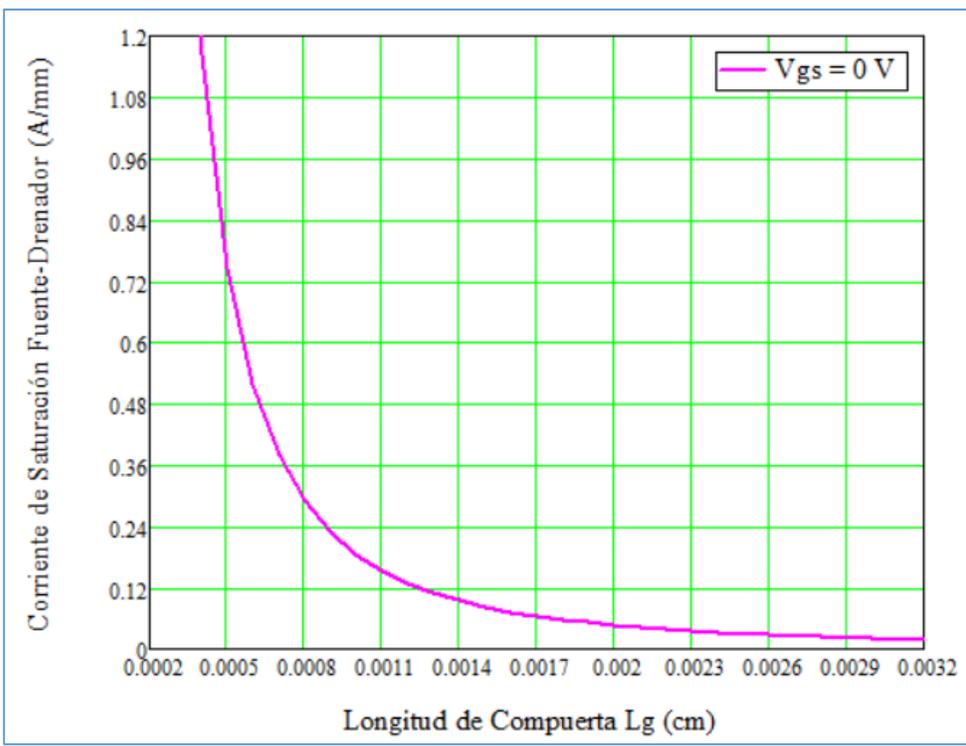


Figura 27. Se muestra la proporcionalidad inversa de la corriente de saturación ($I_{DS,sat}$), con respecto al incremento en la longitud de la compuerta; para la cual se utilizaron los siguientes parámetros: $Z = 100 \mu\text{m}$, $V_{GS} = 0 \text{ V}$, $d_{\text{AlGaN}} = 20 \text{ nm}$, $\text{Al}(x) = 0.3$ y $\mu_n = 1500 \text{ (cm}^2/\text{V}\cdot\text{s)}$.

Cuando la longitud de la compuerta es reducida hasta los sub-micrones, las características del HEMT se ven afectadas por dos razones principalmente: 1) la saturación de la velocidad de arrastre de los

electrones en el canal de conducción; se sabe que la velocidad de arrastre en el GaN es $\sim 2 \times 10^7 \text{ cm/s}$, sin embargo; la teoría predice una velocidad de $2.88 \times 10^7 \text{ cm/s}$ por lo que resulta poco probable la degradación de las características debido a la velocidad de saturación. 2) los efectos de canal corto, que están relacionados por la razón L_G/d_{AlGaN} , donde una razón < 5 resulta en una degradación de las características eléctricas del transistor [54].

2.5 Transconductancia

La transconductancia (g_m) es uno de los parámetros más importantes para cuantificar el desempeño de transistores de efecto de campo [8], ya que indica la capacidad que tiene la compuerta para modular la concentración de carga en el canal de conducción, lo que implica modular I_{DS} . La transconductancia (g_m) está dada por [30,51,54]:

$$g_m = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS}=\text{const.}} \quad (30)$$

La transconductancia depende de parámetros geométricos del dispositivo, tales como L_G y la distancia entre fuente y compuerta (L_{GS}) (Fig. (28)).

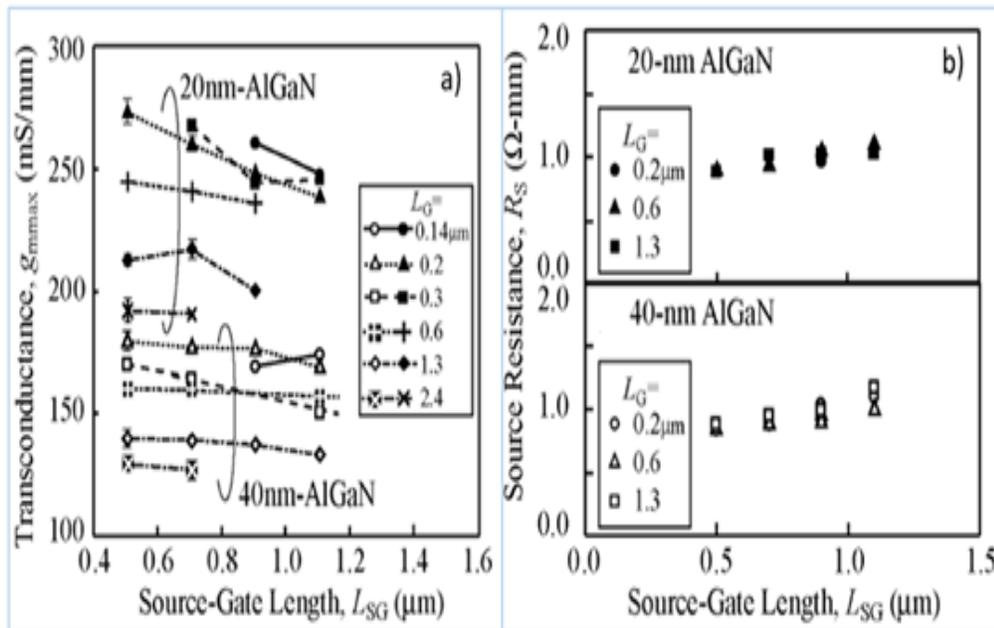


Figura 28. a) Muestra la transconductancia máxima $g_{m,max}$ vs la distancia entre fuente y compuerta (L_{GS}), para dos espesores del AlGaN, los datos experimentales no muestran un efecto importante de L_{GS} sobre g_m siendo claro el de la longitud de la compuerta, conforme ésta aumenta la transconductancia disminuye. b) muestra la disminución de R_S cuando L_{GS} es reducida [54].

transconductance-
transconductancia
source-gate
length_longitud
fuente-compuerta
source resistance-
resistencia de la
fuente

La Fig. (29) muestra la gráfica de la transconductancia en función de V_{GS} de un HEMT AlGaIn/GaN con una longitud de compuerta de $0.125 \mu\text{m}$, densidad de portadores en el 2DEG de $7.05 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ y movilidad de $2160 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. [55]

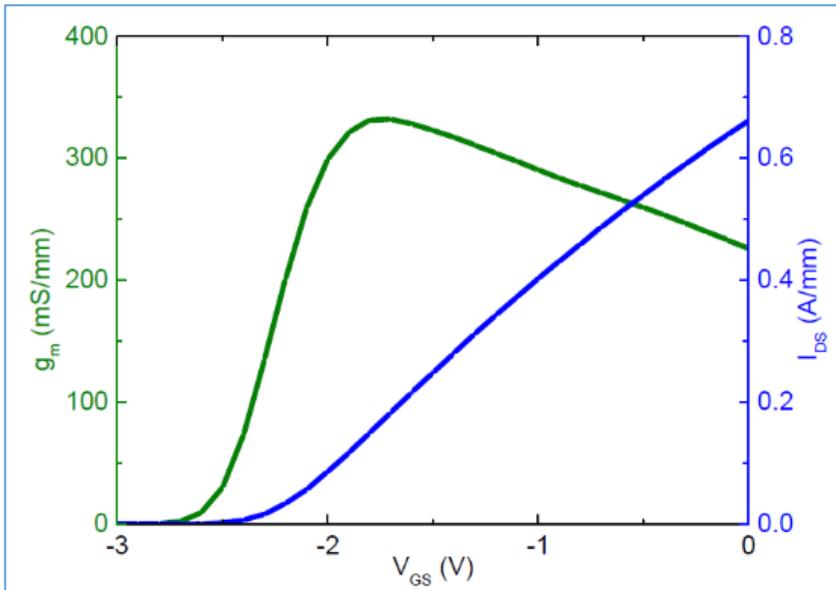


Figura 29. Gráfica de la transconductancia que muestra un pico en $V_{GS} = -1.7 \text{ V}$ con un valor de 332 mS/mm [55]

2.6 Resumen

Siendo el 2DEG la parte medular de este dispositivo, es evidente que la optimización en sus dos principales características: concentración de portadores (n_s (e/cm²)) y su movilidad (μ_n (cm²/V·s)), daría como resultado un mejor desempeño del HEMT. Si bien el origen de los electrones que constituyen el 2DEG sigue siendo una pregunta abierta, es claro que existe una transferencia de carga del AlGa_N hacia el GaN y que esta provoca una acumulación en la interfase AlGa_N/GaN generando un pozo de potencial cuasi-triangular, para el cual se calculó una profundidad de ~ 0.27 eV, considerando $n_s \sim 10^{13}$ cm⁻², $Q_n \sim 1.602 \times 10^{-6}$ C/cm² y $\mathcal{E}_y \sim 2.033 \times 10^6$ V/cm. Con lo anterior se determina que la posición del nivel de Fermi está dentro del pozo de potencial, ya que $E_c - E_F = 0.14$ eV.

En un análisis de resultados experimentales de la dependencia de la movilidad en función de la concentración de electrones libres en el 2DEG para estructuras crecidas por MBE y MOCVD, sugirió que es posible obtener valores aceptables de n_s y de μ_n por ambas técnicas y que las únicas ventajas son las propias de cada una de las técnicas.

Es claro entonces que la mejoría de las propiedades del 2DEG podrían ser complementadas por la variación en los parámetros geométricos del dispositivo, como la disminución de L_G , de acuerdo al modelo matemático que da como resultado la característica de las curvas de salida I_c . (27) y I_e . (28).

3. Capítulo III. Desarrollo Experimental.

3.1 Preparación de Muestras; HEMTs: AlGaN/GaN/Si

El estudio del efecto de la variación en la longitud de compuerta en el desempeño del HEMT, se encuentra muy pocas veces reportado en la literatura. Motivo suficiente para realizar una exploración profunda de esta variación en las propiedades del HEMT AlGaN/GaN.

Con el propósito de dar cumplimiento con el objetivo de esta tesis, en este capítulo se evalúa el efecto de la longitud de compuerta en las propiedades de transporte del dispositivo, para lo cual se fabricaron varios HEMTs, que únicamente difieren en L_G .

La evaluación de las propiedades de transporte para cada uno de los dispositivos, se lleva a cabo mediante la obtención de características tales como:

- ~ Curvas de Salida $I_{DS}-V_{DS}$ con parámetro V_{GS} .
- ~ Función de transferencia ($I_{DS}-V_{GS}$ con parámetro V_{DS}).

Para la realización de este estudio se utilizaron estructuras crecidas por MBE sobre una oblea de silicio de orientación (111), 5 cm de diámetro, 0.5 mm de espesor. La estructura está conformada por una capa buffer de GaN no-intencionalmente impurificada de $1\mu\text{m}$ de espesor, seguida por la película de AlGaN de 20 nm con una fracción molar de aluminio del 30%; y finalmente una capa de recubrimiento (cap layer) de 1 nm de espesor de GaN. Aun cuando todas las películas son no impurificadas intencionalmente, el GaN es de conductividad tipo N con una concentración de portadores $n_0 \sim 10^{16}/\text{cm}^3$, y $\mu_n \sim 50 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. Para la heterounión AlGaN/GaN la resistencia de hoja fue de $\sim 500 \Omega/\text{cuadro}$, con una densidad de electrones en el 2DEG de $n_s = 4 - 8 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ con una movilidad de $\mu_n \sim 1100 - 1200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$.

