

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA  
INSTITUTO DE INGENIERIA  
MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERIA



EL USO DE NITRURO DE GALIO EN SISTEMAS ELECTRONICOS

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERIA

HERNAN FREM NARANJO

DIRECTOR DE TESIS

Dr. NICOLA RADNEV NEDEV

CO DIRECTOR DE TESIS

Dr. ABRAHAM ARIAS LEON

10 de septiembre de 2020

## DEDICATORIA

### *A mi esposa*

Por su amor, paciencia y comprensión, y sobre todo por ayudarme a ser una mejor persona.

### *A mis hijos*

Por todo el tiempo que me cedieron para que yo pudiera invertirlo en este nuevo proyecto.

## AGRADECIMIENTOS

Una serie de eventos secuenciales permitieron la realización de este documento.

*Noboru Matsuki* por apoyar el sueño de establecer un centro de investigación y desarrollo en Furukawa México, y su apoyo incondicional al desarrollo de nueva tecnología.

*Shusuke Kaya* por su tiempo, paciencia y deseo de compartir sus amplios conocimientos sobre nitruro de galio.

*Dr. Benjamín Valdez* por alentarme a iniciar mis estudios para la obtención de este nuevo grado académico, y por todo su apoyo a través de los años de conocernos.

*Dr. Nicola Radnev* por su dirección, dedicación y profesionalismo durante el desarrollo de este proyecto. Por todo el tiempo que me dedicó y todos los conocimientos que me compartió. Por su amistad ya que aprendí de usted como ser una mejor persona.

*Dr. Oscar Landeros* por todo el apoyo recibido durante la elaboración de las muestras experimentales.

*Dr. Abraham Arias* por todo el apoyo recibido durante la caracterización de las muestras experimentales, y la revisión de este documento.

*Dr. David Mateos* por todo el apoyo recibido durante la caracterización de las muestras experimentales.

*Dr. Joaquin Diaz* por todo el apoyo recibido durante la caracterización de las muestras experimentales.

## INDICE

Abreviaturas y Nomenclaturas.....	vi
Índice de tablas .....	ix
Índice de figuras.....	x
Índice de gráficas .....	xiii

### Capítulo 1

1.1 Introducción .....	1
1.2 Antecedentes .....	5
1.3 Objetivos .....	8

### Capítulo 2

2.1 Nitruros del grupo III .....	9
2.2 Estructura cristalina Nitruros del grupo III.....	11
2.3 Propiedades Nitruros del grupo III .....	13
2.3.1 Propiedades Eléctricas .....	15
2.3.2 Propiedades Ópticas.....	18
2.4 Crecimiento de películas y cristales de GaN .....	19
2.4.1 Epitaxia en fase de vapor de hidruro (HVPE) .....	20
2.4.2 Crecimiento de cristales de GaN a granel por HVPE en semillas de GaN...22	
2.4.3 MOVPE de alta tasa de crecimiento .....	22
2.4.4 Crecimiento amonotermal de GaN en condiciones amoniacaes básicas ....23	
2.5 Técnicas de caracterización .....	24
2.5.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM).....	24
2.5.2 Elipsometría .....	27
2.5.3 Mediciones Corriente-Voltaje.....	29

### Capítulo 3

3.1 Dispositivos basados en Nitruro de Galio.....	34
3.2 Diodos Laser .....	36
3.3 LED UV .....	38

3.4 Transistores .....	40
3.5 Diodos Schottky .....	45
3.6 Contactos tipo Schottky en películas de GaN.....	49
3.7 Sensores UV basados en GaN.....	52
Capítulo 4	
4.1 Desarrollo experimental para la obtención de sensores UV tipo Schottky de Nitruro de Galio .....	60
4.1.1 Estudio de las características eléctricas de fotodiodo comercial a base de GaN .....	62
4.1.2 Estudio de la morfología-topografía y análisis químico elemental de fotodiodo comercial a base de GaN.....	65
4.1.3 Características de la película de GaN utilizada para la fabricación del dispositivo .....	67
4.1.4 Estudio y selección de diferentes metales que serán utilizados para la fabricación del dispositivo tipo Schottky.....	68
4.1.5 Estudio de la relación de las áreas de los contactos y sus efectos sobre el contacto tipo Schottky .....	73
4.1.6 Estudio de la relación de distancia entre contactos y sus efectos sobre la corriente de fuga, y ganancia bajo los efectos de luz UV .....	79
Conclusiones .....	85
Futuras Investigaciones.....	87
Bibliografía .....	88

## ABREVIATURAS Y NOMENCLATURAS

ICE:	Motor de combustión Interna (Internal Combustion Engine)
NEV:	Nuevo Vehículo Energético (New Energy Vehicle)
BEV:	Vehículo Eléctrico de Batería (Battery Electric Vehicle)
PHEV:	Vehículo Híbrido Eléctrico (Plug-in Hybrid Electric Vehicle)
GaN:	Nitruro de Galio (Gallium Nitride)
EV:	Vehículos Eléctricos (Electrical Vehicles)
ADAS:	Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (Advanced Driver Assistance Systems)
LiDAR:	Detección y Determinación de Imágenes por Laser (Laser Imaging Detection and Ranging)
SiC:	Carburo de Silicio (Silicon Carbide)
GaAs:	Arseniuro de Galio (Gallium Arsenide)
AlN:	Nitruro de Aluminio (Aluminum Nitride)
InN:	Nitruro de Indio (Indium Nitride)
LED:	Diodo Emisor de Luz (Light Emitting Diode)
IoT:	Internet de las Cosas (Internet of Things)
CAGR:	Tasa Compuesta de Crecimiento Anual (Compound Annual Growth Rate)
IC:	Circuito Integrado (Integrated Circuit)
GaP:	Fosfuro de Galio (Gallium Phosphide)
GaAsP:	Fosfuro de Arseniuro de Galio (Gallium Arsenide Phosphide)
InGaAsP:	Fosfato de Arseniuro de Indio y Galio (Indium Gallium Arsenide Phosphide)
HCP:	Estructura Cristalina Hexagonal Compacta (Hexagonal Close Packed Crystal Structure)
TM:	Temperatura de Fusión (Melting Temperature)
MOCVD:	Deposición Química de Vapor Metal-orgánica (Metalorganic Chemical Vapor Deposition)
MBE:	Epitaxia de Haz Molecular (Molecular-Beam Epitaxy)
E <sub>g</sub> :	Banda Prohibida (Band Gap)

E <sub>Br</sub> :	Campo Eléctrico de Ruptura (Breakdown Electric Field)
v <sub>s</sub> :	Velocidad de Saturación (Velocity Saturation)
μ:	Movilidad de Electrones (Electron Mobility)
HVPE:	Epitaxia en Fase de Vapor de Hidruro (Hydride Vapor Phase Epitaxy)
GaSb:	Antimoniuro de Galio (Gallium Antimonide)
Ge:	Germanio (Germanium)
LT:	Baja Temperatura (Low Temperature)
ELOG:	Sobre Crecimiento Lateral Epitaxial (Epitaxial Lateral Over-Growth)
MOVPE:	Epitaxia Organometálica en Fase de Vapor (Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy)
TEM:	Microscopio Electrónica (Transmission Electron Microscopy)
SEM:	Microscopio de Barrido Electrónico (Scanning Electron Microscope)
EDX:	Espectroscopia de Rayos X de Energía Dispersiva (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy)
AES:	Espectroscopia de Electrones de Auger (Auger Electron Spectroscopy)
SIMS:	Espectroscopia de Masas de Iones Secundarios (Secondary-Ion Mass Spectrometry)
RBS:	Retro-Dispersión de Rutherford (Rutherford Backscattering Spectrometry)
SPM:	Microscopia de Sonda de Barrido (Scanning Probe Microscopy)
PL:	Espectroscopia de Fotoluminiscencia (Photoluminescence Spectroscopy)
CL:	Espectroscopia de Cátodo-Luminiscencia (Optical Cathodoluminescence)
FTIR:	Espectroscopia Infrarroja de Transformada de Fourier (Fourier-Transform Infrared Spectroscopy)
ECV:	Perfil de Capacitancia Electroquímica de Voltaje (Electrochemical Capacitance-Voltage)
PSG:	Generador de Estado de Polarización (Polarization State Generator)
PSA:	Analizador de Estado de Polarización (Polarization State Analyzer)
SE:	Elipsometría Espectroscópica (Spectroscopic Ellipsometry)
LDR:	Luz de Resistencia Variable (Light Dependent Resistor)
RF:	Radio Frecuencia (Radio Frequency)

MOSFET:	Transistor de Efecto Campo Metal Oxido Semiconductor (Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor)
AlGaN:	Nitruro de Aluminio y Galio (Aluminum Gallium Nitride)
LD:	Diodo Laser (Laser Diode)
HEMT:	Transistor de Alta Movilidad de Electrones (High-Electron-Mobility Transistor)
2DEG:	Gas de Electrones Bidimensional (Two-Dimensional Electron Gas)
FET:	Transistor de Efecto Campo (Field Effect Transistor)
SBD:	Diodos Tipo Schottky (Schottky Barrier Diodes)
MSM:	Metal-Semiconductor-Metal (Metal-Semiconductor-Metal)
ITO:	Oxido de Estaño e Indio (Indium Tin Oxide)
WEDM:	Mecanizado por Descarga Eléctrica de Alambre (Wire Electrical Discharge Machining)

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Materiales semiconductores comunes: (a) la porción de la tabla periódica donde ocurren los semiconductores; (b) semiconductores elementales y compuestos.
Tabla 2.2	Parámetros de red y energía de gap de los nitruros del grupo III a temperatura ambiente.
Tabla 2.3	Propiedades Nitruros del Grupo III de tipo wurtzita y semiconductores convencionales a 300 K.
Tabla 3.1	Aplicaciones de nitruro de galio con sus beneficios demostrados y esperados.
Tabla 3.2	Propiedades de los materiales, GaN, SiC y silicio.
Tabla 3.3	Resumen de la altura de barrera de Schottky de Au, Ni, Pd y Pt a GaN a partir de los resultados de experimentación (I-V, I-V-T y C-V),
Tabla 4.1	Características del sensor UV-A a 25°C.
Tabla 4.2	Funciones de trabajo de materiales utilizados en la experimentación.
Tabla 4.3	Condiciones de operación para la evaporación de los contactos de oro y aluminio.
Tabla 4.4	Condiciones de operación para la evaporación de los contactos de oro.
Tabla 4.5	Resultados del estudio de la relación de las áreas de los contactos.
Tabla 4.6	Resultados del estudio de las distancias entre los contactos.
Tabla 4.7	Valores $\Delta I/I_d$ a 0.3V, 0V, -0.3V.

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.1 Emisión de dióxido de carbono.
- Figura 1.2 Muertes por accidentes de tránsito.
- Figura 1.3 Mercado de los dispositivos de Nitruro de Galio.
- Figura 1.4 Mercado de los dispositivos de Nitruro de Galio región Asia Pacifico por aplicación.
- Figura 2.1 Estructura wurtzita de los Nitruro del Grupo III (eje vertical en la dirección [0001]).
- Figura 2.2 Estructura cristalina hexagonal asimétrica de GaN a lo largo del eje c, donde aparece la cara Ga o N en la superficie del cristal.
- Figura 2.3 Energía de banda prohibida versus constante de red a 300 K para semiconductores convencionales de banda ancha y también InN.
- Figura 2.4 Esquema del diagrama de bandas del GaN en la dirección paralela y perpendicular al eje c.
- Figura 2.5 Energía de ancho de banda vs constante de red de semiconductores de nitruro III a temperatura ambiente.
- Figura 2.6 Representación esquemática del crecimiento de GaN por HVPE.
- Figura 2.7 Esquema Microscopio de Barrido Electrónico.
- Figura 2.8 Imágenes de SEM sección transversal de capa de GaN.
- Figura 2.9 Diagrama esquemático de un elipsómetro. El PSG es el generador de estado de polarización y el PSA es el analizador de estado de polarización.
- Figura 2.10 Espectros medidos (línea de puntos) y calculados (línea continua)  $\Delta$  y  $\Psi$  de GaN en un sustrato de zafiro en la parte de interferencia del espectro.
- Figura 2.11 Curvas características I-V de una resistencia ideal.
- Figura 2.12 Curvas características I-V de un diodo.
- Figura 3.1 Diagrama de bandas.
- Figura 3.2 Diagrama banda prohibida y su longitud de onda.
- Figura 3.3 Diodos emisor de luz (LED), proceso de recombinación.
- Figura 3.4 Proceso de emisión de luz del diodo.
- Figura 3.5 Resistencia de encendido y el voltaje de ruptura.

- Figura 3.6 Tiempo de transición entre un transistor GaN y dos MOSFET de potencia de silicio.
- Figura 3.7 Dispositivo en modo de agotamiento (d-modo) HEMT.
- Figura 3.8 Dispositivo en modo de mejora (e-modo).
- Figura 3.9 Características de corriente-voltaje de un diodo Schottky y P-N.
- Figura 3.10 Una barrera Schottky formada al contactar un semiconductor de tipo n con un metal que tiene una función de trabajo más grande: (a) diagramas de banda para el metal y el semiconductor antes de unirse; (b) diagrama de bandas en equilibrio para la unión.
- Figura 3.11 Efectos de polarización directa e inversa en la unión de la Figura 3.10: (a) polarización directa; (b) polarización inversa; (c) característica típica de corriente-voltaje.
- Figura 3.12 Diagrama de un típico circuito fotoconductor.
- Figura 3.13 GaN fotodiodo p-i-n.
- Figura 3.14 Estructura esquemática de los PD de UV con electrodo de Ni o NiO,
- Figura 3.15 Estructura de fotosensor tipo Schottky.
- Figura 3.16 Esquemas de (a) lateral, (b) cuasi vertical, y (c) SBD verticales en GaN: la región gris es el contacto de Schottky, la región negra es el contacto óhmico y la región de la rejilla es el sustrato.
- Figura 4.1 Equipo de evaporación a alto vacío, (a) campana de vidrio Pyrex, (b) unidad de control.
- Figura 4.2 Equipo de caracterización Keithley modelo 4200-SCS.
- Figura 4.3 (a) Vista de muestra y punta de tungsteno, (b) microscopio, (c) y (d) luz LED.
- Figura 4.4 Sensor UV-A a base de nitruro de galio (a), vista interna del sensor (b).
- Figura 4.5 Microscopio de barrido electrónico Jeol JSM-IT100
- Figura 4.6 Morfología-topografía de fotodiodo comercial
- Figura 4.7 Dimensiones del fotodiodo comercial
- Figura 4.8 Análisis químico elemental del fotodiodo comercial
- Figura 4.9 Muestra 5 $\mu$ m película de GaN sobre Zafiro.

- Figura 4.10 Máscara metálica para depositar contactos por evaporación. (a) dibujo de diseño de mascara. (b) máscara metálica fabricada por medio de WEDM.
- Figura 4.11 Montaje de muestra en el interior de la campana de vidrio Pirex.
- Figura 4.12 Arreglo de los contactos de oro y aluminio depositados sobre película de GaN.
- Figura 4.13 (a)rejilla SPI con cuadros de  $95\mu\text{m}$ , (b)mascara para contactor circular de 2mm de diámetro.
- Figura 4.14 Arreglo de contactos de oro depositados sobre película de GaN.
- Figura 4.15 Imagen de contactos de oro obtenidas con el perfilómetro óptico.
- Figura 4.16 Imagen con la medición de las alturas de los contactos de  $95\mu\text{m}$ .
- Figura 4.17 Letra P utilizada como contacto de mayor área (sección verde de la letra P).

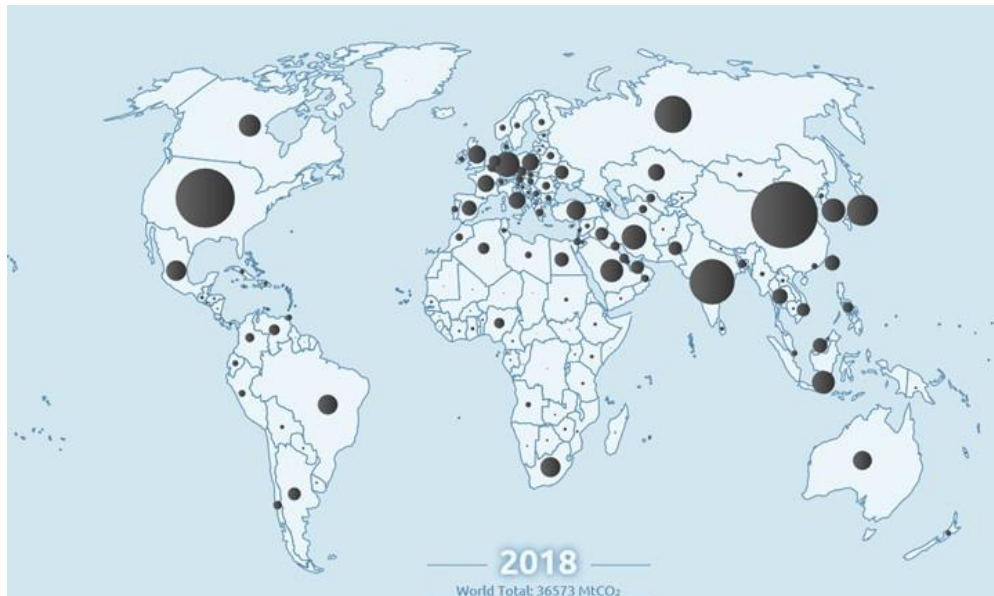
## ÍNDICE DE GRÁFICAS

- Gráfica 4.1 Resultados I-V en oscuridad para sensor UV-A.
- Gráfica 4.2 Resultados I-V para sensor UV-A iluminado.
- Gráfica 4.3 Densidad de dislocación vs espesor para películas de GaN.
- Gráfica 4.4 Curva I-V para contactos de aluminio redondos medidos en oscuridad.
- Gráfica 4.5 Curva I-V para contactos de oro redondos medidos en oscuridad.
- Gráfica 4.6 Curva I-V para medición entre un contacto de oro y uno de aluminio. Mediciones en oscuridad e iluminado con luz UV365.
- Gráfica 4.7 Curva I-V para medición entre contactos de oro (circular de 1mm de diámetro-cuadrado de 1 x 2 mm).
- Gráfica 4.8 Curva I-V para medición entre contactos de oro (cuadro G1 de 0.095 x 0.095mm – sección letra P de 0.285 x 0.332 mm).
- Gráfica 4.9 Curva I-V para medición entre contactos de oro (cuadro G1 de 0.095 x 0.095 mm – círculo grande Ø 2 mm).
- Gráfica 4.10 Curva I-V para medición entre contactos de oro J9 – Círculo Ø2 mm.
- Gráfica 4.11 Curva I-V para medición entre contactos de oro J1 – Círculo Ø2 mm.
- Gráfica 4.12 Curva I-V para medición entre contactos de oro J2 – Círculo Ø2 mm.
- Gráfica 4.13 Curva I-V para medición entre contactos de oro J2 – Círculo Ø2 mm. Corrientes en oscuridad y bajo iluminación con luz UV365.
- Gráfica 4.14 Curva I-V para medición entre contactos de oro G1 – Círculo Ø2 mm. Corrientes en oscuridad y bajo iluminación con luz UV365.

