

UNIVERSIDAD DE SONORA
DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
Departamento de Investigación en Física

**“DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE
TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO
BASADOS EN NITRURO DE GALIO SINTETIZADO
POR CVD”**

TESIS

Que para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN ELECTRÓNICA

PRESENTA:
ING. OMAR EMMANUEL PAREDES GALLARDO

Director: Dr. Dainet Berman Mendoza
Codirector: Dr. Antonio Ramos Carrazco

HERMOSILLO, SONORA

ENERO 2019

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

TK7871.95

.B47

T. 190123

T/19/0123



APROBACIÓN

Los miembros del comité designados para revisar la tesis del Ing. Omar Emmanuel Paredes Gallardo la han encontrado satisfactoria y recomiendan que sea aceptada como requisito parcial para obtener el Grado de Maestro en Ciencias en Electrónica, del programa de Maestría en Ciencias en Electrónica.

Dr. Dainet Berman Mendoza
Director de Tesis

Dr. Roberto Gómez Fuentes
Secretario

Dr. Rafael García Gutierrez
Vocal

Dr. Oscar Edel Contreras López
Sinodal Externo

DEDICATORIA

A mi familia: mis padres *Marisol* y *Gerardo*, los dos pilares fundamentales en mi vida. Por ser las personas que día a día me impulsan a lograr mis objetivos, porque sin ellos nada de esto habría sido posible. A mis hermanas *Andrea*, *Desiree* y *Danna*, que a pesar de las diferencias siempre están para alentarme en esos momentos difíciles.

A mis abuelas Mérida y Guadalupe, otros dos pilares fundamentales en mi vida. Sus comentarios, consejos, amor y cariño son siempre una inspiración y empuje para ser mejor.

A mi novia Karen Enríquez, por su apoyo incondicional, su esfuerzo, dedicación y cariño en todo momento vivido en esta etapa. Fuiste, eres y seguirás siendo un gran impulso como yo espero serlo para ti. ¡Lo hemos logrado morenita!

A mis amigos-hermanos Guadalupe, Ismael, Michel porque ni la distancia ni el tiempo han sabido doblegar esta fuerte amistad. Por muchos años de amistad vividos y por venir, muchas experiencias y largas pláticas, y por estar en los momentos más difíciles.

A los *materialistas*, Brandon, Aaron y Cesar, quienes nunca perdieron ese entusiasmo y disponibilidad para apoyar en la culminación de este trabajo. ¡Se logró el objetivo mijos!

Y a todos y cada uno de los que me acompañaron en esta etapa, con todo el aprecio y admiración para ustedes.

AGRADECIMIENTOS

A mi director y codirector: **Dr. Dainet Berman Mendoza** y **Dr. Antonio Ramos Carrasco**, respectivamente. La realización de este trabajo es el resultado de su guía, apoyo y enseñanzas a lo largo de esta etapa.

A la **Universidad de Sonora** por ser la gran institución que me permitió crecer; a su personal académico, administrativo y de servicio que siempre me brindó su amabilidad y atención.

Al **Laboratorio Nacional de NanoFabricación NanoFAB**, por abrirme sus puertas y ayudarme a desarrollar mi formación científica y personal que he alcanzado.

Al **M. N. Hiram Higuera Valenzuela** y **M. N. Frank Romo García** por sus consejos, apoyo, guía e increíble amistad y proyectar siempre en mí un entusiasmo único.

Al **Dr. Rafael García Gutiérrez**, por proporcionar los medios necesarios para la realización de este trabajo en su laboratorio de Dispositivos Optoelectrónicos de la UNISON.

A los técnicos del Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM, **Ing. Israel Gradilla** y **M.C. Eloísa Aparicio** por su valiosa labor en las caracterizaciones del material empleado en esta tesis.

Al **Cinvestav Unidad Saltillo** de igual modo por las caracterizaciones del material implementado para la culminación de este proyecto.

Al **M.C. Carlos Belman Rodríguez** por su contribución en el proceso de caracterización del material y brindarme su apoyo.

Al **Dr. Eulices Baltazar Acosta Enríquez** por su apoyo en los procesos de síntesis y caracterización.

A **M.C. Carolina Bohórquez Martínez** por su valiosa contribución en la caracterización de catodoluminiscencia en el material implementado en este trabajo.

A mis compañeros de la generación 2016-2018, **M.C. Renzo Tapia, M.C. Joan Coballes, M.C. Anderson Romero, M.C. Francisco Arizaga, M. C. Antonio Gallardo, M. C. Julián Enríquez, M. C. Arturo Espinoza**, en quienes en varias ocasiones me apoyé para escuchar un consejo, tener una discusión siempre constructiva o simplemente bromear de las situaciones. Buenos compañeros y amigos siempre.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT** por el apoyo económico brindado durante la realización de esta maestría. Asimismo, a los proyectos de ciencia básica no. 242508 titulado "Estudio de las propiedades cristalográficas de columnas de InGaN fabricadas por MOCVD para controlar sus características eléctricas y aplicarlas en el desarrollo de micro uniones N-P" y el proyecto FORDECyT no. 272894 por el apoyo brindado para realizar mi proyecto de investigación.

RESUMEN

La aplicación del semiconductor nitruro de galio (GaN) como material activo en estructuras de dispositivos electrónicos implica un estudio detallado de sus propiedades. El primer capítulo brinda al lector los conocimientos y antecedentes que involucran el desarrollo del GaN, así como una retroalimentación de su relevancia en el avance tecnológico. Las hipótesis y objetivos son expuestos en este capítulo. En el capítulo 2, se plantean los conceptos de transistores de efecto de campo (FET, por sus siglas en inglés) y se presenta un panorama general de los tipos, materiales utilizados y estructura de este tipo de dispositivos. Posteriormente, se exploran conceptos relacionados con el semiconductor GaN y de la técnica de síntesis de depósito por vapor químico (CVD, por sus siglas en inglés) empleada en esta tesis, así como también generalidades en cuanto a las técnicas de caracterización típicamente usadas para el GaN. En el capítulo 3 se presenta la metodología a seguir para la síntesis del semiconductor. Implementando un sistema CVD se realizan una serie de posibles combinaciones de flujos de gases reactante (NH_3) y transportador (N_2), así como diferentes condiciones de temperatura durante el proceso de síntesis de GaN siguiendo la metodología de un diseño de experimentos factorial. El proceso de fabricación de transistores FET es llevado a cabo con una estructura pseudo-MOS a base de GaN como canal activo. En el capítulo 4 se presentan los resultados de los transistores FET pseudo-MOS de GaN exhibiendo sus curvas de corriente contra voltaje (I-V), analizando su comportamiento en base a los voltajes aplicados y las corrientes de saturación resultantes. Previo al desarrollo del transistor, se analizan los resultados de las superficies de GaN crecidas sobre substratos de silicio. Las

muestras son analizadas por medio de difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés), catodoluminiscencia (CL, por sus siglas en inglés) y microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) para la identificación correcta del GaN. Finalmente, en el capítulo 5 se plantean las conclusiones del trabajo realizado en base a los resultados obtenidos. Las recomendaciones y trabajos a futuro se plantean en este capítulo.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN	v
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS	xii
CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Hipótesis	6
1.3 Objetivos	6
1.4 Metas.....	7
CAPÍTULO 2 . GENERALIDADES	8
2.1 Transistores de efecto de campo (FET)	8
2.1.1 Tipos de transistores FET.....	8
2.1.2 Materiales usados en transistores FET	13
2.2 NITRURO DE GALIO (GaN).....	15
2.2.1 Propiedades Cristalinas.....	16
2.2.2 Propiedades Ópticas	18
2.2.3 Propiedades Eléctricas.....	19
2.2.4 Técnica de síntesis de GaN: Depósito por vapor químico	21
2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE GaN	24
2.4.1 Difracción de rayos X	24
2.4.2 Microscopía electrónica de barrido	26
2.4.3 Fotoluminiscencia	28
2.4.4 Catodoluminiscencia	30

CAPÍTULO 3 . METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	32
3.1 SÍNTESIS DE PELÍCULAS DE GaN POR CVD	32
3.1.1 Sistema CVD	32
3.1.2 Metodología para la síntesis de GaN/Si	34
3.1.3 Diseño de Experimentos Factorial	36
3.2 Diseño y fabricación del transistor FET con estructura pseudo-MOSFET de GaN	38
CAPÍTULO 4 . ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
4.1 Resultados del diseño de experimentos de la síntesis de GaN	41
4.1.1 Morfología de las superficies de GaN	41
4.1.2 Difracción de rayos X de películas de GaN	46
4.1.3 Catodoluminiscencia	49
4.2 Caracterización eléctrica de los transistores FET de GaN.....	52
4.2.1 Curvas I-V de transistores pseudo-MOSFET de GaN.....	55
CAPÍTULO 5 . CONCLUSIONES.....	58
Trabajo Futuro.....	60
REFERENCIAS	61
ANEXO 1	69
ANEXO 2	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama esquemático de la estructura de un JFET de canal n.....	9
Figura 2.2 (a) Curva de la característica de un JFET con $V_{GS} = 0$ que muestra el voltaje de estrangulamiento, (b) Familia de curvas de característica de drenaje. [25].	10
Figura 2.3 Esquema de un capacitor MOS.....	11
Figura 2.4 Estructura principal de un transistor MOSFET de canal n y su símbolo esquemático.....	12
Figura 2.5 Estructura cristalina tipo wurtzita del GaN.....	16
Figura 2.6 Direcciones cristalinas en la estructura wurtzita.....	17
Figura 2.7 Energía de gap y parámetro de red de las familias de semiconductores con gap en el visible [8].	18
Figura 2.8 Etapas del proceso de depósito por vapor químico.	21
Figura 2.9 Esquema del fenómeno de difracción de rayos X en una estructura cristalina. El ordenamiento de los átomos funciona como rejilla de difracción.	25
Figura 2.10 Señales generadas por un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) al incidir un haz de electrones altamente acelerados sobre una muestra.	26
Figura 2.11 Esquema de un microscopio electrónico de barrido.....	27
Figura 2.12 Diagrama esquemático de la generación de un fotón a través de la transición banda-banda en un semiconductor.	29

Figura 3.1 Diagrama esquemático del sistema CVD empleado para síntesis de GaN.....	33
Figura 3.2 Mecanismos de reacciones en el proceso CVD para el depósito de GaN.	35
Figura 3.3 Estructura de transistor FET pseudo-MOSFET con película de GaN como capa activa.	38
Figura 3.4 Esquema del proceso de fabricación de transistores FET de GaN.	39
Figura 3.5 Patrones geométricos de los contactos diseñados para el transistor FET de GaN.	40
Figura 4.1 Morfología de superficies de GaN. A) Muestra GaN 1 con $T = 750^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 250 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 100 \text{ sccm}$, b) muestra GaN 2 con $T = 750^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 250 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 200 \text{ sccm}$, c) Muestra GaN 3 con $T = 750^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 500 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 200 \text{ sccm}$, d) muestra GaN 4 con $T = 750^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 500 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 200 \text{ sccm}$	42
Figura 4.2 Morfología de superficie de GaN 5 con $T = 950^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 250 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 100 \text{ sccm}$ y f) Crecimiento en forma de cruz de GaN.....	44
Figura 4.3 Crecimiento de GaN en fase hexagonal. Muestra g) GaN 6 con $T = 950^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 250 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 200 \text{ sccm}$, muestra i) GaN 7 con $T = 950^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 500 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 100 \text{ sccm}$, k) muestra GaN 8 con $T = 950^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 500 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 200 \text{ sccm}$. Imágenes h) ampliación de GaN 6, j) ampliación de GaN 7 y l) ampliación de GaN 8.	45
Figura 4.4 Difracción de rayos X de muestras de GaN/Si del diseño de experimentos.	48

Figura 4.5 Espectros de CL de las muestras de <i>GaN 1</i> , <i>GaN 2</i> , <i>GaN 3</i> y <i>GaN 4</i>	49
Figura 4.6 Emisiones de CL de muestras <i>GaN 5</i> , <i>GaN 6</i> , <i>GaN 7</i> y <i>GaN 8</i>	50
Figura 4.7 a) Configuración del analizador de parámetros semiconductores Keithley 4200 para caracterización de FET de GaN, b) Sistema real. Izquierda: analizador de parámetros semiconductores Keithley 4200, derecha: estación de pruebas.....	53
Figura 4.8 Diagrama esquemático para medición de transistores.	54
Figura 4.9 Gráficas de corriente vs. voltaje (I-V) de transistores a base de GaN con: a) $L = 10 \mu\text{m}$, b) $L = 20 \mu\text{m}$, c) $L = 40 \mu\text{m}$, d) $L = 80 \mu\text{m}$	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros experimentales utilizados y valores máximos (+) y mínimos (-).....	36
Tabla 3.2 Diseño de experimentos factorial. Combinación de parámetros y niveles en cada experimento.....	37

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La mayoría de los sistemas electrónicos están hechos a base de silicio. El silicio es el material principal que se ha utilizado en dispositivos electrónicos desde 1950, ya que presenta propiedades significativas que se han adaptado en la producción global de semiconductores y por ser un elemento abundante en la corteza terrestre. Sin embargo, las necesidades de la electrónica han ido cambiando con el tiempo y actualmente el estudio de nuevos materiales que impulsen la innovación en áreas como la optoelectrónica, electrónica flexible y la electrónica de potencia, es imperante para desarrollar dispositivos con características superiores.

La electrónica moderna se basa en un dispositivo en particular: el transistor. Este dispositivo desarrollado en 1948 por Bardeen, Brattain y Shockley [1] ha revolucionado la electrónica hasta nuestros días. El transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET, por sus siglas en inglés) es el dispositivo más comúnmente implementado en la miniaturización y mejoramiento de sistemas electrónicos. La fabricación de estos dispositivos involucra múltiples procedimientos sofisticados que pueden llegar a ser muy costosos, tardados y con un alto grado de complejidad. En este sentido, la ciencia de los materiales impulsa la búsqueda de materiales que puedan

mejorar el avance tecnológico en cuanto a dispositivos electrónicos, y de manera particular en el desarrollo de mejores transistores.

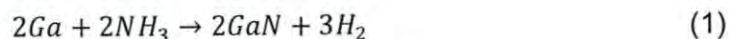
Los nitruros del grupo III-V son materiales vanguardistas que han sido investigados desde 1930. Estos son materiales semiconductores conocidos como el nitruro de galio (GaN), nitruro de aluminio (AlN) y nitruro de indio (InN), cuya composición se basa en la unión de un metal con átomos de nitrógeno. Estos materiales son versátiles y pueden formar aleaciones ternarias entre sus compuestos binarios, tales como el nitruro de galio-aluminio (AlGaN) y el nitruro de galio-indio (InGaN), capaces de modificar sus propiedades ópticas y eléctricas dependiendo de su composición [2]. Estos semiconductores de amplia banda prohibida han tenido mayor aplicación en la manufactura de dispositivos emisores de luz que operan en el rango de longitudes de onda del espectro visible, cubriendo parte del infrarrojo (IR) y el ultravioleta (UV) [3-5]. Recientes investigaciones constatan la aplicación de los nitruros III-V en dispositivos de alta potencia y alta frecuencia, así como también en detectores UV [6,7], lo cual demuestra la versatilidad de los nitruros en el campo de la electrónica. Estos materiales presentan características idóneas para estas aplicaciones, tales como: una banda prohibida (*band-gap*) amplia y directa, alta movilidad electrónica y al ser semiconductores compuestos, cuentan con enlaces químicos cuya electronegatividad vuelve a estos materiales óptimos para su aplicación en ambientes hostiles [8].

El interés que surge respecto a estos materiales radica en la capacidad de sintonizar su banda prohibida mediante el dopaje o el crecimiento de aleaciones ternarias (InGaN, AlGaIn), cuyos valores pueden ir desde los 0.7 eV hasta 3.4 eV (para el caso del InGaIn) o de 0.7 eV hasta 6.2 eV (para el caso del AlGaIn). Variando las condiciones de depósito para su crecimiento es posible modificar la composición de las aleaciones ternarias, logrando así modificar un valor determinado para su banda prohibida. Lo anterior, abre la posibilidad de fabricar y mejorar dispositivos como transistores de efecto de campo (FET, por sus siglas en inglés) [9], transistores de alta movilidad electrónica (HEMT, por sus siglas en inglés) [10], diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) [11] y dispositivos de efecto túnel [12], por mencionar algunos.