Los transistores fueron realizados por tecnología planar sencilla utilizando tres niveles de mascarillas. La primera para definir las mesas de aislamiento, la segunda para establecer las áreas de contactos óhmicos de fuente y drenador y la tercera para depositar el contacto rectificante para la barrera de la compuerta. Los metales utilizados para los contactos óhmicos fueron: Au/Al/Ti ($2.0\mu\text{m}/200\text{nm}/20\text{nm}$) y recocido de ohmicidad por RTA a 900°C durante 30 segundos en atmosfera de nitrógeno; posterior al proceso de lift-off (Fig. (30)). Los metales fueron evaporados en vacío de 10^{-8} Torr mediante cañón de electrones. En la compuerta de Au/Ni ($2.0\mu\text{m}/200\text{nm}$), el Ni da lugar a la barrera Shottky y el Au es para disminuir la resistencia en serie de acceso a ésta.

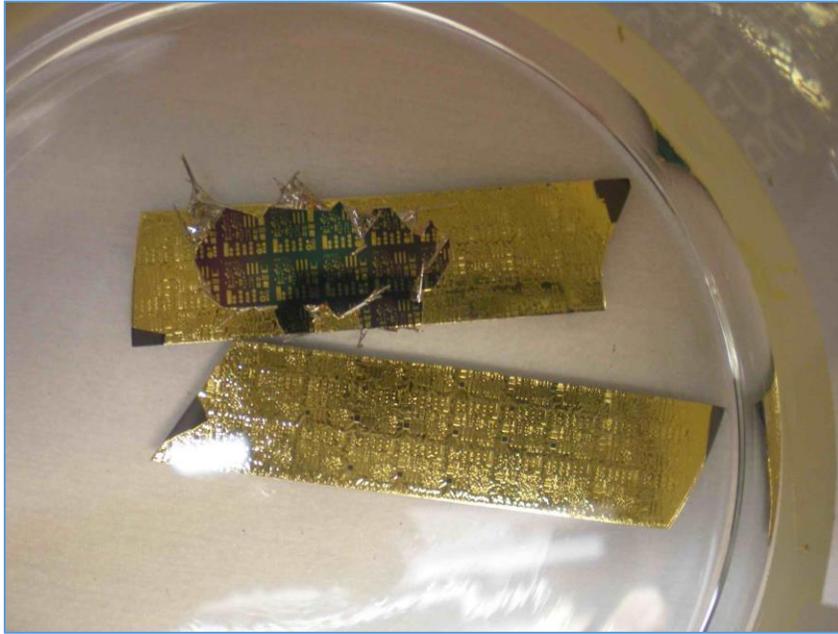


Figura 30. Para definir los contactos de los diferentes transistores, se realiza un proceso de litf-off a base de Au.

En la Fig. (31 a), se puede observar el plano superior de los dados con diferentes estructuras de apoyo para la caracterización de los diferentes procesos tecnológicos que llevan a la mejora de los dispositivos para su posterior utilización en las condiciones óptimas, como motivos para realizar efecto Hall con el objetivo de medir la concentración y movilidad de los electrones en el gas bidimensional, así como los motivos TLM para medir la resistencia de contacto. Se usó el dado 2553 para dar cumplimiento con el objetivo de esta tesis. Una imagen ampliada del dado 2553 (Fig. (31 b)), muestra una serie de transistores con diferente longitud en la compuerta ($L_G = 1, 2, 4, 8, 16$ y $32 \mu\text{m}$) y en el cual el drenador (D) del primer transistor se convierte en fuente (S) del segundo y así sucesivamente; el ancho de la compuerta (W_G) para todos los dispositivos es de $100 \mu\text{m}$, la distancia entre la fuente y el borde de la compuerta (d_{S-G}) es de $3 \mu\text{m}$ y la distancia entre el borde de la compuerta y el drenador (d_{G-D}) es de $4 \mu\text{m}$.

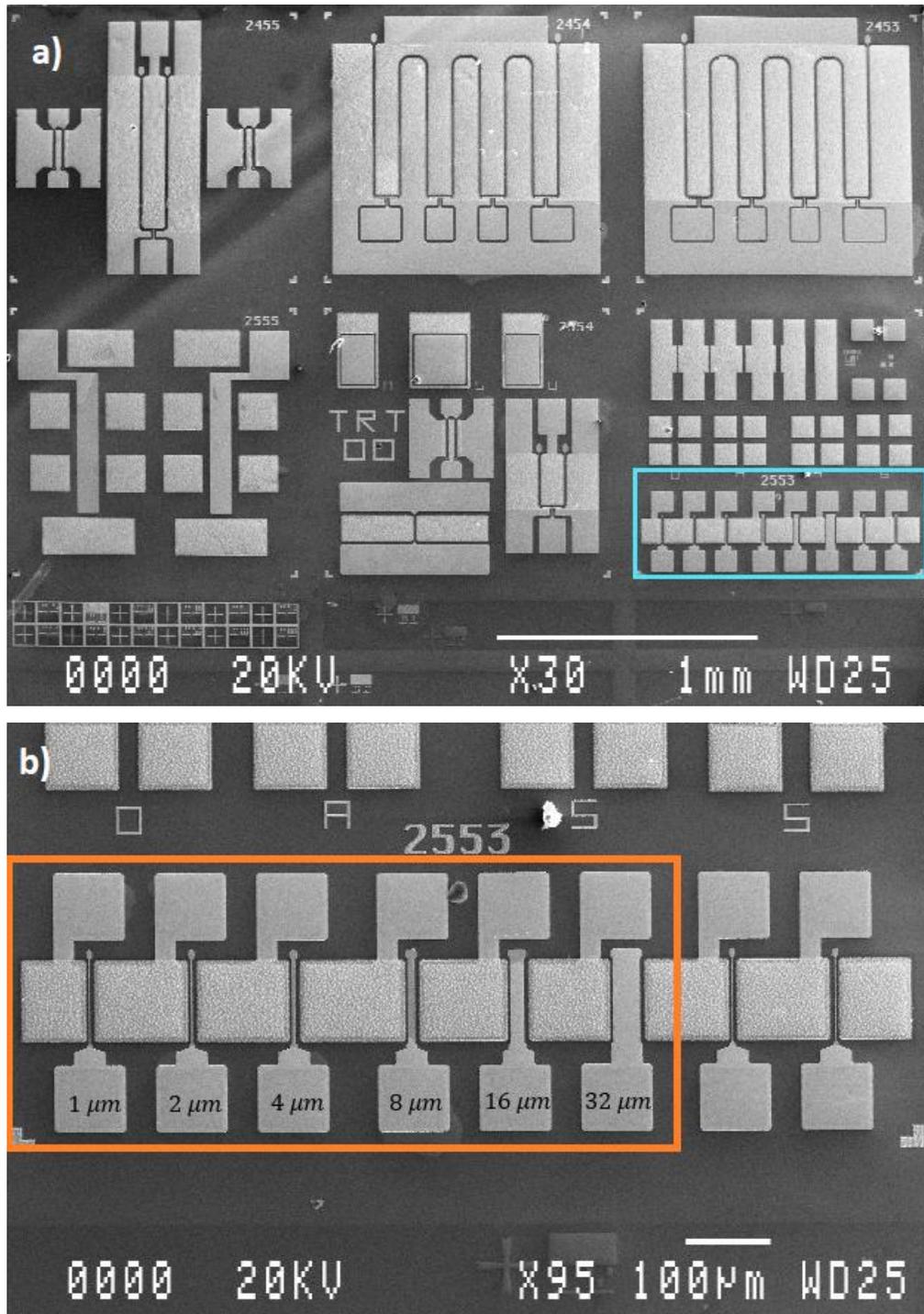


Figura 31. a) Plano superior de los dados con diferentes estructuras de apoyo para la caracterización de diferentes procesos tecnológicos. Se muestra el dado 2553 el cual será utilizado para el cumplimiento del objetivo de esta tesis. b) Imagen MBE de HEMTs con longitudes de compuerta ($L_G = 1, 2, 4, 8, 16$ y $32 \mu m$,) primeras seis compuertas a partir de la izquierda, ancho de compuerta $100 \mu m$, (W_G) para todos, distancia fuente-compuerta $3 \mu m$ compuerta-drenador $4 \mu m$

3.2 Caracterización eléctrica

Para la caracterización eléctrica de los HEMTs de AlGaIn/GaN con diferentes longitudes de compuerta, se obtuvieron: curvas de salida ($I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$), función de transferencia ($I_{DS}-V_{GS}, V_{DS}$). Al obtener las curvas de salida se observó un efecto de “calentamiento” de los HEMTs por lo que inicialmente se realizaron mediciones de corriente de drenador en función del tiempo (I_D vs t); los equipos usados para realizar las mediciones respectivas fueron: máquina de puntas, para contactar los dispositivos y el analizador de parámetros de semiconductor HP 4145B (Fig. (32)) Este analizador cuenta con cuatro SMUs (Source Monitor Unit), cada una de las cuales puede ser usada como fuente de corriente y medidor de voltaje o fuente de voltaje y medidor de corriente dentro de los siguientes rangos de operación:

- Voltaje: 1 mV a 100 V con incrementos mínimos de 1mV.
- Amperaje: 1 pA a 100 mA.



Figura 32. Analizador de parámetros de semiconductor HP 4145B, con el cual se realizaron las mediciones en los HEMTs.

3.2.1 Curvas de salida $I_{DS}-V_{DS}-V_{GS}$

Las curvas características típicas de salida experimentales para los transistores en estudio fueron obtenidas bajo el diagrama eléctrico mostrado en la Fig. (33).