## CAPITULO 1

### 1.1 Introducción

Desde los inicios de la humanidad, los seres humanos hemos liberado dióxido de carbono a la atmósfera a través de múltiples actividades, comenzando con la deforestación. Alrededor de 1750, la revolución industrial inicio con la invención de la energía de vapor, iniciando una era de liberación de dióxido de carbono sin precedentes a la atmósfera. Con el uso industrial de combustibles fósiles, primero carbón, luego petróleo y gas, las emisiones han crecido exponencialmente [1, 2]. Tan solo en el año 2018 se registraron 36,573 Mt de dióxido de carbono en todo el mundo (Figura 1.1) [2].



*Figura 1.1 Emisión de dióxido de carbono*

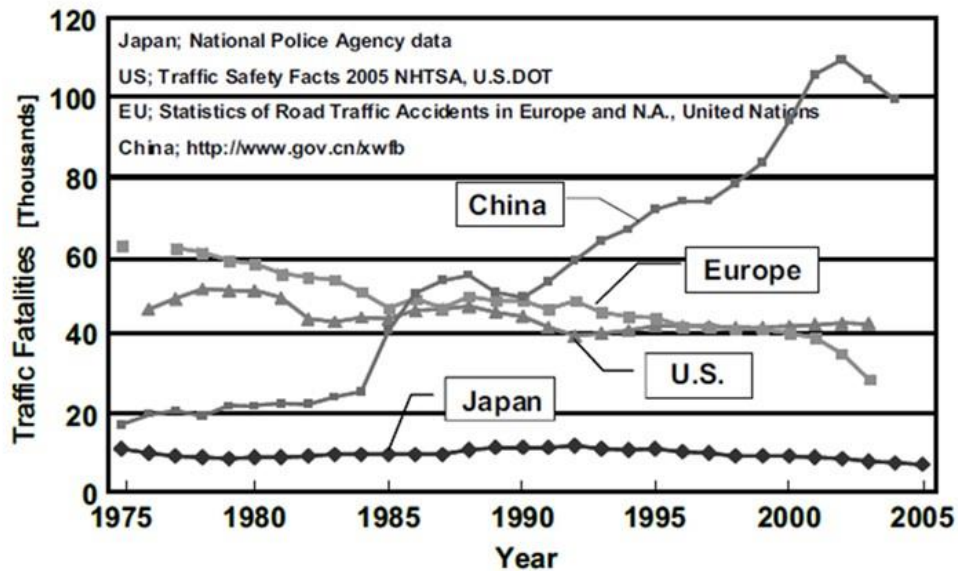
Los sectores de la energía y la industria combinados dominan las emisiones actuales de dióxido de carbono global, representando alrededor del 60% de las emisiones totales. Otros sectores de la economía, como los sectores residenciales y de transporte, aportan alrededor del 30% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono. El sector de transporte por si solo contribuye con el 25% de las emisiones globales de dióxido de carbono [1, 3].

La industria automotriz juega un papel muy importante en la resolución de este problema. Los diseñadores de automóviles trabajan en nuevos diseños para reducir las emisiones de dióxido de carbono, su objetivo es la creación de un vehículo ecológico

aumentando el rendimiento ambiental del tren de fuerza, utilizando nuevos combustibles y energía eléctrica, e integración de la tecnología híbrida [3]. Los nuevos diseños incorporarán nuevas tecnologías: tecnología aerodinámica, de diseño ligero, de recuperación de energía ICE (por ejemplo, inyección directa turbo) y tecnologías NEV (por ejemplo, BEV, PHEV) [4].

Las propiedades de ahorro de energía del material GaN y la capacidad de manejar operaciones de alto voltaje sin perder potencia brindan a los diseñadores ventajas críticas en el diseño de los vehículos eléctricos del mañana, que incluyen una menor pérdida de conmutación, velocidades de conmutación más rápidas, mayor densidad de potencia, presupuestos térmicos mejorados; y mayor reducción de peso y costos. Incluso más allá del mercado de EV, la electrónica basada en GaN ofrece una gran oportunidad para reducir aún más el consumo de energía en centros de datos y dispositivos de consumo [5].

Además de su contribución a las emisiones globales, el transporte es causante de la muerte de 1.35 millones de personas anualmente a nivel mundial. En algunos países la cantidad de muertes por accidentes de tránsito vehicular siguen incrementando (Figura 1.2) [3].



*Figura 1.2 Muertes por accidentes de tránsito*

En el año 2016 se registraron en Estados Unidos 37,461 muertes ocasionas por accidentes de tránsito vehicular, de las cuales el 16% fueron muertes de peatones. En los

últimos años, el número de muertes de peatones en los Estados Unidos ha crecido sustancialmente más rápido que todas las demás muertes por tráfico. El número de víctimas mortales de peatones aumentó un 27% de 2007 a 2016, mientras que, al mismo tiempo, todas las demás muertes por accidentes de tráfico disminuyeron en un 14%. Las muertes de peatones como proporción del total de muertes por accidentes automovilísticos aumentaron constantemente, del 11% en 2007 a 16% en 2016. Los peatones ahora representan una mayor proporción de muertes por accidentes de tráfico de los últimos 33 años [6].

Los fabricantes de automóviles gastan millones en el desarrollo de tecnologías de vanguardia para mantener a los conductores seguros y libres de accidentes mientras operan sus vehículos. Estas tecnologías se conocen en la industria como Sistemas Avanzados de Asistencia al Conductor (ADAS, por sus siglas en inglés) y cada una está controlada por complejos sistemas integrados en tiempo real [7]. La tecnología ADAS puede proporcionar beneficios inmediatos de seguridad y formar el camino hacia una flota de vehículos parcial y totalmente autónoma que podría eliminar virtualmente las muertes por accidentes de tráfico. Las tecnologías ADAS por sí solas tienen el potencial de prevenir el 30 por ciento de todos los accidentes. Junto con la tecnología autónoma, podrían reducir los accidentes automovilísticos en un 90% [8].

En los sistemas avanzados de asistencia al conducir existen múltiples tecnologías, pero una de las más importantes y prometedoras es la tecnología LiDAR. La detección y medición de luz (LiDAR) es un sistema de medición de distancia basado en láser. Mediante el uso de LiDAR, un vehículo puede detectar a lo lejos que tan distante está de un edificio, de un vehículo estacionado o peatones. Por ejemplo, si un vehículo sin conductor detecta un vehículo estacionado a unos cientos de metros de distancia, tal vez en un semáforo en rojo, comenzará a reducir la velocidad y aplicar el frenado. A diferencia de los controladores humanos, los sensores LiDAR no se pueden distraer con un mensaje de texto [9].

Para que los sistemas LiDAR cumplan con las especificaciones de rendimiento cada vez más altas, deben realizar una conmutación rápida de pulsos de alta corriente, que es donde un interruptor de potencia de GaN puede intervenir para ayudar [10]. En la actualidad el nitruro de galio tiene las siguientes aplicaciones en automóviles:

- Cargador de batería a bordo
- Inversor de tracción
- Sensor LiDAR
- Centros de datos
- Convertidor de DC/AC
- Cargador de batería inalámbrico
- Sistema de alimentación de 48V
- Dirección asistida electrónica

Las aplicaciones del nitruro de galio no son solamente prometedoras en la industria automotriz, el área de la salud también está haciendo uso de las propiedades de este material al fabricar fotodetectores portátiles inteligentes que puedan monitorear los rayos UV en tiempo real (especialmente UV-A y B) para la prevención de cánceres de piel o enfermedades por exceso de exposición a los rayos UV.

El cáncer de piel se ha convertido en un problema de salud humana cada vez mayor. En las últimas tres décadas, más personas han experimentado cáncer de piel que todos los demás tipos de cáncer combinados. El cáncer de piel se ha convertido en la forma más común de cáncer en los Estados Unidos, con más de 3.5 millones de casos diagnosticados cada año. Como resultado, las personas están cada vez más preocupadas por medir su exposición a la radiación ultravioleta (UV) que es, en su mayor parte, responsable de la formación de tumores de cáncer de piel [11].

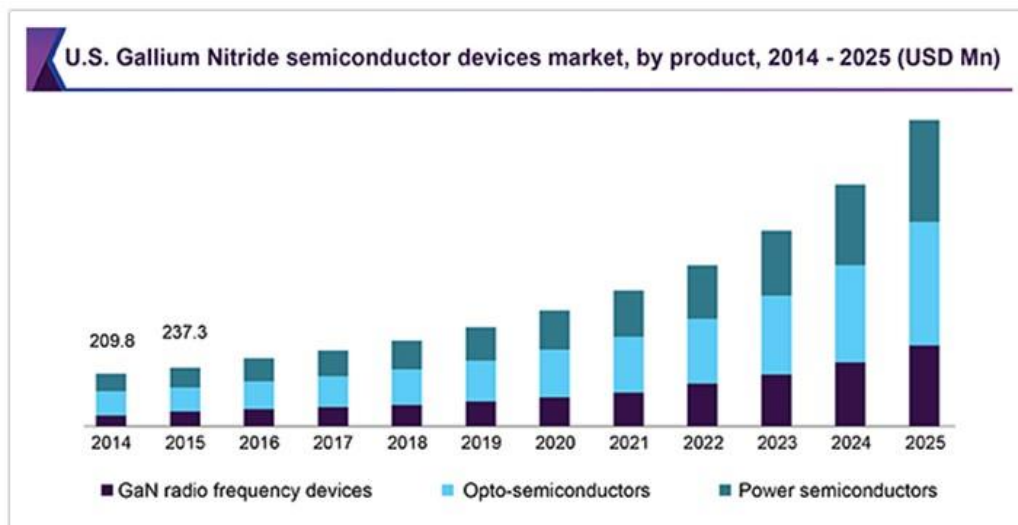
Los transistores que son utilizados en los autos híbridos y eléctricos, los interruptores utilizados en los sistemas LiDAR, y los dispositivos para monitoreo de radiación UV requieren de frecuencias de conmutación más altas, temperaturas de funcionamiento más elevadas, y mayores capacidades de manejo de voltaje. Los materiales de banda ancha como el nitruro de galio (GaN) y el carburo de silicio (SiC) son materiales que proporcionan estas características además de contribuir en los esfuerzos por reducir el consumo de energía.

## 1.2 Antecedentes

Los materiales semiconductores se han estudiado intensamente desde el nacimiento de la tecnología de silicio hace más de 50 años. La capacidad de adaptar física y químicamente sus propiedades con precisión es el factor clave responsable de la revolución electrónica en nuestra sociedad en las últimas décadas. Los sistemas de materiales semiconductores (como el silicio y los materiales relacionados con GaAs) ahora han madurado y encontrado aplicaciones bien establecidas en electrónica, optoelectrónica y varios otros campos.

Otros materiales como III-Nitruros fueron desarrollados más tarde, en respuesta a las necesidades que los semiconductores mencionados anteriormente no pudieron cumplir. Las propiedades de los III-Nitruros (AlN, GaN, InN y sistemas de aleación relacionados) los convierten en una excelente opción para emisores de luz eficientes, tanto en la región visible como UV, detectores UV, y para una variedad de dispositivos electrónicos como dispositivos de alimentación unipolar de alta frecuencia [12].

El tamaño global del mercado de dispositivos semiconductores de nitruro de galio (GaN) se valoró en USD 974.9 millones en 2016. Se espera que el mercado experimente un crecimiento significativo en los próximos ocho años, debido a la acelerada demanda de productos electrónicos que consuman menos energía y sean más eficientes.



*Figura 1.3 Mercado de los dispositivos de Nitruro de Galio*

La Figura 1.3 muestra que tan solo en estados unidos el mercado para semiconductores de GaN fue de 237.3 millones de USD para el año de 2015.

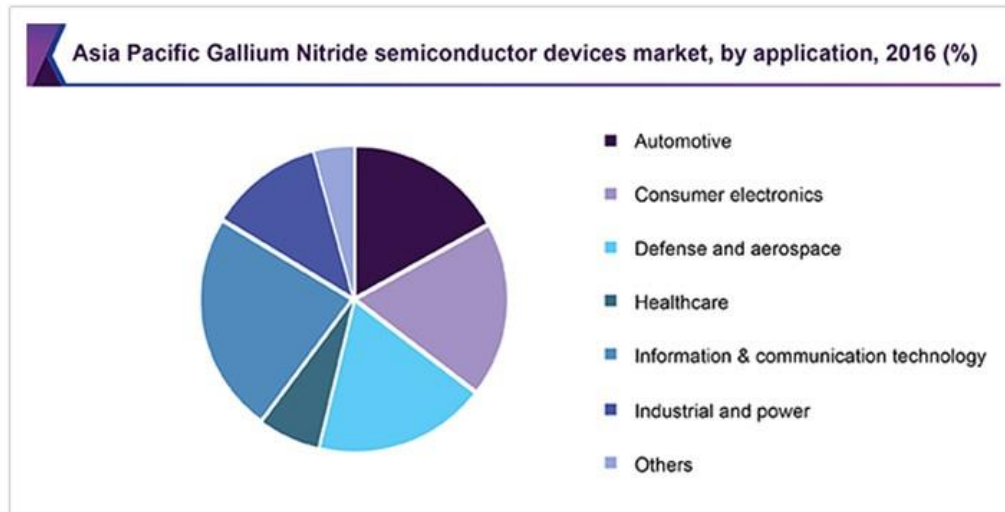
Se espera que la tecnología GaN sea testigo de una demanda significativa en el sector de la salud. Se observa a los hospitales tomando la ayuda de robots equipados con componentes de nitruro de galio para realizar cirugías delicadas. Además, los equipos de exploración, como sonogramas, resonancia magnética y máquinas de rayos X en miniatura, utilizan componentes semiconductores basados en GaN, debido a sus capacidades de posicionamiento precisas que son útiles para realizar cirugías.

En 2016, el segmento de productos opto-semiconductores adquirió una importante participación de mercado (Figura 1.3). Esto puede atribuirse en gran medida a la aplicación de opto-semiconductores en dispositivos como LED, celdas solares, fotodiodos, láseres y optoelectrónica, entre otros. El sector automotriz utiliza cada vez más la tecnología GaN en luces automotrices, iluminación interior y exterior y láser impulsado por pulsos.

Sin embargo, se espera que el segmento de dispositivos de radiofrecuencia GaN emerja como el segmento de más rápido crecimiento con una tasa compuesta anual de 20.4% entre 2017 y 2025. El crecimiento se puede atribuir al uso creciente de dispositivos de radiofrecuencia basados en galio para una amplia variedad de aplicaciones en todas las industrias. como electrónica de consumo y defensa, que son los primeros en adoptar el mercado.

En la Figura 1.4, que muestra el mercado para la región Asia Pacifico, se aprecia que el segmento de aplicaciones de tecnología de la información y la comunicación dominó el mercado en 2016 y se valoró en USD 229.2 millones. El crecimiento del segmento puede atribuirse en gran medida a la creciente adopción de la tecnología de Internet de las cosas (IoT).

La tecnología IoT requiere una configuración que comprende una gran cantidad de dispositivos interconectados. Estos dispositivos exigen componentes eficientes y rentables que faciliten un intercambio constante de información. Se espera que los semiconductores basados en GaN sean suficientes para el bajo consumo de energía y los requisitos de alta eficiencia para el correcto funcionamiento de los productos habilitados para IoT.



**Figura 1.4** Mercado de los dispositivos de Nitruro de Galio región Asia Pacífico por aplicación

Se espera que el segmento de defensa y aeroespacial crezca a la CAGR más alta del 20.9% de 2017 a 2025. El crecimiento se puede atribuir a las crecientes aplicaciones de la tecnología GaN en el sector de defensa y aeroespacial para aumentar el ancho de banda y la confiabilidad del rendimiento en las comunicaciones, guerra electrónica y radares, entre otros. Los circuitos integrados utilizados en las placas de radar incorporan GaN que permite una navegación eficiente, evita la colisión y permite el control del tráfico aéreo en tiempo real [13].

El grupo Furukawa Electric, a través de su equipo de investigación y desarrollo, ha desarrollado alrededor de 150 patentes (110 en Japón) sobre materiales, técnicas de fabricación y dispositivos basados en tecnologías relacionadas con el crecimiento de cristales GaN.

En las últimas décadas, Furukawa Electric ha establecido alianzas estratégicas para desarrollar más aplicaciones que utilicen la tecnología que han estado desarrollando. En junio del año 2009 Furukawa Electric se asoció con Fuji Electric con el objetivo de desarrollar dispositivos MOSFET y SBD (diodo de barrera Schottky) utilizando GaN en sustratos de Si. En el año 2014, Furukawa Electric y Transphorm, consolidaron una alianza estratégica con el objetivo de desarrollar productos relacionados con la tecnología GaN.

La necesidad de desarrollar nuevas aplicaciones para la tecnología de GaN, y una posible colaboración con Furukawa México para la fabricación de estos dispositivos, son los principales motivantes para el desarrollo de este trabajo.

### **1.3 Objetivos**

El principal objetivo de este trabajo es llevar a cabo un estudio de las propiedades eléctricas y ópticas del semiconductor de banda ancha GaN, así como el desarrollo de un dispositivo electrónico.