El crecimiento de los nitruros III-V es un tema importante en la fabricación de dispositivos electrónicos basados en estos compuestos. Las técnicas que más destacan para la síntesis de estos materiales son la epitaxia por haces moleculares (MBE, por sus siglas en inglés), depósito por vapor químico (CVD, por sus siglas en inglés) y depósito por vapor químico organometálico (MOCVD, por sus siglas en inglés). Ésta última técnica, ha presentado los mejores resultados en la producción de nitruros y se caracteriza por la obtención efectiva de películas semiconductoras de alta calidad, a partir de la reacción de precursores volátiles a altas temperaturas sobre sustratos de distintos materiales. El grado de complejidad en el control de las variables que involucran el proceso de síntesis tales como la presión, la temperatura del

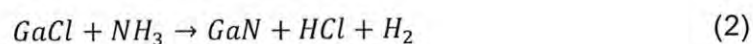
substrato y el flujo de gases dentro del sistema, son algunas de las consideraciones más importantes para esta técnica.

De manera particular, el GaN es el nitruro más versátil, aplicado y con características prometedoras en dispositivos electrónicos. La investigación en torno al GaN inicia cuando se obtienen los primeros resultados de este material en forma de polvos. La conversión de galio metálico en GaN en una atmósfera de amoníaco (NH_3) se llevó a cabo en el año 1932, los cuales fueron los primeros resultados reportados relacionados al crecimiento de GaN [13].



Johnson et. al. sintetizó GaN por primera vez usando la siguiente reacción:

Posteriormente, surgen los avances en el crecimiento de estos materiales en películas delgadas realizados por Maruska y reportados en 1969, donde se llevó a cabo el crecimiento de GaN por epitaxia en fase vapor de hidruros (HVPE, por sus siglas en inglés) [14]. Fueron los resultados de Maruska y Tietjen los que sentaron las bases para la técnica de CVD, la cual favoreció la producción de GaN en películas de distinto grosor e incluso monocristalinas. Esta técnica se utilizó por primera vez por estos autores para el crecimiento de GaN. Su método implicó fluir HCl a través de galio metálico produciendo un transporte hacia el substrato que se encontraba en una atmósfera de NH_3 . Realizando espectroscopía de masas, Ban mostró que la reacción química que controlaba el crecimiento era:



Utilizando este método, la primera película delgada de GaN monocristalina fue realizada. Posteriormente, Dingle et. al. reportó la primera emisión estimulada en agujas de GaN [15]. Por otro lado, una de las técnicas más populares en el crecimiento de películas delgadas de nitruros III-V fue reportada a través de sputtering. Asimismo, otros resultados se han obtenido a partir de los años 1970 usando la epitaxia por haces moleculares (MBE, por sus siglas en inglés) [16] y la epitaxia en fase vapor con precursores organometálicos (MOVPE, por sus siglas en inglés) [17].

El GaN ha resultado ser un material versátil aplicado en estructuras de transistores de potencia sometidos a altas temperaturas siguiendo estructuras MOS, HEMT y MESFET (transistor de efecto de campo metal-semiconductor) [18,19]. De igual manera, se han venido desarrollando aplicaciones utilizando GaN en estructuras de transistores de película delgada (TFT, por sus siglas en inglés). Se ha reportado estas estructuras usando GaN con niveles de voltaje de umbral de 11.5 V crecidos a bajas temperaturas [20], demostrando que es posible fabricar transistores a base de GaN para aplicaciones en monitores de pantallas planas. Posteriormente, Blat et. al. reportaron el crecimiento de GaN en sustratos flexibles mediante la técnica de depósito por capas atómicas por cátodo asistido por plasma (HCPA-ALD, por sus siglas en inglés) con voltajes de umbral de 0.15 V [21]. La alta movilidad electrónica y las distintas propiedades morfológicas en el crecimiento del GaN permite su aplicación en dispositivos a nivel nanométrico. Huang et. al. describe el desarrollo de transistores FET basados en nanovarillas de GaN [22].

Con la finalidad de adquirir información para la optimización de los parámetros del crecimiento del semiconductor GaN para su aplicación en dispositivos electrónicos, es llevada a cabo una caracterización amplia y extensa de sus parámetros estructurales, ópticos y eléctricos. En este trabajo se desarrollan transistores de efecto de campo de potencia utilizando GaN como capa activa partiendo de una estructura pseudo-MOSFET. La síntesis del material se lleva a cabo mediante la técnica CVD. Se analizan los parámetros de crecimiento para la optimización del crecimiento del material sobre obleas de silicio (100).

1.2 Hipótesis

Usando el semiconductor GaN como capa activa en un dispositivo, se obtendrá el comportamiento de un transistor de efecto de campo por medio del análisis de sus curvas I-V.

1.3 Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar y caracterizar transistores de efecto de campo utilizando GaN como capa activa, sintetizado por la técnica depósito de vapor químico sobre sustratos de silicio de baja resistividad.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Sintetizar el semiconductor GaN sobre obleas de silicio (100) mediante la técnica CVD utilizando un diseño de experimentos factorial de dos niveles.

- Identificar las propiedades óptimas del GaN caracterizando las muestras obtenidas por medio de técnicas SEM, CL, XRD.
- Estudiar el efecto de los parámetros de síntesis sobre la morfología, estructura cristalina y emisión del GaN sintetizado por CVD.
- Depositar GaN sobre obleas de SiO₂/Si aplicando las condiciones más favorables para la fabricación del transistor.
- Diseñar y fabricar un transistor de efecto de campo usando el GaN como capa activa para formar el canal de conducción.
- Realizar un análisis de la respuesta eléctrica de los diferentes depósitos de GaN seleccionados para la fabricación del transistor FET pseudo-MOS mediante la obtención de las curvas características I-V.
- Realizar un análisis de la respuesta eléctrica en base a la geometría utilizada en los contactos óhmicos y el ancho de canal de los transistores FET.

1.4 Metas

- Obtener distintas morfologías del semiconductor GaN depositadas por CVD dependiendo de las variables de depósito.
- Realizar la caracterización óptica, morfológica, estructural y cristalográfica de las muestras de GaN.
- Obtener el efecto de campo del dispositivo basado en GaN a través de la caracterización de la familia de curvas I-V.

CAPÍTULO 2 . GENERALIDADES

2.1 TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO (FET)

En este trabajo, el objetivo principal es la fabricación de transistores de efecto de campo y la caracterización de estos, por lo tanto, es importante entender qué son los transistores, cómo funcionan y cuáles son los parámetros requeridos, para considerar que el dispositivo que hemos fabricado presenta las características de estos transistores. El principio de funcionamiento de un transistor de efecto de campo (FET, por sus siglas en inglés) se basa en la inducción de un campo eléctrico para la generación de cambios en la carga libre dentro de un sólido, de ahí su nombre. Estos cambios en la carga de un sólido producen la modificación del potencial de otro conductor cercano. Este efecto es aprovechado para modular corrientes producidas al aplicar una diferencia de potencial para la generación de un canal. Un FET es un dispositivo *unipolar* ya que éste opera mediante un canal por el cual fluye un tipo de portador: electrones (canal *n*) o huecos (canal *p*) [23].

2.1.1 Tipos de transistores FET

En la Figura 2.1 se observa el esquema de un transistor JFET (FET de unión) de canal *n*. El dispositivo cuenta con tres terminales llamadas drenaje (D), fuente (S) y compuerta (G). Las terminales de S y D son dos contactos óhmicos. Al aplicar una diferencia de potencial positivo al terminal D respecto al terminal S (V_{DS}), los electrones fluyen de S a D. Por lo tanto, S actúa como el origen de los portadores y D como el drenador de estos portadores. Por otro

lado, al aplicar un voltaje entre las terminales G y S (V_{GS}) se presenta un incremento en la región de carga espacial (o zona de agotamiento) comprendida entre las regiones $p+$ y n , dando lugar a un cambio en el ancho del canal producido por V_{DS} . El dispositivo puede ser considerado como una resistencia variable controlada por voltaje [24].

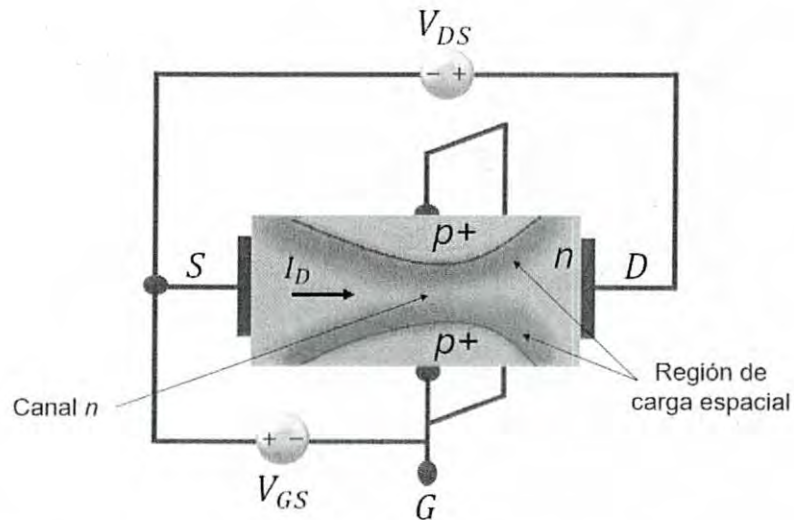
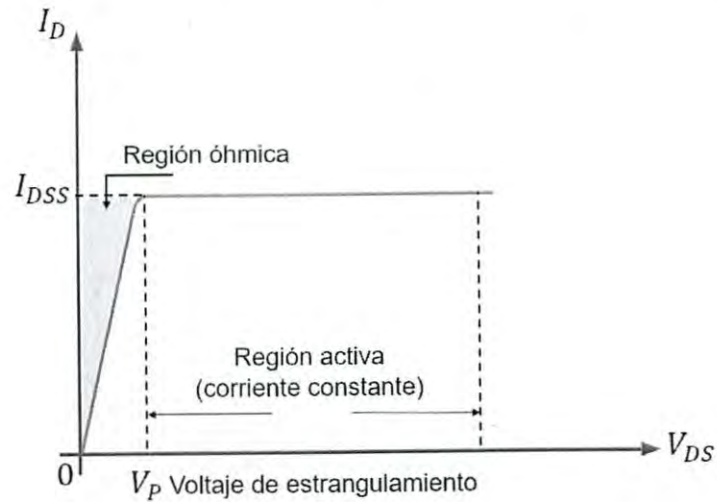


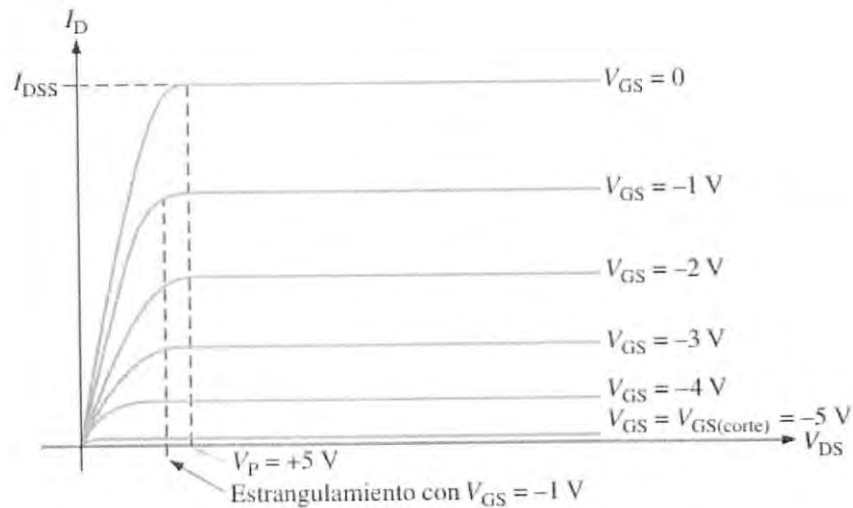
Figura 2.1 Diagrama esquemático de la estructura de un JFET de canal n.

Como se aprecia en la Figura 2.2(a), si se considera un voltaje $V_{GS} = 0$, la región de carga espacial no es lo suficientemente grande como para que tenga un efecto significativo, lo cual produce que la corriente I_D aumente gradualmente. Esta zona se conoce como región óhmica. El voltaje de estrangulamiento (V_P) es el voltaje en el cual V_{DS} e I_D se vuelve esencialmente constante. Un voltaje V_{DS} mayor al voltaje de estrangulamiento genera una corriente casi constante de drenaje (I_{DSS}). Cuando V_{GS} se ajusta a valores cada vez más negativos se produce una familia de curvas características del drenaje, como se aprecia en la Figura 2.2(b). Como consecuencia, la corriente de drenaje disminuye debido al estrangulamiento del canal. Cabe destacar que

el término estrangulamiento no es lo mismo que voltaje de estrangulamiento V_P , de modo que V_{GS} controla la cantidad de corriente en el drenaje [25].



a)



b)

Figura 2.2 (a) Curva de la característica de un JFET con $V_{GS} = 0$ que muestra el voltaje de estrangulamiento, (b) Familia de curvas de característica de drenaje. [25].

Los transistores FET se pueden clasificar en tres tipos principales: JFET (FET de unión) el cual, como se presentó en el apartado anterior, utiliza uniones p-n en su estructura para aislar la compuerta, el IGFET (FET de compuerta aislada)

cuyo dispositivo aísla la compuerta y el canal activo mediante un aislante, y los MESFET (metal-semiconductor FET) donde la compuerta y el semiconductor se unen para formar una barrera Schottky [26].

Dentro de esta clasificación podemos encontrar un tipo de FET en específico: el MOSFET (FET metal-óxido-semiconductor). La estructura base de este dispositivo se muestra en la Figura 2.3, denominada como capacitor MOS. Se cuenta con tres capas: un substrato de silicio, puro o poco dopado tipo p o n , sobre el cual se genera una capa de dióxido de silicio (SiO_2) que posee características dieléctricas o aislantes y finalmente una capa de metal (aluminio o polisilicio) con características conductoras. En un MOSFET se crece una capa de óxido para aislar el semiconductor y el canal activo. El aislante más utilizado en este tipo de estructuras de FET es el SiO_2 resultando en una interfaz de muy alta calidad con el Si [27]. La característica principal de este dispositivo es que con la implementación de una capa de óxido se pueden generar portadores libres en un canal mediante un proceso de inversión, además de ser un material con una banda prohibida grande, lo que reduce corrientes de fuga en el dispositivo.



Figura 2.3 Esquema de un capacitor MOS.

Existe una particularidad en los transistores MOSFET. Estos dispositivos se pueden presentar de dos tipos: incrementales (o *enriquecimiento*) o decrementales (o *empobrecimiento*). En el de tipo incremental, el canal activo se encuentra ausente debido a la poca cantidad de portadores de carga dentro de éste. El flujo de corriente por el drenaje cuando $V_{GS} = 0$ es mínimo. Si un voltaje es aplicado en la terminal de compuerta el canal drenaje-fuente se vuelve menos resistivo y permite el paso de la corriente. La corriente aumenta conforme el voltaje se modifica. Por otro lado, se tienen los MOSFET de tipo decremental o empobrecimiento donde el canal activo existe incluso cuando $V_{GS} = 0$. Esto implica que la corriente fluya a través del drenaje. Sin embargo, si $V_{GS} > 0$ el resultado origina que la corriente disminuya al causar un aumento en la resistencia del canal. La estructura de un MOSFET de canal n se aprecia en la Figura 2.4. Una característica de la estructura de transistores MOSFET es que poseen un voltaje de ruptura bajo, por lo que es usada en aplicaciones de baja potencia.

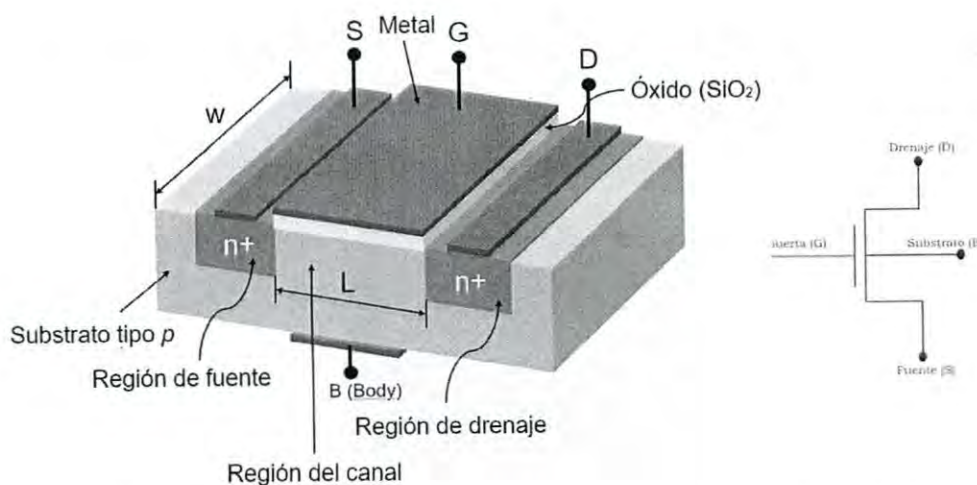


Figura 2.4 Estructura principal de un transistor MOSFET de canal n y su símbolo esquemático.