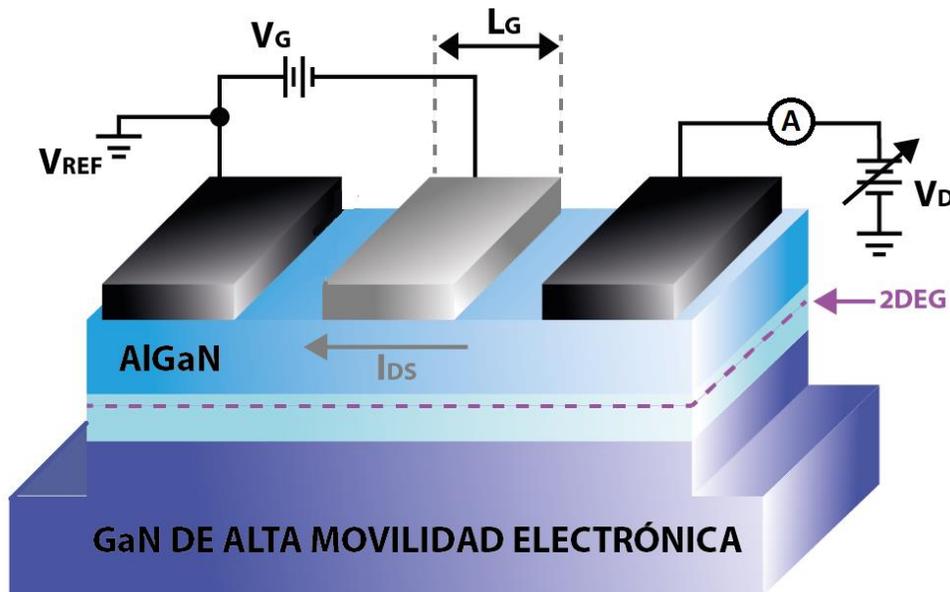
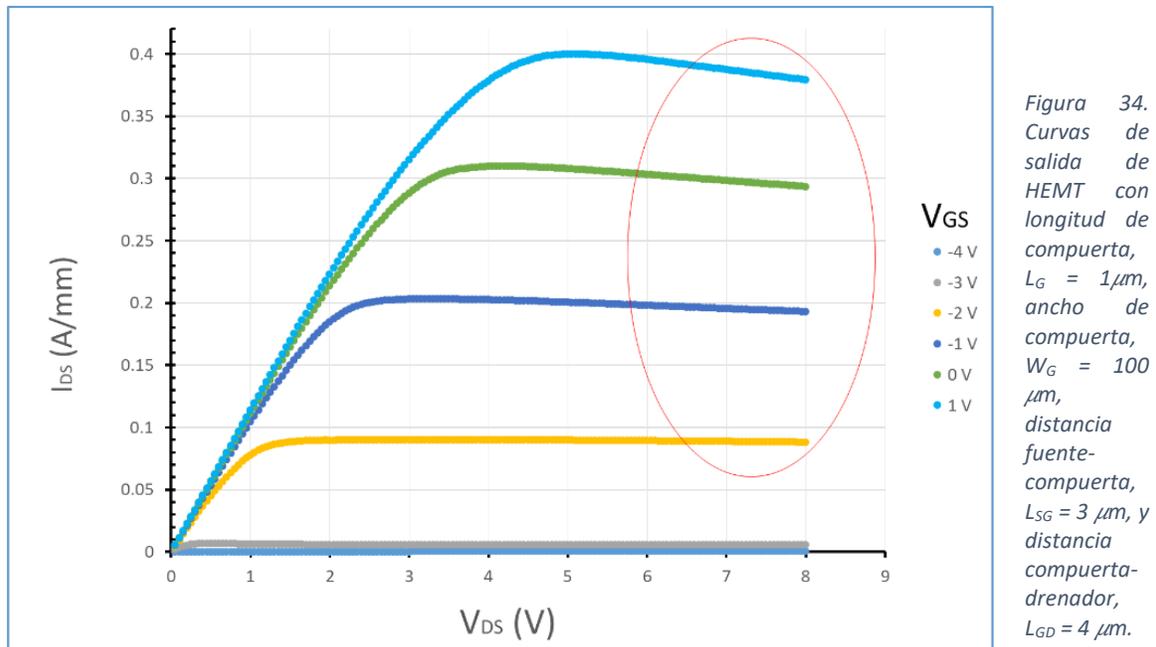


Figura 33. Diagrama de conexión, para la obtención de las curvas características $I_{DS}(V_{DS}, V_{GS})$

La Fig. (34) muestra las curvas de salida para un transistor con $L_G = 1 \mu\text{m}$; el cual fue polarizado con $V_{DS} = 0$ a 10 V para cada V_{GS} : 1 a -4 V con un incremento de 1 V . En las curvas, correspondientes a V_{GS} de 1 a -2 V se puede apreciar que el comportamiento de I_{DS} con respecto a V_{DS} , se asemeja bastante a lo encontrado continuamente en la literatura; donde I_{DS} alcanza un máximo y después presenta una ligera caída después del punto de saturación. Este decaimiento en la corriente de saturación se debe a ese "calentamiento" presente en el 2DEG, el cual disminuye la movilidad de los portadores de carga [56]. Las curvas correspondientes a valores de V_{GS} de -3 y -4 V , siguen un comportamiento totalmente apegado a la teoría donde la corriente máxima de saturación se mantiene constante al aumentar la polarización entre fuente y drenador. Además, para estos V_{GS} , la corriente prácticamente ha desaparecido debido a que el transistor prácticamente ha alcanzado la condición de apagado.



3.2.2 Función de transferencia.

La función de transferencia permite calcular el valor de voltaje al cual el HEMT AlGaIn/GaN se apagará (V_T). Debido al calentamiento que presenta el dispositivo se realizaron gráficas de I_{DS} vs t , con V_{GS} desde 1 a -2.5 V con incrementos de 0.5 V y $V_{DS} = 10$ V como parámetro.

En la Fig. (35) (gráfica roja) se observa que el V_T , de acuerdo con los valores de I_{DS} (obtenidos experimentalmente), y la extrapolación para $I_{DS} = 0$ sucede para $V_{GS} = -3.05$ V; y para valores de I_{DSmax} (gráfica azul) obtenidos a partir de los ajustes realizados a las gráficas I_{DS} vs t (ver gráficas 36 y 37) se obtuvo que el V_T se correspondía con un $V_{GS} = -3.16$ V; estos valores difieren en 0.11 V que corresponde al 3.5 %; cabe destacar que las corrientes de drenador obtenidas de los ajustes es la característica intrínseca, que se corresponde con un dispositivo que no es modificado por efectos térmicos y por lo tanto no conlleva a dispersiones de corriente de drenador. Las corrientes obtenidas experimentalmente se corresponden con un transistor que aún no está tecnológicamente terminado y por ende no hay una correcta disipación de calor y esto provoca una disminución de I_{DSmax} y V_T .

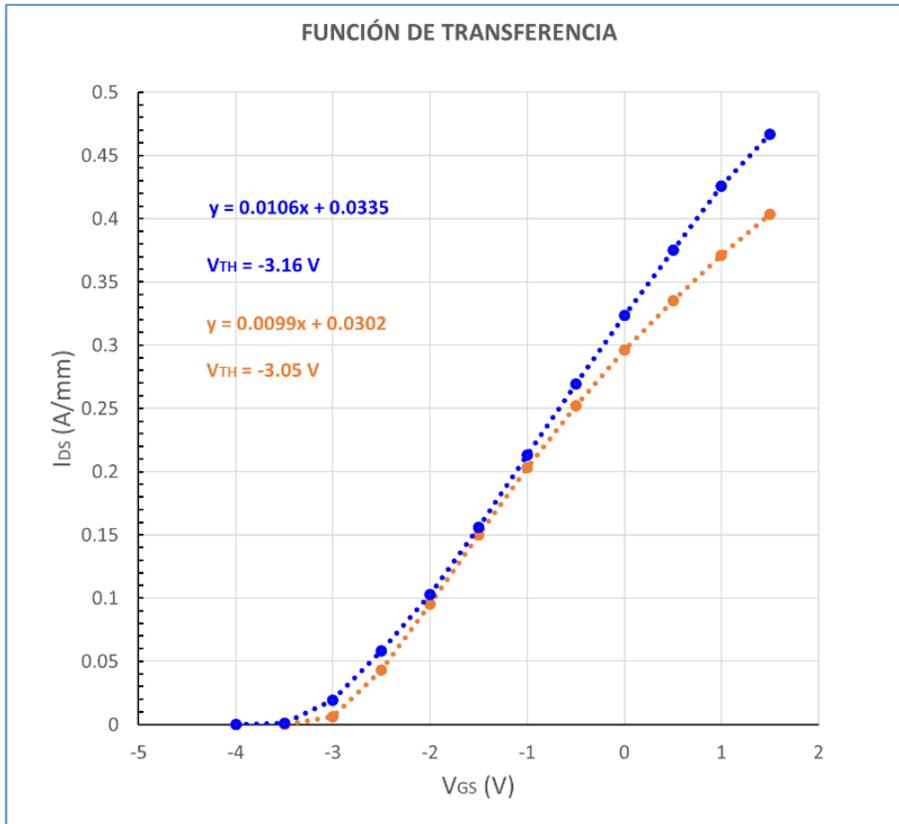


Figura 35 Muestra la función de transferencia de un HEMT con $L_G = 1\mu\text{m}$. Donde la línea azul corresponde a valores de I_{DSmax} provenientes del ajuste matemático y la línea roja corresponde a valores experimentales.

De acuerdo a la gráfica de transconductancia obtenida a partir de los ajustes realizados (Ver Fig. 37 y Fig. 38), se observa que una adecuada disipación de la temperatura resultaría en una mejor modulación de la conductividad del canal mediante la polarización de la compuerta V_{GS} (Fig. (36)).

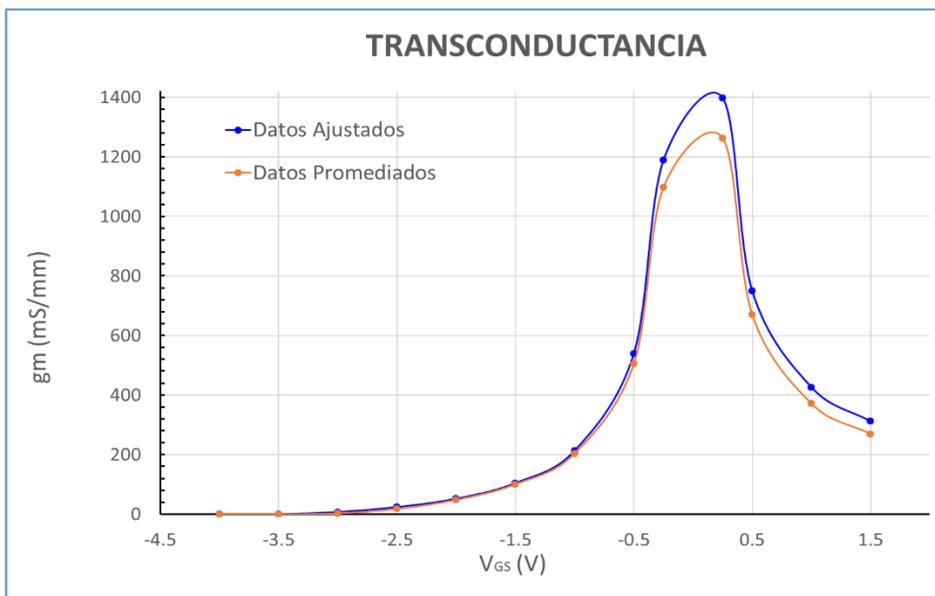


Figura 36. La transconductancia que muestra valores máximos para ambas gráficas en $V_G = 0.5 \text{ V}$.

3.2.3 Curvas I_{DS} ($V_{GS} = -1.0$ V, $V_{DS} = 10$ V) vs t.

Como se ha mencionado antes estas mediciones se efectuaron para explorar el calentamiento del HEMT, para ello se obtienen curvas de I_{DS} en función del tiempo con parámetros de polarización constantes. Éstas fueron ajustadas mediante la ecuación (31), obteniendo I_{DSmax} , corriente de saturación que corresponde al valor intrínseco de la estructura antes de la manifestación de los efectos de calentamiento. Los ajustes se realizaron para cada una de las gráficas obtenidas para V_{GS} , para los 6 transistores y en algunos casos se requirieron hasta 3 constantes de tiempo (τ).

$$I_{DS}(t) = I_0 - \sum_{i=1}^{i=N} \Delta I \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau_i}\right)} \right) \quad (31)$$

donde: I_0 , es la corriente potencial de la estructura a $t = 0$ y ΔI es el decremento en corriente por los efectos térmicos y τ es la constante de tiempo del mecanismo que interviene.