Para el desarrollo de este trabajo se plantearon los siguientes objetivos específicos con la finalidad de fabricar un dispositivo tipo Schottky:

1. Estudio de los contactos Al/GaN y Au/GaN obtenidos por evaporación térmica de los metales Al y Au, y su selección en base a su desempeño como contacto tipo Schottky.
2. Estudiar el efecto de las áreas de los contactos sobre las características corriente-voltaje. Análisis de los resultados para determinar aspectos idóneos para la optimización de las propiedades del diodo tipo Schottky.
3. Estudiar el efecto de las geometrías sobre las características del diodo tipo Schottky.

## CAPITULO 2

### 2.1 Nitruros del Grupo III

Los semiconductores son un grupo de materiales que tienen conductividades eléctricas intermedias entre metales y aislantes. Es significativo que la conductividad de estos materiales pueda variar en órdenes de magnitud mediante cambios en la temperatura, la excitación óptica y el contenido de impurezas. Esta variabilidad de las propiedades eléctricas hace que los materiales semiconductores sean opciones naturales para las investigaciones de dispositivos electrónicos.

Algunos materiales semiconductores se encuentran en la columna IV y las columnas vecinas de la tabla periódica. Los semiconductores de la columna IV, silicio y germanio, se denominan semiconductores elementales porque están compuestos de especies únicas de átomos. Además de los materiales elementales, los compuestos de los átomos de la columna III y de la columna V, así como ciertas combinaciones de II y VI y de IV, forman los semiconductores compuestos.

(a)	II	III	IV	V	VI
		B	C	N	
		Al	Si	P	S
	Zn	Ga	Ge	As	Se
	Cd	In		Sb	Te
(b)	Elemental	IV compounds	Binary III-V compounds	Binary II-VI compounds	
	Si	SiC	AlP	ZnS	
	Ge	SiGe	AlAs	ZnSe	
			AlSb	ZnTe	
			GaN	CdS	
			GaP	CdSe	
			GaAs	CdTe	
			GaSb		
			InP		
			InAs		
			InSb		

**Tabla 2.1** Materiales semiconductores comunes: (a) elementos químicos presentes en materiales semiconductores; (b) semiconductores elementales y compuestos [14].

Como indica la Tabla 2.1, hay numerosos materiales semiconductores. El semiconductor elemental Ge fue ampliamente utilizado en los primeros días del desarrollo

de semiconductores para transistores y diodos. El silicio se utiliza para la mayoría de los rectificadores, transistores y circuitos integrados (IC). Sin embargo, los compuestos se usan ampliamente en dispositivos de alta frecuencia y dispositivos que requieren la luz de emisión o absorción.

Los compuestos de dos elementos (binarios) III-V como GaN, GaP y GaAs son comunes en los diodos emisores de luz (LEDS). Los compuestos de tres elementos (ternarios) como GaAsP y los compuestos de cuatro elementos (cuaternarios) como InGaAsP se pueden producir para proporcionar una mayor flexibilidad en la elección de las propiedades de los materiales.

Una de las características más importantes de un semiconductor, que lo distingue de metales y aislantes, es su banda prohibida. Esta propiedad determina, entre otras cosas, las longitudes de onda de las luces que pueden ser absorbidas o emitidas por el semiconductor [14].

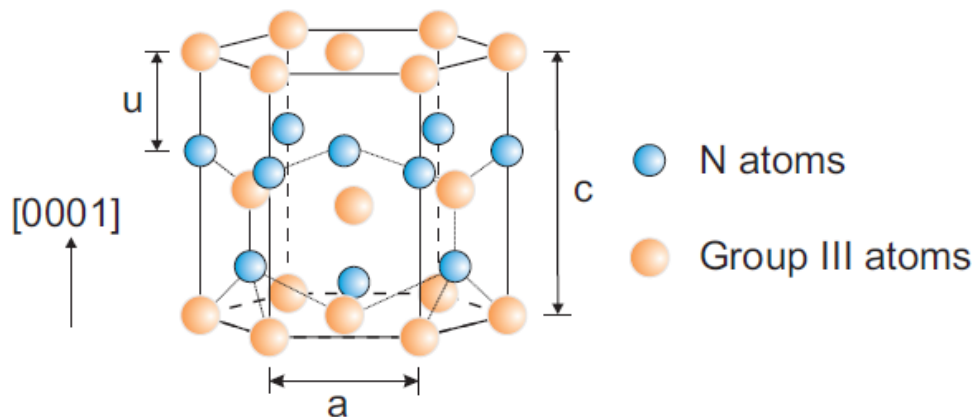
Los materiales de nitruro III (AlN, GaN, InN y sus soluciones sólidas) poseen una combinación única de propiedades físicas que garantizan su demanda en la microelectrónica y la optoelectrónica modernas. Entre estas propiedades esta un amplio ancho de banda prohibida, su rango de saturación de velocidad de electrones, el alto voltaje de ruptura, la alta conductividad térmica, la notable estabilidad química y térmica, etc. Debido a estas características, los nitruros ahora se consideran los materiales más prometedores para la fabricación de estructuras de transistores potentes de alta frecuencia capaces de funcionar a altas temperaturas y en entornos hostiles.

Los dispositivos de este tipo pueden utilizarse en sistemas de comunicación inalámbrica, sistemas de conmutación en la industria energética, detectores para la detección temprana de infecciones químicas o biológicas, etc. Sin embargo, las mayores expectativas en relación con el desarrollo de tecnologías de nitruro se relacionan con las fuentes de luz de estado sólido, incluyendo diodos emisores de luz de onda corta (LED) y láseres de rango visible y ultravioleta (UV), y también elementos UV básicos de LED "blancos" brillantes [15].

## 2.2 Estructura cristalina Nitruros del grupo III

Los nitruros del grupo III pueden cristalizar según tres tipos de estructura: wurtzita (hexagonal compacta) también denominada ( $\alpha$ -AlN,  $\alpha$ -GaN,  $\alpha$ -InN); zinc-blenda (cúbico) o esferalita, denominada ( $\beta$ -AlN,  $\beta$ -GaN,  $\beta$ -InN) y rocksalt (con estructura de cloruro sódico). Las dos primeras son las más comunes, siendo la estructura de wurtzita la más estable a temperatura ambiente, mientras que la zinc-blenda es metaestable. La estructura zinc-blenda cúbica se obtiene al crecer epitaxialmente sobre sustratos con estructura cristalina cúbica similar, como es el caso de GaAs, Si y MgO en la dirección (100) o como inclusiones cúbicas dentro de la estructura wurtzita [16].

La Figura 2.1 muestra una representación de la celda unitaria hexagonal de la estructura wurtzita, definida con dos parámetros de red característicos  $a$  y  $c$ , siendo  $a$  el lado del hexágono y  $c$  la altura del prisma hexagonal. Consiste en dos redes de tipo hexagonal compacto (HCP), cada una con uno de los dos tipos de átomos interconectados a lo largo de la dirección del eje principal de simetría del prisma hexagonal, con una separación de  $5/8c$ . El apilamiento de planos en este tipo de estructuras tiene un periodo de 2 capas atómicas (i.e. ABABAB...).



**Figura 2.1** Estructura wurtzita de los Nitruro del Grupo III (eje vertical en la dirección [0001]).

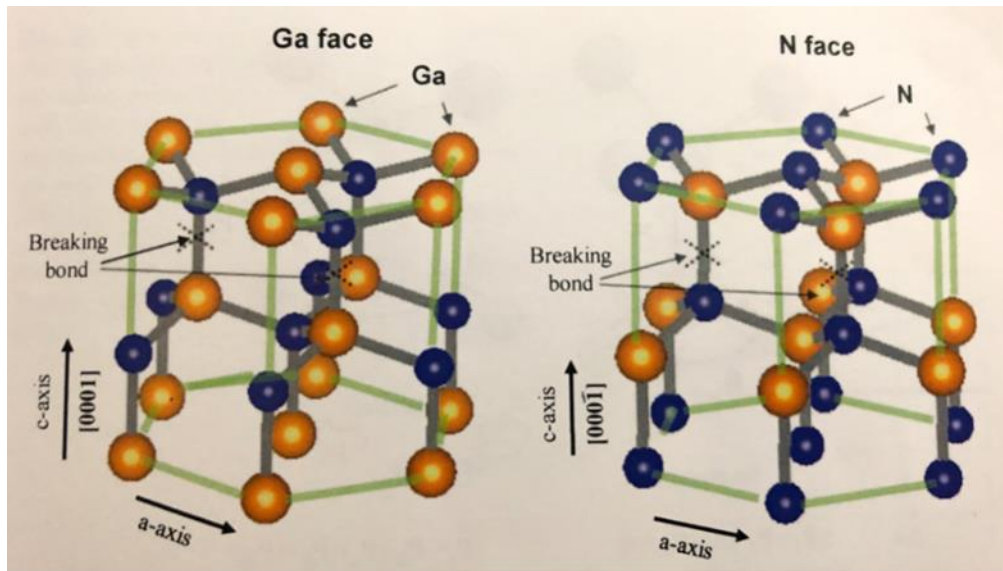
La principal característica de los nitruros, desde el punto de vista químico, es la alta energía de enlace entre el Nitrógeno y el elemento del grupo III, que es máxima en el AlN y disminuye progresivamente en el GaN y el InN. El carácter fuertemente covalente del enlace colabora, además, en que la estabilidad térmica y mecánica de los nitruros sea muy

elevada. Los parámetros de red de los tres binarios (GaN, AlN, InN) para las diferentes estructuras se exponen en la Tabla 2.2.

	Parámetros de red (Å)	$E_g$ (300K) (eV)
$\beta$ -AlN	$a = 4.38$	5.11 (teórico)
$\alpha$ -AlN	$a = 3.112 \quad c = 4.982$	6.2
$\beta$ -GaN	$a = 4.52$	3.2
$\alpha$ -GaN	$a = 3.189 \quad c = 5.185$	3.39
$\beta$ -InN	$a = 4.98$	2.2 (teórico)
$\alpha$ -InN	$a = 3.548 \quad c = 5.705$	1.89, 0.9

**Tabla 2.2** Parámetros de red y energía de gap de los nitruros del grupo III a temperatura ambiente.

El cristal de GaN tiene diferentes caras perpendiculares al eje  $c$  como se muestra en la Figura 2.2.



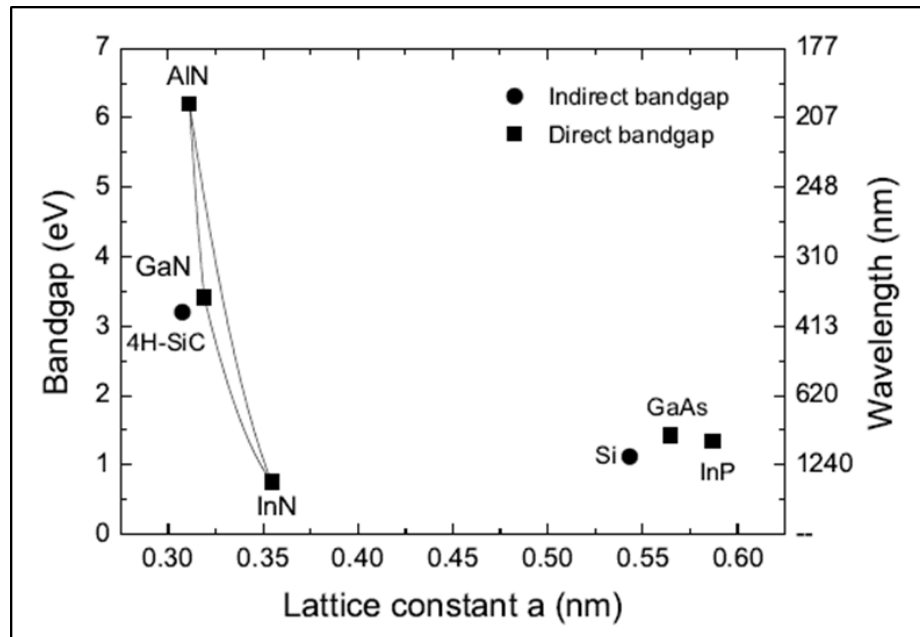
**Figura 2.2** Estructura cristalina hexagonal asimétrica de GaN a lo largo del eje  $c$ , donde aparece la cara Ga o N en la superficie del cristal

Enfocando los enlaces de ruptura débiles en la Figura 2.2, se puede ver la dirección opuesta de enlace de átomos de Ga a N en las Figuras izquierda y derecha. Esto significa que el plano  $c$  de los cristales de GaN tiene cara de Ga o cara N en la cara de corte, lo que lleva a las diferentes características eléctricas. Se reporta que cara-Ga generalmente se obtiene mediante el crecimiento de MOCVD sobre el sustrato de zafiro del plano  $c$ , mientras que MBE puede lograr la cara- N bajo algunas preparaciones específicas.

Dado que el nitrógeno tiene mayor electronegatividad que el galio, los átomos de Ga y N tienen características aniónicas (+) y catiónicas (-), respectivamente, lo que provoca polarización eléctrica. Aunque la polarización se cancela dentro del material, la asimetría en la cara de corte surge una polarización específica a lo largo del eje  $c$ , que se denomina polarización espontánea [17].

### 2.3 Propiedades Nitruros del grupo III

Los materiales de banda ancha, particularmente los nitruros del Grupo III como GaN, AlGaN, InGaN, etc., han atraído mucha atención debido a varias ventajas potenciales en comparación con los semiconductores convencionales. Estas ventajas surgen de las propiedades físicas básicas del material asociado con la estructura cristalina. La banda prohibida directa de estos materiales y sus aleaciones brinda la posibilidad de ser utilizados no solo para aplicaciones electrónicas sino también para aplicaciones ópticas.



**Figura 2.3** Energía de banda prohibida versus constante de red a 300 K para semiconductores convencionales de banda ancha y también InN.

La Figura 2.3 muestra la banda prohibida en función de la constante de la red  $a$  para los semiconductores convencionales Si, GaAs, InP, incluidos los materiales de banda ancha SiC, GaN y AlN, teniendo en cuenta también a InN, es obvio que los nitruros del Grupo

III cubren un intervalo de banda de 0.7 a 6.2 eV correspondiente a longitudes de onda en el rango visible hasta UV profundo.

<b>Properties</b>	<b>GaN</b>	<b>AlN</b>	<b>InN</b>	<b>4H-SiC</b>	<b>Si</b>	<b>GaAs</b>	<b>InP</b>
$E_g$ (eV)	3.4	6.2	0.7	3.2	1.12	1.43	1.35
$E_{Br}$ (MV/cm)	3.3	8.4	1.2	3.5	0.3	0.4	0.5
$v_s$ ( $\times 10^7$ cm/s)	2.5	2.16	1.8	2.0	1	1	1
$\mu$ ( $cm^2/(Vs)$ )	990	135	3.6	650	1500	8500	5400

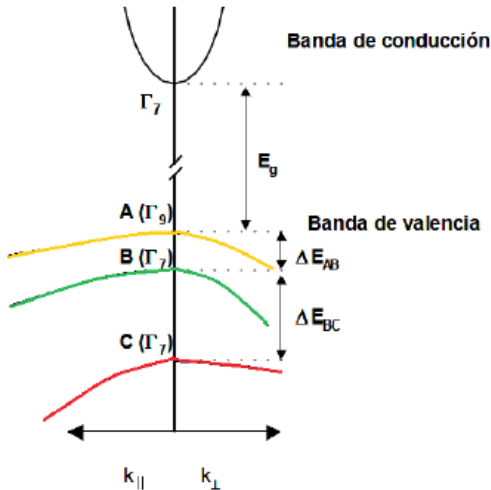
**Tabla 2.3** Propiedades Nitruros del Grupo III de tipo wurtzita y semiconductores convencionales a 300 K

La Tabla 2.3 muestra una descripción general y una comparación de las propiedades de material fundamentales más importantes para aplicaciones en electrónica de alta potencia y frecuencia.

Entre las energías de banda prohibida más altas, los materiales de nitruro del Grupo III exhiben campos de ruptura mucho mayores  $E_{Br}$  y velocidades de saturación de electrones  $v_s$  que los semiconductores convencionales. Por lo tanto, son mucho más adecuados para aplicaciones que requieren dispositivos electrónicos tanto de alto voltaje como de alta potencia [18].

Las estructuras de banda de GaN y otros nitruros de grupo tienen bandas directas en el centro de la zona de Brillouin (punto  $\Gamma$ ) [19].

La Figura 2.4 muestra el diagrama de bandas de los nitruros con estructura wurtzita, en torno al punto  $\Gamma$  de la red recíproca. Existen tres bandas de valencia debido a los desdoblamientos de la banda de valencia por las interacciones de spin-orbital y del campo cristalino. Las energías correspondientes a las sub-bandas de valencia A ( $\Gamma_9$ ), B ( $\Gamma_7$ ) y C ( $\Gamma_7$ ) mostradas en la Figura 2.4 vienen dadas, en relación con la intensidad de la interacción con el campo cristalino y el espín-órbita [20].



**Figura 2.4** Esquema del diagrama de bandas del GaN en la dirección paralela y perpendicular al eje  $c$ .

### 2.3.1 Propiedades Eléctricas

Las ventajas asociadas con una banda prohibida grande incluyen voltajes de ruptura relativamente altos, la capacidad de sostener grandes campos eléctricos, baja generación de ruido y funcionamiento a alta temperatura y potencia. Una alta conductividad térmica, grandes campos de ruptura eléctrica y resistencia a entornos hostiles también respaldan los nitruros del grupo III como verdaderos materiales de elección para aplicaciones de dispositivos. El transporte de electrones en semiconductores, incluidos los nitruros, puede considerarse en condiciones de campo eléctrico bajo y alto. En campos eléctricos suficientemente bajos, la energía obtenida por los electrones del campo eléctrico aplicado es pequeña en comparación con la energía térmica de los electrones, y, por lo tanto, la distribución de energía de los electrones no se ve afectada por un campo eléctrico bajo. Dado que las tasas de dispersión que determinan la movilidad de los electrones dependen de la función de distribución de electrones, la movilidad de los electrones permanece independiente del campo eléctrico aplicado, y se obedece la ley de Ohm. Cuando el campo eléctrico aumenta hasta un punto donde la energía obtenida por los electrones del campo externo ya no es insignificante en comparación con la energía térmica del electrón, la función de distribución de electrones cambia significativamente desde su valor de equilibrio. Estos electrones se convierten en electrones calientes caracterizados por una temperatura de electrones mayor que la temperatura de la red [20].