2.1.2 Materiales usados en transistores FET

La tecnología MOS es la tecnología dominante en la industria electrónica. La clave para el escalamiento exitoso de la tecnología MOS son las excelentes propiedades de los materiales de SiO_2 y la interfaz SiO_2/Si . Sin embargo, la ciencia de los materiales ha puesto las bases para la implementación de materiales que beneficien el desempeño de transistores FET.

Una característica importante de los semiconductores compuestos del grupo III-V es su alta movilidad electrónica, su desempeño a escalas tanto micrométricas como nanométricas y la capacidad de desarrollar nuevas estructuras funcionales de transistores [28]. Los dispositivos basados en arseniuro de galio (GaAs) tienen potencialmente grandes ventajas sobre dispositivos basados en silicio en aplicaciones de alta velocidad y alta potencia. Algunas técnicas de síntesis sofisticadas como el depósito por capas atómicas (ALD, por sus siglas en inglés) se han implementado para el desarrollo de transistores MOSFET de canal n utilizando sustratos de GaAs con óxido de aluminio (Al_2O_3) como capa aislante para aplicaciones de comunicaciones en el orden de GHz [29]. Otros materiales como el arseniuro de indio (InAs) también han sido utilizados para implementarse en aplicaciones de alta frecuencia [30] y como material nanoestructurado en MOSFET's implementando bicapas de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{HfO}_2$ como capa aislante [31].

De manera particular, los nitruros del grupo III-V han demostrado tener un buen desempeño en estructuras MOSFET. Huang et. al. reportó transistores MOSFET de tipo enriquecimiento de canal n de GaN de alto rendimiento

compatibles con tecnología MOSFET de silicio [32]. En este trabajo de tesis se plantea el uso de GaN como capa activa en transistores FET con una estructura pseudo-MOSFET. En el capítulo 3 se plantean los procedimientos de fabricación para el transistor y en el capítulo 4 se presentan los resultados mediante la obtención de curvas I-V de los dispositivos a nivel laboratorio, con la finalidad de demostrar el uso de este material en dispositivos electrónicos desde la síntesis del material hasta el prototipo propuesto.

2.2 NITRURO DE GALIO (GaN)

El GaN es un compuesto semiconductor cuya composición se basa en la unión de átomos de Ga y N, los cuales le brindan sus propiedades semiconductoras y por ende es un buen candidato para la conducción de corriente eléctrica. El GaN es un semiconductor de amplia banda prohibida (3.4 eV) o *band-gap* directo. Esta característica de su ancho de banda permite al semiconductor realizar transiciones de electrones sin cambio en su momento (sin emisión de fonones), provocando la emisión de fotones [33]. Esta propiedad vuelve al GaN un buen candidato en aplicaciones en dispositivos emisores de luz como diodos, láseres, etc.

Durante el crecimiento del GaN se obtiene de forma intrínseca una conductividad tipo-n, debida principalmente a vacancias de nitrógeno. Además de esto, puede formar aleaciones sólidas continuas con el AlN e InN. Una aleación entre AlN, InN y GaN produciría un compuesto ternario con una banda prohibida dependiente de la concentración, la cual podría oscilar entre los 0.7 y los 6 eV [34].

El GaN tiene propiedades de material superiores tales como un mayor campo de ruptura eléctrica, mayor velocidad de saturación, en comparación con el Si. Su optimización en la mejora del rendimiento de dispositivos electrónicos sigue en una constante búsqueda por encontrar las mejores condiciones de crecimiento de este material. Entender las propiedades físicas del GaN es abrir las puertas para lograr estos objetivos.

2.2.1 Propiedades Cristalinas

La estructura cristalina más común y que presenta mayor estabilidad del GaN es la wurtzita (P63mc) [35]. En la Figura 2.5 se observa que la fase wurtzita del GaN mantiene una secuencia de apilamiento ... $A\alpha B\beta A\alpha B\beta$... entre las bicapas a lo largo de la dirección (0001). Este apilamiento consiste en dos redes hexagonales de átomos de galio y nitrógeno coordinados en un arreglo tetrahedral [36]. Los parámetros c y a son conocidos como parámetros de red: $a = 3.189 \text{ \AA}$ y $c = 5.182 \text{ \AA}$. La wurtzita cuenta con tres ejes (x, y, u), los cuales son coplanares formando ángulos de 120° , y perpendiculares al cuarto eje vertical (Figura 2.6). Comúnmente, los cristales hexagonales como la wurtzita se describen mediante cuatro ejes cristalográficos. La notación de las direcciones y planos se realiza utilizando los índices de Miller, referidos a los cuatro ejes descritos en el orden $xyuz$ [hkil]. Es importante hacer notar que los tres primeros índices no son independientes, puesto que indican intersecciones sobre tres ejes coplanares fijos [37].

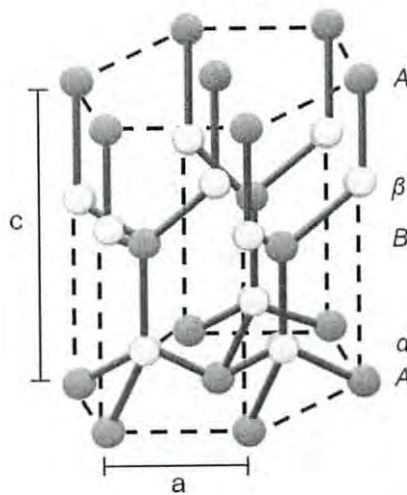


Figura 2.5 Estructura cristalina tipo wurtzita del GaN.

El índice i se relaciona con los primeros dos índices mediante la siguiente relación:

$$h + k = -i \quad (3)$$

Como es el caso de cualquier semiconductor, un aspecto importante a considerar es que la movilidad de los portadores en capas de GaN se ve influenciada por la calidad cristalina del material, por lo que películas de GaN con una mejor calidad cristalina son pieza clave para su implementación.

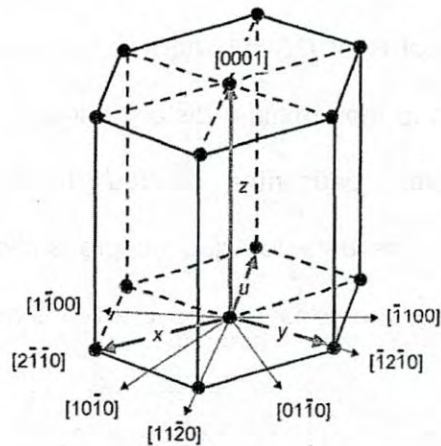


Figura 2.6 Direcciones cristalográficas en la estructura wurtzita.

2.2.2 Propiedades Ópticas

Entre las propiedades principales del GaN podemos mencionar su banda de energía directa, cuya característica le confiere una alta eficiencia en procesos radiativos (emisión de luz). El GaN es un semiconductor que ha presentado diferentes propiedades luminiscentes experimentales atribuidas a defectos en la estructura cristalina. En la Figura 2.7 se presentan emisiones de distintos materiales semiconductores, entre ellos los nitruros III-V en función de sus parámetros de red. Se observa que destaca una luminiscencia dentro del rango visible la cual se encuentra alrededor de los 2.2-2.3 eV la cual corresponde a la emisión en el amarillo del GaN [38,39]. Aquellos defectos o impurezas cuyo tamaño es comparado a la más mínima distancia interatómica, son conocidos como defectos puntuales, causantes de las distintas emisiones en el semiconductor. Otro tipo de defectos que se presentan en el GaN son las dislocaciones, huecos, aglomerados, por mencionar los más destacados [40].

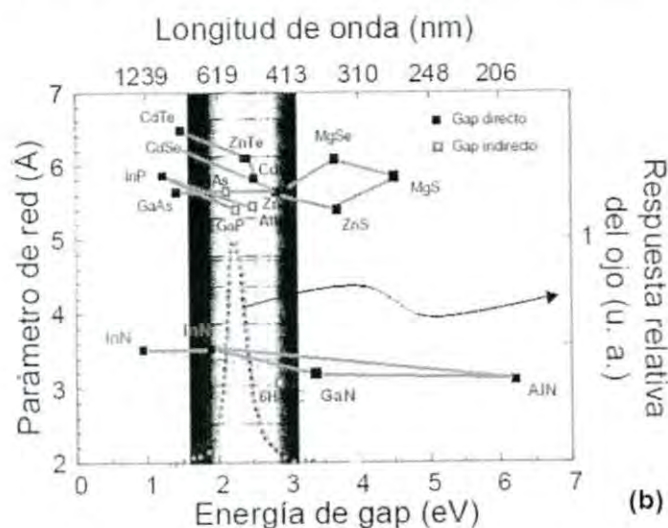


Figura 2.7 Energía de gap y parámetro de red de las familias de semiconductores con gap en el visible [8].

Es importante mencionar que la luminiscencia de GaN en el azul (3.3-3.4 eV) es la emisión que ha dado al semiconductor el mayor impacto en el ámbito tecnológico, impulsando el desarrollo de diodos emisores de luz en el azul, detectores UV, sensores, entre los que más destacan.

2.2.3 Propiedades Eléctricas

Además de sintetizar el GaN con una baja densidad de defectos, otro aspecto importante que se requiere para la fabricación de dispositivos electrónicos utilizando este semiconductor es la habilidad de controlar sus propiedades eléctricas. El GaN por naturaleza es un semiconductor tipo-*n* con una concentración de portadores de $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Perlin et. al. demostró que las vacancias de nitrógeno presentes en el GaN actúan como donantes superficiales [41]. Esto da lugar a la conductividad de tipo-*n* en películas de GaN sin dopar. Algunos experimentos han mostrado que átomos de oxígeno presentes en el proceso de crecimiento actúan como donadores en el GaN, influyendo en su comportamiento tipo-*n* [42]. Las concentraciones de portadores y las movilidades en películas sin dopar dependen de la técnica de depósito utilizada, de los materiales del sustrato [43] y de las capas de nucleación delgadas a baja temperatura (AlN, GaN, ZnO) [44, 45]. Las concentraciones de portadores en películas sin dopar pueden variar de $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ a $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ por incorporación no intencional de impurezas extrínsecas, principalmente silicio y oxígeno.

Sin embargo, la alta calidad del crecimiento cristalino permitió descubrir un GaN tipo-*p*, dopado con magnesio y activado mediante radiación de electrones,

para producir el primer LED azul ultravioleta de unión p-n. De modo que, al observar dicha capa, se comprobó que brillaba con mayor intensidad cuando lo hacía bajo un microscopio electrónico, demostrando así que los electrones mejorarían el material. Anteriormente, las propiedades eléctricas del GaN se habían considerado imposibles de controlar dada su conductividad. Finalmente, en 1990 consiguieron controlar la conductividad de un nitruro de galio de tipo-n, dopado con silicio, para poder utilizar heteroestructuras y múltiples pozos cuánticos en el diseño de estructuras de emisión de luz más eficientes del tipo unión *p-n*.

2.2.4 Técnica de síntesis de GaN: Depósito por vapor químico

En cuanto al proceso de síntesis de materiales aplicados en el área de la electrónica, una de las técnicas que más destaca es el depósito por vapor químico (CVD, por sus siglas en inglés). Esta técnica es implementada para desarrollar películas delgadas de materiales sobre sustratos. Sin embargo, ha sido utilizada también para el desarrollo de materiales en polvo.



Figura 2.8 Etapas del proceso de depósito por vapor químico.

Como se aprecia en la Figura 2.8, el proceso CVD implica una serie de etapas que se ven involucradas en la síntesis de materiales a partir de reacciones químicas volátiles. Un sistema CVD opera aplicando gases reactantes (tienen lugar en las reacciones químicas producidas) y gases transportadores (no tienen lugar en las reacciones químicas, gases inertes). Los gases transportadores promueven la movilidad de especies generadas previas a las reacciones del depósito, tal como la descomposición de un gas reactante. Estas especies son transportadas al sustrato a altas temperaturas donde ocurre una etapa de difusión. La nucleación y crecimiento ocurre al reaccionar distintas especies producto de las altas temperaturas y condiciones de flujo y presión a las que se encuentre el sustrato. Por último, ocurre un proceso de

desorción de reacciones volátiles donde las especies que no reaccionaron son evacuadas del sistema.

Los depósitos por CVD de películas y recubrimientos implica las reacciones químicas de reactivos gaseosos en la superficie de un sustrato a altas temperaturas. El proceso consiste en calentar un sustrato a temperaturas entre los 200°C a 1600°C dentro de una cámara (por lo general de cuarzo en forma tubular) por donde se hacen fluir gases y reaccionen con especies dentro de la zona caliente y produzcan materiales de capa única, multicapa compuestos, con dimensiones bien controladas. Las presiones que se pueden obtener en este tipo de sistemas pueden fluctuar entre presión atmosférica a condiciones de vacío (del orden de mTorr) [46].

Basados en la presión de operación, el proceso de la técnica CVD se puede dividir en diferentes categorías: depósito por vapor químico a baja presión (LPCVD, por sus siglas en inglés), CVD a ultra alto vacío (UHVCVD, por sus siglas en inglés) y CVD a presión atmosférica (APCVD, por sus siglas en inglés).

La elección de un precursor adecuado es un factor importante que puede afectar el proceso de CVD. Los precursores utilizados en esta técnica pueden ser tanto sólidos como gases. Cuando se utilizan elementos metálicos para un proceso CVD se busca que el elemento pase al estado gaseoso para formar otro material en la superficie de un sustrato. Lo anterior se logra introduciendo

especies que vuelvan modifiquen al material en cuestión y generar nuevas especies volátiles activas dentro del sistema.

Son muchos los materiales que se pueden depositar con la técnica CVD y algunas otras técnicas relacionadas: metales, óxidos, nitruros, arseniuros, por mencionar los más comunes.

El atractivo de esta técnica es su capacidad de ser reproducible en ambientes de laboratorios haciendo a esta técnica amigable y una técnica estándar fiable en la fabricación de circuitos integrados (CI) a nivel industrial [47].

2.4 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE GaN

2.4.1 Difracción de rayos X

La técnica que brinda información acerca de la estructura cristalina de materiales semiconductores es la técnica de difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés). El principio de esta técnica se basa en la interacción de muestras de materiales cristalinos con radiación electromagnética altamente energética. Esta técnica es utilizada para identificar orientaciones cristalinas a partir del fenómeno de difracción, obteniendo así un patrón característico de cada material.

Esta técnica toma lugar cuando un haz de rayos X impacta una muestra cristalina y los haces incidentes experimentan un proceso de difracción al interactuar con los átomos que componen al material. De ahí la importancia de que el haz incidente cuente con una longitud de onda equivalente a la distancia interatómica (aproximadamente 1.5 Å). La condición más importante para que este fenómeno ocurra es que el ordenamiento atómico del material a evaluar tenga una geometría regular y repetitiva y que exista también, interferencia constructiva entre dos haces difractados. El objetivo de esta técnica es obtener un patrón de difracción en donde se presentan picos característicos indicando la posición 2θ en donde ocurre interferencia constructiva. De este modo, es posible obtener estos picos siempre que la ley de Bragg se cumpla [48]:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (4)$$

donde n es el valor que representa el orden de difracción, λ es la longitud de onda de rayo X utilizado y θ es el ángulo de Bragg. En un monocristal todas las

celdas unitarias son idénticas y se alinean en la misma orientación, de manera que dispersan la radiación de forma cooperativa originando un patrón de difracción definido que consiste en haces difractados en unas direcciones definidas.

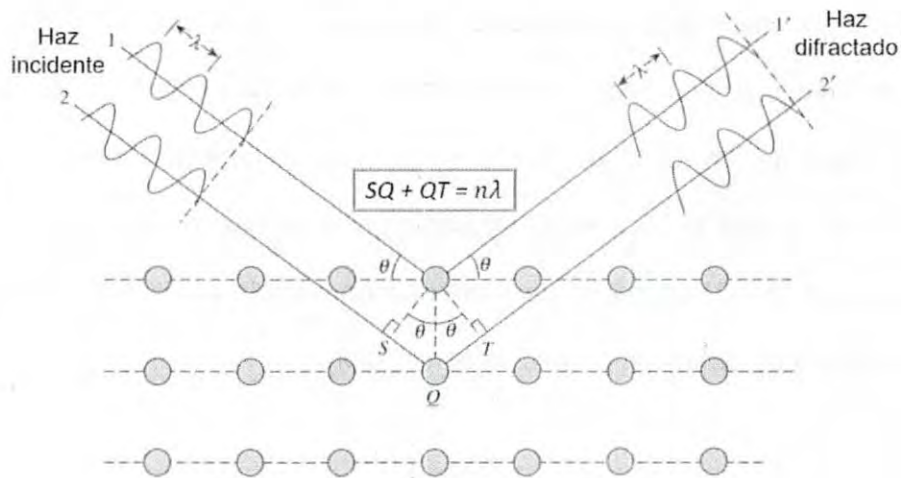


Figura 2.9 Esquema del fenómeno de difracción de rayos X en una estructura cristalina. El ordenamiento de los átomos funciona como rejilla de difracción [48].