La Fig. (37) muestra una gráfica representativa de dichos ajustes, correspondiente al transistor 4 (T4) con $L_G = 1 \mu\text{m}$ y para el cual I_{DS} ($V_{GS} = -1.0$ V, $V_{DS} = 10$ V). Los parámetros que intervienen en el ajuste son:

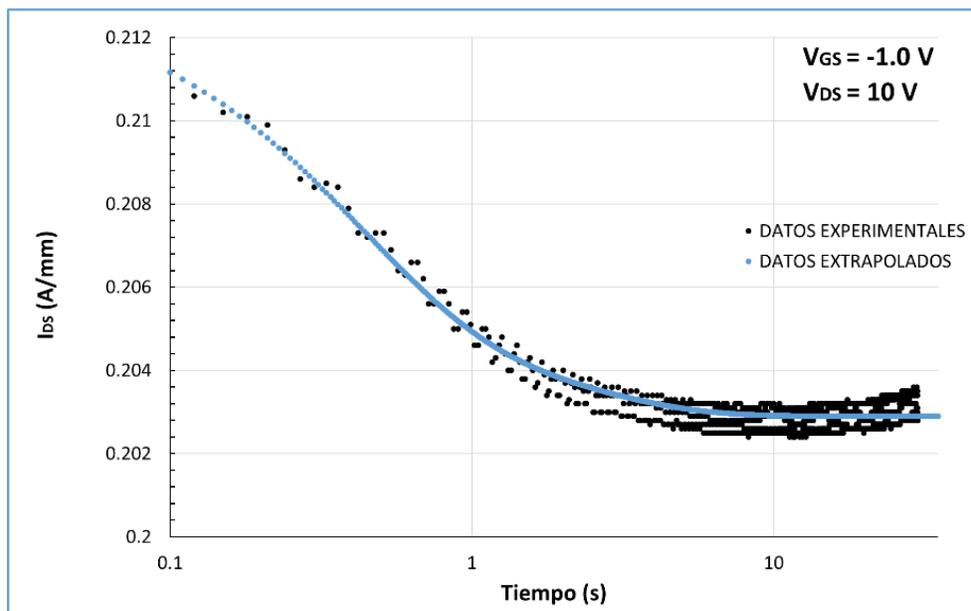


Figura 37. Corriente $I_{DS}(t)$ para el HEMT (T4) con $L_G = 1 \mu\text{m}$. Donde la línea azul corresponde al ajuste utilizando la ecuación (31) con 3 exponenciales.

3.2.3.1 Disminución de I_{DS} bajo condiciones de polarización constantes.

La Fig. (38) muestra la corriente de drenador en función del tiempo que se mantiene bajo polarización de la estructura en la condición estable: $V_{GS} = -1.0$ V, $V_{DS} = 10$ V, de $t = 0$ a 30 s con $\Delta t = 30$ ms. I_{DS}

disminuye al transcurrir el tiempo debido al efecto térmico antes mencionado, que conlleva al aumento de la dispersión de los electrones libres del gas por fonones, disminuyendo su movilidad y con ello la corriente de drenador. Los parámetros que resultan del ajuste son: $I_0 = 0.0471$ A, $\Delta I_1 = 1.3$ mA con $\tau_1 = 0.11$ s, $\Delta I_2 = 1.1$ mA con $\tau_2 = 1$ s y $\Delta I_3 = 1.9$ mA con $\tau_3 = 8$ s.

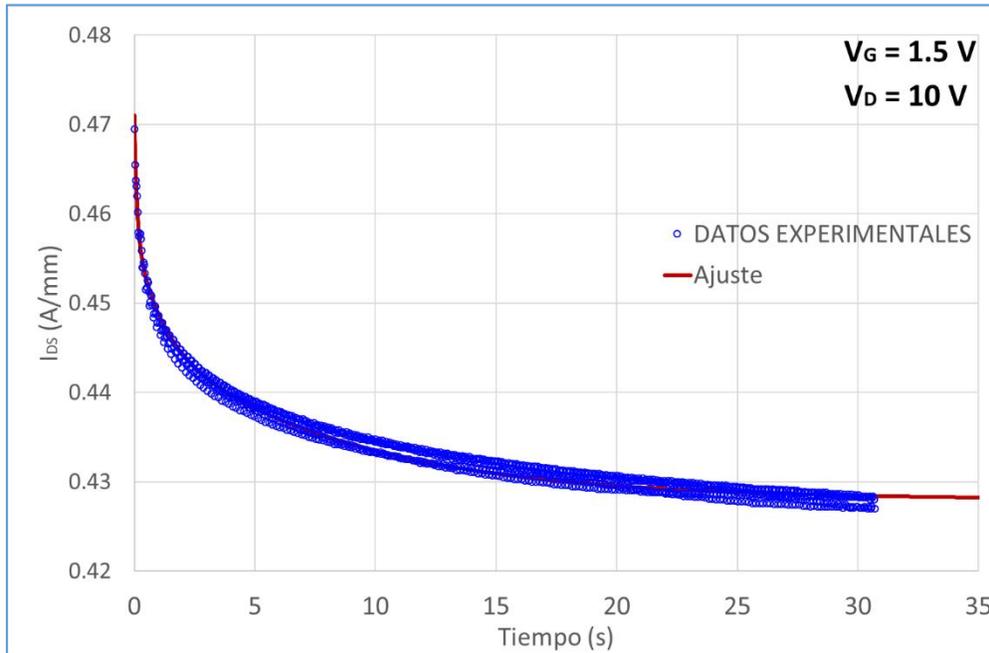


Figura 38. Corriente $I_{DS}(t)$ para el HEMT (T4) con $L_G = 1\mu m$. Donde la línea roja corresponde al ajuste utilizando la ecuación (31) con 3 exponenciales y la línea azul corresponde a los datos experimentales.

La Fig. (39) muestra las dos primeras constantes de tiempo (τ), necesarias a los ajustes de las curvas de $I_{DS}(t)$. La necesidad de hacer intervenir dos constantes de tiempo, sugiere la participación de dos mecanismos en el decaimiento de la corriente. Se aprecia que la primera constante de tiempo (τ_1) se mantiene constante para I_{DS} entre 0.01 y 0.08 A. Sin embargo, para valores de I_{DS} menores a 0.08 A ésta crece hasta alcanzar el valor de la segunda constante de tiempo. Esto parecería indicar que se pasa de un mecanismo a otro, desapareciendo el primero y volviéndose dominante el segundo.

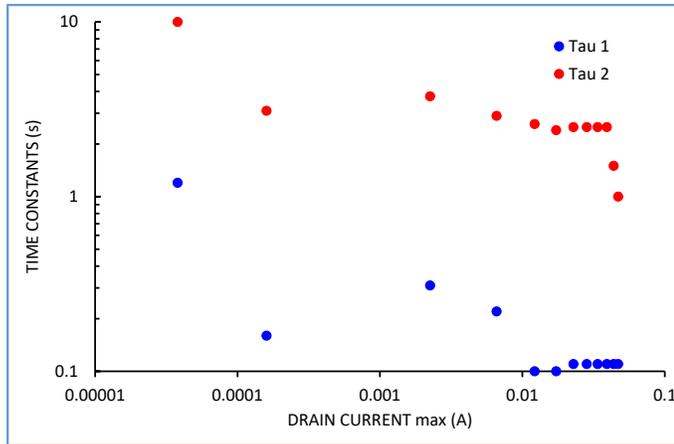


Figura 39. Constantes de tiempo utilizadas en los ajustes de las curvas de $I_{DS}(t)$ a partir de la ecuación 31.

La Fig. (40) muestra el comportamiento de I_{DS} para las mismas condiciones de polarización de la Fig. (38) para las diferentes longitudes de compuerta estudiadas. Se observa que al aumentar L_G I_{DS} disminuye. Para $L_G=1 \mu\text{m}$ es fuerte el efecto de disminución de I_{DS} pero al aumentar L_G ésta disminución se hace menor, debido a que el dispositivo maneja menos potencia y los efectos térmicos disminuyen.

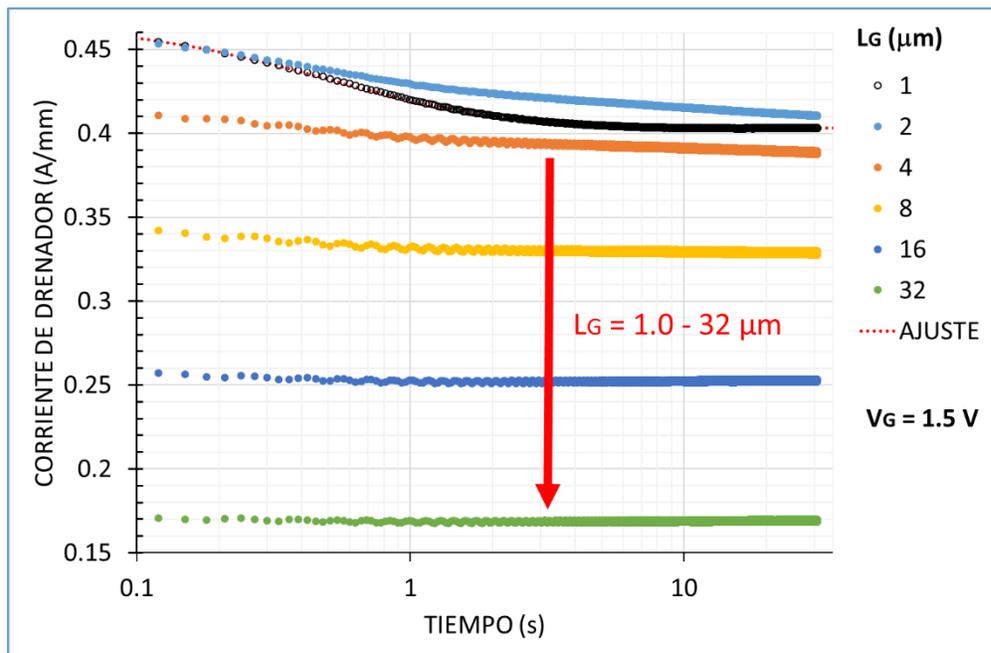


Figura 40. Corriente $I_{DS}(t)$ para 6 transistores con diferentes longitudes de compuertas 1, 2, 4, 8, 16 y 32 μm .

3.2.4 Efecto de la longitud de compuerta en I_{DS} .

El estudio de las curvas de salida del transistor, para $V_G=1 \text{ V}$ y $V_{DS}= 0-10 \text{ V}$, en función de la longitud de compuerta (L_G) desde 1 hasta 32 μm , se presenta en la Fig. (41). Las densidades de corriente van

de ~ 0.13 A/mm para $L_G = 32 \mu\text{m}$ a ~ 0.42 A/mm para $L_G = 2 \mu\text{m}$. El comportamiento para $L_G = 1 \mu\text{m}$ se verá más adelante.

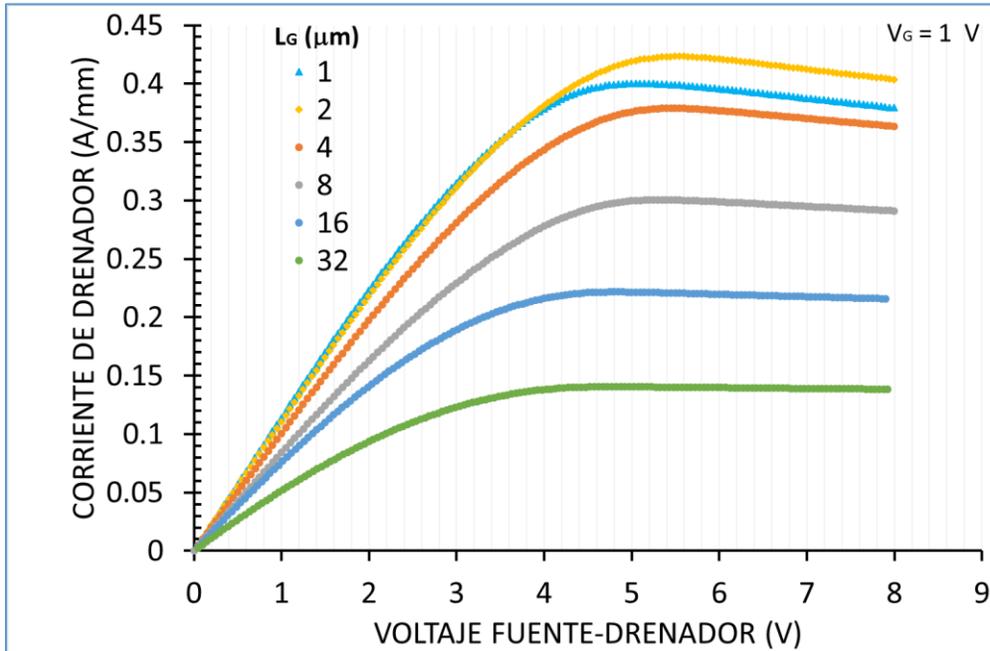


Figura 41. Curvas características I-V, para longitudes de compuerta de 1 hasta 32 μm .