El efecto Hall es la técnica más utilizada para medir las propiedades de transporte y evaluar la calidad de las capas epitaxiales. Para materiales semiconductores, mide la concentración del portador, su tipo y la movilidad del portador. Más específicamente, las mediciones de Hall dependientes de la temperatura en un amplio rango (4.2 - 300K) brindan información sobre impurezas, imperfecciones, uniformidad, mecanismo de dispersión, etc. El coeficiente de Hall y la resistividad se determinan experimentalmente y luego se relacionan con los parámetros eléctricos a través de  $R_H = r_H/ne$  y  $\mu_H = R_H/\rho$ , donde  $n$  es la concentración del portador libre,  $e$  es la unidad de carga eléctrica,  $\mu_H$  es la movilidad Hall, y  $r_H$  es el factor de dispersión de Hall. La movilidad de arrastre,  $\mu$ , es la velocidad promedio por unidad de campo eléctrico en el límite del campo eléctrico cero y está relacionada con la movilidad de Hall a través del factor de dispersión de Hall por  $\mu_H = r_H\mu$ . El factor de dispersión de Hall depende de los detalles de los mecanismos de dispersión en juego, lo que limita la velocidad de arrastre. A medida que los portadores viajan a través de un semiconductor, se encuentran con varios mecanismos de dispersión que gobiernan la movilidad del portador en el sistema electrónico. El parámetro para caracterizar los diversos mecanismos de dispersión es el tiempo de relajación  $\tau$ , que determina la tasa de cambio en el momento de los electrones a medida que se mueven en el cristal semiconductor. La movilidad está relacionada con el tiempo de relajación por

$$\mu = \frac{q\langle\tau\rangle}{m^*}$$

donde  $m^*$  es la masa efectiva del electrón,  $q$  es la carga electrónica y  $\langle\tau\rangle$  es el tiempo de relajación promediado sobre la distribución energética de los electrones. El tiempo de relajación total,  $\tau_T$ , cuando varios mecanismos de dispersión están operativos está dado por la regla de Matthiessen

$$\frac{1}{\tau_T} = \sum_i \frac{1}{\tau_i}$$

donde  $i$  representa cada proceso de dispersión. El principal mecanismo de dispersión que generalmente gobierna el transporte de electrones en los semiconductores III-V también es válido para los nitruros del grupo III. Se enumeran brevemente de la siguiente manera:

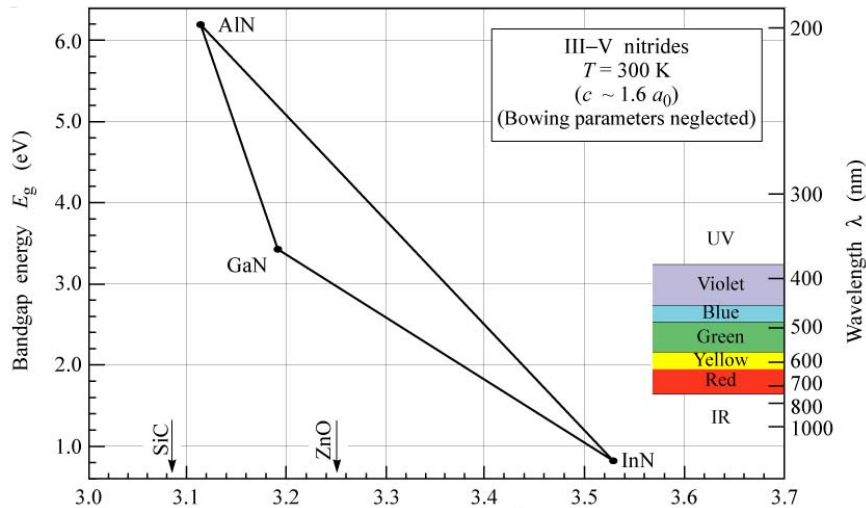
1. La dispersión de impurezas ionizadas se debe a la desviación de los portadores libres por el potencial de Coulomb de largo alcance de los centros cargados causados por defectos o impurezas. Esto puede considerarse como una perturbación local del borde de la banda, que afecta el movimiento del electrón.
2. La dispersión de fonones longitudinales-ópticos polares (LO) es causada por la interacción de una carga en movimiento con un campo eléctrico inducido por la polarización eléctrica asociada con la vibración reticular debido a la naturaleza iónica de los enlaces en semiconductores polares como los nitruros.
3. Dispersión de fonones acústicos a través del potencial de deformación que surge del cambio de energía del borde de la banda inducido por la tensión asociada con los fonones acústicos, donde la tasa de dispersión aumenta con el vector de onda de los fonones.
4. La dispersión piezoeléctrica surge de los campos eléctricos que son producidos por deformación asociada con los fonones en un cristal sin simetría de inversión, como los nitruros de banda ancha.
5. Debido a la alta densidad de dislocaciones y defectos nativos inducidos por las vacantes de nitrógeno en GaN, la dispersión por dislocación y la dispersión a través de las vacantes de nitrógeno también se han considerado como un posible mecanismo de dispersión. La dispersión por dislocación se debe al hecho de que se introducen centros aceptores a lo largo de las líneas de dislocación, que capturan electrones de la banda de conducción en un semiconductor de tipo n. Las líneas de dislocación se cargan negativamente y se forma una región de carga espacial alrededor de ellas, que dispersa los electrones que viajan a través de las dislocaciones, reduciendo así la movilidad.

La movilidad de electrones en GaN es uno de los parámetros más importantes asociados con el material, este parámetro tiene un gran impacto en los dispositivos. Este

parámetro ha sido objeto de estudios intensivos en los últimos años, tanto desde el punto de vista experimental como teórico [21].

### 2.3.2 Propiedades Ópticas

Las propiedades ópticas de un semiconductor son de gran importancia debido a la amplia gama de información útil que se puede obtener en el intento de comprender las propiedades de los semiconductores, especialmente el material de banda prohibida directa para aplicaciones optoelectrónicas. Para semiconductores ideales sin defectos, las transiciones ópticas se producen entre la banda de conducción y la banda de valencia, incluidos los efectos excitónicos debidos a la interacción de Coulomb [21].



**Figura 2.5** Energía de ancho de banda vs constante de red de semiconductores de nitruro III a temperatura ambiente [22].

Los Nitruros del grupo III (GaN, AlN e InN) y sus aleaciones, han sido considerados durante muchos años como semiconductores ideales para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, que funcionan en el límite azul-ultravioleta (UV). El principal atractivo de estos materiales reside en el hecho de que todos poseen una brecha de energía directa que cubren un amplio espectro de energías, desde los 1.9 eV (rojo) del InN, pasando por 3.4 eV (UVA) del GaN, hasta los 6.2 eV (UVC) del AlN [23].

## 2.4 Crecimiento de películas y cristales de GaN

La investigación de los sistemas de materiales GaN se incrementó alrededor de 1970. Su objetivo principal era producir (crecer) materiales a granel. El hecho de no producir materiales de tipo p en ese momento desanimó a la mayoría de los grupos de investigación, y sus actividades se desvanecieron después de unos años. Varios desarrollos importantes en los procedimientos de crecimiento a mediados y finales de la década de 1980 condujeron a un resurgimiento del interés de investigación en GaN y materiales relacionados. Akasaki et al. sugirieron un método para crecer capas de GaN monocristalinas lisas en un sustrato (es decir, hetero epitaxia en zafiro) usando una capa delgada intermedia de AlN crecida a baja temperatura (aproximadamente 30 nm). También descubrieron un método para producir GaN de tipo p Óhmico y demostraron un dispositivo de emisión de luz basado en la unión p-n. Esto dio como resultado el rápido desarrollo y comercialización de los emisores de luz de nitruro III (LED y láser). Usando heteroepitaxia sobre zafiro (más tarde SiC), Khan et al. también demostraron el gas electrónico bidimensional en la interfaz de las capas AlGaIn-GaN de alta calidad y los transistores de alta movilidad de electrones, a fines de la década de 1980. Esto condujo a un rápido desarrollo y mejora de los dispositivos electrónicos de potencia de microondas con una impresionante capacidad de manejo de potencia. Estos dispositivos se están empleando en aplicaciones comerciales [12].

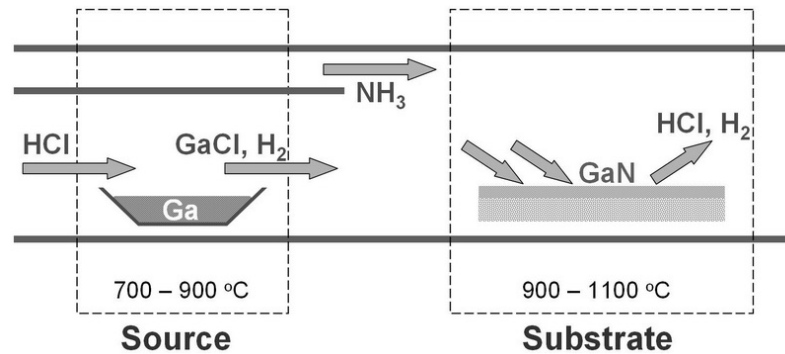
Hasta la fecha, una parte importante de la investigación de GaN ha utilizado heteroepitaxia porque los sustratos a granel III-N aún no están suficientemente desarrollados. Los sustratos de GaN a granel de gran tamaño y alta calidad siguen siendo mucho más caros que el zafiro o el SiC, que son una opción preferida para la heteroepitaxia de GaN. La necesidad futura de sustrato de GaN a granel se encuentra actualmente en debate. Estos sustratos proporcionan una clara ventaja de aumentar el tiempo de vida en la operación continua de los láseres debido a las reducidas dislocaciones (densidad de dislocación  $<10^6 \text{ cm}^{-3}$ ).

Para los diodos emisores de luz, la ventaja no es tan obvia. Sin embargo, probablemente sea cierto que todos los dispositivos basados en GaN se beneficiarían de alguna manera si la densidad de defectos disminuye gracias a la fabricación a granel de sustratos de GaN de alta calidad. Por lo tanto, el desarrollo de técnicas de crecimiento

adecuadas para producir sustratos de GaN a granel de alta calidad, a un costo accesible para dispositivos comerciales, se ha convertido en un área de investigación muy importante durante la última década [12, 24].

#### 2.4.1 Epitaxia en fase de vapor de hidruro (HVPE)

La epitaxia en fase de vapor de hidruro (HVPE) es el método de crecimiento conocido durante mucho tiempo, donde un precursor de vapor de haluro, como GaCl, y un hidruro, como NH<sub>3</sub>, se usan como precursores del grupo III y del grupo V, respectivamente. El crecimiento de HVPE puede lograr una alta tasa de crecimiento y una alta calidad de cristal debido a la estabilidad térmica de una fuente de haluro, el uso de materiales de partida de alta pureza sin contener carbono y una alta migración superficial de moléculas de haluro. Por lo tanto, el crecimiento de HVPE atrae la atención como un método de crecimiento de película gruesa [12].



*Figura 2.6 Representación esquemática del crecimiento de GaN por HVPE [25].*

La primera epitaxia en fase de vapor de hidruro (HVPE) de GaN fue reportada por Maruska et al. en 1969, usando un sustrato de zafiro. El monocristalino, incoloro, GaN se preparó mediante una técnica de crecimiento en fase de vapor utilizada previamente para preparar GaAs, GaP y GaSb. Estos cristales fueron los primeros especímenes reportados de GaN adecuados para una buena evaluación eléctrica y óptica de este compuesto. Se determinó que GaN tiene un intervalo de banda de energía directa de 3.39 eV, y que los cristales sin dopar preparados por este método tienen una concentración de electrones inherente muy alta, típicamente superior a  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ , lo que probablemente esté relacionado con una alta densidad de vacantes de nitrógeno. Pudieron preparar muestras de tipo p

utilizando Ge como dopante; pero este resultado se reportó difícil de reproducir y las muestras no fueron eléctricamente homogéneas [26].

En el caso de los métodos estándar de epitaxia en fase de vapor para el crecimiento de GaN (HVPE, MOCVD), las altas temperaturas de crecimiento ( $> 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y la alta concentración de amoníaco e hidrógeno reducen considerablemente la elección de posibles sustratos. La deposición de una o incluso múltiples capas intermedias de baja temperatura en el primer paso de la fabricación del dispositivo es esencial para permitir el uso de sustratos extraños como el zafiro, SiC, Si, GaAs o GaP. Incluso para la epitaxia de haz molecular (MBE) con temperaturas de crecimiento que son aproximadamente  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  inferiores a las del crecimiento de HVPE y MOCVD, la estabilidad de la superficie del sustrato a  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$  y bajo la influencia de los radicales de nitrógeno es un problema crítico. Para la producción de dispositivos a escala industrial, el sustrato debe cumplir otros criterios, como el tamaño mínimo (2"), las superficies atómicamente planas y la disponibilidad en grandes cantidades a un precio aceptable. El zafiro fue y sigue siendo el sustrato más común para la deposición de diodos emisores de luz (LED) basados en GaN, debido a su costo razonablemente bajo y amplia disponibilidad, y a pesar del hecho de que tiene un gran desajuste de coeficiente de expansión térmica y constante de red grande con respecto a GaN.

El desajuste de la constante de red y el desajuste térmico entre GaN y el sustrato dan como resultado un gran esfuerzo residual y una alta densidad de dislocación. Las dislocaciones pueden formar centros de recombinación no radioactiva y centros de dispersión de luz, lo que reduce en gran medida la eficiencia luminosa y la vida útil del dispositivo basado en GaN [27].

Se han realizado muchos esfuerzos para mejorar la calidad de los cristales de las capas heteroepitaxiales, principalmente en el caso específico de GaN en zafiro. Los casos de éxito incluyen una preparación adecuada de la superficie del sustrato, como nitruración, deposición de capas de intermedias de AlN o GaN a baja temperatura (LT), múltiples capas intermedias LT, sobrecrecimiento lateral epitaxial (ELOG), PENDEO-epitaxial, y otras técnicas. A pesar de todos estos esfuerzos, las capas de GaN heteroepitaxiales con densidades de dislocación inferiores a  $10^7\text{ cm}^{-2}$  no pueden obtenerse de manera práctica [28, 29, 30].

### **2.4.2 Crecimiento de cristales de GaN a granel por HVPE en semillas de GaN**

El método de epitaxia en fase de vapor de hidruro (HVPE) es, en la actualidad, el único que permite la producción en masa de sustratos de GaN independientes con calidad suficiente para la fabricación de diodos láser. Sin embargo, la tecnología de hacer los sustratos de GaN por HVPE es muy específica (las tecnologías basadas en GaN son generalmente "inusuales") porque es heteroepitaxia (en GaAs o zafiro) seguida de un proceso de despegue del sustrato que da un solo sustrato de GaN en una ejecución de HVPE (si se usa el reactor HVPE de oblea simple) [12].

Esto contrasta con el enfoque típico en la tecnología de semiconductores donde los sustratos (por ejemplo, Si o GaAs) se obtienen cortando y puliendo cristales individuales a granel de alta calidad típicamente crecidos a partir de líquidos estequiométricos por el método Czochralski o Bridgman. Para GaN, es difícil debido a sus condiciones extremas de fusión ( $T_M = 2,220\text{ °C}$  y  $P_M = 6.0\text{ GPa}$ ) [31].

Es posible crecer GaN por HVPE con tasas relativamente altas del orden de  $100\text{ }\mu\text{m/h}$  en varias direcciones cristalográficas, lo que sugiere que la cristalización a granel por este método debe ser alcanzable en principio. Existen pocos informes sobre el crecimiento de larga duración ( $> 10\text{ h}$ ) de GaN por HVPE en un área larga, zafiro plano o semillas de GaN (sustratos) que dan cristales de 2 pulgadas de diámetro con un grosor cercano a 10 mm. Sin embargo, el progreso (en términos de tamaño y calidad de los cristales) en la cristalización masiva de GaN por HVPE no es muy rápido, lo que se relaciona principalmente con limitaciones técnicas del método, como la deposición parasitaria de GaN de la semilla, la deposición de productos de reacción sólidos (principalmente  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) o agotamiento de la fuente líquida de galio [32].

### **2.4.3 MOVPE de alta tasa de crecimiento**

En la actualidad se puede crecer GaN en sustratos de zafiro con una densidad de dislocación baja de  $10^8\text{ cm}^{-3}$  mediante la epitaxia de fase de vapor orgánico-metal (MOVPE) a presión atmosférica mediante el uso de la técnica convencional de crecimiento en dos pasos [33]. La tecnología de alta tasa de crecimiento de GaN por MOVPE es prometedora para la obtención de una película gruesa de baja densidad de dislocación como alternativa de GaN a granel ya que la estructura del dispositivo puede crecer sucesivamente

en el mismo reactor. Muy recientemente, Tanaka et al. informó sobre un diodo emisor de luz (LED) InGaN en GaN de 100  $\mu\text{m}$  de espesor, que fue crecido por MOVPE con una tasa de crecimiento de hasta 56  $\mu\text{m}/\text{h}$  [34]. Hasta hace poco, la tasa de crecimiento de MOVPE GaN se había limitado a unos pocos micrómetros por hora en equipos de producción a gran escala a presión atmosférica.

La calidad de las películas delgadas de GaN crecidas por MOVPE usando capas intermedias de AlN muestran excelentes propiedades morfológicas, cristalinas y ópticas. Los parámetros claves de crecimiento necesarios para obtener películas de alta calidad son el grosor y la temperatura de deposición de la capa intermedia de AlN, así como la temperatura de crecimiento de GaN, el agrietamiento de la película de GaN y el sustrato pueden evitarse de manera efectiva utilizando una capa intermedia de AlN [35].

Durante el método de MOVPE ocurre una reacción parasitaria que genera partículas en fase de vapor, esta reacción es el factor limitante más probable de la tasa de crecimiento máxima de GaN y AlGaN. Se ha reportado por Matsumoto que, para reducir este efecto, desarrollo una inyección de gas de tres capas de alta velocidad de flujo. Al emplear esta inyección de gas de tres capas, GaN creció con una tasa de crecimiento de hasta 28  $\mu\text{m}/\text{h}$  a presión atmosférica [36].