Como se aprecia en la Figura 2.9, para que exista difracción se debe de cumplir las siguientes condiciones:

- Debe haber una igualdad entre el ángulo del haz incidente y el haz difractado (θ) con respecto al mismo plano.
- La diferencia entre las trayectorias de los rayos es un número entero de veces la longitud de onda de los rayos X empleados.

Además, en un cristal hay distintas familias de planos, con diferentes espaciados, y en consecuencia habrá diferentes direcciones de difracción [48].

2.4.2 Microscopía electrónica de barrido

La microscopía electrónica de barrido es una técnica útil en la obtención de imágenes a escalas bastante reducidas (~ 1 nm) para el análisis estructural de muestras por medio de la incidencia de haces de electrones altamente acelerados. Un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) es un equipo sofisticado que se encarga de realizar esta labor. El modo de operación de un SEM se basa en la alta aceleración de electrones produciendo un haz previamente enfocado hacia un punto específico de la muestra, todo se realiza dentro de una columna a vacío para evitar especies que puedan comprometer la pureza de la medición.

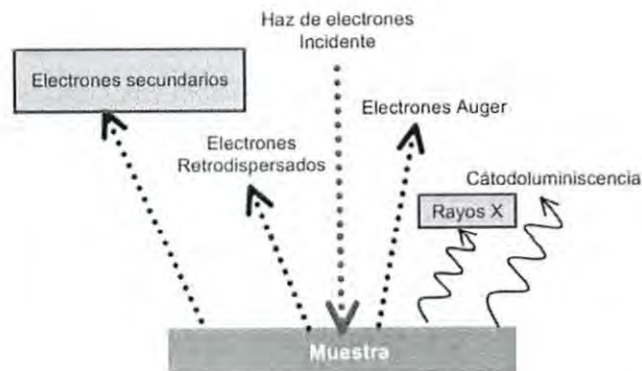


Figura 2.10 Señales generadas por un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) al incidir un haz de electrones altamente acelerados sobre una muestra[49].

El principio de funcionamiento de un SEM es el siguiente: cuando los electrones son acelerados por medio de un voltaje increíblemente alto (del orden de kV), éstos interactúan con los átomos de la muestra a medir y esta interacción provoca una serie de señales medibles que se emplean para diferentes análisis. Como se observa en la Figura 2.10, las señales que un SEM puede generar provienen de electrones secundarios, electrones retro

dispersados, electrones Auger, rayos X, entre otros, y son captadas por detectores especiales para cada tipo de señal. Los electrones secundarios son los que se utilizan para la generación de imágenes tridimensionales a escalas micrométricas a nanométricas de muestras como pueden ser semiconductores [49].

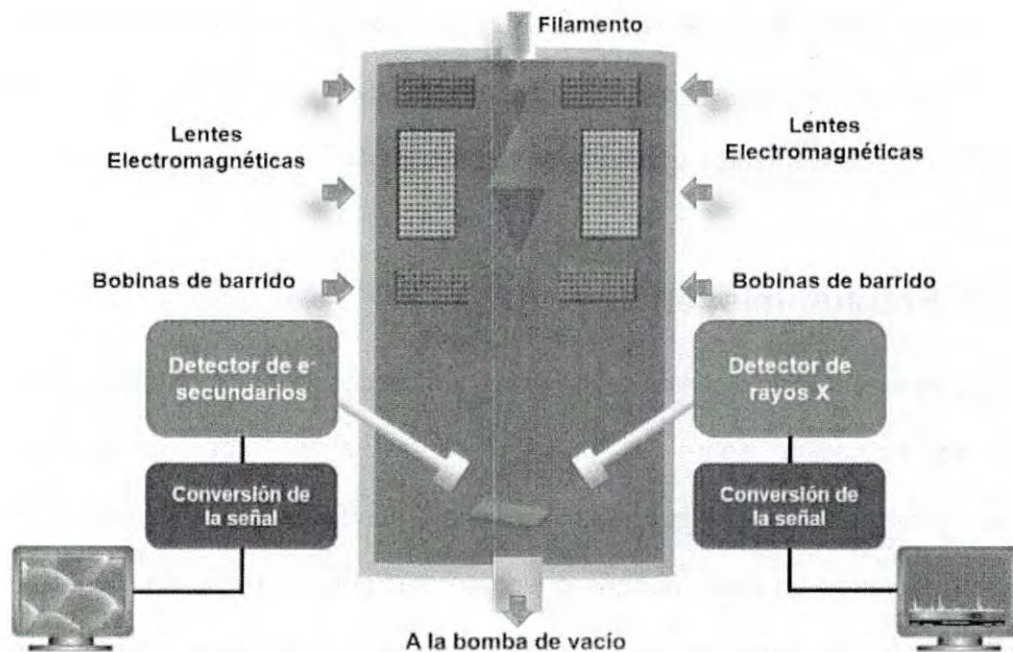


Figura 2.11 Esquema de un microscopio electrónico de barrido.

En algunos casos, para facilitar esta emisión de electrones se metaliza la muestra con una pequeña capa de un metal conductor como el oro. El haz de electrones se puede concentrar en una zona diminuta ($\sim 20 \text{ \AA}$) que puede barrer la superficie del espécimen al ser deflectado por bobinas adecuadas. Los electrones secundarios se detectan por encima del espécimen y la imagen muestra la intensidad de los electrones secundarios emitidos por las diferentes partes de la muestra, tal como se observa en la Figura 2.11. Un SEM emplea un filamento el cual actúa como ánodo, disparando los electrones acelerados

hacia distintos puntos de la muestra (la cual funciona como cátodo). Dentro del SEM se encuentran bobinas electromagnéticas y de barrido que ayudan a enfocar el haz de electrones y redirigirlo hacia la muestra a medir. Los detectores de electrones secundarios se encargan de generar las imágenes de microestructuras. La identificación de elementos o fases dentro de un compuesto es una de las funciones principales de un SEM, información que se obtiene por medio de la técnica de espectroscopía de dispersión de energía (EDS, por sus siglas en inglés). El detector de rayos X es útil en la identificación de elementos que compongan al espécimen.

2.4.3 Fotoluminiscencia

Lo que determina las distintas técnicas de luminiscencia es la naturaleza del tipo de excitación sobre el material. Entre ellas cabe destacar la fotoluminiscencia (PL, por sus siglas en inglés) donde la fuente de excitación por lo general es un láser, aunque puede ser cualquier otro tipo de fuente de luz óptica, tal como una lámpara. La luminiscencia es el fenómeno que ocurre cuando un material emite luz debido a la absorción y transformación de energía en radiación electromagnética. Las emisiones de fotones ocurren en presencia de dopantes, impurezas e incluso de defectos. En un semiconductor, la luminiscencia puede presentarse mediante un proceso de generación y recombinación de un electrón y un hueco [50].

Un fotón, cuya energía era igual o mayor a la energía de la banda prohibida de un material, puede excitar un electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción. Este proceso fundamental se encuentra fuertemente afectado

por la banda prohibida del material: si es directo o indirecto. En un semiconductor de banda prohibida directa como el GaN, un electrón en el máximo de la banda de valencia realiza una transición vertical al mínimo de la banda de conducción, como se exhibe en la Figura 2.12. La energía se conserva de acuerdo con:

$$h\nu = E_2 - E_1 \quad (5)$$

donde E_2 y E_1 son los estados energéticos inicial y final, respectivamente, cuya unidad de medida son electrón volts (eV) [51].

De manera particular, el GaN es un semiconductor que ha presentado diferentes luminiscencias atribuidas a defectos en la estructura cristalina. Los distintos defectos presentes en la estructura del material pueden ser identificados por medio de técnicas ópticas, principalmente en los semiconductores con amplia E_g como el GaN (3.4 eV).

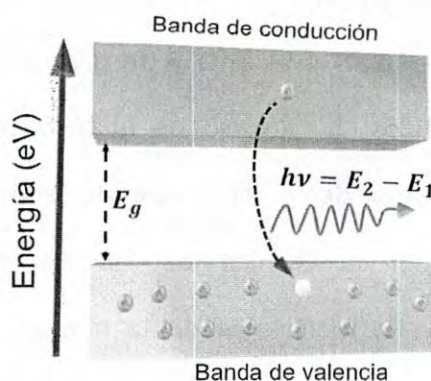


Figura 2.12 Diagrama esquemático de la generación de un fotón a través de la transición banda-banda en un semiconductor.

Aquellos defectos o impurezas cuyo tamaño es comparado a la más mínima distancia interatómica son conocidos como defectos puntuales, causantes de las distintas emisiones en el semiconductor. Otro tipo de defectos que se presentan en el GaN son las dislocaciones, huecos, aglomerados, por mencionar los más destacados.

2.4.4 Catodoluminiscencia

En el caso de la catodoluminiscencia (CL, por sus siglas en inglés), la excitación se realiza mediante un haz de electrones, generalmente en un microscopio electrónico de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). La energía que adquieren los electrones altamente acelerados dentro de un SEM al incidir en un material es capaz de generar una mayor densidad de pares electrón-hueco a diferencia de los generados por los fotones en la técnica de fotoluminiscencia. Ésta es la diferencia más destacada entre estas técnicas de caracterización. CL es utilizada en los semiconductores de banda prohibida amplia, siendo una herramienta importante para la caracterización de semiconductores como el GaN o el ZnO y de gran auge para el diseño de dispositivos optoelectrónicos. El manejo de la técnica CL permite adquirir información complementaria de la eficiencia de emisión del material. La información brindada por la técnica de CL permite correlacionar las propiedades ópticas con la morfología de la muestra, mediante imágenes también obtenidas por el SEM. El acoplamiento de la CL a un equipo SEM permite obtener ventajas adicionales, pudiéndose realizar análisis complementarios tales como espectroscopía de rayos X por energía dispersiva (EDX, por sus siglas en inglés), corrientes inducidas por haz de electrones

(EBIC, por sus siglas en inglés) etc., siempre y cuando se cuente con este tipo de detectores acoplados al microscopio.

CAPÍTULO 3 . METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 SÍNTESIS DE PELÍCULAS DE GaN POR CVD

3.1.1 Sistema CVD

El proceso de síntesis de películas de GaN se llevó a cabo mediante la técnica de depósito por vapor químico sobre sustratos de silicio cuadrados (1.3 cm x 1.3 cm). El sistema CVD empleado para este proyecto se muestra en la Figura 3.1. Las zonas más importantes del sistema CVD son la entrada de gases, zona de reacción y salida de gases. Para la etapa de introducción de gases, se cuenta con elementos de control como flujómetros máscicos regulados desde 0 a 200 sccm para el gas nitrógeno y desde 0 a 1 l/min para el gas amoniaco, cuya función es controlar la cantidad de gases que entran al sistema. Los gases son introducidos al sistema por medio de conexiones rígidas de acero inoxidable y también mediante conexiones flexibles. Un tubo de cuarzo de $\frac{3}{4}$ " de diámetro es conectado a dos líneas flexibles para introducir los gases transportador (nitrógeno, N_2) y reactante (amoniaco, NH_3). Como elemento principal de este sistema, se encuentra la cámara de reacción la cual se constituye de un tubo de cuarzo de 1" de diámetro que cuenta con dos bridas principales donde se adecua una conexión necesaria para el control de la presión mediante un sensor de presión. En la cámara es donde se llevan a cabo una serie de reacciones químicas para el desarrollo de las películas semiconductoras de GaN. Posteriormente, se cuenta con líneas de salida de gases hacia burbujeadores de gases para evitar el incremento de la presión dentro del sistema.

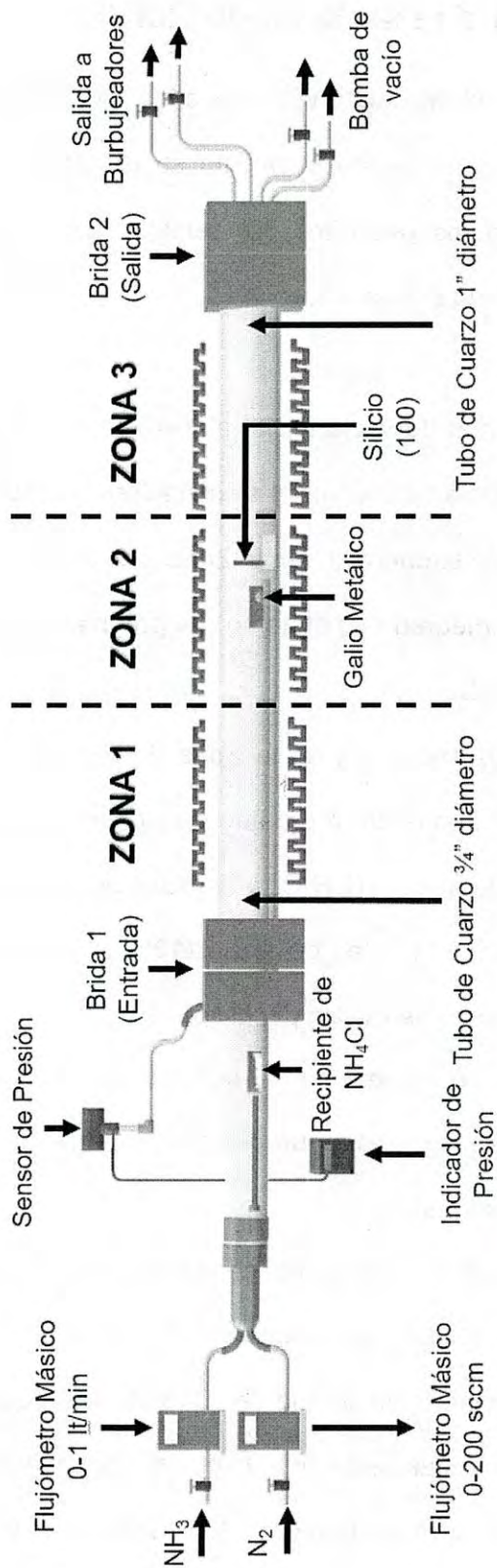


Figura 3.1 Diagrama esquemático del sistema CVD empleado para síntesis de GaN

3.1.2 Metodología para la síntesis de GaN/Si

Para el crecimiento de GaN, el sistema CVD debe ser acondicionado para su óptimo funcionamiento. El siguiente procedimiento se realiza para crear las condiciones necesarias para los depósitos del semiconductor, siguiendo la configuración del esquema de la Figura 3.1:

1. Se crean las condiciones de vacío inicial al sistema por medio de una bomba mecánica. El vacío óptimo inicial se considera de 250-300 mTorr.
2. Después, una rampa de temperatura en la Zona 2 es iniciada, controlada por el mismo sistema integrado en el horno. Se programa la temperatura hasta alcanzar los 950°C.
3. Llegada la temperatura requerida en la Zona 2, inicia la rampa de la Zona 1 a 800°C. Esta temperatura promueve la posterior evaporización del precursor cloruro de amonio (NH_4Cl) y la descomposición del NH_3 .
4. Un tratamiento térmico a la oblea de silicio (100) y al galio metálico a una temperatura de 950°C se realiza por 1 hora.
5. Los gases N_2 y NH_3 son introducidos al sistema con flujos específicos. En este punto se dejan fluir hasta que el sistema tenga las condiciones de flujo y presión constantes.
6. Una vez alcanzadas estas condiciones, se inicia el proceso de depósito. El cloruro de amonio (NH_4Cl) se encuentra desde el principio en una "zona fría" a una temperatura ambiente. Cuando las condiciones del sistema son las adecuadas, este precursor se acerca a una zona de mayor temperatura de aproximadamente 300°. Pasados 10 minutos, Se realiza un segundo movimiento acercando la sal a 3 cm dentro del

horno. El depósito termina cuando la sal termina de consumirse. Tiempo de reacción: ~ 20 minutos.

- Las temperaturas de la Zona 1 y 2 se reducen a temperatura ambiente. Posteriormente, una etapa de enfriamiento es iniciado y un flujo de N_2 es ajustado a 50 sccm. Cuando la temperatura de la Zona 2 desciende a $500^\circ C$, se interrumpe el flujo de NH_3 . El sistema se deja enfriar a temperatura ambiente.

El cloruro de amonio (NH_4Cl) es utilizado para producir especies volátiles activas, tal como se muestra en el inciso a) de la Figura 3.2. Cuando este precursor se encuentra a una temperatura de aproximadamente $350^\circ C$, pasa de un estado sólido a uno gaseoso produciendo $NH_3 + HCl$, siendo estos compuestos volátiles transportados por el gas N_2 y NH_3 . Posteriormente, el HCl reacciona con el galio metálico (Ga) produciendo compuestos metálicos volátiles de cloruro de galio ($GaCl$). Como proceso final, el $GaCl$ se descompone sobre la superficie del sustrato de silicio a una temperatura elevada provocando que especies de galio y especies de nitrógeno activo (provenientes de la descomposición de la molécula del gas NH_3). Estas últimas reacciones producen el crecimiento de películas de GaN sobre el sustrato.