De esta figura se observa que el comportamiento es consistente con la teoría, es decir, un aumento de L_G da lugar a la disminución de I_{DS} . Sin embargo, la Fig. (42) muestra el comportamiento de I_{DSmax} en función de L_G y, como se ha dicho el comportamiento parece estar conforme a la teoría, Ec. (29).

La curva azul en esa figura corresponde a la gráfica de la Ec. (29) que arbitrariamente se ha hecho pasar por el punto experimental correspondiente a $L_G=2 \mu\text{m}$, y se observa que si se hace pasar por cualquier otro punto experimental el ajuste tampoco es bueno; ya que los datos experimentales no corresponden con lo predicho por la teoría. La curva naranja corresponde al ajuste que pasa por la mayoría de los puntos experimentales correspondiendo a la siguiente ecuación:

$$I_{DS} \propto \frac{cte}{L_G+14} \tag{32}$$

Es decir, que la compuerta del HEMT funciona como si su geometría correspondiese a una compuerta virtual efectiva aumentada en $14 \mu\text{m}$. Este comportamiento podría deberse a la zona de carga espacial que desarrolla la barrera Schottky en el AlGaIn bajo el Ni de la compuerta.

Finalmente, la curva en naranja de la Fig. (42) se generó con la Ec. (32) con una constante igual a 0.1, sin embargo, un HEMT con una longitud de compuerta de $0.1 \mu\text{m}$ manejaría una corriente de 1.0 A/mm . Esto sería el potencial de la estructura si se consigue eliminar el ancho virtual de la compuerta antes descrito y discutido.

En relación a la curva I_{DS} para $L_G = 1 \mu\text{m}$; $I_{DS} \sim 0.39 \text{ A/mm}$, resulta menor que la del HEMT para $L_G = 2 \mu\text{m}$ en 0.3 A/mm , contradiciendo lo esperado teóricamente, (Fig. 41). Este comportamiento puede ser debido a defectos de la estructura tales como dislocaciones, que provocan un decremento en n_s y/o la movilidad, disminuyendo I_{DS} de manera correspondiente.

Se concluye esta sección señalando que estos valores de I_{DS} , si bien no corresponden del todo con el estado del arte; no obstante, manejan una densidad lineal de corriente aceptable. Pero sobre todo la estructura permitió poner evidencia la presencia de una compuerta virtual efectiva cuyo origen resta establecer y eliminar.

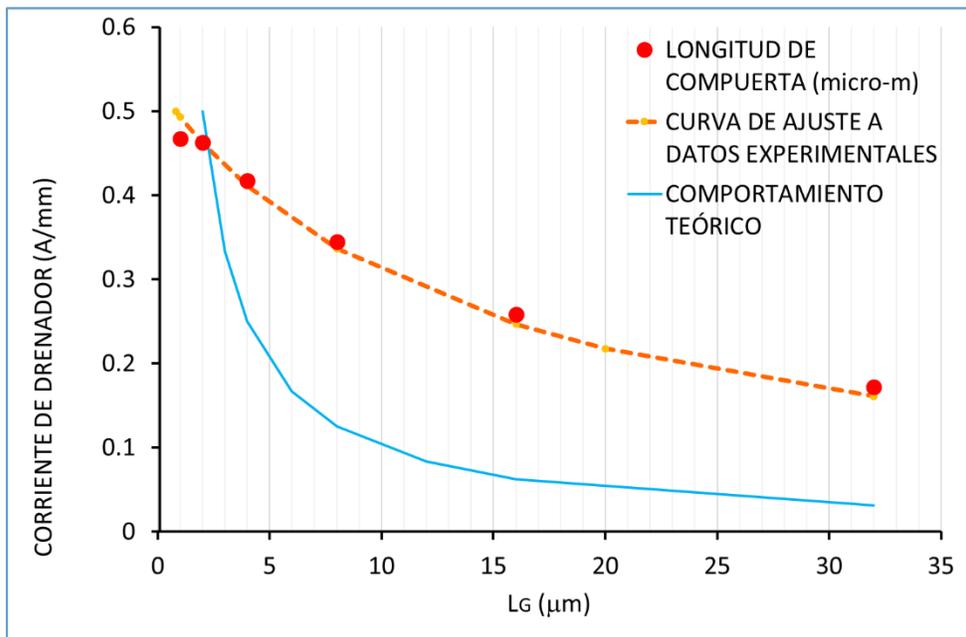


Figura 42. I_{DSmax} como función de L_G , donde la curva negra representa el comportamiento teórico mientras que la curva naranja corresponde a los datos experimentales

La Fig. (43), muestra una recopilación de los resultados más relevantes del comportamiento de I_{DSmax} con respecto a la variación de la longitud de la compuerta (L_G) (puntos naranjas), para HEMTs de estructura AlGaIn/GaN sin diferenciación de espesor y composición del AlGaIn. Se observa que L_G en el rango de los submicrones generan las I_{DSmax} más altas, en acuerdo cualitativo con lo que predice la teoría. En esa misma figura se sobreponen los resultados aquí obtenidos y su ajuste (triángulos azules y línea amarilla), es decir considerando la longitud de compuerta efectiva. Para longitudes de compuerta alrededor de 2 micras nuestros resultados son congruentes con los reportados en la literatura y los complementan para longitudes entre 4 y 32 micras. Es decir, que en la dependencia de I_{DSmax} con la longitud de la compuerta en los resultados reportados se observa el mismo comportamiento cualitativo que el encontrado en nuestras muestras. Es decir, que la mayoría de los grupos que investigan este dispositivo tienen el mismo problema; que habrá que explorar con más detalle y corregir, para con ello extraer de mejor manera el potencial tecnológico de la estructura.

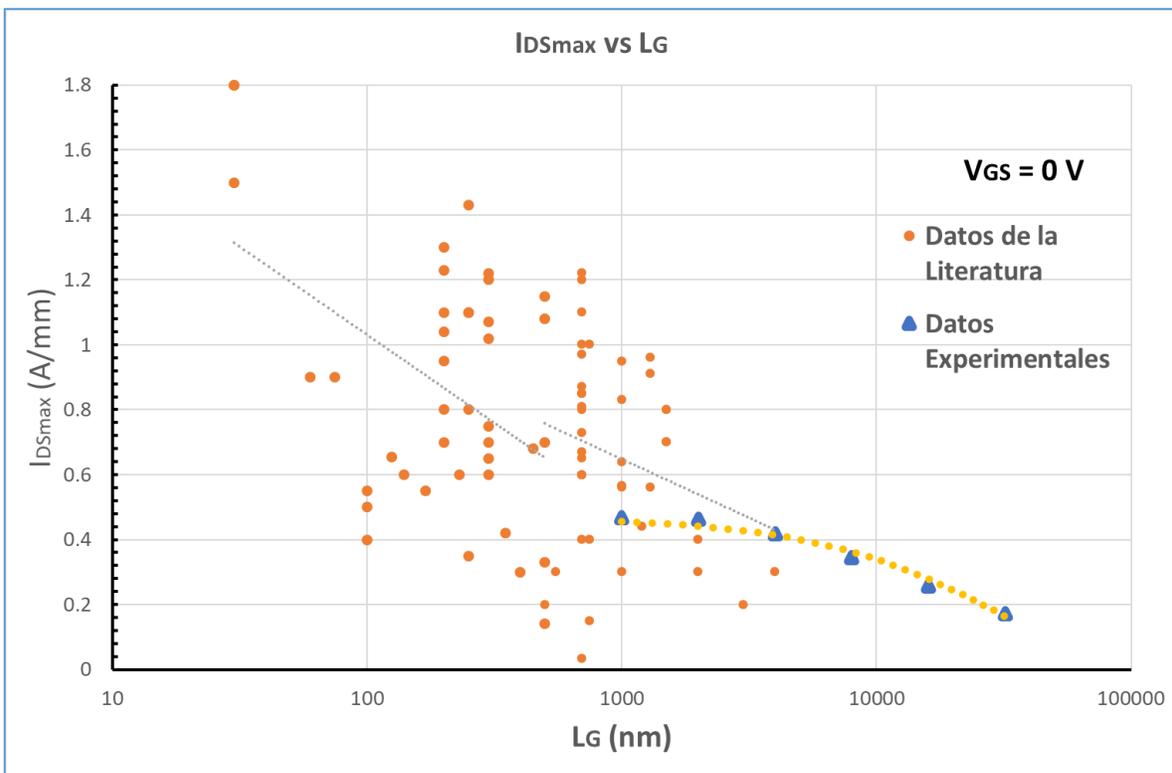


Figura 43. Muestra una comparativa entre datos de I_{DSmax} con respecto a la variación de L_G , recopilados desde la literatura (puntos) y los datos de nuestros resultados experimentales (triángulos). Donde valores de L_G alrededor de los 2 μm muestran un comportamiento congruente a lo reportado en la literatura; mientras que para L_G mayores, el comportamiento es apegado cualitativamente a la teoría.

4. Capítulo IV. Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

En este trabajo se revisaron las propiedades de los semiconductores que conforman la estructura del HEMT aquí estudiado. En particular la aparición del gas bidimensional de electrones que constituye su elemento más importante. Se analiza el mecanismo de transporte de carga en este dispositivo hasta obtener la ley que determina la dependencia de la corriente de drenador en función de las propiedades físicas del DEG, de la geometría y de las condiciones de polarización, destacando el efecto de la longitud de la compuerta sobre la corriente de drenador y la transconductancia del dispositivo. Se describió, en forma resumida, la tecnología de manufactura de las estructuras estudiadas (propiedad de una compañía europea). Para finalmente estudiar sus propiedades de transporte de carga.

Este estudio cuantificó la variación de la corriente de drenador por efecto de calentamiento del DEG estableciendo que puede disminuirla hasta en 10% así como las constantes de tiempo que intervienen en ese proceso de calentamiento. Se estudió, conforme al objetivo planteado el efecto de la longitud de compuerta en el desempeño del transistor, habiendo encontrado que la compuerta del HEMT en esta estructura estudiada funciona como si su geometría correspondiese a una compuerta virtual aumentada en 14 μm . Este comportamiento podría deberse a la zona de carga espacial que desarrolla la barrera Schottky en el AlGa_N bajo el Ni de la compuerta, aunque es evidente que constituye un campo a explorar detalladamente.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda estudiar estructuras equivalentes realizadas por otra empresa para comparar, así como realizar y estudiar estructuras con la película de AlGa_N altamente impurificada. Esto disminuiría la extensión de su zona de vaciamiento y se vería si hay algún efecto sobre el largo efectivo de la compuerta.