#### **2.4.4 Crecimiento amonotermal de GaN en condiciones amoniacaes básicas**

El método amonotermal se considera como un análogo del hidrotermal, donde se usa amoníaco supercrítico en lugar de agua como solvente y se pueden crecer nitruros en lugar de óxidos. En primer lugar, el método amonotermal permite el crecimiento de semillas de alto diámetro con cristalinidad perfecta de alta calidad. En segundo lugar, es un proceso muy controlable y reproducible a temperaturas y presiones relativamente bajas. En tercer lugar, permite el crecimiento de muchos cristales durante un proceso con costos mínimos de material (sistema cerrado). Se ha propuesto el uso de amoníaco supercrítico para bajar la temperatura y disminuir la presión durante el proceso de crecimiento de nitruros [12].

Utilizando este método, Doradziński et al. reportan excelentes parámetros estructurales y un amplio espectro de propiedades eléctricas de cristales de GaN producidos a granel. En los cristales considerados, se alcanza una baja densidad de dislocación ( $5 \times 10^3$

cm<sup>-2</sup>). Al mismo tiempo, la red cristalina es extremadamente plana y la curva de balanceo es muy estrecha. Las excelentes propiedades estructurales de los cristales, combinadas con las ventajas del método (multiplicación de semillas, repetitividad, escalabilidad), nos permiten afirmar que el Método AMMONO es una tecnología extremadamente prometedora para fabricar sustratos GaN de gran diámetro y alta calidad. La alta escalabilidad confirmada del método jugará un papel crucial para mejorar aún más su rentabilidad cuando se implemente a escala industrial [37, 38].

## **2.5 Técnicas de caracterización**

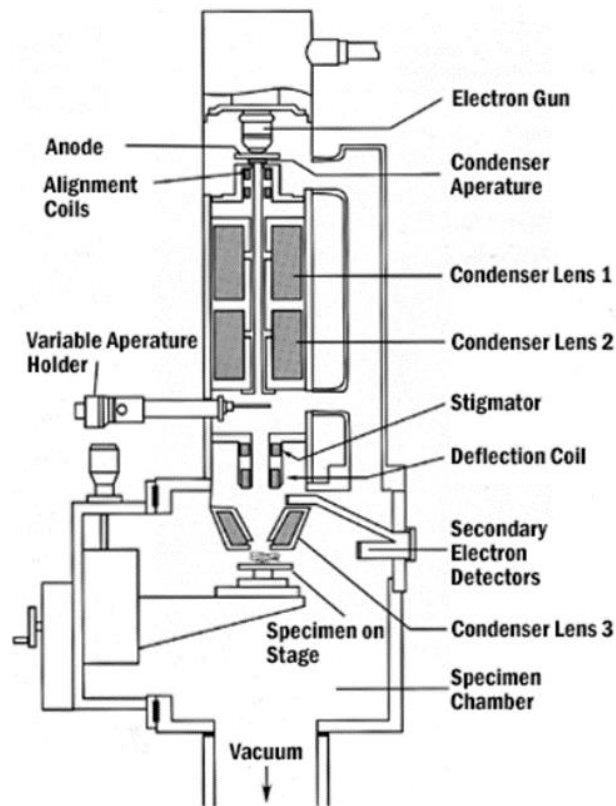
Existen varias técnicas importantes de caracterización de semiconductores, que cubren sus propiedades estructurales, ópticas y eléctricas. Difracción de rayos X, microscopía electrónica (TEM y SEM), espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDX), espectroscopia de electrones de Auger (AES), espectroscopia de masas de iones secundarios (SIMS), retro-dispersión de Rutherford (RBS) y microscopía de sonda de barrido (SPM) se utilizan como técnicas de caracterización estructural. Las técnicas de caracterización óptica incluyeron espectroscopia de fotoluminiscencia (PL), espectroscopia de cátodo-luminiscencia (CL), mediciones de reflectancia y absorbancia, elipsometría, espectroscopia Raman y espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (FTIR). Las técnicas de caracterización eléctrica consisten en la medición de resistividad, la medición de efecto Hall, las técnicas de capacitancia, mediciones de corriente-voltaje, y el perfil de capacitancia electroquímica de voltaje (ECV). Estas técnicas de caracterización son fundamentales para comprender las propiedades más importantes de varios semiconductores como componentes básicos de muchos dispositivos electrónicos y optoelectrónicos [39].

### **2.5.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

El microscopio electrónico de barrido (SEM) es uno de los instrumentos más versátiles disponibles para el examen y análisis de la morfología de la microestructura y las caracterizaciones de la composición elemental. La muestra se bombardea utilizando electrones de alta energía, y se analizan los electrones (y los rayos X cuando el microscopio está equipado con detector de rayos X) salientes. Estos electrones/rayos X salientes brindan

información sobre topografía, morfología, composición, orientación de granos, información cristalográfica, etc. de un material. La morfología indica la forma y el tamaño, mientras que la topografía indica las características de la superficie de un objeto, su textura, suavidad o rugosidad. Asimismo, composición significa elementos y compuestos que constituyen el material, mientras que cristalografía significa el arreglo de los átomos en los materiales [41].

Los principales componentes de SEM son, fuente de electrones, columna donde los electrones viajan con lentes electromagnéticas, detector de electrones, cámara de muestra y computadora y pantalla para ver las imágenes.



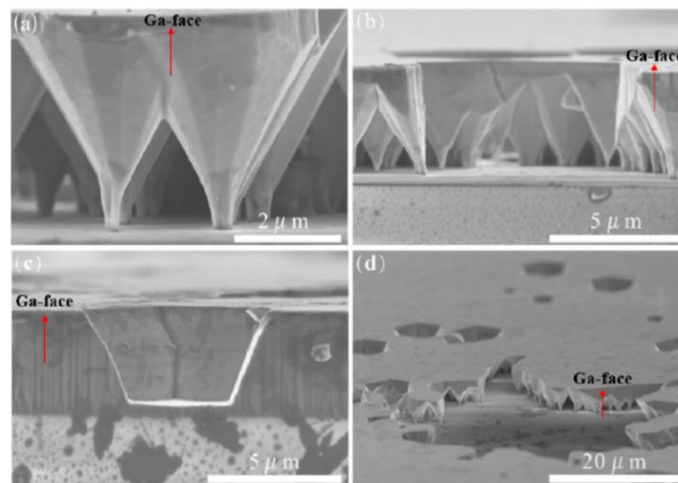
**Figura 2.7** Esquema Microscopio de Barrido Electrónico [42].

Los electrones se producen en la parte superior de la columna, se aceleran hacia abajo y pasan a través de una combinación de lentes y aberturas para producir un haz enfocado de electrones que golpea la superficie de la muestra. La muestra se monta en una base en el área de la cámara y, a menos que el microscopio esté diseñado para funcionar a bajos vacíos, tanto la columna como la cámara se evacúan mediante una combinación de

bombas. La posición del haz de electrones en la muestra se controla mediante bobinas de exploración situadas por encima de la lente del objetivo. Estas bobinas permiten escanear el haz sobre la superficie de la muestra. Este escaneo del haz, como sugiere el nombre del microscopio, permite recopilar información sobre un área definida en la muestra. Como resultado de la interacción electrón-muestra, se producen varias señales. Estas señales son detectadas por los detectores apropiados.

El microscopio electrónico de barrido (SEM) produce imágenes escaneando la muestra con un haz de electrones de alta energía. A medida que los electrones interactúan con la muestra, producen electrones secundarios, electrones retro-dispersados y rayos X característicos. Estos detectores recopilan estas señales para formar imágenes que luego se muestran en la pantalla de la computadora. Cuando el haz de electrones golpea la superficie de la muestra, penetra la muestra a una profundidad de unas pocas micras, dependiendo del voltaje de aceleración y la densidad de la muestra. Muchas señales, como electrones secundarios y rayos X, se producen como resultado de esta interacción dentro de la muestra [43].

SEM es el aparato líder que es capaz de lograr una imagen visual detallada de una partícula con una resolución espacial y de alta calidad de unos pocos nm. Aunque SEM se usa solo para visualizar imágenes de superficie de un material y no proporciona ninguna información interna, todavía se considera como un poderoso instrumento que puede usarse para caracterizar las características cristalográficas, magnéticas y eléctricas de la muestra [41].



**Figura 2.8** Imágenes de SEM sección transversal de capa de GaN

En la Figura 2.8 se pueden observar ejemplos de imágenes de SEM de sección transversal de la capa de GaN crecida con MOCVD grabada con fosfato durante 14 minutos a 230 °C. En la imagen (a) podemos observar las estructuras piramidales en la cara polar de nitrógeno (N-polar) de MOCVD-GaN, en la imagen (b) las estructuras de GaN alrededor del pozo de grabado alcanzan el sustrato de zafiro, en (c) el pozo de grabado que no alcanza el sustrato de zafiros, y (d) una imagen a vista de pájaro del sustrato grabado [27].

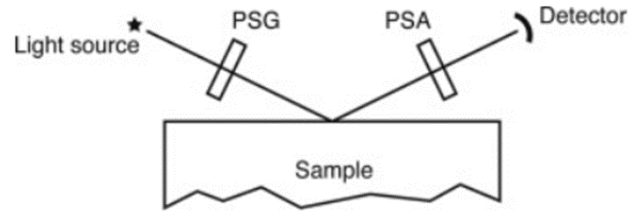
### 2.5.2 Elipsometría

La elipsometría es una técnica que se usa a menudo para medir el grosor de una película delgada. En términos generales, la medición se realiza polarizando un haz de luz incidente, reflejándolo en una superficie de muestra lisa en un ángulo oblicuo grande y luego volviendo a polarizar el haz de luz antes de su medición de intensidad. Dado que el proceso de reflejar la luz de una superficie de muestra lisa generalmente cambia la luz polarizada linealmente en luz polarizada elípticamente, la técnica se ha denominado "elipsometría".

Las primeras medidas de elipsometría (1890) se usaron para determinar las constantes ópticas (índice de refracción  $n$  y coeficiente de extinción  $k$ , o equivalente, coeficiente de absorción  $\alpha$ ) para varios materiales. En la década de 1940 se descubrió que una medición de elipsometría de anulación de longitud de onda única podía usarse para determinar el grosor de ciertas películas delgadas con mucha precisión. Desde ese momento, la elipsometría de longitud de onda variable se ha utilizado en escaneo espectral y configuraciones multicanal; estos datos adicionales permiten la extracción simultánea del espesor de la película y las curvas de dispersión de las constantes  $n$ ,  $k$  del material. La elipsometría espectroscópica se ha convertido así en la metodología estándar para caracterizar películas delgadas para una variedad de aplicaciones industriales, incluidos semiconductores y dispositivos fotovoltaicos.

Las mediciones de elipsometría producen valores para los parámetros elipsométricos  $\Psi$  y  $\Delta$  que no son útiles por sí mismos, modelos adecuados y computadoras deben usarse para obtener cantidades útiles, como el espesor de película delgada o las dispersiones de las constantes ópticas de los materiales. El advenimiento de las computadoras modernas dio como resultado la invención de varios tipos de elipsómetros

espectroscópicos y la creación de programas de análisis más realistas necesarios para interpretar los datos de elipsometría espectroscópica.



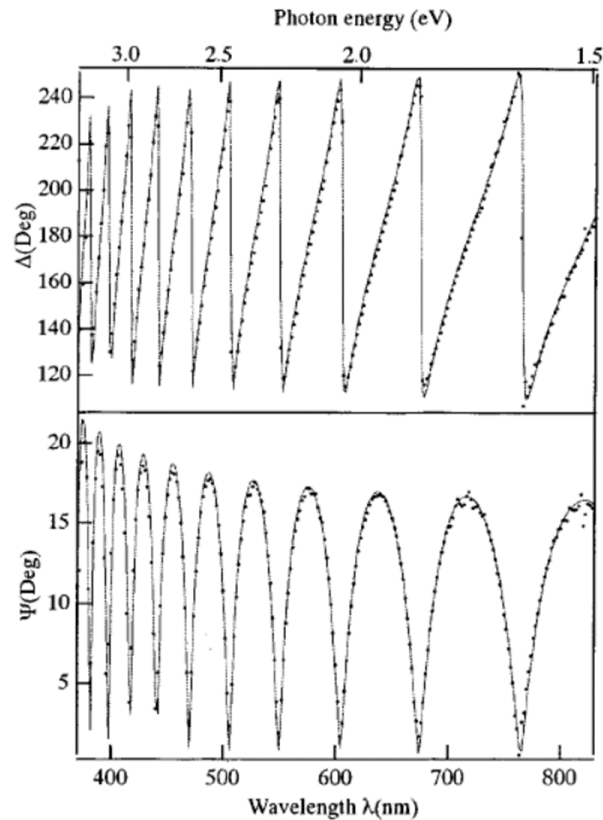
**Figura 2.9** Diagrama esquemático de un elipsómetro. El PSG es el generador de estado de polarización y el PSA es el analizador de estado de polarización.

Cualquier elipsómetro (Figura 2.9) consta de cinco elementos: (1) una fuente de luz, (2) un generador de estado de polarización (PSG), (3) una muestra, (4) un analizador de estado de polarización (PSA) y (5) un detector de luz. La fuente de luz puede ser monocromática, como un láser, o banda ancha, como una o dos lámparas, por ejemplo, de tungsteno y de arco de xenón o mercurio; la primera para la región visible y la segunda para la región UV. El PSG y el PSA son instrumentos ópticos que cambian el estado de polarización de un haz de luz que los atraviesa y contienen elementos ópticos como polarizadores, retardadores y moduladores fotoelásticos. En la mayoría de los experimentos de elipsometría, la luz del PSG se refleja desde la superficie de la muestra en un gran ángulo de incidencia  $\phi$ , relativamente el perpendicular de la superficie. Los elipsómetros espectroscópicos utilizan una fuente de luz blanca y un monocromador (antes del PSG o después del PSA) para seleccionar longitudes de onda específicas. Algunos elipsómetros espectroscópicos capturan la luz blanca del PSA en una matriz de detectores, permitiendo así que todo el espectro se recolecte simultáneamente.

Cualquier elipsómetro solo medirá las características de la luz reflejada o transmitida a través de la muestra. Los elipsómetros no miden directamente los espesores de película o las funciones ópticas de los materiales, aunque estos parámetros a menudo se pueden inferir con mucha precisión a partir de las mediciones de elipsometría [44].

La técnica de elipsometría es esencial en el diseño de dispositivos opto-eléctricos ya que nos proporciona información de espesores de películas y sus propiedades ópticas. Esta técnica fue utilizada por G. Yu et al. en su publicación “Propiedades ópticas de la

estructura de wurtzita GaN en zafiro alrededor del borde de absorción fundamental (0.78–4.77 eV) por elipsometría espectroscópica y el método de transmisión óptica”. La elipsometría espectroscópica (SE) junto con el método de transmisión óptica se utilizó con éxito para determinar el índice de refracción  $n$  y el coeficiente de absorción  $\alpha$  de la película de nitruro de galio sin dopar en el rango espectral de 0.78 a 4.77 eV de energía fotónica [45].



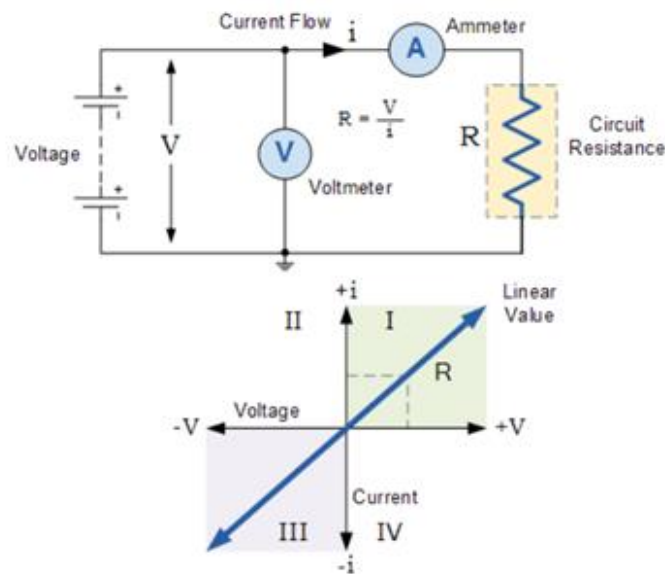
**Figura 2.10** Espectros medidos (línea de puntos) y calculados (línea continua)  $\Delta$  y  $\Psi$  de GaN en un sustrato de zafiro en la parte de interferencia del espectro [45].

### 2.5.3 Mediciones de Corriente-Voltaje

Las curvas características de corriente-voltaje o simplemente curvas I-V de un dispositivo o componente eléctrico, son un conjunto de curvas gráficas que se utilizan para definir o analizar su funcionamiento dentro de un circuito eléctrico. Como su nombre lo indica, las curvas características I-V muestran la relación entre la corriente que fluye a través de un dispositivo electrónico y el voltaje aplicado a través de sus terminales.

Las curvas características I-V se usan generalmente como una herramienta para determinar y comprender los parámetros básicos de un componente o dispositivo y también se pueden usar para modelar matemáticamente su comportamiento dentro de un circuito electrónico. Existe un número infinito de curvas características I-V que representan las diversas entradas o parámetros y, como tal, podemos mostrar una familia o grupo de curvas en el mismo gráfico para representar los diversos valores. Por ejemplo, las características de corriente-voltaje de un diodo que opera tanto en sus regiones directas como inversa.

Las características estáticas de corriente-voltaje de un componente o dispositivo no siempre son una línea recta. Tomemos, por ejemplo, las características de una resistencia de valor fijo, esperaríamos que sean razonablemente rectas y constantes dentro de ciertos rangos de corriente, voltaje y potencia, ya que es un dispositivo lineal u óhmico. Sin embargo, hay otros elementos resistivos como LDR, termistores, varistores e incluso la bombilla, cuyas curvas IV características no son líneas rectas o lineales, sino curvas o con forma y, por lo tanto, se llaman dispositivos no lineales porque sus resistencias no son resistencias lineales.