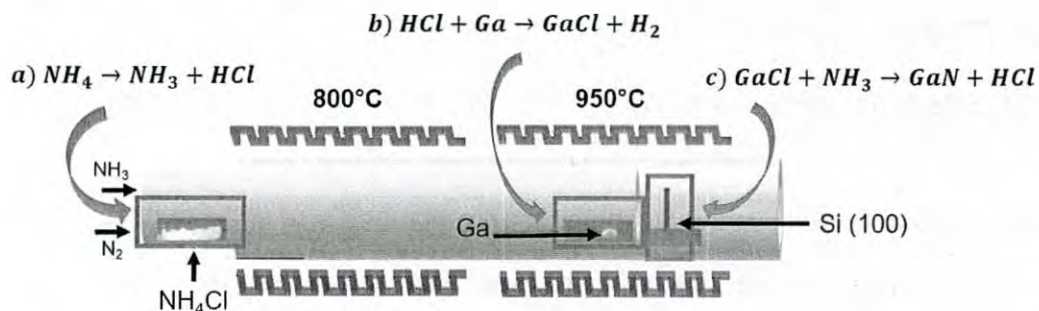


Figura 3.2 Mecanismos de reacciones en el proceso CVD para el depósito de GaN .

3.1.3 Diseño de Experimentos Factorial

Como se observó en la sección anterior, en el proceso CVD se ven involucrados diferentes parámetros en el control del crecimiento de GaN. Con la finalidad de encontrar las mejores condiciones para su depósito y obtener la mejor película semiconductor, se realizaron una serie de depósitos siguiendo un diseño de experimentos factorial [52]. Los tres parámetros considerados importantes en la síntesis del semiconductor, siguiendo la configuración del sistema propuesto, son: *temperatura del substrato* (T_{sub}), *flujo de N_2* (f_{N_2}) y *flujo de NH_3* (f_{NH_3}). Estos parámetros implementados consisten en variar la temperatura en donde ocurre la reacción del semiconductor, y los flujos del gas transportador y reactante para comparar su efecto en la formación de las películas de GaN. En la Tabla 3.1, se puede observar que el diseño factorial incluye tres variables (n) con dos niveles de valores (N) resultando en $N^n = 8$ experimentos.

Tabla 3.1 Parámetros experimentales utilizados y valores máximos (+) y mínimos (-).

<i>Variable</i>	<i>Nivel (+)</i>	<i>Nivel (-)</i>
Temperatura del substrato (T_{sub})	950°C	750°C
Flujo de gas reactante NH_3 (f_{NH_3})	500 sccm	250 sccm
Flujo de gas transportador N_2 (f_{N_2})	200 sccm	100 sccm

Las combinaciones llevadas a cabo en los experimentos se enlistan en la Tabla 3.2. Los resultados en las películas de GaN producidas en estos ocho experimentos sirven de base para encontrar las mejores condiciones de

depósito y poder seleccionar las características más favorables para la capa activa de los transistores FET.

Tabla 3.2 Diseño de experimentos factorial. Combinación de parámetros y niveles en cada experimento.

<i>Experimento</i>	$T_{sub}(^{\circ}C)$ (+)950, (-)750	$f_{NH_3}(sccm)$ (+)500, (-)250	$f_{N_2}(sccm)$ (+)200, (-)100
GaN 1	-	-	-
GaN 2	-	-	+
GaN 3	-	+	-
GaN 4	-	+	+
GaN 5	+	-	-
GaN 6	+	-	+
GaN 7	+	+	-
GaN 8	+	+	+

El análisis de los resultados de SEM, XRD, CL y XPS de cada una de las muestras del diseño de experimentos factorial propuesto en este trabajo es presentado en el capítulo 4.

3.2 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL TRANSISTOR FET CON ESTRUCTURA PSEUDO-MOSFET DE GaN

En la Figura 3.3 se ilustra el diagrama esquemático para un dispositivo FET basado en una estructura tipo pseudo-MOSFET usando una película de GaN como capa activa.

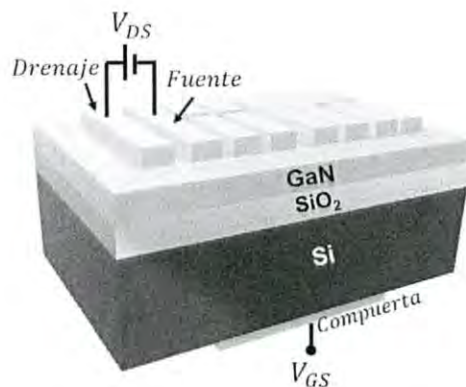


Figura 3.3 Estructura de transistor FET pseudo-MOSFET con película de GaN como capa activa.

La estructura de la Figura 3.3 consta de una oblea de silicio de baja resistividad, tipo- n , con orientación (100). Una capa de SiO_2 es formada por oxidación térmica sobre el sustrato de Si para generar la capa aislante que separa al semiconductor de la capa activa de GaN y fomentar así la inducción de carga en el semiconductor GaN. Los contactos metálicos de aluminio se depositan sobre la capa activa de GaN por evaporación térmica con distintas geometrías para la formación de los contactos de drenaje y fuente. La terminal de compuerta se coloca en la parte posterior del sustrato de silicio. A continuación, se describe el proceso de fabricación:

metalización del transistor mediante la colocación de contactos óhmicos de aluminio mediante evaporación térmica. Para formar los contactos, se coloca sobre la película de GaN una mascarilla con patrones geométricos que se muestran en la Figura 3.5, los cuales presentan diferentes tamaños de contactos y distancias entre ellos. Estas distancias entre contactos figuran la longitud del canal, tomando valores de 10, 20, 40 y 80 μm . El ancho del canal correspondiente para los contactos es de 1 mm.

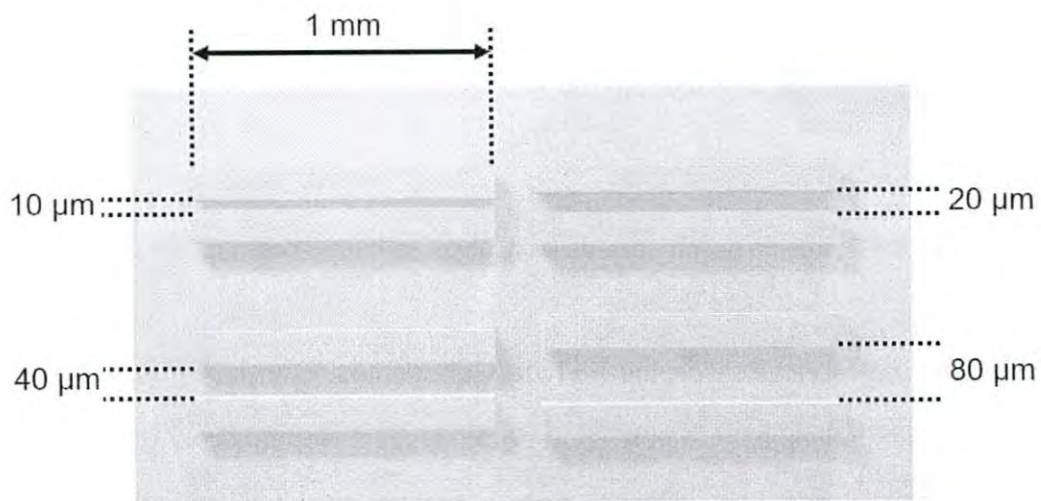


Figura 3.5 Patrones geométricos de los contactos diseñados para el transistor FET de GaN

Por otro lado, un aspecto importante que cabe resaltar de esta estructura es que su proceso de fabricación es mucho menos riguroso que el que se realiza por medio de técnicas de litografía, grabados químicos, etc. Logrando emular el funcionamiento de un transistor FET con esta estructura se demuestra la eficiencia del semiconductor GaN en transistores FET fabricados de manera rápida, eficiente y menos costosa.

CAPÍTULO 4 . ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE LA SÍNTESIS DE GaN

4.1.1 Morfología de las superficies de GaN

Para comparar la morfología de los depósitos de GaN sobre silicio en función de las condiciones propuestas del diseño de experimento, se tienen los resultados obtenidos por medio de microscopía electrónica de barrido. Se analizan los efectos en la superficie de los depósitos en función de la variación de la temperatura y flujos de los gases NH_3 y N_2 . En la Figura 4.1 se presentan las imágenes de los depósitos de las muestras *GaN 1*, *GaN 2*, *GaN 3* y *GaN 4* utilizando una escala de 5 μm y una ampliación de 5,000X para las tres primeras muestras y una escala de 20 μm con una ampliación de 700X para la muestra *GaN 4*. El resultado de la Figura 4.1 (a) muestra un crecimiento sobre la superficie del silicio de cristales del semiconductor de manera aglomerada. Se puede observar que la distribución de tamaños de los cristales no es uniforme, variando desde algunos cientos de nanómetros hasta llegar a oscilar los 2 μm . El depósito presenta buen recubrimiento de la superficie. Se observan algunos aglomerados de galio, producto del precursor que no reacciono durante el proceso de crecimiento. Cabe destacar que los flujos de los gases NH_3 y N_2 fueron flujos con niveles bajos, 250 sccm y 100 sccm, respectivamente, lo que supone bajo nivel de transporte de los precursores.

Por otro lado, en la Figura 4.1 (b) se muestra el resultado de la muestra *GaN* 2. La película resultante de este depósito presenta cristales con una mejor definición. Se puede observar la terminación galio de los cristales en pequeñas zonas debido al cambio de contraste producido por la interacción de los electrones acelerados del SEM con este metal. Esto puede suponer que a una temperatura de 750°C y usando un flujo de 200 sccm de N_2 , la presencia de galio es mayor debido al aumento del transporte del producto de la reacción del HCl con el galio metálico. La distribución de tamaño del cristal se aprecia en su mayoría homogénea, oscilando entre 500 nm a 1 μm de tamaño.

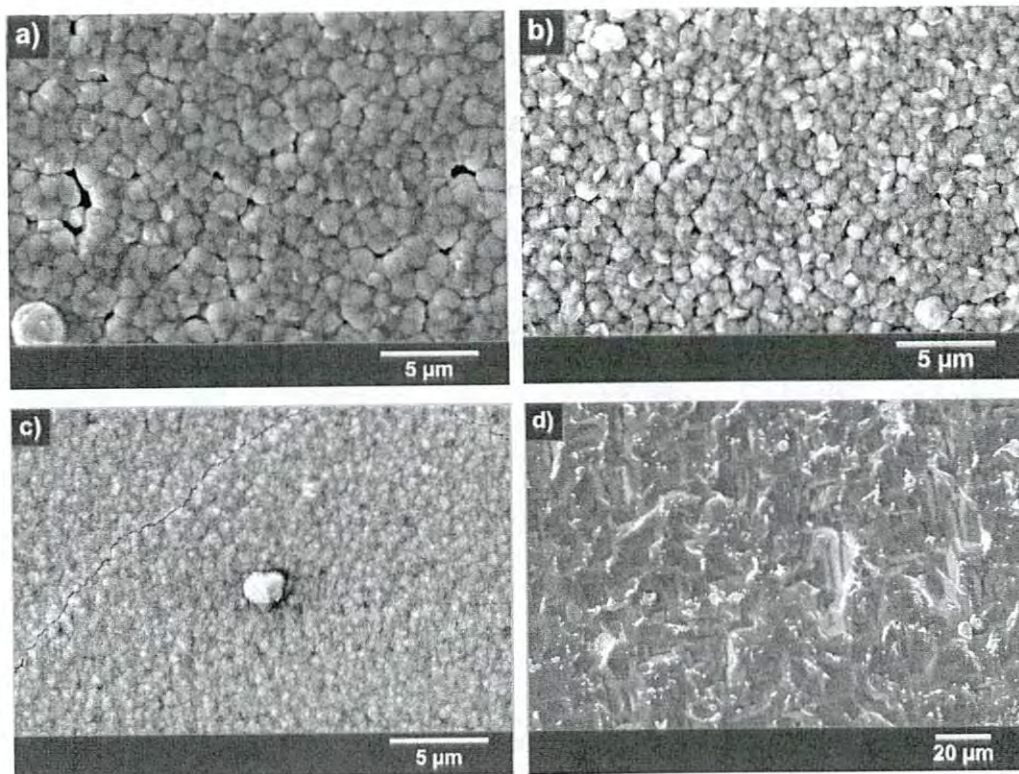


Figura 4.1 Morfología de superficies de GaN. A) Muestra *GaN* 1 con $T = 750^{\circ}C$, $f_{NH_3} = 250$ sccm, $f_{N_2} = 100$ sccm, b) muestra *GaN* 2 con $T = 750^{\circ}C$, $f_{NH_3} = 250$ sccm, $f_{N_2} = 200$ sccm, c) Muestra *GaN* 3 con $T = 750^{\circ}C$, $f_{NH_3} = 500$ sccm, $f_{N_2} = 200$ sccm, d) muestra *GaN* 4 con $T = 750^{\circ}C$, $f_{NH_3} = 500$ sccm, $f_{N_2} = 200$ sccm

Las Figuras 4.1 c) y d) muestran una morfología más uniforme en las muestras *GaN 3* y *GaN 4* en comparación a las superficies analizadas anteriormente. Un proceso de coalescencia es observado cuando el flujo de NH_3 se incrementa al nivel alto (500 sccm) produciendo que los cristales se unan para formar una película más uniforme [53]. La Figura 4.1 c) presenta una disminución en cuanto a los aglomerados de galio metálico sin reaccionar y muestra un crecimiento en forma de película delgada. Cuando el flujo de los gases está en el nivel alto del diseño de experimentos y a una temperatura de 750°C , la formación de películas semiconductoras de GaN se pueden observar.

Cuando se mantienen las mismas condiciones de flujos de gases descritas en las primeras cuatro muestras, pero con una temperatura superior (950°C) la morfología en el crecimiento de GaN se modifica considerablemente. En la Figura 4.2 se tienen los resultados de la muestra *GaN 5* a una escala de $5\ \mu\text{m}$ y una ampliación de 5,000X. Estas películas exhiben una composición aleatoria entre varillas y aglomerados con una distribución aleatoria. Se muestra que flujos bajos de gases y a una alta temperatura fomentan el crecimiento de varillas micrométricas con una terminación en cruz. En particular, los extremos de las varillas se componen de distintas geometrías, destacando entre ellas el crecimiento de GaN en su fase hexagonal, como se aprecia en la Figura 4.2 (f), con una escala de 100 nm a una ampliación de 30,000X. Es en estas muestras donde el crecimiento de GaN característico correspondiente a su fase wurtzita o hexagonal compacta empieza a tener presencia.

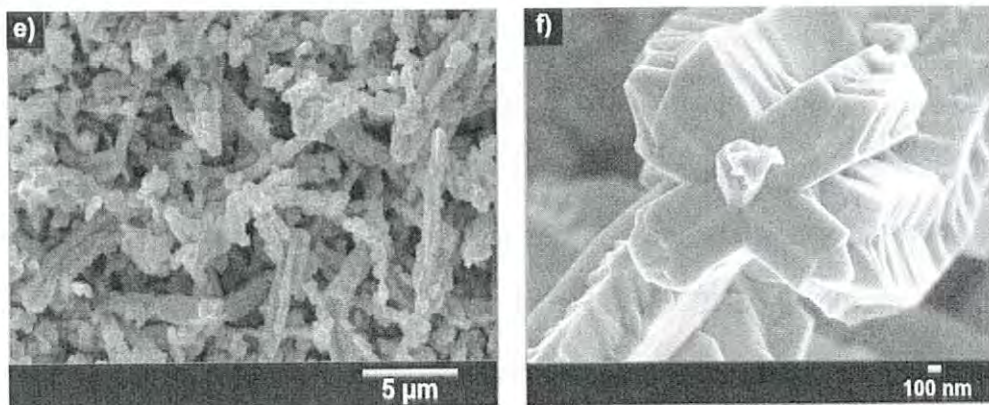


Figura 4.2 Morfología de superficie de GaN 5 con $T = 950^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 250 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 100 \text{ sccm}$ y f) Crecimiento en forma de cruz de GaN.

Posteriormente, los resultados de las muestras GaN 6 y GaN 7 se exhiben en la Figura 4.3. Estas muestras presentan una morfología con una estructura muy característica del GaN tipo columna, la cual representa un tipo de crecimiento prematuro de GaN en su fase wurtzita. Este tipo de estructura se caracteriza por presentar policristales nanoestructurados producto de varias estructuras hexagonales unidas por dislocaciones [54]. Estas estructuras conservan un crecimiento independiente, bien definido y con espacio entre sus vecindades.