Referencias

- [1] A. Jiménez; "Crecimiento y Fabricación de Transistores HEMT de AlGa_N/Ga_N por epitaxia de haces moleculares", Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, June 2003.
- [2] M. Asif Khan, J. N. Kuznia, A. R. Bhattarai and D. T. Olson; "Metal Semiconductor Field Effect Transistor Based on Single Crystal Ga_N"; Applied Physics Letters, vol. 62, pp. 1786, 1993.
- [3] V. Tilak, B.Green, V. Kaper, H. Kim, T. Prunty, J. Smart, J. Shealy and L. Eastman; "Influence of Barrier Thickness on the High-Power Performance of AlGa_N/Ga_N HEMTs", IEEE Electron Devices Letters, vol. 22, no. 11, November 2001.
- [4] K. Shinoara, D. Regan, A. Corrión, D. Brown, Y. Tang, J. Wong, G. Candia, A. Schmitz, H. Fung, S. Kim and M. Micovic; "Self-Aligned-Gate Ga_N-HEMTs with Heavily-Doped n⁺-Ga_N Ohmic Contacts to 2DEG", IEEE, 2012.
- [5] I. Daumiller, C. Kirchner, M. Kamp, K. J. Ebeling, and E. Kohn; "Evaluation of the Temperature Stability of AlGa_N/Ga_N Heterostructure FET's", IEEE Electron Device Letters, vol. 20, no. 9, September 1999.
- [6] G. Koblmüller, R. M. Chu, A. Raman, U. K. Mishra and J. S. Speak; "High Temperature Molecular Beam Epitaxial Growth of AlGa_N/Ga_N templates with reduced interface impurity levels", Journal of Applied Physics, vol. 107, 2010.
- [7] R. S. Pengelly, S. M. Wood, J. W. Milligan, S. T. Sheppard and W. L. Pribble; "A Review of Ga_N on SiC High Electron Mobility Power Transistors and MMICs", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 6, June 2012.
- [8] P. Javorka; "Fabrication and Characterization of AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistor", RWTH Aachen University, Aachen, Germany, February 2004.
- [9] S. A. Kukushkin, A. V. Osipov, V. N. Bessolov, B. K. Medvedev, B. K. Nevlin and K. A. Tcarick; "Substrates for Epitaxy of Gallium Nitride: New Materials and Techniques", 2008.
- [10] E. R. Dobrovinskaya, L. A. Lytvynov and V. Pishchik; "Sapphire: Material, Manufacturing and Applications", Hardcover, Springer, 2009.
- [11] S. C. Jain, M. Willander, J. Narayan and R. Van Overstraeten; "III-nitrides: Growth, Characterization and Properties", Journal of Applied Physics, vol. 87, no. 3, February 2000.
- [12] S. Fischer, C. Wetzel, W. L. Hansen, E. D. Bourret-Courchesne, B. K. Meyer and E. E. Haller; "Properties of Ga_N grown at High Rates on Sapphire and on 6H-SiC", Applied Physics Letters, vol. 69, 1996.
- [13] Y.-Y. Wong, Y.-S. Chiu, T.-T. Luang, T.-M. Lin, Y.-T. Ho, Y.-C. Lin, E. Y. Chang; "Growth and Fabrication of AlGa_N/Ga_N HEMT on SiC Substrate", IEEE, 2012.
- [14] S. Arulkumaran, G. Ing Ng, S. Vicknesh, H. Wang, K. Siong Ang, J. Pei Ying Tan, V. Kaixin Lin, S. Todd, Guo-Qiang Lo, and S. Tripathy; "Direct Current and Microwave Characteristics of Sub-micron AlGa_N/Ga_N High-Electron-Mobility Transistors on 8-Inch Si(111) Substrate"; Japanese Journal of Applied Physics, vol. 51, October 2012.
- [15] S. Strite and H. Morkoç; "Ga_N, Al_N and In_N: A Review"; University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992.

- [16] O. Ambacher, J. Smart, J. R. Shealy, N. G. Weimann, K. Chu; "Two-dimensional Electron Gases Induced by Spontaneous and Piezoelectric Polarization Charges in N- and Ga-face AlGa_N/Ga_N Heterostructures", *Journal of Applied Physics*, vol. 85, 1999.
- [17] E. T. Yu, X. Z. Dang, P. M. Asbeck, S. S. Lau and G. J. Sullivan; "Spontaneous and Piezoelectric Polarization Effects in III-V Nitride Heterostructures", *American Vacuum Society*, May 1999.
- [18] O. Ambacher; "Polarization Induced Effects in AlGa_N/Ga_N Heterostructures", Walter Schottky Institute, TU-Munich, Am Coulombwall, 85748 Garching, Germany, vol. 98, 2000.
- [19] E. O. Morales Santillán; "Efecto de Deuterar Películas de nid-GaN en sus Propiedades de Transporte de Carga", CINVESTAV-IPN, México, July 2012.
- [20] Z. Dridi, B. Bouhafs and P. Ruterana; "First-Principles Investigation of Lattice Constants and Bowing Parameters in Wurtzite Al_xGa_{1-x}N, In_xGa_{1-x}N and In_xAl_{1-x}N Alloys", *Institute of Physics Publishing, Semiconductor Science and Technology*, vol. 18, pp. 850-856, August 2003.
- [21] T.R. Lenka and A.K. Panda, "Characteristics Study of 2DEG Transport Properties of AlGa_N/Ga_N and AlGaAs/GaAs-based HEMT", *National Institute of Science and Technology, Odisha, India*, 2010.
- [22] N. Nepal, J. Li, M. L. Nakarmi, J. V. Lin and H. X. Jiang; "Temperature and Compositional Dependence of Energy Band Gap of AlGa_N Alloys", *Applied Physics Letters*, vol. 87, December 2005.
- [23] V. I. Litvinov, A. Manasson and D. Pavlidis; "Short-Period Intrinsic Stark Ga_N/AlGa_N Superlattice as a Bloch Oscillator", *Applied Physics Letters*, vol. 85, no. 4, July 2004.
- [24] R. R. Pelá, C. Caetano, M. Marques, L. G. Ferreira, J. Furthmüller, "Accurate Band Gaps of AlGa_N, InGa_N, and AlInN Alloys Calculations Based on LDA-1/2 Approach", *Applied Physics Letters*, vol. 98, 2011.
- [25] M. Estrada and A. Escobosa; "Tecnología de Fabricación de Microcircuitos: Aspectos Básicos", Editorial Académica Española, 2012.
- [26] F. Rinaldi; "Basics of Molecular Beam Epitaxy (MBE)", *Annual Report 2002, Optoelectronics Department, University of Ulm*, 2002.
- [27] R. Held, D. E. Crawford, A. M. Johnston, A. M. Dabiran, and P. I. Cohen; "In Situ Control of Ga_N Growth by Molecular Beam Epitaxy", *J. Elect. Materials*, July 1999.
- [28] D. Nilsson, "Doping of High-Al-Content AlGa_N Grown by MOCVD", *Linköping University, Linköping, Sweden*, 2014.
- [29] Q. Fareed, R. Gaska, J. Mickevicius, G. Tamulaitis, M. S. Shur and M. Asif Khan; "Migration Enhanced Metalorganic Chemical Vapor Deposition of AlN/Ga_N/In_N based Heterostructures", *Atlas Road, Columbia*.
- [30] S. M. Sze and K. K. Ng; "Physics of Semiconductor Devices", *John Wiley & Sons*, third edition, 2007.
- [31] V. Hoel, S. Bouloy, H. Gerard, V. Rabaland, E. Delos, J. C. De Jaeger, M. A. Di-Forte Poisson, C. Bryllinski, H. Lahreche, R. Langer and P. Bove; "AlGa_N/Ga_N HEMTs on Epitaxies Grown on Composite Substrate", *European Microwave Integrated Circuits Conference, Munich, Germany*, October 2007.
- [32] D. Lide, David R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 83rd ed.; CRC Press; Boca Raton, FL, 2002.
- [33] E. Müller, D. Gerthsen, P. Brückner, F. Scholz, Th. Gruber and A. Waag; "Probing the Electrostatic Potential of Charged Dislocations in n-Ga_N and n-ZnO Epilayers by Transmission Electron Holography", *Physical Review B*, vol. 73, June 2006.

- [34] E. Meissner, S. Schweigard, J. Friedrich, T. Paskova, K. Udvary, G. Leibiger and F. Habel; "Cathodoluminescence Imaging for the Determination of Dislocation Density in Differently Doped HVPE GaN", *Journal of Crystal Growth*, vol. 340, pp. 78–82, 2012.
- [35] W. Luo, X. Wong, H. Xiao, C. Wang, J. Ran, L. Gua, J. Li, H. Liu, Y. Chen, F. Yang and Jinmin Li; "Growth and Fabrication of AlGaIn/GaN HEMT Based on Si (111) Substrates by MOCVD", *Microelectronics Journal*, vol. 39, 2008.
- [36] Y. Cordier, F. Semond, P. Lorenzini, N. Grandjean, F. Natali, B. Damilano, J. Massies, V. Hoël, A. Minko, N. Vellas, C. Gauquiere, J. C. De Jaeger, B. Dessertene, S. Cassette, M. Surrugue, D. Adam, J-C Grattepain, R. Aubry and S. L. Delage; "MBE Growth of AlGaIn/GaN HEMTs on resistive Si (111) Substrate with RF Small Signal and Power Performances", *Journal of Crystal Growth*, vol. 251, 2003.
- [37] X. Wang, C. Wang, G. Hu, J. Wang, J. Ran, C. Fang, J. Li, Y. Zeng, Jinmin Li, X. Liu, J. Liu and H. Qiao; "Growth and Characterization of 0.8- μm Gate Length AlGaIn/GaN HEMTs on Sapphire Substrates", *Ser F. Information Sciences*, vol. 48, 2005.
- [38] S. J. Heikman; "MOCVD Growth Technologies for Applications in AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors", University of California, Santa Barbara, USA, September 2002.
- [39] L. Shen, S. Heikman, B. Moran, R. Coffie, N. Q. Zhang and D. Buttari; "AlGaIn/AlN/GaN High-Power Microwave HEMT", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 22, pp. 457-459, October 2001.
- [40] Yun-H. Wang, Y. C. Liang, G. S. Samudra, Ting-Fu Chang, Chih-F. Huang, Li Yuan and Guo-Qiang Lo; "Modelling Temperature Dependence on AlGaIn/GaN Power HEMT Device Characteristics", *Semiconductor Science and Technology*, vol. 28, September 2013.
- [41] A.V. Vertiatichikh, L.F. Eastman, W.J. Schaff and T. Prunty; "Effect of Surface Passivation of AlGaIn/GaN Heterostructure Field-Effect Transistor", *Electronics Letters*, vol. 38, no. 8, April 2002.
- [42] A. Jiménez, Z. Bougrioua, J. M. Tirado, A. F. Braña, E. Calleja, E. Muñoz and I. Moerman; "Improved AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistor Using AlN interlayers", *Applied Physics Letters*, vol. 82, pp. 4827-4829, 2003.
- [43] V. Kumar, A. Kuliev, R. Schwindt, M. Muir, G. Simin, J. Yang, M. Asif Khan and I. Adesida; "High Performance 0.25 μm Gate-Length AlGaIn/GaN HEMTs on Sapphire with Power Density of over 4.5 W/mm at 20 GHz", *Solid-State Electronics*, vol. 47, January 2003.
- [44] N. Bonseddik, Z. Benamara, H. Mazari; "Fabrication and DC Characterization of AlGaIn/GaN High Electron Mobility Transistors (HEMTs) with Field plate Over Passivation Layers", *Sensor Letters*, vol. 9, pp. 2302-2304, December 2011.
- [45] W. Jatal, Uwe Baumann, K. Tonish, F. Schwierz; "High-Frequency Performance of GaN High-Electron Mobility Transistor on 3C-SiC/Si Substrates with Au-Free Ohmic Contacts", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 36, no. 2, February 2015.
- [46] C. A. Hernández Gutiérrez; "Efecto de Deuterar HEMTs de Estructura Ni/AlGaIn/GaN/Si de 1.0 μm de Compuerta en sus Propiedades de Transporte", *CINVESTAV-IPN, México*, February 2013.
- [47] D. Delagebeaudeuf and N. T. Linh; "Metal-(n) AlGaAs-GaAs Two-Dimensional Electron Gas FET", *IEEE Transactions On Electron Devices*, vol. ed-29, no. 6, June 1982.
- [48] M. Kocan; "AlGaIn/GaN MBE 2DEG Heterostructures: Interplay between Surface-, Interface and Device-Properties", RWTH Aachen University, Aachen, Germany, July, 2003.