**Figura 2.11** Curvas características I-V de una resistencia ideal

Si el voltaje de suministro eléctrico (V) aplicado a las terminales de un elemento resistivo óhmico (R) fuera variado, y se midiera la corriente resultante, esta corriente se caracterizaría como:  $I = V/R$ , siendo una de las ecuaciones de la Ley de Ohm. Sabemos por la Ley de Ohm que a medida que aumenta el voltaje a través de la resistencia también lo

hace de manera lineal la corriente que fluye a través de él. En la Figura 2.11 se muestra la relación entre el voltaje y la corriente de una resistencia ideal.

Las curvas características de I-V de la Figura 2.11 definen el elemento resistivo, en el sentido de que, si aplicamos cualquier valor de voltaje al elemento resistivo, la corriente resultante se puede obtener directamente de las características I-V. Como resultado, la potencia disipada (o generada) por el elemento resistivo también se puede determinar a partir de la curva I-V. Si el voltaje y la corriente son de naturaleza positiva, entonces las curvas características I-V serán positivas en el cuadrante I, si el voltaje y, por lo tanto, la corriente es de naturaleza negativa, la curva se mostrará en el cuadrante III como se muestra.

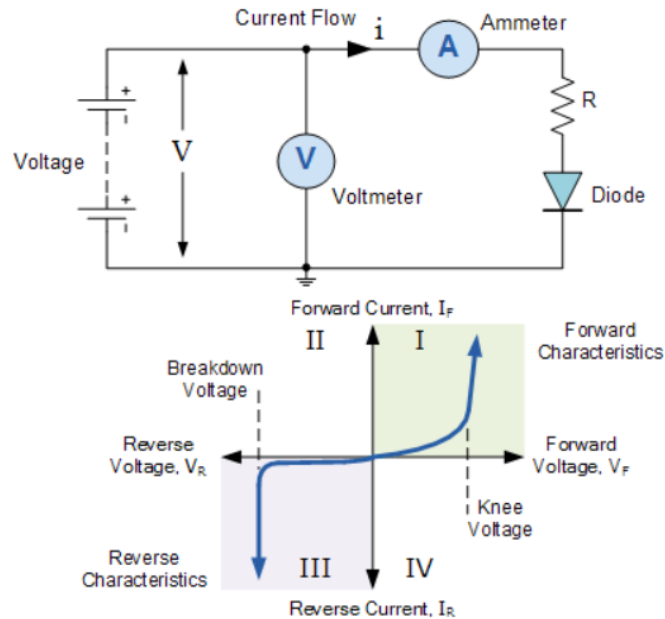
En una resistencia pura, la relación entre voltaje y corriente es lineal y constante a una temperatura constante, de modo que la corriente ( $i$ ) es proporcional a la diferencia de potencial  $V$  multiplicada por la constante de proporcionalidad  $1/R$  dando  $i = (1/R) \times V$ . Luego, la corriente a través de la resistencia es una función del voltaje aplicado y podemos demostrar esto visualmente usando una curva de características IV. En este ejemplo, la corriente  $I$  contra la diferencia de potencial  $V$ , es una línea recta con pendiente constante  $1/R$  ya que la relación es lineal y óhmica. Sin embargo, las resistencias prácticas pueden exhibir un comportamiento no lineal bajo ciertas condiciones, por ejemplo, cuando se exponen a altas temperaturas.

Hay muchos componentes y dispositivos electrónicos que tienen características no lineales, es decir, su relación  $V/I$  no es constante. Los diodos semiconductores se caracterizan por características de voltaje de corriente no lineales, ya que la corriente que fluye a través de un diodo de silicio común polarizado directamente está limitada por las propiedades de la unión p-n.

Los dispositivos semiconductores, como los diodos, transistores y tiristores, se construyen utilizando uniones semiconductoras p-n conectadas entre sí y, como tales, sus curvas de características I-V reflejarán el funcionamiento de estas uniones. Entonces, estos dispositivos tendrán características I-V no lineales, a diferencia de las resistencias que tienen una relación lineal entre la corriente y el voltaje.

La función principal de un diodo semiconductor es la rectificación de AC a DC. Cuando un diodo está polarizado directamente (el potencial más alto está conectado a su

ánodo), pasará corriente. Cuando el diodo tiene polarización inversa (el mayor potencial está conectado a su cátodo), la corriente se bloquea. Entonces, una unión p-n necesita un voltaje de polarización de cierta polaridad y amplitud para que la corriente fluya. Este voltaje de polarización también controla la resistencia de la unión y, por lo tanto, el flujo de corriente a través de ella.



**Figura 2.12** Curvas características I-V de un diodo

Cuando el diodo está polarizado directamente, el ánodo positivo con respecto al cátodo, una corriente directa o positiva pasa a través del diodo y opera en el cuadrante superior derecho de sus curvas de características I-V como se muestra en la Figura 2.12. Comenzando en la intersección cero, la curva aumenta gradualmente hacia el cuadrante directo, pero la corriente directa y el voltaje son extremadamente pequeños. Cuando el voltaje directo excede el voltaje de barrera interna de las uniones p-n de los diodos, que para el silicio es de aproximadamente 0.7 voltios, se produce un incremento exponencial de los portadores minoritarios en los bordes de la unión de los dos lados y la corriente directa aumenta rápidamente para un aumento muy pequeño en el voltaje produciendo una curva no lineal.

Del mismo modo, cuando el diodo está polarizado en sentido inverso, el cátodo es positivo con respecto al ánodo, el diodo bloquea la corriente, excepto por una corriente de

fuga extremadamente pequeña, y opera en el cuadrante inferior izquierdo de sus curvas características I-V. El diodo continúa bloqueando el flujo de corriente a través de él hasta que el voltaje inverso a través del diodo se vuelve mayor que su punto de voltaje de ruptura, lo que resulta en una avalancha y en un aumento repentino de la corriente inversa que produce una curva descendente bastante lineal. Este punto de voltaje de ruptura inversa se usa con buenos resultados con los diodos Zener [46].

Las mediciones de corriente-voltaje de los dispositivos semiconductores convencionales son quizás las mediciones más simples y rutinarias realizadas, y pueden proporcionar información valiosa sobre la calidad de los materiales utilizados. Por ejemplo, si consideramos las características I-V de una estructura de diodos p-n, las uniones fuente-sustrato o drenaje-sustrato pueden proporcionar información útil sobre la calidad de la unión, como por ejemplo si hay defectos presentes (dan lugar a corrientes de generación-recombinación o grandes resistencias parásitas en serie para los contactos en las terminales fuente, drenaje o sustrato). Esto se ve fácilmente a partir de la relación corriente-voltaje en polarización directa dada por la suma de las corrientes de difusión ( $I_{DIFF}$ ) y recombinación ( $I_{GR}$ )

$$I_D = I_{DIFF} + I_{GR} = I_{D0} \left[ \exp\left(\frac{eV_D}{nk_B T}\right) - 1 \right] + I_{GR0} \exp\left(\frac{eV_D}{2k_B T}\right) \quad (1)$$

donde  $I_{D0}$  e  $I_{GR0}$  son las corrientes de difusión y recombinación de polarización cero respectivamente,  $n$  es un factor de idealidad (típicamente 1), y  $V_D$  es el voltaje intrínseco a través del diodo, que está dado por

$$V_D = V_{applied} - I_D R_{parasitic} \quad (2)$$

para Eq. (1), una gráfica de  $\ln(I_D)$  versus  $V_D$  nos permite separar los componentes de corriente de difusión y recombinación. De (Eq1) y (Eq2), también podemos usar las características I - V del diodo para determinar la resistencia parasitaria en serie con el diodo intrínseco. En la mayoría de los casos, este  $R_{parasitic}$  está dominado por la resistencia de contacto [47].

## **CAPITULO 3**

### **3.1 Dispositivos basados en Nitruro del Galio**

El nitruro de galio (GaN) es un material que se puede utilizar en la producción de diodos laser, diodos emisores de luz (LED), componentes RF, dispositivos de alta potencia, fotodetectores y celdas solares. El nitruro de galio (GaN) ha demostrado su capacidad de ser la tecnología de desplazamiento para semiconductores de silicio en conversión de potencia, RF y aplicaciones analógicas.

Desde los orígenes de la era de la electrónica hace más de cien años, los ingenieros de diseño de energía han estado buscando el interruptor ideal, uno que convierta rápida y eficientemente la energía eléctrica en un flujo controlado y útil de electrones. Primero vino el tubo de vacío, pero la ineficiencia, como se evidencia en el calor que generan, y su gran tamaño y alto costo, crearon límites para su uso final. Luego, a finales de los años 50, el transistor ganó un uso generalizado; con su pequeño tamaño y mejor eficiencia, vinieron a remplazar la tecnología de los tubos de vacío.

El silicio se convirtió rápidamente en el material de elección para el transistor semiconductor, no solo por sus propiedades eléctricas fundamentalmente superiores, sino que también era mucho menos costoso de producir que el tubo de vacío. El ascenso meteórico del transistor de silicio, y posteriormente los circuitos integrados, continuó durante las décadas de 1970 y 1980. La "Ley de Moore", que exigía duplicar el rendimiento del transistor (cada 2 años se duplicara el número de transistores en un circuito integrado) con un costo de reducción aproximadamente cada 18 meses, creó una batería sincronizada de nuevos productos con mayor rendimiento y menor costo para el deleite del consumidor.

Al igual que con el tubo de vacío, los MOSFET de potencia de silicio ahora han llegado al final del camino al ofrecer un mejor rendimiento a un costo en constante disminución. La búsqueda del interruptor ideal que tiene una velocidad de conmutación infinitamente rápida, sin resistencia eléctrica y un costo menor, no se ha detenido y han surgido nuevos materiales.

El principal candidato para llevar el rendimiento electrónico al siguiente nivel y una reactivación del impulso positivo de la Ley de Moore es el nitruro de galio. El nitruro de galio (GaN) tiene la capacidad de conducir electrones 1000 veces más eficientemente que el silicio [48].

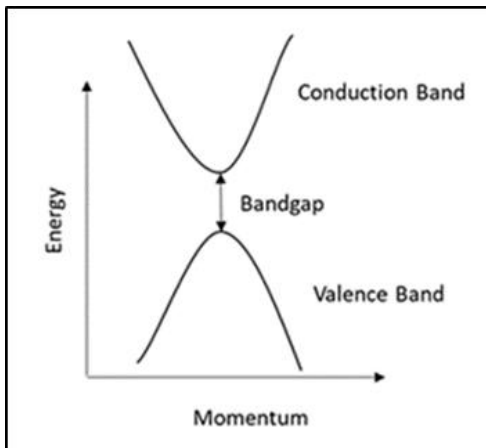
Las posibles aplicaciones del nitruro de galio que han sido desarrolladas o estudiadas se resumen en la Tabla 3.1.

Aplicación	Beneficios demostrados	Beneficios esperados
Laser	Aumenta la vida útil; corriente de umbral reducida; mayor potencia de salida; corriente de fuga reducida; conductividad térmica mejorada; dislocación reducida; difusión mejorada.	Mayor capacidad de potencia y densidad de potencia.
LED	Reducción de centros de recombinación no radiactiva; corriente de fuga reducida; conductividad térmica mejorada; eficiencia mejorada; disminución en la segregación asociada con dislocaciones; reducción de los efectos del envejecimiento causados por la electro-migración de metales a lo largo de las dislocaciones.	Mejoras en la eficiencia cuántica interna (IQE); mejora de eficiencia a longitudes de onda más largas; incrementos en potencias de salida.
RF FET	Mayor movilidad del canal; mayor carga del canal, mayor movilidad del canal x producto de carga; fuga de búfer reducida; estados superficiales reducidos.	Mayores frecuencias de operación; mayores potencias de operación; mayor confiabilidad.
Interruptores de alimentación y diodos.	Alto voltaje de ruptura; mayor velocidad de conmutación, mayor eficiencia; reducción del tiempo de recuperación inversa.	Mayor confiabilidad; menor resistencia de encendido; mayor capacidad de transporte de potencia; mayor movilidad del canal
Fotodetectores, celdas solares	Bajas corrientes oscuras en fotodetectores y celdas solares; operación del fotodetector en modo Geiger	Mejora en defectos; fotocorriente mejorada; eficiencia mejorada

**Tabla 3.1** Aplicaciones de nitruro de galio con sus beneficios demostrados y esperados [12]

### 3.2 Diodos laser

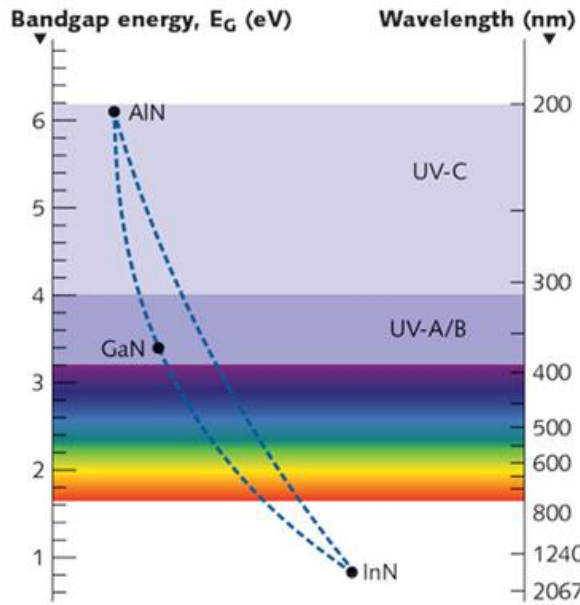
En la actualidad los diodos láser azul, verde y UV se han convertido en algo común. Estos láseres se están utilizando en una amplia gama de aplicaciones, desde reproductores de blue-ray hasta iluminación comercial y pantallas para soldadura de cobre. La longitud de onda de salida de un láser semiconductor se basa en la diferencia de energía entre las bandas de conducción y valencia del material.



*Figura 3.1 Diagrama de bandas*

Esta diferencia de energía se conoce como energía de banda prohibida, como se muestra en la Figura 3.1, y determina la energía del fotón. Dado que la energía de un fotón es inversamente proporcional a su longitud de onda, esto significa que una energía de banda prohibida más grande dará como resultado una longitud de onda de emisión más corta.

Los dispositivos semiconductores pueden diseñarse para tener una energía de banda prohibida específica mediante la combinación de varios elementos para formar aleaciones binarias, ternarias y cuaternarias. Estos semiconductores pueden tener su banda prohibida adaptando aún más la estequiometría en semiconductores ternarios y cuaternarios. Los diodos láser visibles se pueden producir a partir de una combinación de AlN, GaN e InN. La aleación resultante típicamente referida como GaN, se puede combinar teóricamente utilizando las siguientes fórmulas  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  y  $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$  para formar cualquier banda prohibida que se encuentre dentro del gráfico que se muestra en la Figura 3.2 [49].



*Figura 3.2 Diagrama banda prohibida y su longitud de onda*

Se han logrado avances significativos en los LD basados en GaN desde la primera demostración de Nakamura et al. [50]. Gran parte de este trabajo se desarrolló y demostró a través del crecimiento de cristales utilizando zafiro como sustrato de crecimiento. Como consecuencia de este enfoque de desarrollo heteroepitaxial, la alta densidad de dislocación y la tensión biaxial en las capas de GaN han obstaculizado la mejora en el rendimiento de estos diodos láser basados en nitruro. Las dislocaciones pueden causar un deterioro en el funcionamiento de los LD de pozos cuánticos principalmente por tres mecanismos: (a) al servir como centros de recombinación no radiactiva para electrones y huecos que conducen a la generación de calor en lugar de la emisión óptica; (b) introduciendo una difusión rápida a lo largo de las líneas de dislocación, disminuyendo los efectos de pozos cuánticos y acortando uniones p-n; y (c) perturbando el frente de crecimiento epitaxial, de modo que no se puedan obtener estructuras atómicamente planas [51]. La dislocación también causa un aumento en la densidad de corriente del umbral del diodo láser y, en última instancia, limita la vida útil de los dispositivos.

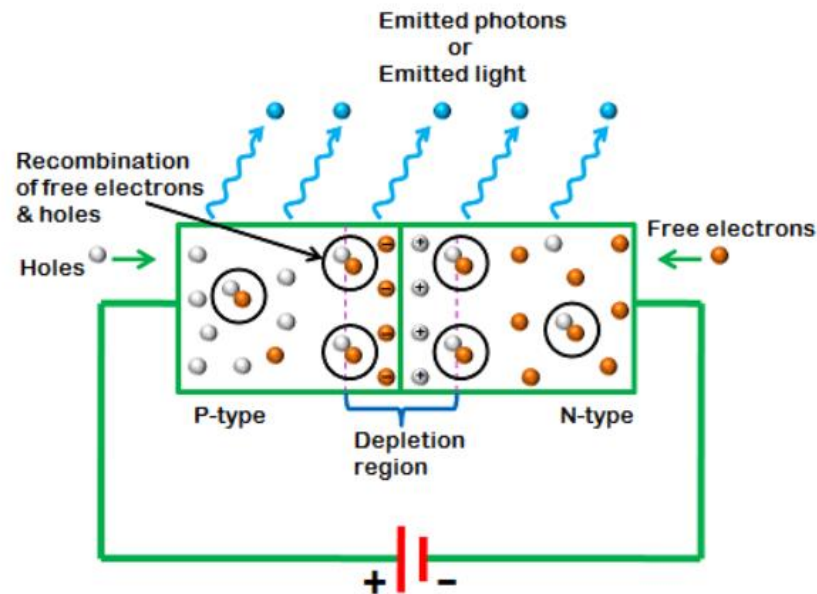
Los mercados para la optoelectrónica basada en GaN son grandes y continuarán generando nuevas aplicaciones para LD. Por ejemplo, muchos sistemas se beneficiarían enormemente de la disponibilidad de LD con longitudes de onda  $>500$  nm, incluidos los proyectores de video basados en láser y los sistemas analíticos. Las extrapolaciones de los

requisitos de rendimiento y calidad del material hacia longitudes de onda más largas basadas en las tendencias observadas en el desarrollo del láser de almacenamiento óptico azul/violeta son tales que la mayoría de los expertos están de acuerdo en que un sustrato GaN de baja densidad de defectos es un elemento básico necesario de dicho diodo láser [12].