Por último, se muestra el resultado de la muestra GaN 8 en la Figura 4.3, donde la escala implementada corresponde a 5 μm y 100 nm con una ampliación de 5,000X y 50,000X, respectivamente. En este depósito se puede observar una tendencia al crecimiento columnar del GaN a una escala nanométrica, obteniendo tamaños de cristales variados. Para verificar que estas estructuras correspondan al crecimiento de GaN con más precisión, es necesario conocer sus propiedades cristalográficas, obteniendo patrones de difracción de rayos X. En el siguiente postulado se presentarán estos resultados.

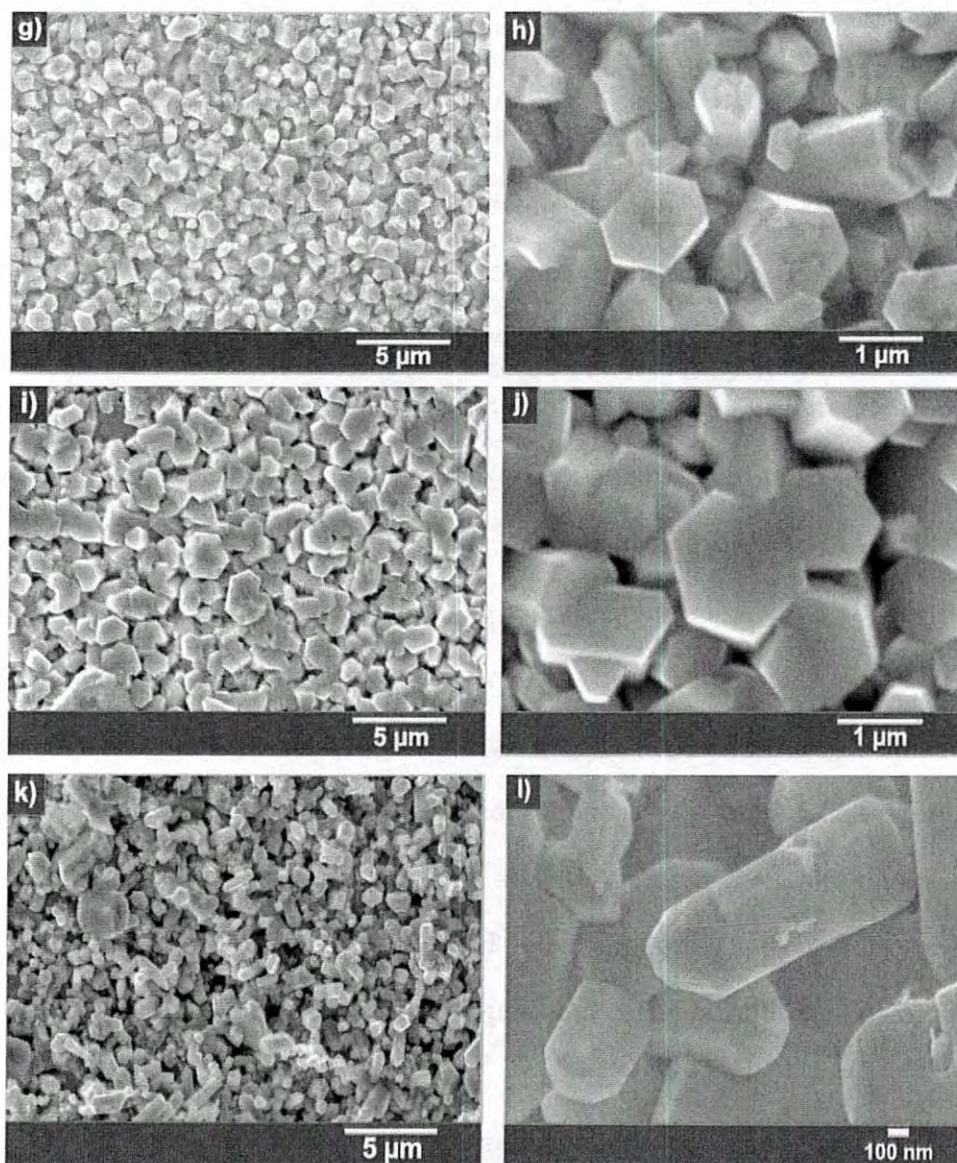


Figura 4.3 Crecimiento de GaN en fase hexagonal. Muestra g) GaN 6 con $T = 950^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 250 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 200 \text{ sccm}$, muestra i) GaN 7 con $T = 950^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 500 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 100 \text{ sccm}$, k) muestra GaN 8 con $T = 950^{\circ}\text{C}$, $f_{\text{NH}_3} = 500 \text{ sccm}$, $f_{\text{N}_2} = 200 \text{ sccm}$. Imágenes h) ampliación de GaN 6, j) ampliación de GaN 7 y l) ampliación de GaN 8.

4.1.2 Difracción de rayos X de películas de GaN

Para la identificación de las fases cristalinas en los depósitos del GaN, se obtuvieron los resultados de difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés) de las muestras del diseño de experimentos factorial. El análisis de los patrones de difracción nos proporciona información cristalográfica de cada una de las muestras y nos indica la presencia de GaN. XRD es ideal para la caracterización de nitruros III-V debido a su naturaleza no destructiva, alta sensibilidad de deformación, análisis rápido y resultados representativos [55]. La Figura 4.4 muestra el patrón de difracción o difractograma de rayos X de las muestras obtenidas en el diseño de experimentos factorial. Para la muestra *GaN 1*, se exhibe solo el pico característico con una orientación cristalina en $(10\bar{1}0)$ en 32.8° , que es parte de los picos principales de la fase wurtzita o hexagonal del GaN. La presencia de un pico situado en 40.1° se puede deber al crecimiento de la fase cubica del GaN; esto puede ser atribuido a la fase cubica del sustrato y a las condiciones del crecimiento a bajos flujos y baja temperatura [56]. La muestra *GaN 4*, de igual manera, presenta una orientación preferencial en $(10\bar{1}0)$ al aumentar el flujo de los gases a los niveles altos, lo que produjo la reducción de las fases que se presentaron en la muestra *GaN 1*.

Las muestras restantes sintetizadas a una baja temperatura (750°) correspondientes a las etiquetas de *GaN 2* y *GaN 3*, exhiben un pico preferencial en 34.6° , el cual corresponde al plano basal de la estructura wurtzita, con una orientación (0002) . De estos resultados se puede discernir que para una temperatura de 750°C y operando a los niveles de flujos bajos y altos establecidos en este diseño de experimentos, la orientación cristalina que

exhibe el GaN está orientada en el plano $(10\bar{1}0)$ mientras que, al modificarse los flujos de transporte y de reactante se presenta una orientación en el plano (0002) , donde la presencia del flujo reactante a un valor de 500 sccm mejora el crecimiento cristalino.

Por otro lado, se presenta los resultados obtenidos para las muestras sintetizadas a una temperatura de 950°C . Los picos XRD situados en 32.8° , 34.6° y 36.5° en la posición 2θ para las muestras *GaN 5*, *GaN 6* y *GaN 8* corresponden a las señales de difracción principales de la fase hexagonal del GaN, lo cual es congruente con la información de la carta cristalográfica 00-050-0792 (ver Anexo 1). La intensidad de estas señales es mayor comparada con las de las muestras depositadas a 750° debido al incremento de la temperatura que promueve de una manera mejorada la serie de reacciones que ocurren en el proceso de síntesis. El plano basal en (0002) se presenta con mayor intensidad en la muestra *GaN 7* con un flujo mayor de NH_3 en comparación al de N_2 presentando también señales menos intensas en 36.9° , 48.1° , 57.7° , 63.6° y 69.2° , con orientaciones en $(10\bar{1}1)$, $(10\bar{1}2)$, $(11\bar{2}0)$, $(10\bar{1}3)$, $(11\bar{2}2)$, respectivamente. Realizando una comparativa entre los resultados a baja y alta temperatura, se puede concluir que al incrementar el flujo de NH_3 a 500 sccm con un flujo de 250 sccm de N_2 con el sistema propuesto se puede sintetizar GaN con un buen nivel de cristalinidad y con una tendencia al crecimiento en el plano basal. Es importante recordar que los índices empleados para la identificación de los picos XRD son los índices de Miller $[hki]$, donde el índice i se relaciona con los dos primeros índices de la siguiente manera:

$$h + k = -i$$

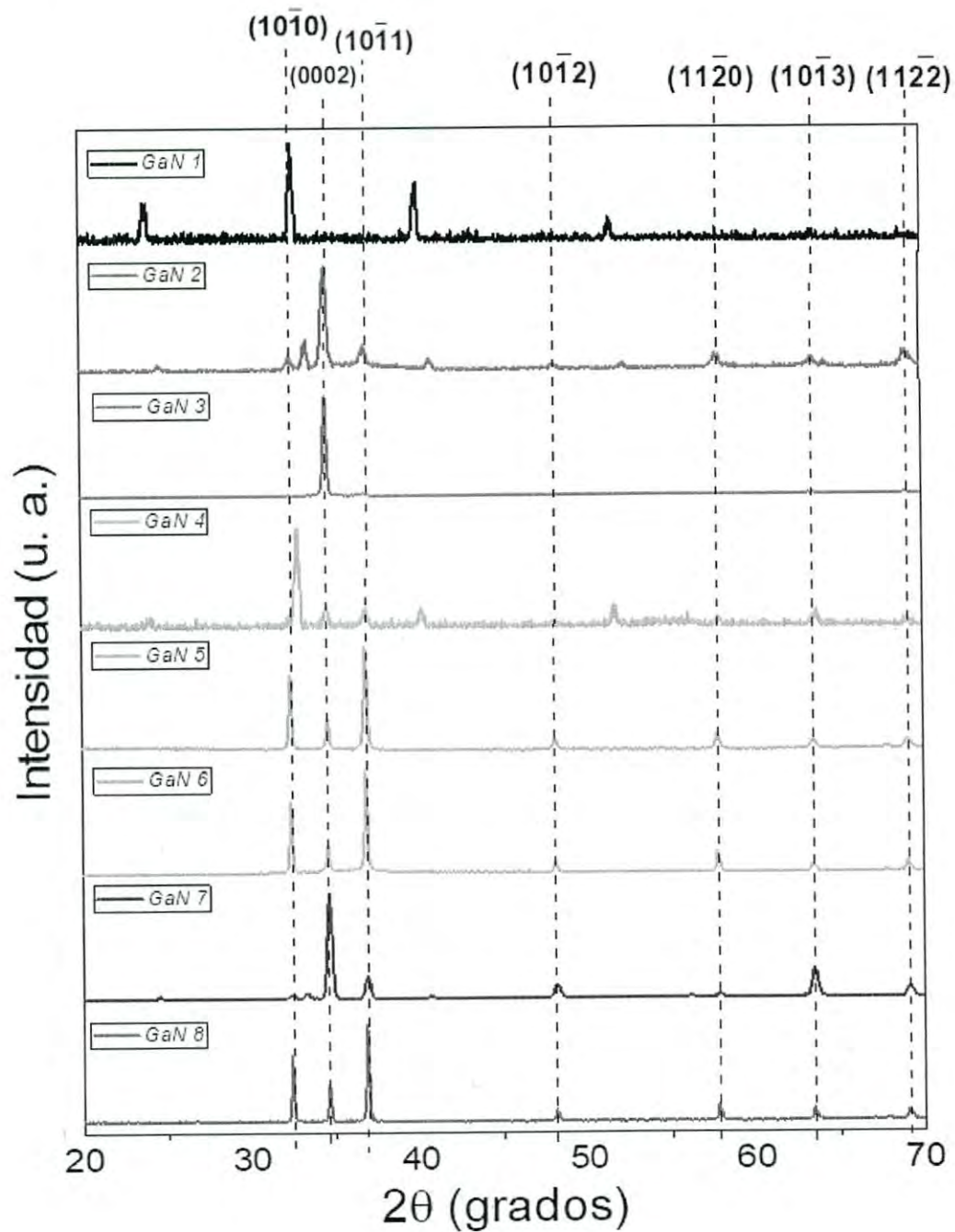


Figura 4.4 Difracción de rayos X de muestras de GaN/Si del diseño de experimentos.

4.1.3 Catodoluminiscencia

Los espectros de emisión de catodoluminiscencia de las muestras primeras cuatro muestras de GaN se muestran en la Figura 4.5.

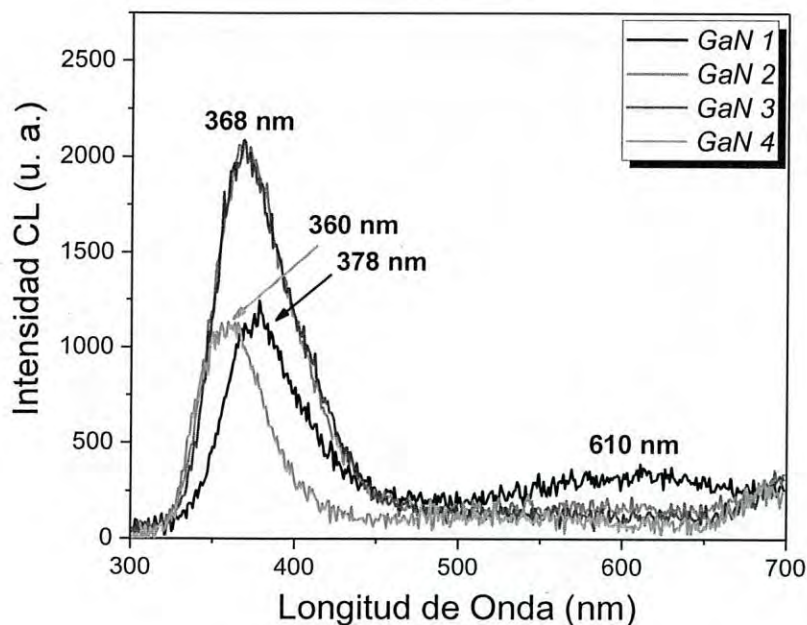


Figura 4.5 Espectros de CL de las muestras de *GaN 1*, *GaN 2*, *GaN 3* y *GaN 4*.

Como se aprecia en la Figura 4.5, la emisión centrada en la longitud de onda de 378 nm (3.28 eV) corresponde a la muestra *GaN 1*. Esta emisión es característica del GaN sin contaminantes y es conocida como la emisión en el ultravioleta (UUV) (ver Anexo 2). La transición que produce esta emisión en el GaN es del tipo electrón-aceptor (e-A type), donde el electrón es atrapado en un nivel energético menor al de la banda prohibida, producido por defectos en la estructura del GaN. Por otro lado, se tienen las emisiones de las muestras *GaN 2* y *GaN 3*, ambas centradas a 368 nm (3.36 eV). Esta emisión es conocida como Y_4 la cual pertenece al conjunto de emisiones del GaN sin

contaminantes y se caracteriza al generarse por una transición de un excitón con defectos en la superficie de GaN. Esta emisión se acerca a la emisión característica de GaN (3.4 eV). Sin embargo, la muestra *GaN 4* presenta una emisión en la longitud de onda de 360 nm (3.44 eV) cuya energía pertenece a una transición que ocurre cuando un excitón unido a un donante neutro (D^0X) se recombina y deja al donante en un estado excitado. Esta emisión se le conoce como transición de satélite de dos electrones (TES, por sus siglas en inglés).

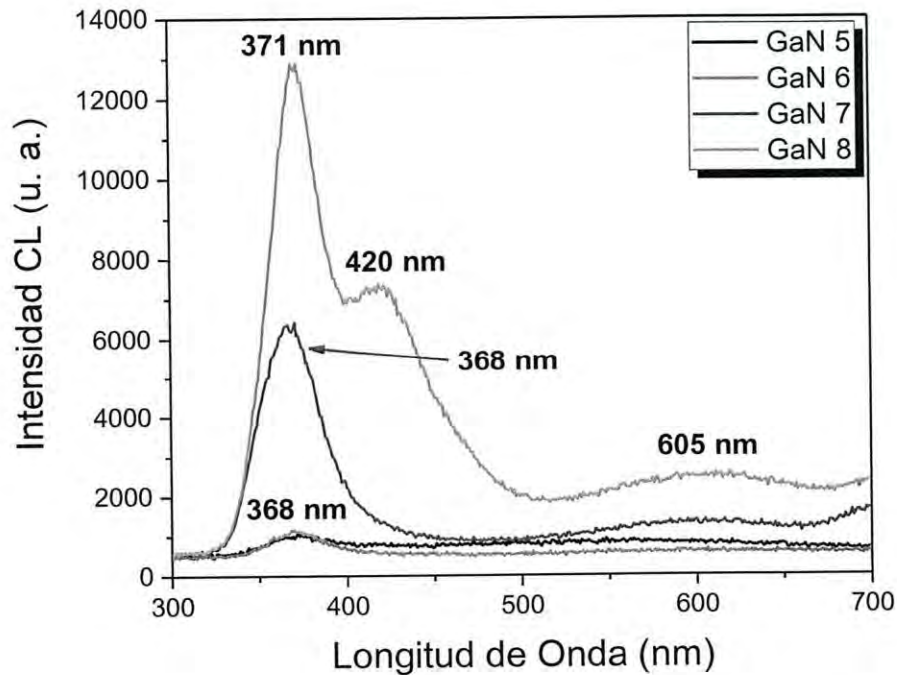


Figura 4.6 Emisiones de CL de muestras *GaN 5*, *GaN 6*, *GaN 7* y *GaN 8*.