- [49] Xiaoqing Xu, Xianglin Liu, Xiuxun Han, Hairong Yuan, Jun Wang, Yan Guo, Huaping Song, Gaolin Zheng, Hongyuan Wei, Shaoyan Yang, Qinsheng Zhu and Zhanguo Wang; "Dislocation Scattering in $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ Heterostructures", *Applied Physics Letters*, vol. 93, 2008.
- [50] V. Darakchieva, B. Monemar, A. Usui, M. Saenger and M. Schubert; "Lattice Parameters of Bulk GaN Fabricated by Halide Vapor Phase Epitaxy", *Journal of Crystal Growth*, vol. 310, p.p. 959–965, January 2008.
- [51] J. C. Sippel, S. S. Islam and S. S. Mukherjee; "A Physics-Based Analytical Model of a GaN/AlGa_N HEMT Incorporating Spontaneous and Piezoelectric Polarization", *IEEE*, 2004.
- [52] M. Charfeddine, H. Belmabrouk, M. A. Zaidi and H. Maaref; "2-D Theoretical Model for Current-Voltage Characteristics in AlGa_N/Ga_N HEMT's", *Journal of Modern Physics*, vol. 3, pp. 881-886, April 2012.
- [53] U. K. Mishra, L. Shen, T. E. Kazior and Y. Wu; "GaN-Based RF Power Devices and Amplifiers", *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 2, p.p. 287-305, February 2008.
- [54] T. Ide, M. Shimizu, A. Nakajima, M. Inada, S. Yagi, G. Piao, Y. Yano, N. Akutsu, H. Okumura and K. Arai; "Gate-Length Dependence of DC Characteristics in Submicron-Gate AlGa_N/Ga_N High Electron Mobility Transistors", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 46, no. 4B, p.p. 2334–2337, April 2007.
- [55] F. Lecourt, Y. Douvry, N. Defrance, V. Hoel, J.C. De Jaeger, S. Bouzid, M. Renvoise, D. Smith and H. Maher; "High Transconductance AlGa_N/Ga_N HEMT with Thin Barrier on Si(111) Substrate", *IEEE*, 2010.
- [56] C. H. Oxley, M. J. Uren, A. Coates, D. G. Hayes, "On the temperature and carrier density dependence of electron saturation velocity in an AlGa_N/Ga_N HEMT," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 53, pp. 565, March 2006.

Apéndice I

Tabla 1. Muestra los valores de ID_{Smax} vs L_G , para $V_{GS} = 0$ V.

	L_G [nm]	ID_{Smax} (VGS =0) [A/mm]	Referencia
1	30	1.8	2011 IEEE EDL 300-GHz InAlN/GaN HEMTs With InGaN Back Barrier, Dong Seup Lee,
2	30	1.5	InAlN/AlN/GaN HEMTs With Regrown Ohmic Contacts and fT of 370 GHz Yuanzheng Yue
3	30	1.8	2012 IEEE Scaled Self-Aligned N-Polar GaN/AlGa _N ; Nidhi
4	60	0.9	2010 IEEE AlGa _N /GaN HEMT With 300-GHz f _{max} ; Jinwook W. Chung
5	75	0.9	
6	100	0.4	
7	100	0.5	2012 IEEE EDL 150-GHz Cutoff Frequencies and 2-W/mm Output Power at 40 GHz in a Millimeter-Wave AlGa _N /GaN HEMT Technology on Silicon; Diego Marti,
8	100	0.55	2001 SSE Effect of leigth gate on DC performance of AlGa _N /GaN HEMTs grown by MBE, J. W. Johnson
9	125	0.655	
10	140	0.6	
11	170	0.55	2004 IEEE EDL High Microwave and Noise Performance of 0.17- m AlGa _N -Ga _N HEMTs on High-Resistivity Silicon Substrates; A. Minko
12	200	1.1	2001 IEEE EDL Power Electronics on InAlN/(In)Ga _N : Prospect for a Record Performance; Ján Kuzmik
13	200	0.95	
14	200	1.3	2005 PSS Fe doping for making resistive Ga _N layers with low dislocation density; consequence on HEMTs; Z. Bougrioua
15	200	1.04	2005 PSS Fe doping for making resistive Ga _N layers with low dislocation density; consequence on HEMTs; Z. Bougrioua
16	200	1.23	2005 PSS Fe doping for making resistive Ga _N layers with low dislocation density; consequence on HEMTs; Z. Bougrioua
17	200	0.7	2005 PSS Temperature-dependent microwave noise performances of AlGa _N /GaN HEMTs with post-gate annealing; Dongmin Liu
18	200	0.8	2005 PSS Temperature-dependent microwave noise performances of AlGa _N /GaN HEMTs with post-gate annealing; Dongmin Liu
19	230	0.6	
20	250	1.43	2003 SSE High performance 0.25 lm gate-length AlGa _N /GaN HEMTs on sapphire with power density; of over 4.5 W/mm at 20 GHz V. Kumar
21	250	1.1	2006 JJAP High-Power-Density 0.25 m Gate-Length AlGa _N /GaN High-Electron-Mobility Transistors on Semi-Insulating 6H-SiC Substrates; J.-W. LEE
22	250	1.1	2010 IEEE EDL AllInN/AlN/GaN HEMT Technology on SiC With 10-W/mm and 50% PAE at 10 GHz; N. Sarazin
23	250	0.35	2001 SSE Effect of leigth gate on DC performance of AlGa _N /GaN HEMTs grown by MBE, J. W. Johnson
24	250	0.8	2006 MICC Very High Performance Ga _N HEMT devices by Optimized Buffer and Field Plate Technology; P.Romaninil
25	300	0.75	2004 EL D.C. Dumka RF reliability performance of AlGa _N -Ga _N HEMTs on Si substrate at 10 GHz
26	300	1.2	2001 IEEE EDL Influence of Barrier Thickness on the High-Power Performance of AlGa _N /GaN HEMTs; Vinayak Tilak
27	300	0.7	2011 MOTL EFFECT OF COMPOSITED-LAYER AlyGa1-yN ON PERFORMANCES OF AlGa _N /GaN HEMT WITH UNINTENTIONALLY DOPING BARRIER AlxGa1-xN; Zhi-qun Cheng
28	300	0.6	2011 MOTL EFFECT OF COMPOSITED-LAYER AlyGa1-yN ON PERFORMANCES OF AlGa _N /GaN HEMT WITH UNINTENTIONALLY DOPING BARRIER AlxGa1-xN; Zhi-qun Cheng
29	300	1.02	2005 PSS Influence of carrier supply doping on the RF properties of AlGa _N /GaN/SiC high-electron-mobility transistors; M. Marso
30	300	1.07	2005 PSS Influence of carrier supply doping on the RF properties of AlGa _N /GaN/SiC high-electron-mobility transistors; M. Marso
31	300	1.22	2005 PSS Influence of carrier supply doping on the RF properties of AlGa _N /GaN/SiC high-electron-mobility transistors; M. Marso
32	300	0.65	2012 JJAP Direct Current and Microwave Characteristics of Sub-micron AlGa _N /GaN High-Electron-Mobility Transistors on 8-Inch Si(111) Substrate Subramaniam; Arulkumaran
33	350	0.42	2010 JS A Ku-band 3.4 W/mm power AlGa _N /GaN HEMT on a sapphire substrate; Wang Dongfang
34	400	0.3	2005 IEEE A C-Band AlGa _N /GaN HEMT with Cat-CVD SiN Passivation Developed for an Over 100 W Operation; Y. Kamo1
35	450	0.68	1999 IEEE EDL High-Power Microwave Ga _N /AlGa _N HEMT's on Semi-Insulating Silicon Carbide Substrates; S. T. Sheppard,
36	500	1.15	2005 High power and linearity performances of gallium nitride HEMT devices on sapphire substrate; M. Werquin
37	500	1.08	High Power Performances of AlGa _N /GaN HEMTs On Sapphire Substrate At F=4GHz; N. Vellas
38	500	0.33	2001 SSE Effect of leigth gate on DC performance of AlGa _N /GaN HEMTs grown by MBE, J. W. Johnson
39	500	0.7	2004 SSE Post-annealing effects on device performance of AlGa _N /GaN HFETs; Jaesun Lee
40	500	0.14	2005 PSS Influence of passivation induced stress on the performance of AlGa _N /GaN HEMTs; D. Gregušová

	L_g [nm]	I_{DSmax} (VGS =0) [A/mm]	Referencia
41	500	0.2	2005 PSS Influence of passivation induced stress on the performance of AlGaIn/GaN HEMTs, D. Gregušová
42	550	0.3	2004 IEEE EDL 30-W/mm GaN HEMTs by Field Plate Optimization; Y.-F. Wu,
43	700	0.4	
44	700	0.6	
45	700	0.65	2001 IEEE EDL AlGaIn/AlN/GaN High-Power Microwave HEMT; L. Shen
46	700	0.85	2003 ED 2.1 A/mm current density AlGaIn=GaIn; HEMTA. Chini
47	700	0.033	2004 IEEE EDL Power and Linearity Characteristics of Field-Plated Recessed-Gate AlGaIn–GaIn HEMTs; A. Chini
48	700	1	2004 IEEE EDL 12 W/mm AlGaIn–GaIn HFETs on Silicon Substrates J. W. Johnson
49	700	1.2	2004 IEEE EDL 9.4-W/mm Power Density AlGaIn–GaIn HEMTs on Free-Standing GaN Substrates; K. K. Chu,
50	700	1.1	2004 IEEE EDL Power Performance of AlGaIn–GaIn HEMTs Grown on SiC by Plasma-Assisted MBE; Siddharth Rajan
51	700	0.97	2005 MJ Impact of layer structure on performance of unpassivated AlGaIn/GaN HEMT; P. Kordos' a
52	700	0.81	2005 MJ Impact of layer structure on performance of unpassivated AlGaIn/GaN HEMT; P. Kordos
53	700	1.22	2005 MJ Impact of layer structure on performance of unpassivated AlGaIn/GaN HEMT; P. Kordos
54	700	0.87	2001 APL Effect of growth termination conditions on the performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors; S. Keller
55	700	0.85	2001 APL Effect of growth termination conditions on the performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors; S. Keller
56	700	0.67	2001 APL Effect of growth termination conditions on the performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors; S. Keller
57	700	0.6	2001 APL Effect of growth termination conditions on the performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors; S. Keller
58	700	0.73	2001 APL Effect of growth termination conditions on the performance of AlGaIn/GaN high electron mobility transistors; S. Keller
59	700	0.6	2004 IEEE EDL 12 W/mm AlGaIn–GaIn HFETs on Silicon Substrates; J. W. Johnson,
60	700	0.8	2004 SSE Performance of unpassivated AlGaIn/GaN/SiC HEMTs after short-term electrical bias stress; J. Bern at
61	750	1	2001 IEEE TED Very-High Power Density AlGaIn/GaN HEMTs; Yi-Feng Wu
62	750	0.15	2004 IEEE EDL 9.4-W/mm Power Density AlGaIn–GaIn HEMTs on Free-Standing GaN Substrates; K. K. Chu.
63	750	0.4	2001 SSE Effect of leigh gate on DC performance of AlGaIn/GaN HEMTs grown by MBE, J. W. Johnson
64	1000	0.83	2007 Microwave performance and structural characterization of MBE-grown AlGaIn/GaN HEMTs on low dislocation density GaN ubstrates; D.F. Storma.
65	1000	0.565	PEMCI AlGaIn/GaN HEMTs on Epitaxies Grown on Composite Substrate V. Hoel
66	1000	0.64	2007 IEEE EDL Remarkable Reduction of On-Resistance by Ion Implantation in GaIn/AlGaIn/GaN HEMTs with Low Gate Leakage Current; Kazuki Nomoto
67	1000	0.95	2003 IEEE EDL Unpassivated AlGaIn–GaIn HEMTs With Minimal RF Dispersion Grown by Plasma-Assisted MBE on Semi-Insulating 6H–SiC Substrates; Nils G. Weimann
68	1000	0.3	2004 SSE GaIn/AlGaIn HEMTs grown by hydride vapor phase epitaxy on AlN/SiC substrates; J.R. LaRoche
69	1000	0.56	2006 APL Effects of a thin Al layer insertion between AlGaIn and Schottky gate on the AlGaIn/GaN high electron mobility transistor characteristics; Takuma Nanjo
70	1200	0.44	2001 SSE Effect of leigh gate on DC performance of AlGaIn/GaN HEMTs grown by MBE, J. W. Johnson
71	1300	0.96	2005 PSS Fe doping for making resistive GaN layers with low dislocation density; consequence on HEMTs; Z. Bougrioua
72	1300	0.56	2005 PSS Fe doping for making resistive GaN layers with low dislocation density; consequence on HEMTs; Z. Bougrioua
73	1300	0.91	2005 PSS Fe doping for making resistive GaN layers with low dislocation density; consequence on HEMTs; Z. Bougrioua
74	1500	0.7	2008 MBE growth of AlGaIn=GaIn HEMTs with high power density; D.S. Katzer
75	1500	0.7	2008 MBE growth of AlGaIn=GaIn HEMTs with high power density; D.S. Katzer
76	1500	0.8	2004 GAAS Performances of AlGaIn/GaN HEMTs in Planar Technology; M. Werquin
77	1500	0.8	2004 GAAS Performances of AlGaIn/GaN HEMTs in Planar Technology; M. Werquin
78	2000	0.4	2003 JVST Characterization of different-Al-content Al _x Ga _{1-x} N/GaN heterostructures and high-electron-mobility transistors on sapphire; S. Arulkumar
79	2000	0.3	2005 ISPSD High current operation of GaN power HEMTs; H. Ueda
80	3000	0.2	
81	4000	0.3	An Over 100 W CW Output Power Amplifier Using AlGaIn/GaN HEMTs; Toshihide Kikkawa