### 3.3 LED UV

Los diodos emisores de luz (LED) son los diodos semiconductores más utilizados entre los diferentes tipos de diodos semiconductores disponibles en la actualidad. Los diodos emisores de luz emiten luz visible o invisible cuando se polarizan directamente. Un diodo emisor de luz (LED) es un dispositivo semiconductor óptico que emite luz cuando se aplica voltaje, convierte la energía eléctrica en energía luminosa.

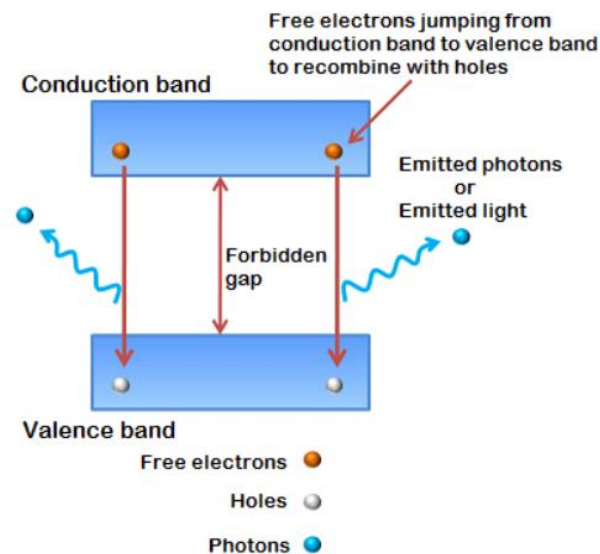
El diodo emisor de luz (LED) funciona solo en condiciones de polarización directa. Cuando el diodo emisor de luz (LED) está polarizado directamente, los electrones libres del lado n y los huecos del lado p son empujados hacia la unión n-p. Cuando los electrones libres alcanzan la región de unión o agotamiento, algunos de los electrones libres se recombinan con los huecos de los iones positivos. De manera similar, los huecos del lado p se recombinan con electrones en la región de agotamiento (Figura 3.3).



*Figura 3.3 Diodos emisor de luz (LED), proceso de recombinación*

Debido a la recombinación de electrones libres y huecos en la región de agotamiento, el ancho de la región disminuye, permitiendo que más cargas crucen la unión p-n. Algunos de los portadores de carga del lado p y del lado n cruzarán la unión p-n antes de recombinarse en la región de agotamiento. Algunos electrones libres del semiconductor de tipo n cruzan la unión p-n y se recombinan con huecos en el semiconductor de tipo p. De manera similar, los huecos del semiconductor de tipo p cruzan la unión p-n y se recombinan con electrones libres en el semiconductor de tipo n. Por lo tanto, la recombinación tiene lugar en la región de agotamiento, así como en los semiconductores de tipo p y n.

Los electrones libres en la región p no permanecerán en la banda de conducción por mucho tiempo, después de un corto período, los electrones libres pierden energía en forma de luz y se recombinan con los huecos en la banda de valencia (Figura 3.4) [52].



**Figura 3.4** Proceso de emisión de luz del diodo

Los LED azules se basan en los semiconductores de banda ancha GaN (nitruro de galio) e InGaN (nitruro de galio indio). Los primeros LED azules fueron fabricados en 1971 por Jacques Pankove en los Laboratorios RCA. Sin embargo, estos dispositivos eran demasiado débiles para ser de mucho uso práctico. A finales de la década de 1980, los avances clave en el crecimiento epitaxial de GaN y el dopaje de tipo p por parte de Isamu

Akasaki e Hiroshi Amano marcaron el comienzo de la era moderna de los dispositivos optoelectrónicos basados en GaN [53].

Los LED basados en AlGaIn son una fuente alternativa de luz UV profunda (DUV), donde la luz emitida en esta región del espectro destruye las bacterias que causan enfermedades. Si se pueden desarrollar dispositivos eficientes, serán fáciles de usar, tendrán una larga vida útil, no serán frágiles y podrán ser operados con batería para permitir su uso en ubicaciones remotas. Cambiar la composición de la capa activa de AlGaIn nos permite ajustar fácilmente la longitud de onda de los LED. Dichos LED DUV también tendrán aplicaciones potenciales para la iluminación de estado sólido UV y la detección de drogas [54].

### **3.4 Transistores**

Los transistores de nitruro de galio (GaN) HEMT (Transistor de alta movilidad de electrones) comenzaron a aparecer por primera vez en 2004 como transistores de RF de modo de agotamiento fabricados por Eudyna Corporation en Japón. Usando GaN en sustratos de carburo de silicio (SiC), Eudyna introdujo con éxito la producción de transistores diseñados para el mercado de RF. La estructura HEMT se basó en la alta movilidad de electrones descrita como un gas de electrones bidimensional (2DEG), cerca de la interfaz entre AlGaIn y GaN de una heteroestructura. Adaptando este fenómeno al nitruro de galio crecido en carburo de silicio, Eudyna pudo producir una ganancia de potencia de referencia en el rango de frecuencia de varios gigahercios. En 2005, Nitronex Corporation presentó el primer transistor RF HEMT en modo de agotamiento hecho con GaN crecido en obleas de silicio utilizando su tecnología SIGANTIC®.

Los transistores de RF GaN han seguido incursionando en las aplicaciones de RF a medida que otras compañías han entrado en el mercado. Sin embargo, la aceptación fuera de este mercado se ha visto limitada por el costo del dispositivo y por los inconvenientes del funcionamiento en modo de agotamiento.

En junio de 2009, Efficient Power Conversion Corporation (EPC) introdujo los primeros FET GaN sobre silicio (eGaN®) en modo de mejora diseñados específicamente como reemplazos de MOSFET de potencia. Estos productos están diseñados para ser

producidos en grandes volúmenes a bajo costo utilizando tecnología e instalaciones estándar de fabricación de silicio.

Los requisitos básicos para los semiconductores de potencia son eficiencia, confiabilidad, capacidad de control y costo. Sin estos atributos, una nueva estructura de dispositivo no tiene posibilidades de viabilidad económica. Los tres materiales que estarán compitiendo en el mercado de los transistores de alta potencia son, el silicio, carburo de silicio y nitruro de galio.

El silicio ha sido un material dominante para la administración de energía desde finales de los años cincuenta. Las ventajas que el silicio tenía sobre los semiconductores anteriores, como el germanio o el selenio, podrían expresarse en cuatro categorías clave:

1. Silicio habilitó nuevas aplicaciones que no son posibles en materiales anteriores
2. El silicio demostró ser más confiable
3. El silicio era en muchos sentidos más fácil de usar
4. Los dispositivos de silicio fueron de menor costo

Para que otro material semiconductor desplace al silicio en los transistores de potencia de la próxima generación, debe demostrar su superioridad sobre el silicio en estas cuatro áreas.

Propiedades	Descripción	GaN	Si	SiC
$E_g$ (eV)	Energía de ancho de banda	3.4	1.12	3.2
$E_{BR}$ (MV/cm)	campo eléctrico crítico para descomposición en el cristal	3.3	0.3	3.5
$\mu$ (cm <sup>2</sup> /Vs)	Movilidad de electrones	990-2000	1500	650

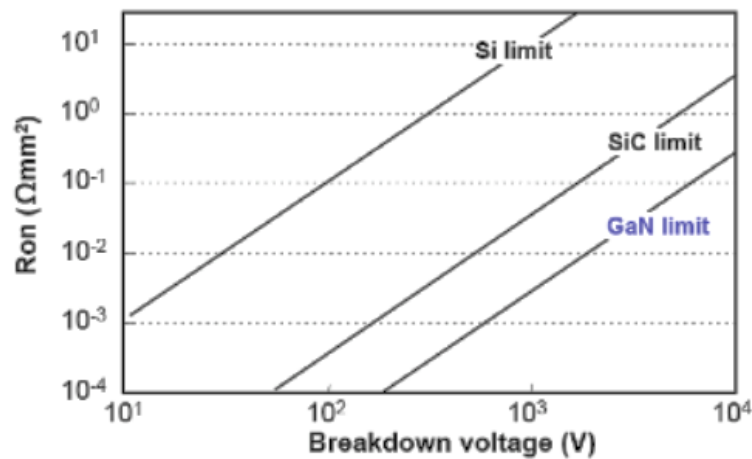
*Tabla 3.2 Propiedades de los materiales, GaN, SiC y silicio*

Todas las ventajas del silicio provienen de sus propiedades físicas básicas combinadas con una gran inversión en infraestructura de fabricación e ingeniería. La Tabla 3.2 muestra tres propiedades eléctricas clave de tres materiales semiconductores que compiten por el mercado de administración de energía.

Una forma de traducir estos parámetros básicos de cristal en una comparación del rendimiento del dispositivo en un transistor de potencia es calcular el mejor rendimiento

teórico que podría lograrse en cada uno de los tres candidatos. Para los dispositivos de alimentación, existen muchas características que afectan el rendimiento en una variedad de sistemas de conversión de energía disponibles en la actualidad. Cinco de los más importantes son la eficiencia de conducción, el voltaje de ruptura, la eficiencia de conmutación, el tamaño y el costo. Estas características del dispositivo determinan la frecuencia alcanzable del sistema y la densidad de potencia.

Utilizando los datos de la Tabla 3.2 (y ajustando la movilidad mejorada del GaN 2DEG), podemos calcular la resistencia mínima teórica del dispositivo (la inversa de la conductividad) en función del voltaje de ruptura y en función del material.



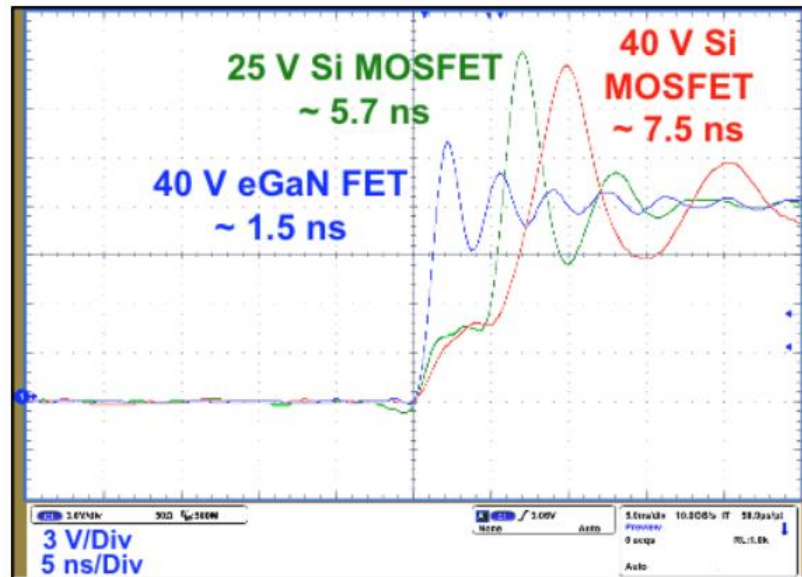
*Figura 3.5 Resistencia de encendido y el voltaje de ruptura*

Como se muestra en la Figura 3.5, SiC y GaN tienen una relación superior entre la resistencia de encendido y el voltaje de ruptura debido a su mayor intensidad de campo eléctrico crítico. Esto permite que los dispositivos sean más pequeños y que las terminales eléctricas se coloquen más juntas para un requisito de voltaje de ruptura dado.

GaN tiene una ventaja adicional en comparación con SiC como resultado de la movilidad mejorada de electrones en el 2DEG. Esto se traduce en un dispositivo GaN con un tamaño más pequeño para un voltaje de ruptura y resistencia de encendido.

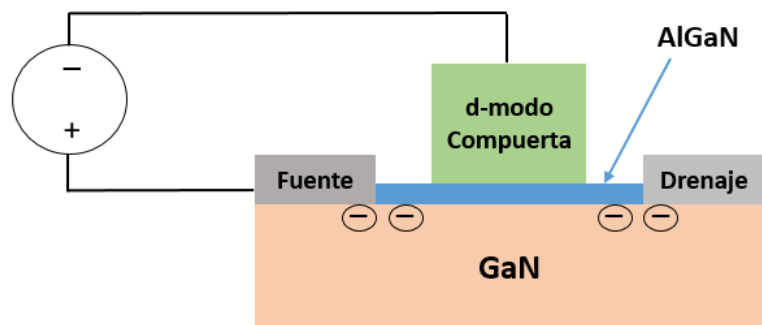
Debido a que los dispositivos GaN pueden ser mucho más pequeños que los dispositivos de silicio, y los electrones son más móviles que el silicio o el carburo de silicio, los transistores GaN HEMT pueden conmutar mucho más rápido. La Figura 3.6 muestra

una comparación del tiempo de transición entre un transistor GaN y dos MOSFET de potencia de silicio en un convertidor de 12 VIN y 1.2 VOUT. El transistor GaN cambia aproximadamente un quinto del tiempo del dispositivo de silicio de 40V comparable y un cuarto del tiempo de un dispositivo de silicio de 25V.



*Figura 3.6* Tiempo de transición entre un transistor GaN y dos MOSFET de potencia de silicio

La estructura lateral del dispositivo eGaN también se presta para el empaquetado de chip flip, que es una solución de empaque de muy alto rendimiento debido a la resistencia mínima y la inductancia terminal [55].

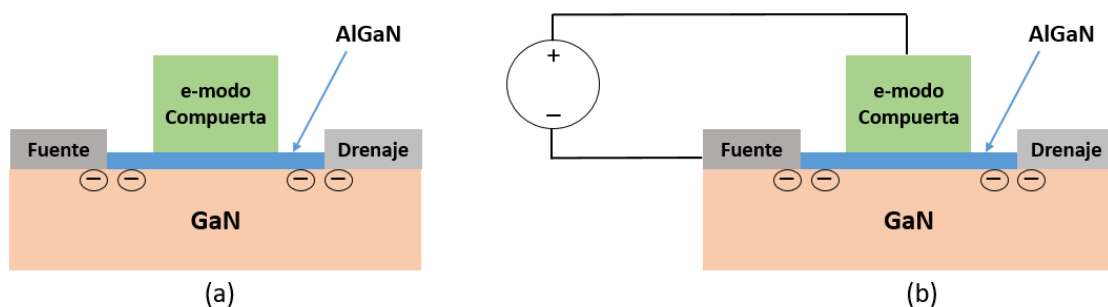


*Figura 3.7* Dispositivo en modo de agotamiento (d-mod) HEMT

La estructura del transistor GaN en modo de agotamiento básico se muestra en la Figura 3.7. Al igual que con cualquier FET de potencia, hay electrodos de compuerta, fuente y drenaje. La fuente y los electrodos de drenaje atraviesan la capa superior de AlGaN para formar un contacto óhmico con el 2DEG subyacente. Esto crea un cortocircuito entre la fuente y el drenaje hasta que se agota el grupo de electrones 2DEG y el cristal GaN semiaislante puede bloquear el flujo de corriente. Para agotar el 2DEG, se coloca un electrodo de puerta en la parte superior de la capa de AlGaN. Cuando se aplica un voltaje negativo relativo a los electrodos de drenaje y fuente a la compuerta, los electrones en el 2DEG se agotan del dispositivo. Este tipo de transistor se llama modo de agotamiento o modo-d, HEMT.

Hay dos formas comunes de producir un dispositivo HEMT en modo-d. El transistor inicial introducido en 2004 tenía un electrodo de compuerta Schottky que se creó al depositar una capa de metal directamente sobre el AlGaN. La barrera de Schottky se formó utilizando metales como Ni-Au o Pt [56]. Los dispositivos en modo de agotamiento también se han hecho usando una capa aislante y una puerta de metal similar a un MOSFET [57].

En las aplicaciones de conversión de energía, los dispositivos de modo-d son inconvenientes porque, al inicio de un convertidor de energía, primero se debe aplicar una polarización negativa a los dispositivos de energía. Si la polarización negativa no se aplica primero, se producirá un cortocircuito. Un dispositivo de enriquecimiento (modo-e), por otro lado, no sufriría estas limitaciones. Con cero polarizaciones en la puerta, un dispositivo en modo-e está APAGADO (Figura 3.8 (a)) y no conducirá corriente hasta que se aplique un voltaje positivo a la puerta, como se ilustra en la Figura 3.8 (b) [58].



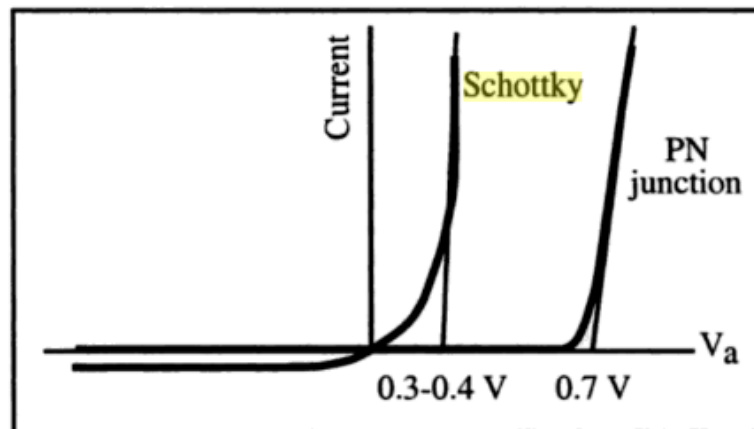
*Figura 3.8* Dispositivo en modo de mejora (e-modo)

Existen cuatro estructuras populares que se han utilizado para crear dispositivos en modo de mejora: puerta empotrada, puerta implantada, puerta pGaN e híbrido cascode.

### 3.5 Diodos Schottky

Un diodo Schottky es un diodo semiconductor con una acción de conmutación muy rápida, pero una baja caída de voltaje directo. Cuando una corriente fluye a través del diodo, hay una pequeña caída de voltaje a través de los terminales del diodo. En un diodo normal, la caída de voltaje está entre 0.6 y 1.7 voltios, mientras que en un diodo Schottky la caída de voltaje normalmente oscila entre 0.15 y 0.45 voltios (Figura 3.9). Esta caída de voltaje más baja proporciona mayor velocidad de conmutación y mejor eficiencia del sistema. En el diodo Schottky, se forma una unión entre un semiconductor y un metal, creando así una barrera Schottky. El semiconductor de tipo N actúa como un cátodo y el lado metálico actúa como el ánodo del diodo.