Las emisiones de las muestras *GaN 5*, *GaN 6* y *GaN 7* presentan la emisión Y_4 con distintas intensidades destacando la emisión de la muestra *GaN 7*.

La muestra GaN 8 es la que presenta un mayor número de emisiones en su espectro. Centrada a una longitud de onda de 371 nm (3.34 eV), la emisión conocida como Y_6 se atribuye a un proceso de transición donador aceptor (DAP, por sus siglas en inglés). Otra característica es que este tipo de emisión se ha presentado en superficies rugosas de GaN, lo cual concuerda con el resultado de una muestra con una morfología con estructuras micrométricas. También se exhibe una emisión en 420 nm (2.95 eV). Esta es una emisión amplia, que concuerda con el espectro reportado, siendo una emisión del GaN sin contaminantes. La transición es conocida como emisión en el azul (BL, por sus siglas en inglés) de banda inestable [57].

Cabe destacar que los espectros de todas las muestras de GaN presentan una emisión característica en ~ 610 nm (2.05 eV). Esta luminiscencia se caracteriza por ser amplia y puede ser generada por contaminantes como el carbono (C). Algunos autores reportan especies de C presentes en el proceso de síntesis que causan una emisión roja-amarilla entre los 2.12 eV y los 1.89 eV [58,59]. El crecimiento de GaN que genera este tipo de emisión por lo general se presenta en la fase cúbica, lo cual es consistente con los resultados analizados de SEM.

4.2 CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE LOS TRANSISTORES FET DE GaN

Para la caracterización del dispositivo se utilizó un sistema de análisis de parámetros semiconductores Marca Keithley Modelo 4200A-SCS. Una de las ventajas que ofrece este sistema es que durante el proceso de medición no es necesario modificar la configuración del sistema de manera física y permite realizar mediciones en un menor tiempo. Un esquema del sistema Keithley 4200 es mostrado en la Figura 4.7 (a). Éste se compone de un porta-muestras (Chuck), cuya función es proporcionar un contacto eléctrico para los dispositivos de prueba. Para el transistor FET, provee la conexión para el voltaje V_{GS} a través del contacto de Al en la parte posterior del silicio. Mientras que V_{DS} se suministra por medio de un par de micro-manipuladores cuya colocación se realiza en los contactos óhmicos superiores. Es importante mencionar que el sistema permite medir la corriente de drenaje I_D a través de las mismas conexiones eléctricas.

Para la obtención de curvas I-V, se crea un proyecto para la medición automática de la familia de curvas de los dispositivos MOSFET. En dicho programa, se asignan los valores de V_{DS} y V_{GS} a cada una de las terminales correspondientes. De esta manera es posible realizar un barrido de voltajes dependiendo de la magnitud que se quiera analizar. Esta operación se realiza de manera automática mediante el uso de los SMU's (*Source Measure Unit*, por sus siglas en inglés) con los que cuenta el equipo. Cada uno de estos componentes está dedicado a un electrodo (drenaje, fuente y compuerta) del dispositivo FET.

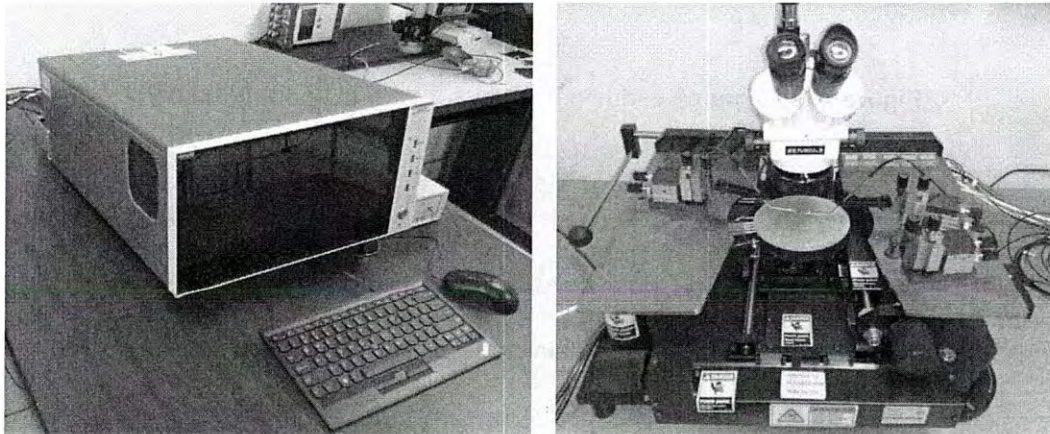
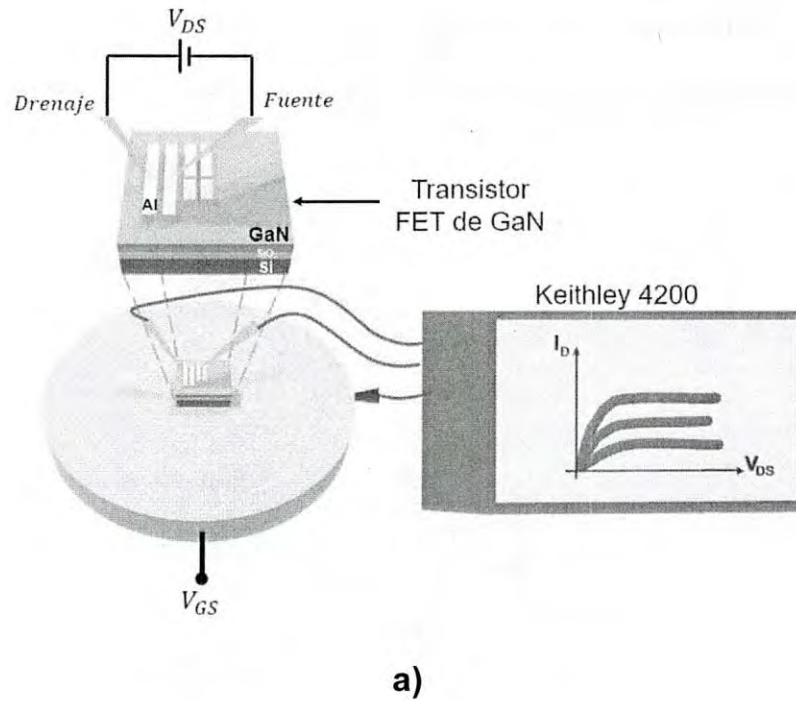


Figura 4.7 a) Configuración del analizador de parámetros semiconductores *Keithley 4200* para caracterización de FET de GaN, b) Sistema real. Izquierda: analizador de parámetros semiconductores *Keithley 4200*, derecha: estación de pruebas.

El esquema del software HMI (Human-Machine-Interface, por sus siglas en inglés) implementado para la medición de transistores se muestra en la Figura 4.8.

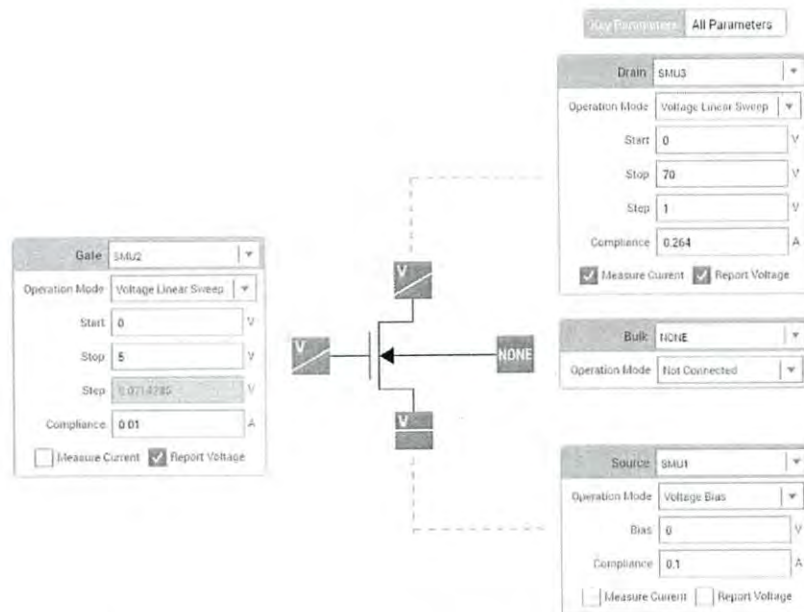


Figura 4.8 Diagrama esquemático para medición de transistores.

Como se observa en la Figura 4.8, el esquema de medición indica un barrido lineal de voltaje para V_{GS} , el cual se asigna a la terminal de compuerta. Para analizar la influencia de V_{GS} en el comportamiento de la corriente I_D , voltajes positivos y negativos fueron utilizados. Por otro lado, en la terminal de drenaje se asigna otro barrido de voltaje referente al V_{DS} , con el cual se genera la corriente I_D utilizando valores de 0 a 70 V. La terminal de fuente es colocada a 0 V para que el equipo reconozca un diferencial de potencial positivo.

4.2.1 Curvas I-V de transistores pseudo-MOSFET de GaN

Las propiedades eléctricas del transistor de GaN propuesto en este trabajo se exhiben en el comportamiento de sus curvas características de corriente-voltaje (I-V). La muestra seleccionada para la fabricación del transistor de GaN fue la GaN 7 por presentar las mejores propiedades cristalográficas, morfología superficial, estructura hexagonal y propiedades ópticas. Las curvas I-V muestran la respuesta característica de salida típica de un transistor FET, representando a través de la corriente I_D en función del voltaje V_{DS} . Cabe recordar que el comportamiento de la corriente I_D está también influenciado por la geometría de los contactos de drenaje y fuente, así como también de la separación entre ellos. El análisis de las corrientes de saturación de los transistores propuestos se realiza considerando un ancho de canal (W) constante de 1 mm y largos de canal (L) de 10, 20, 40 y 80 μm .

La Figura 4.9 corresponde a los resultados obtenidos de transistores con $W= 1$ mm y $L= 10, 20, 40$ y $80 \mu\text{m}$. Se observa que el comportamiento de las curvas corresponde a un transistor de efecto de campo, contando con una región lineal o resistiva. De igual modo, los transistores exhiben un voltaje de estrangulamiento (V_P) de 37 V y la región de saturación es obtenida. Se puede observar que las diferentes corrientes de saturación de cada transistor aumentan para voltajes negativos de V_{GS} , mientras que disminuyen para voltajes positivos. Este resultado comprueba que el transistor basado en GaN como capa activa opera en modo empobrecimiento, ya que no es necesario un voltaje en compuerta para la generación de un canal (es decir, para $V_{GS}= 0\text{V}$

existe una corriente de saturación). Otro factor importante que resaltar es la dependencia en el largo (L) del canal en los dispositivos. Conforme la longitud del canal aumenta, la corriente I_D de saturación es mayor, como se puede apreciar en la Figura 4.9.

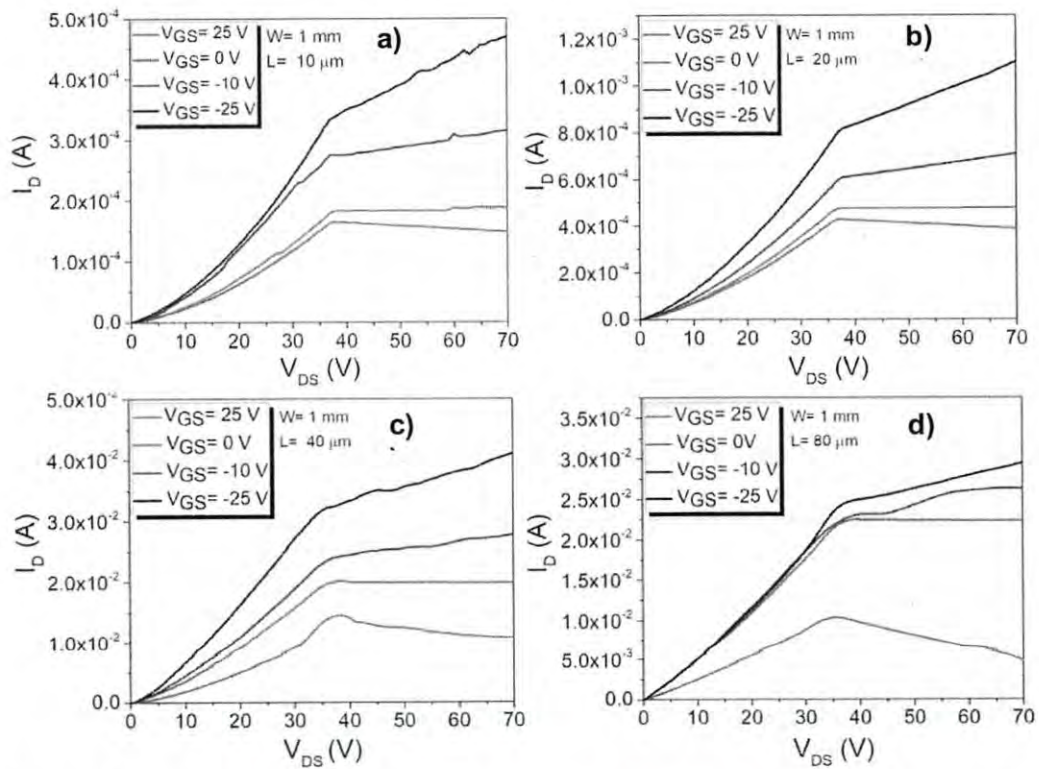


Figura 4.9 Gráficas de corriente vs. voltaje (I - V) de transistores a base de GaN con: a) $L = 10 \mu\text{m}$, b) $L = 20 \mu\text{m}$, c) $L = 40 \mu\text{m}$, d) $L = 80 \mu\text{m}$.

Cuando los transistores fueron medidos en la práctica, presentaron un comportamiento en la región de saturación en el cual la corriente I_D continua en aumento después de alcanzar el V_p . Este comportamiento es atribuido a una modulación del canal produciendo que la longitud efectiva del canal disminuye, tal fenómeno se denomina modulación de longitud de canal [60]. Este efecto produce que la corriente I_D siga moviéndose hasta alcanzar la fuente.

La conductancia del canal también se ve influenciada en la modulación del canal, en este caso la corriente I_D sigue aumentando. El efecto del aumento en la conductancia al seguir variando el V_{DS} después del punto de saturación es provocada por el aumento en la energía adquirida por los electrones, fenómeno que se denomina portadores calientes [61,62].

Por otro lado, se puede apreciar un tercer efecto no lineal en el comportamiento de las curvas I-V de los transistores. Al aumentar el voltaje V_{GS} a niveles positivos y al llegar a la corriente de saturación, se aprecia un decaimiento de la corriente en la zona de saturación conforme V_{DS} se modifica. Esto es causado por un auto calentamiento que se produce por la corriente continua empleada para obtener las curvas [63].

CAPÍTULO 5 . CONCLUSIONES

Se realizaron los depósitos de películas de GaN sobre obleas de silicio (100) mediante la técnica CVD. El sistema CVD fue caracterizado y se encontraron las mejores condiciones para el depósito de las películas semiconductoras, implementando el método de combinación de ambos flujos reactante (NH_3) y transportador (N_2), donde el GaN resultante presentó la fase wurtzita o hexagonal del GaN, buen cubrimiento de la superficie del substrato y luminiscencias en 360 nm correspondientes a la emisión en el ultravioleta cercano (UV), característica del GaN.

La implementación de películas de GaN semiconductoras en estructuras pseudo-MOS demostraron emular el funcionamiento de un transistor MOSFET de tipo empobrecimiento. Sin embargo, con los transistores de GaN propuestos en este trabajo se encontró un aumento de la corriente de saturación después del voltaje de estrangulamiento. El largo de canal de los transistores influye en el comportamiento de la conductividad y por ende en el desempeño del dispositivo. El efecto provocado por un fenómeno de modulación de canal producido por el voltaje de compuerta y drenaje fue observado. Se encontró que para anchos de canal superiores la corriente de saturación se incrementaba para los transistores de GaN. La estructura de los transistores pseudo-MOSFET de GaN afecta en los resultados, ya que se cuenta con una compuerta común para todos los dispositivos, produciendo una distribución de carga no uniforme.

Se realizaron los primeros transistores basados en GaN sintetizado por medio de la implementación de un sistema CVD hecho en laboratorio en la Universidad de Sonora.