Tabla 2. Muestra los valores de concentración de portadores (n_s) y movilidad (μ_n) en el 2DEG para estructuras crecidas por MBE.

MBE	n_s (cm ²)	m_n (cm ² /V s)	Referencia
1	1.25E+13	1150	2014 JEM Mukhopadhyay 43 4 Comparative grown on Si & Sapphire
2	1.10E+13	1340	2014 JEM Mukhopadhyay 43 4 Comparative grown on Si & Sapphire
3	8.70E+12	1780	2013 IEEE Defrance 60 3 Fabrication HEMTs on Flexible Substrates
4	1.20E+13	1200	2012 IEEE Shinohara 978-1-4673-4871-3 HEMTs with Heavily Doped n+_GaN
5	1.10E+13	1250	2012 IEEE Shinohara 978-1-4673-4871-3 HEMTs with Heavily Doped n+_GaN
6	8.00E+12	1600	2003 JCG Cordier 251 811-815 MBE growth on resistive Si (111)
7	1.00E+13	1200	2003 JCG Cordier 251 811-815 MBE growth on resistive Si (111)
8	9.00E+12	700	
9	1.50E+13	1100	
10	1.27E+13	1475	
11	1.13E+13	1600	
12	6.69E+12	1645	
13	1.00E+13	1300	2014 JP Alexeev CS 541 012030 Features III-V growth by MBE
14	1.80E+13	1700	2014 JP Alexeev CS 541 012030 Features III-V growth by MBE
15	1.50E+13	1000	2001 SSE Johnson effect gate lenght
16	1.50E+13	1500	2001 SSE Johnson effect gate lenght
17	7.96E+12	1680	2014 SST Leclair nanosystems applications
18	6.82E+12	1306	2014 SST Leclair nanosystems applications
19	6.96E+12	1319	2014 SST Leclair nanosystems applications
20	6.72E+12	1147	2014 SST Leclair nanosystems applications
21	1.00E+13	1643	2007 IEEE Poblenz Performance Grown on SiC by MBE
22	8.00E+12	1800	2006 S&M Joblot grown by MBE on Si
23	9.00E+12	1600	2006 S&M Joblot grown by MBE on Si
24	1.00E+13	1800	2006 S&M Joblot grown by MBE on Si
25	9.00E+12	2000	2009 JAP 105 033701 Cordier Crit T growth on HE perf TDs less 1E9 Mu 2000 noHEMT
26	9.60E+12	1982	2010 JCG 312 2683 Cordieer on Si (110) HEMT n1E13 mu 2000 Ids 630mAmm VIII
27	8.00E+12	1800	2010 JCG 312 2683 Cordieer on Si (110) HEMT n1E13 mu 2000 Ids 630mAmm VIII
28	1.00E+13	2000	2010 JCG 312 2683 Cordieer on Si (110) HEMT n1E13 mu 2000 Ids 630mAmm VIII
29	1.20E+13	1200	2013 06479113 Shinohara ID 4A mm
29	2.15E+13	1500	2001 JAP 90 10 5196 Smorchkova TEG
30	1.10E+13	1250	2013 06479113 Shinohara ID 4A mm
30	9.20E+13	1555	2014 JVST B 32 030605 Hoke on 200 mm Si 9 2E12 Mu 1555
31	1.00E+13	1800	2011 MOTL 53 6 1206 Cheng Multy layer 1e13 1800 Ids 870mAmm
32	1.00E+13	1800	2011 MOTL 53 6 1206 Cheng Multy layer 1e13 1800 Ids 870mAmm
33	9.00E+12	1100	2011 PSS Dharmarasu 2DEG grown MBE Si

Tabla 3. Muestra los valores de concentración de portadores (n_s) y movilidad (μ_n) en el 2DEG para estructuras crecidas por MOCVD.

MOCVD	n_s (cm ⁻²)	μ_n (cm ² /V s)	Referencia
1	1.20E+13	970	2003 AIP Jimenez 82 4827 AlN interlayers
2	1.20E+13	1160	2003 AIP Jimenez 82 4827 AlN interlayers
3	1.41E+13	820	2003 AIP Jimenez 82 4827 AlN interlayers
4	1.40E+13	1210	2003 AIP Jimenez 82 4827 AlN interlayers
5	7.50E+12	1760	2015 IEEE Jatal 36 02 On 3C-SiC_Si with Au-Free Ohmic Contact
6	7.20E+12	1200	2015 IEEE Jatal 36 02 On 3C-SiC_Si with Au-Free Ohmic Contact
7	1.30E+13	1200	2001 IEEE Tilak 22 11 Influence of barrier thickness
8	1.40E+13	1200	2001 IEEE Tilak 22 11 Influence of barrier thickness
9	1.20E+13	1200	2003 SSE Kumar 47 1577-1580 Power density over 4.5 W-mm
10	1.00E+13	2000	1999 APL Gaska 74 2 Electron Mobility in modulation-doped
11	7.30E+12	1930	2007 2nd European Microwave Conference Hoel Epitaxies grown on composite substrate
12	7.29E+12	1870	2007 2nd European Microwave Conference Hoel Epitaxies grown on composite substrate
13	6.80E+12	1920	2007 2nd European Microwave Conference Hoel Epitaxies grown on composite substrate
14	1.22E+13	1520	2001 IEEE Shen 22 10 High power microwave HEMT
15	1.48E+13	1542	2001 IEEE Shen 22 10 High power microwave HEMT
16	1.04E+13	1575	2005 SC Xiaoliang 48 6 808-814 Growth 0.8 mm gate on sapphire
17	8.79E+12	2060	2012 IEEE Wong 978-1-4673-2396-3 Growth on SiC substrate
18	8.54E+12	2130	2012 IEEE Wong 978-1-4673-2396-3 Growth on SiC substrate
19	8.16E+12	1260	2012 IEEE Wong 978-1-4673-2396-3 Growth on SiC substrate
20	6.54E+12	1980	2012 IEEE Wong 978-1-4673-2396-3 Growth on SiC substrate
21	9.85E+12	1840	2012 IEEE Wong 978-1-4673-2396-3 Growth on SiC substrate
22	7.05E+12	2160	2010 IEEE Lecourt 978-1-4244-6661-0 High transconductance
23	1.00E+13	2000	
24	8.00E+12	1600	2014 SST Kruszewski algan_gan structures
25	1.10E+13	1950	2007 JJAP-46 45 -L1087 Pei REc Slant Gate n_s 1 1E13 μ_n 1950 no Ids
26	1.85E+13	1360	2008 APE 1 111102 Hiroki InAlN AlGaIn AlN GaN n_s 1 85E13 μ_n 1360 Rsh 247 no HEMT
27	1.00E+13	2011	2008 I3EEDL 29 4 300 Pei BArr Al comp nd thick on N_s 1E13 μ_n 2000 nd Pwr perf no Ids
28	1.10E+13	1912	2008 I3EEDL 29 4 300 Pei BArr Al comp nd thick on N_s 1E13 μ_n 2000 nd Pwr perf no Ids
29	1.10E+13	1950	2008 I3EEDL 29 4 300 Pei BArr Al comp nd thick on N_s 1E13 μ_n 2000 nd Pwr perf no Ids
30	1.36E+13	1557	2011 CPB 20 9 097701 Zi Eff strain on transprops n_s 1 36e13 μ_n 1557 no HEMT
31	1.32E+13	922	2011 CPB 20 9 097701 Zi Eff strain on transprops n_s 1 36e13 μ_n 1557 no HEMT
32	1.62E+13	1193	2011 CPB 20 9 097701 Zi Eff strain on transprops n_s 1 36e13 μ_n 1557 no HEMT
33	1.00E+13	655	2012 NIMPRB 272 125 Nomoto Si implant lowOCR poor Rsh no HEMT
34	1.53E+13	1650	2012 pss C9 3 4 473 Zhu Impr sur morph n μ_n 1600 0 94 A mm
35	1.50E+13	1460	2012 pss C9 3 4 473 Zhu Impr sur morph n μ_n 1600 0 94 A mm
36	1.97E+13	1250	2012 pss C9 3 4 473 Zhu Impr sur morph n μ_n 1600 0 94 A mm
37	1.27E+13	1475	2010 PSS Eichfeld grown
38	1.13E+13	1600	2010 PSS Eichfeld grown
39	6.69E+12	1645	2010 PSS Eichfeld grown
40	2.25E+12	1556	2007 JJAP 46 L842 Pei delta dop NAOC Rsh 60 O sqb
41	7.90E+12	1500	1996 APL 69_1438 Wu HBV n transc in HEMT
42	1.2E+13	1175	2004 SSE 48 1855 Lee Ann on perform
43	1.5E+13	1300	2010 I3E EDL 31 11 Sarazin 1 5E13 μ_n 1300 Rs 320
44	1.12E+13	1210	2012 I3EEDL Liu gate diel MOS HEMT
45	1.51E+13	1030	2012 I3EEDL Liu gate diel MOS HEMT
46	2.8E+13	169	2012 PSS A 209 3 501 Hashimoto 2DEG AlGaIn channel
47	2.48E+13	143	2012 PSS A 209 3 501 Hashimoto 2DEG AlGaIn channel
48	9.6E+12	1950	2015 JS 36 014008 Chunjiang AlGaIn back
49	1.4E+13	1990	2008 APE 1 021 103 Masataka HEMT
50	1.7E+13	1900	2008 APE 1 021 103 Masataka HEMT
51	1.1E+13	980	2010 APL 96 032103 Hao Band diag n eTrap Film-AlGaIn-GaN
52	1.01E+13	1560	2010 APL 97 232106 Song Leakage scuw dislocations
53	7.9E+12	1237	2010 PSSC 7 7-8 1928 Irokawa ANom CV Py SBD n H
54	8.4E+12	1550	2012 JJAP-51-111001 Arulkumaran 8 in on Si
55	8.6E+12	895	2013 SST 28 125010 Wang T dep on power