Trabajo Futuro

1. Implementar y adecuar un sistema de depósito por vapor químico implementando organometálicos (sistema MOCVD) para la síntesis de GaN y estudiar sus efectos de crecimiento.
2. Adecuar las características de los transistores de GaN con estructura pseudo-MOS utilizando distintos metales como contactos.
3. Diseñar transistores con diferentes arquitecturas y estudiar el efecto de la capa activa de GaN.
4. Desarrollar transistores a base de capas de semiconductor ternario como el AlGaIn e InGaIn para el mejoramiento de las características eléctricas de los dispositivos.

REFERENCIAS

- [1] Dummer, G. W. A. (2013). *Electronic inventions and discoveries: electronics from its earliest beginnings to the present day*. Elsevier.
- [2] Strite, S., & Morkoç, H. (1992). *GaN, AlN, and InN: a review*. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 10(4), 1237-1266.
- [3] Ambacher, O. (1998). *Growth and applications of group III-nitrides*. Journal of Physics D: Applied Physics, 31(20), 2653.
- [4] Mukai, T., Nagahama, S., Isawa, N., Senoh M., Yamada, T., (2001). *Nitride light-emitting diodes*, Journal of Physics: Condensed Matter, 13 (32): 7089-7098 p.
- [5] Seong, T. Y., Han, J., Amano, H., Morkoc, H. (ed.). *III-Nitride based light emitting diodes and applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- [6] Muñoz, E., et al. *III nitrides and UV detection*. Journal of Physics: Condensed Matter, 2001, vol. 13, no 32, p. 7115.
- [7] Zhang, Mingxiang, et al. *High performance self-powered ultraviolet photodetectors based on electrospun gallium nitride nanowires*. Applied Surface Science, 2018, vol. 452, p. 43-48.
- [8] Taborda, J. A. P. (2011). *Propiedades estructurales y ópticas de compuestos (AlN, GaN, InN)*. Tumbaga, 1(6), 201-214.
- [9] Dargar, S. K., Srivastava, J. K., Bharti, S., & Nyati, A. (2017). *Performance Evaluation of GaN based Thin Film Transistor using TCAD Simulation*. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 7(1), 144-151.

- [10] Pengelly, R. S., Wood, S. M., Milligan, J. W., Sheppard, S. T., & Pribble, W. L. (2012). *A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 60(6), 1764-1783.
- [11] Ponce, F. A., & Bour, D. P. (1997). *Nitride-based semiconductors for blue and green light-emitting devices*. Nature, 386(6623), 351.
- [12] Mazumdar, K., Hussain, S., Singh, V. P., & Ghosal, A. (2015). *Tunneling effect in double barrier nitride (AlGaIn/GaN) heterostructures at very low temperatures*. Science International, 27(2).
- [13] Johnson, W. C., Parson, J. B., & Crew, M. C. (1932). *Nitrogen compounds of gallium. iii*. The Journal of Physical Chemistry, 36(10), 2651-2654.
- [14] Maruska, H. Á., & Tietjen, J. J. (1969). *The preparation and properties of vapor-deposited single-crystal-line GaN*. Applied Physics Letters, 15(10), 327-329.
- [15] Dingle, R., Sell, D. D., Stokowski, S. E., & Ilegems, M. (1971). *Absorption, reflectance, and luminescence of GaN epitaxial layers*. Physical Review B, 4(4), 1211.
- [16] Yoshida, S., Misawa, S., Fujii, Y., Takada, S., Hayakawa, H., Gonda, S., & Itoh, A. (1979). *Reactive molecular beam epitaxy of aluminium nitride*. Journal of Vacuum Science and Technology, 16(4), 990-993.
- [17] Manasevit, H. M., Erdmann, F. M., & Simpson, W. I. (1971). *The use of metalorganics in the preparation of semiconductor materials IV. The nitrides of aluminum and gallium*. Journal of the Electrochemical Society, 118(11), 1864-1868.

- [18] Yoshida, S., & Suzuki, J. (1998). *Reliability of GaN metal semiconductor field-effect transistor at high temperature*. Japanese journal of applied physics, 37(5A), L482.
- [19] Pérez-Tomás, A., Placidi, M., Baron, N., Chenot, S., Cordier, Y., Moreno, J. C., ... & Millán, J. (2009). *GaN transistor characteristics at elevated temperatures*. Journal of Applied Physics, 106(7), 074519.
- [20] Chen, R., Zhou, W., Zhang, M., & Kwok, H. S. (2013). *Bottom-gate thin-film transistors based on GaN active channel layer*. IEEE Electron Device Letters, 34(4), 517-519.
- [21] Bolat, S., Sisman, Z., & Okyay, A. K. (2016). *Demonstration of flexible thin film transistors with GaN channels*. Applied Physics Letters, 109(23), 233504.
- [22] Huang, Y., Duan, X., Cui, Y., & Lieber, C. M. (2002). *Gallium nitride nanowire nanodevices*. Nano Letters, 2(2), 101-104.
- [23] Reynoso, T. M.. (2015). *Estudio de transistores FET de CdS por diferentes formulaciones mediante baño químico*. Tesis de Doctorado, Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV).
- [24] Boylestad, R. L., & Nashelsky, L. (2003). *Electrónica, Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. PEARSON educación.
- [25] Floyd, T. L. (2008). *Dispositivos electrónicos* (No. Sirsi) i9789702611936).
- [26] S. M. Sze & Kwok K. Ng, *Physics Of Semiconductor Devices*, Third Edition, Wiley Intersciencie, 2007.
- [27] Kwok K. Ng, *Complete guide to semiconductor devices*, McGraw-Hill.

- [28] Saraswat, K. C., Chui, C. O., Kim, D., Krishnamohan, T., & Pethe, A. (2006, December). *High mobility materials and novel device structures for high performance nanoscale MOSFETs*. In Electron Devices Meeting, 2006. IEDM'06. International (pp. 1-4). IEEE.
- [29] Ye, P. D., Wilk, G. D., Kwo, J., Yang, B. A. Y. B., Gossmann, H. J., Frei, M. A. F. M., ... & Ng, K. K. (2003). *GaAs MOSFET with oxide gate dielectric grown by atomic layer deposition*. IEEE Electron Device Letters, 24(4), 209-211.
- [30] Kim, D. H., Kim, T. W., Hill, R. J., Young, C. D., Kang, C. Y., Hobbs, C., ... & Jammy, R. (2013). *High-Speed E-Mode InAs QW MOSFETs With Al₂O₃ Insulator for Future RF Applications*. IEEE Electron Device Letters, 34(2), 196-198.
- [31] Dey, A. W., Thelander, C., Lind, E., Dick, K. A., Borg, B., Borgstrom, M., ... & Wernersson, L. E. (2012). *High-performance InAs nanowire mosfets*. IEEE Electron Device Letters, 33(6), 791-793.
- [32] Huang, W., Khan, T., & Chow, T. P. (2006, June). *Enhancement-mode n-channel GaN MOSFETs on p and n-GaN/sapphire substrates*. In Power Semiconductor Devices and IC's, 2006. ISPSD 2006. IEEE International Symposium on (pp. 1-4). IEEE.
- [33] Liu, L., & Edgar, J. H. (2002). *Substrates for gallium nitride epitaxy*. Materials Science and Engineering: R: Reports, 37(3), 61-127.
- [34] Berger, L. (1997). *Semiconductor materials*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press
- [35] Echeverría-Narvaéz, C. (2005). *Caracterización y crecimiento de películas delgadas de GaN dopadas con tierras raras por el método de deposición por láser pulsado*. Tesis de doctorado, Universidad de Puerto Rico, San Juan, Puerto Rico.

- [36] Neumayer, D. A., & Ekerdt, J. G. (1996). *Growth of group III nitrides. A review of precursors and techniques*. Chemistry of materials, 8(1), 9-25.
- [37] Leszczynski, M., Teisseyre, H., Suski, T., Grzegory, I., Bockowski, M., Jun, J., ... & Cheng, T. S. (1996). *Lattice parameters of gallium nitride*. Applied Physics Letters, 69(1), 73-75.
- [38] Suski, T., Perlin, P., Teisseyre, H., Leszczyński, M., Grzegory, I., Jun, J., ... & Moustakas, T. D. (1995). *Mechanism of yellow luminescence in GaN*. Applied physics letters, 67(15), 2188-2190.
- [39] Reshchikov, M. A., McNamara, J. D., Helava, H., Usikov, A., & Makarov, Y. (2018). *Two yellow luminescence bands in undoped GaN*. Scientific reports, 8(1), 8091.
- [40] Reshchikov, M. A., & Morkoç, H. (2005). *Luminescence properties of defects in GaN*. Journal of applied physics, 97(6), 5-19.
- [41] Perlin, P., Suski, T., Teisseyre, H., Leszczynski, M., Grzegory, I., Jun, J., ... & Polian, A. (1995). *Towards the identification of the dominant donor in GaN*. Physical review letters, 75(2), 296.
- [42] Jain, S. C., Willander, M., Narayan, J., & Van Overstraeten, R. (2000). *III-nitrides: Growth, characterization, and properties*. Journal of Applied Physics, 87(3), 965.
- [43] Lin, M. E., Sverdlov, B., Zhou, G. L., & Morkoc, H. (1993). *A comparative study of GaN epilayers grown on sapphire and SiC substrates by plasma-assisted molecular-beam epitaxy*. Applied physics letters, 62(26), 3479-3481.

- [44] Nakamura, S., Senoh, M., & Mukai, T. (1991). *Highly p-typed Mg-doped GaN films grown with GaN buffer layers*. Japanese journal of applied physics, 30(10A), L1708.
- [45] Amano, H., Akasaki, I., Hiramatsu, K., Koide, N., & Sawaki, N. (1988). *Effects of the buffer layer in metalorganic vapour phase epitaxy of GaN on sapphire substrate*. Thin Solid Films, 163, 415-420.
- [46] Choy, K. L. (2003). *Chemical Vapour Deposition of Coatings*. Progress in Materials Science, 2: 57-170.
- [47] Nishinaga, T. (Ed.). (2014). *Handbook of crystal growth: fundamentals*. Elsevier.
- [48] Hoyle, S. (1993). *Introduction to crystallography; Royal Microscopical Society microscopy handbooks 19*: By C. Hammon. Oxford/New York: Oxford University Press (1992); 132 pp.
- [49] Nin, G. V. (2000). *Introducción a la microscopia electrónica aplicada a las ciencias biológicas*. UNAM.
- [50] Kasap, S. O. (2006). *Principles of electronic materials and devices (Vol. 2)*. New York: McGraw-Hill.
- [51] Perkowitz, S. (2012). *Optical characterization of semiconductors: infrared, Raman, and photoluminescence spectroscopy (Vol. 14)*. Elsevier.
- [52] Arizaga, G. G. C., Herrera, G. S., Fischer, A. M., & López, O. E. C. (2011). Influence of reaction conditions on the growth of GaN rods in an ammono-CVD reactor. *Journal of Crystal Growth*, 319(1), 19-24.
- [53] Poole Jr, C. P., & Owens, F. J. (2003). *Introduction to nanotechnology*. John Wiley & Sons.

- [54] Strite, S., y Morkoc, H., 1992. *GaN, AlN and InN: A review*, American Vacuum Society, 10 (4): 1237-1266 p.
- [55] Sibilía, J. P. (1996). *A guide to materials characterization and chemical analysis*. John Wiley & Sons.
- [56] Lei, T., Fanciulli, M., Molnar, R. J., Moustakas, T. D., Graham, R. J., & Scanlon, J. (1991). *Epitaxial growth of zinc blende and wurtzitic gallium nitride thin films on (001) silicon*. Applied physics letters, 59(8), 944-946.
- [57] Xu, S. J., Li, G., Chua, S. J., Wang, X. C., & Wang, W. (1998). Observation of optically-active metastable defects in undoped GaN epilayers. *Applied physics letters*, 72(19), 2451-2453.
- [58] Fernandez, J. R. L., Cerdeira, F., Meneses, E. A., Brasil, M. J. S. P., Soares, J. A. N. T., Santos, A. M., ... & Potthast, S. (2003). *Optical and x-ray diffraction studies on the incorporation of carbon as a dopant in cubic GaN*. Physical Review B, 68(15), 155204.
- [59] Goldhahn, R., Scheiner, J., Shokhovets, S., Frey, T., Köhler, U., As, D. J., & Lischka, K. (2000). *Refractive index and gap energy of cubic $In_x Ga_{1-x} N$* . Applied Physics Letters, 76(3), 291-293.
- [60] García, D. V., de Ávila López, S. F., Millán, J. C. F., & Gómez, A. R. (2018). *Electrónica general. Polarización de transistores: Conceptos básicos y exámenes resueltos*. Universidad Miguel Hernández.
- [61] Ytterdal, T., Cheng, Y., & Fjeldly, T. A. (2003). *Device modeling for analog and RF CMOS circuit design*. John Wiley & Sons.
- [62] Hoffmann, K. (2006). *System integration: From transistor design to large scale integrated circuits*. John Wiley & Sons.

- [63] C. Anghel, A.M. Ionescu, N. Hefyene, R. Gillon, *Self-Heating Characterization and Extraction Method for Thermal Resistance and Capacitance in High Voltage MOSFETs*

ANEXO 2

Emisiones características del nitruro de galio

Energía	Nomenclatura	Impureza	Descripción
3.478	FE, X _A	No dopado	No especificada en la literatura
3.471	DBE, D ⁰ X _A	No dopado, Si	Líneas emisión estrechas
3.466	ABE, A ⁰ X _A	No dopado, Mg	FWHM < 0.1 meV
3.44-3.46	TES	No dopado	Superposición de líneas
3.455	ABE	Zn	Disminución de la intensidad en 3.39 eV
3.45-3.46	Y ₁	No dopado	Correlacionado con inversión de dominios
3.41-3.42	Y ₂	No dopado	No especificada en la literatura
3.397		Be	Transición e-A
3.387	FE-LO	No dopado	No especificada en la literatura
3.38	DBE-LO	No dopado	No especificada en la literatura
3.38		Be	Transición DAP
3.37-3.38	Y ₃		En GaN sin contaminantes
3.375	ABE-LO	No dopado	No especificada en la literatura
3.364	ABE-LO	Zn	No especificada en la literatura
3.35-3.36	Y ₄	No dopado	No especificada en la literatura
3.34	Y ₅	No dopado	No especificada en la literatura
3.30-3.32	Y ₆	No dopado	No especificada en la literatura
3.295	FE-2LO	No dopado	No especificada en la literatura
3.288	DBE-2LO	No dopado	No especificada en la literatura
3.283	ABE-2LO	No dopado	No especificada en la literatura
3.28	UVL	No dopado	Transición e-A
3.272	ABE-2LO	Zn	No especificada en la literatura
3.27	DBE		DBE en GaN cubico
3.26	UVL	No dopado, Si	Transición DAP

(CONTINUACIÓN)

Emisión	Nomenclatura	Impureza	Descripción
3.1-3.26	UVL	Mg	Transiciones e-A y DAP
3.21-3.23	Y ₇	No dopado	No especificada en la literatura
3.16			DAP en GaN cubico
3.08	Y ₈	No dopado	No especificada en la literatura
3.08		C	En GaN cubico
3.0-3.05	BL	C	Emisión amplia
2.9-3.0	BL	No dopado, Fe	Emisión amplia con intensidad inestable
2.9	BL	P	Emisión amplia dependiente de la estructura
2.88	BL	No dopado	Emisión amplia dependiente de la estructura
2.88	BL	Zn	Emisión amplia dependiente de la estructura
2.86	Y ₉	No dopado	No especificada en la literatura
2.8	Y ₁₀	No dopado	No especificada en la literatura
2.8	BL	Cd	Emisión amplia dependiente de la estructura
2.7-2.8	BL	Mg	Emisión amplia con corrimiento
2.6-2.8	BL	No dopado	Emisión amplia relacionada con la superficie
2.68	Y ₁₁	No dopado	No especificada en la literatura
2.6	GL	As	Emisión amplia en substrato pulido
2.6	GL	Zn	Emisión amplia
2.56	AL	No dopado	Emisión amplia
2.51	GL ₃	No dopado	Emisión amplia
2.5		Ca	Emisión amplia
2.4-2.5		Mg-O	Emisión amplia
2.48	GL	No dopado	Emisión amplia
2.43		Hg	Emisión amplia
2.36	GL ₂	No dopado	Emisión amplia

(CONTINUACIÓN)

Energía	Nomenclatura	Impureza	Descripción
2.2-2.3	YL	No dopado, C	Emisión amplia
1.9-2.1		C	Emisión amplia en GaN cubico
1.8-2.0	RL	No dopado	Emisión amplia
1.85	RL ₂	No dopado	Emisión amplia
1.8		Zn	Emisión amplia
1.7-1.8		Mg	Emisión amplia
1.66		No dopado	Emisión amplia
1.64		C	Emisión amplia
1.3		Fe	Emisión angosta
1.27		Mn	Emisión amplia
1.193		Ti, Cr	Emisión angosta
0.95		No dopado	Emisión angosta, inducida por irradiación
0.85-0.88		No dopado	Emisión angosta, inducida por irradiación