El diodo de barrera Schottky es un dispositivo unidireccional que conduce flujos de corriente solo en una dirección (flujo de corriente convencional del metal al semiconductor) [59].

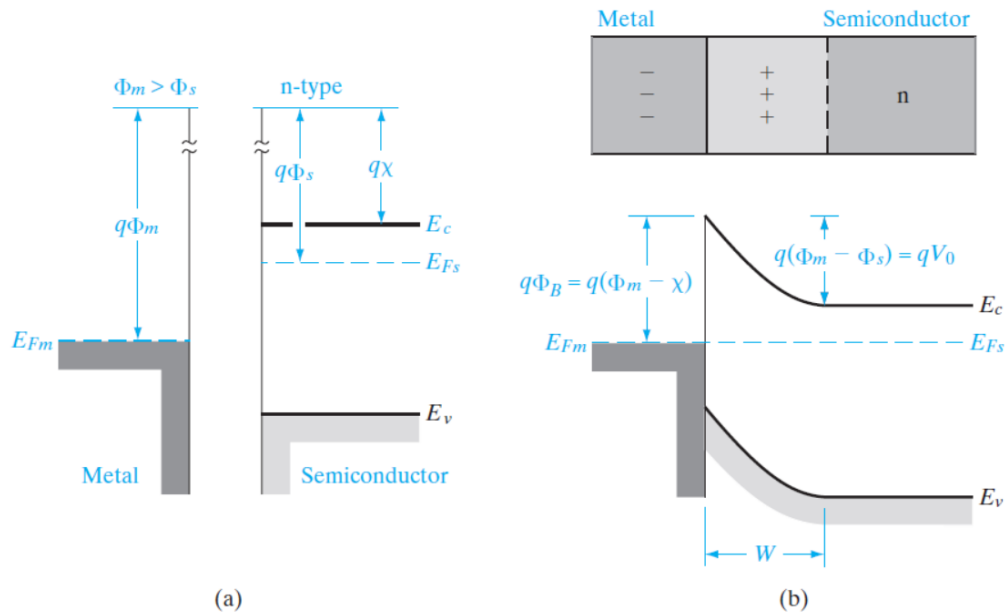


*Figura 3.9 Características de corriente-voltaje de un diodo Schottky y PN*

Los diodos Schottky son capaces de conmutar rápidamente porque su funcionamiento se basa en portadores mayoritarios (a diferencia de los diodos P-N donde el funcionamiento del dispositivo se vuelve lento por el almacenamiento y la recombinación de portadores minoritarios en exceso) [60].

Muchas de las propiedades útiles de una unión p-n se pueden lograr simplemente formando un contacto apropiado de metal-semiconductor. Este enfoque es obviamente atractivo debido a su simplicidad de fabricación; Además, las uniones de metal y semiconductores son particularmente útiles cuando se requiere una rectificación de alta velocidad. Por otro lado, también debemos ser capaces de formar contactos no rectificadores (óhmicos) a semiconductores [61].

La barrera de potencial, que se forma cuando un metal se pone en contacto con un semiconductor, surge de la separación de las cargas en la interfaz metal-semiconductor de modo que se crea una región de alta resistencia agotada de portadores móviles en el semiconductor. La barrera de Schottky resulta de la diferencia en la función de trabajo de los dos materiales. La función de trabajo de un metal ( $q\Phi_m$ ) se define como la cantidad de energía requerida para elevar un electrón desde el nivel de Fermí hasta el nivel de vacío. La función de trabajo del semiconductor ( $q\Phi_s$ ) se define de manera similar y es una cantidad variable porque el nivel de Fermí en el semiconductor varía con el dopaje [62].

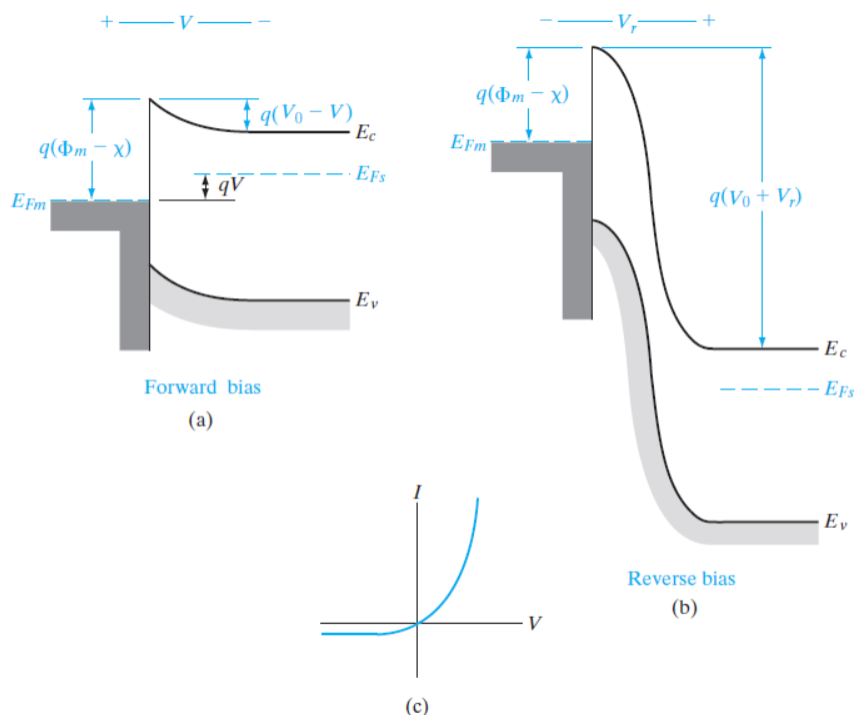


**Figura 3.10** Una barrera Schottky formada al contactar un semiconductor de tipo n con un metal que tiene una función de trabajo más grande: (a) diagramas de banda para el metal y el semiconductor antes de unirse; (b) diagrama de bandas en equilibrio para la unión [61].

Cuando un metal con función de trabajo  $q\Phi_m$  se pone en contacto con un semiconductor que tiene una función de trabajo  $q\Phi_s$ , la transferencia de carga ocurre hasta

que los niveles de Fermi se alinean en equilibrio (Figura 3.10). Por ejemplo, cuando  $\Phi_m > \Phi_s$ , el nivel de Fermi del semiconductor es inicialmente más alto que el del metal antes de que se establezca el contacto. Para alinear los dos niveles de Fermi, el potencial electrostático del semiconductor debe aumentarse (es decir, las energías de los electrones deben reducirse) en relación con la del metal.

El potencial de contacto de equilibrio  $V_0$ , donde  $qV_0 = q(\Phi_m - \Phi_s)$  (Figura 3.10 (b)), que impide una mayor difusión neta de electrones desde la banda de conducción de semiconductores hacia el metal, es la diferencia en los potenciales de las funciones de trabajo  $\Phi_m - \Phi_s$ . La altura de la barrera de potencial  $\Phi_B$  para la inyección de electrones del metal hacia la banda de conducción de semiconductores es  $\Phi_B = \Phi_m - \chi$ , donde  $q\chi$  (llamada afinidad electrónica) se mide desde el nivel de vacío hasta el borde de la banda de conducción de semiconductores. La diferencia de potencial de equilibrio  $V_0$  puede disminuirse o aumentarse mediante la aplicación de voltaje de polarización directa ( $V$ ) o inversa ( $V_r$ ), como en la unión p-n (Figura 3.11).



**Figura 3.11** Efectos de polarización directa e inversa en la unión de la Figura 3.10: (a) polarización directa; (b) polarización inversa; (c) característica típica de corriente-voltaje [61].

Cuando se aplica un voltaje de polarización directa  $V$  a la barrera Schottky de la Figura 3.10 (b), el potencial de contacto se reduce de  $V_0$  a  $V_0 - V$  (Figura 3.11(a)). Como resultado, los electrones en la banda de conducción de semiconductores pueden difundirse a través de la región de agotamiento hacia el metal. Esto da lugar a una corriente directa (metal a semiconductor) a través de la unión. Por el contrario, una polarización inversa aumenta la barrera  $V_0 + V_r$ , y el flujo de electrones desde el semiconductor al metal se vuelve insignificante. En cualquier caso, el flujo de electrones del metal al semiconductor es retardado por la barrera  $\Phi_m - \chi$ . La ecuación resultante del diodo es similar en forma a la de la unión p-n

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1)$$

como lo sugiere la Figura 3.11(c). En este caso, la corriente de saturación inversa  $I_0$  no se deriva simplemente como lo fue para la unión p-n. Sin embargo, una característica importante que podemos predecir es que la corriente de saturación debe depender del tamaño de la barrera  $\Phi_B$  para la inyección de electrones del metal al semiconductor. Esta barrera (que es  $\Phi_m - \chi$  para el caso ideal que se muestra en la Figura 3.11) no se ve afectada por el voltaje de polarización. Esperamos que la probabilidad de que un electrón en el metal supere esta barrera sea dada por un factor de Boltzmann.

$$I_0 \propto e^{-q\Phi_B/kT}$$

El diodo de barrera Schottky es de rectificación, con un flujo de corriente grande en la polarización directa y poca corriente en polarización inversa. La corriente directa se debe a la inyección de portadores mayoritarios del semiconductor en el metal. La ausencia de inyección de portadores minoritarios y el tiempo de retraso de almacenamiento es una característica importante de los diodos de barrera Schottky. Aunque si ocurre alguna inyección de portadores minoritarios a altos niveles de corriente, estos son esencialmente dispositivos de portadores mayoritarios. Por lo tanto, sus propiedades de alta frecuencia y velocidad de conmutación son generalmente mejores que las uniones p-n típicas. La

descripción anterior es válida para un diodo Schottky ideal. En los diodos Schottky reales, la altura de barrera entre el metal y el semiconductor, aun siguiendo la regla general de ser mayor para una mayor diferencia en las funciones de trabajo, depende en gran medida de la carga atrapada en la interfaz metal-semiconductor. [14, 63].

### **3.6 Contactos tipo Schottky en películas de GaN**

Cuando se forman uniones entre dos materiales diferentes (metal-semiconductor), no se puede obtener un contacto ideal ya que existen ciertos efectos que modifican los resultados ideales esperados. A diferencia de una unión p-n, que ocurre dentro de un solo cristal, una unión de barrera Schottky incluye una terminación del cristal semiconductor y un metal. El semiconductor contiene estados de superficie debido a enlaces covalentes incompletos y otros factores que pueden conducir cargas hacia la interfaz metal-semiconductor. Además, al depositar metales sobre la superficie de un semiconductor, normalmente podemos encontrar una delgada capa interfacial, que no es semiconductor ni metálica [61].

El rendimiento de los dispositivos basados en GaN a menudo pueden verse limitados por la calidad de los contactos Schottky y óhmicos. Factores como la calidad de las películas de GaN crecidas en sustratos con diferente constante de red, la preparación de la superficie de GaN antes de la deposición de metal y los procesos de deposición, deben considerarse en la fabricación de los contactos [64].

A mediados de la década de 1990 se realizaron una gran cantidad de trabajos sobre contactos Schottky depositados en películas de GaN, los cuales construyeron una base sólida para el desarrollo posterior de diodos tipo Schottky (SBD) de GaN. El contacto de Au Schottky con n-GaN fue informado por primera vez por Hacke et al. [65] y Khan et al. [66]. La formación de contactos Schottky de Ni, Pd y Pt sobre GaN fueron ampliamente estudiada por varios grupos de investigación [67, 68, 69, 70, 71, 56]. Las mediciones I-V, I-V-T y C-V se realizaron para encontrar las características de los contactos Schottky (factor de idealidad, el coeficiente de Richardson efectivo y la altura de la barrera de Schottky).

La Tabla 3.3 muestra un resumen de las alturas de barrera de Schottky de los metales más comunes depositados sobre películas de GaN. Las barreras fueron calculadas mediante los tres métodos mencionados anteriormente.

<b>Metal</b>	<b><math>\Phi_B</math> (eV) I-V</b>	<b><math>\Phi_B</math> (eV) I-V-T</b>	<b><math>\Phi_B</math> (eV) C-V</b>	<b>Reportado por</b>
<b>Au</b>	0.844	-	0.94	Hacke et al. [65]
	0.91	-	1.01	Khan et al. [66]
	1.03	-	1.03	Kalinina et al. [69]
	0.87	0.88	0.98	Ping et al. [70], Schmitz et al. [71]
<b>Ni</b>	1.15	-	1.11	Kalinina et al. [69]
	0.95	0.99	1.13	Schmitz et al. [71]
	0.83	0.93	1.03	Liu et al. [56]
<b>Pd</b>	-	0.91	0.94	Guo et al. [67]
	1.11	0.96	1.24	Wang et al. [68]
	0.94	0.92	1.07	Ping et al. [70], Schmitz et al. [71]
<b>Pt</b>	-	1.03	1.04	Guo et al. [67]
	1.13	-	1.27	Wang et al. [68]
	1.01	1.08	1.16	Schmitz et al. [71]

**Tabla 3.3** Resumen de la altura de barrera de Schottky de Au, Ni, Pd y Pt a GaN a partir de los resultados de experimentación (I-V, I-V-T y C-V) [63].

Aunque los contactos Schottky y óhmicos de GaN tipo-n se han estudiado ampliamente durante la última década, sus propiedades y tecnologías aún no se han comprendido en su totalidad [72, 73, 74, 75, 76, 77, 78]. Una de las preguntas claves para ambos tipos de contactos es la poca reproducibilidad de los resultados obtenidos en diferentes laboratorios para una metalización similar. Otro problema fundamental para los contactos de Schottky es la aparición de altas corrientes de fuga durante su polarización inversa [73].

Recientemente se han publicado varios documentos sobre mecanismos de corriente de fuga de polarización inversa en diodos Schottky M/GaN, las sugerencias de los investigadores sobre el mecanismo de corriente de fuga de polarización inversa son muy diferentes. H. Zhang et al. publicaron que la corriente de fuga, bajo polarización inversa, para diodos tipo Schottky de GaN y  $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$  es casi independiente de la temperatura cuando esta es aproximadamente menor a los 150 °K. Después de un análisis detallado de

los resultados de I-V concluyeron que la corriente de fuga está dominada por la presencia de dislocaciones altamente conductivas en la interfaz metal-semiconductor [77]. Koteswara et al. sugiere que existen dos mecanismos de transporte predominantes, mediante un análisis detallado de la corriente de fuga inversa indica que existe un túnel asistido por trampa de electrones activados térmicamente, estas trampas de electrones es un conjunto continuo de dislocaciones conductivas [79]. Foresi et al. sugiere que la barrera de Schottky obtenida durante su investigación tiene fugas debido a los efectos de túnel que surgen de la alta concentración de portador de las películas y la posible existencia de una capa de óxido nativo interfacial [75]. Boles et al. en su reporte basado en estudios de diversos autores concluyo que existen dos mecanismos de fuga subyacentes en el electrodo de puerta de diodo Schottky Ni/Au del dispositivo HEMT. El primer proceso de fuga es la emisión de Poole - Frenkel (FP). La conducción por emisión de FP es un proceso asistido por trampas y tiene una fuerte dependencia de la temperatura. El segundo mecanismo dominante se denomina túnel de Fowler-Nordheim (FN). El túnel FN aumenta con el campo eléctrico, no depende de la temperatura y no necesita ayuda de los estados de trampa [80].

Mohammad et al. crecieron una película de 100-400  $\mu\text{m}$  de GaN sobre un sustrato de zafiro (0001) mediante HVPE. Para poder estudiar la altura de la barrera Schottky y los efectos de la interfaz metal-semiconductor, depositaron Al como contacto óhmico y Au como contacto Schottky. Dentro de los resultados obtenidos, uno que es de interés para el desarrollo de este trabajo es la corriente de fuga, la cual fue reportada del orden de  $10^{-9}$  A cuando se polarizo inversamente el dispositivo a -10V [81]. Dobos et al. analizando las características de los contactos metálicos en películas de GaN observaron que la corriente que fluye a través de dos contactos Schottky (u óhmicos), y a través de la capa de GaN, con barrera Schottky inferior a 0.3–0.4 eV (dependiendo de la resistencia en serie), el contacto generalmente presenta características lineales I–V a temperatura ambiente y a bajos niveles de corriente, lo cual indican un comportamiento óhmico. En este caso, la corriente está limitada por la resistencia de la capa de GaN y la resistencia a la propagación de las áreas de contacto. Sin embargo, al disminuir la temperatura y el área del contacto (para Al de  $1 \text{ mm}^2$  a  $0.04 \text{ mm}^2$ ) se pueden obtener comportamientos de rectificación tipo Schottky en polarización inversa y directa. Un comportamiento similar se puede apreciar

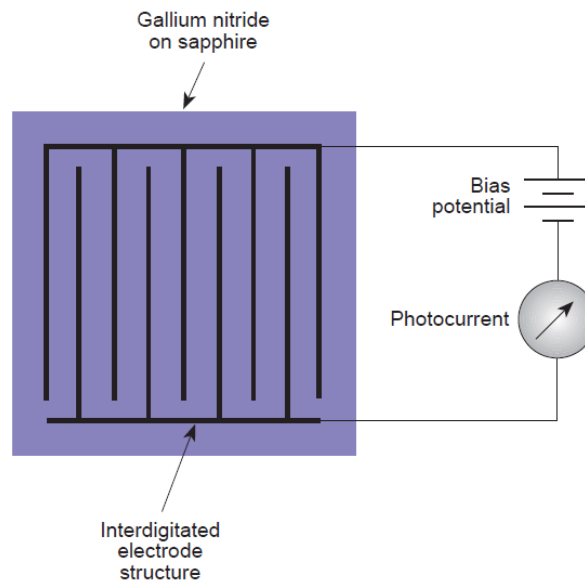
en los contactos Au/Ti/n-GaN, las características I-V para el área de 1 mm<sup>2</sup> son ligeramente rectificadoras, mientras que las características I-V obtenidas para 0.01 mm<sup>2</sup> presentan un comportamiento claro de un contacto rectificador [73].

### 3.7 Sensores UV basados en GaN

Los nitruros de grupo III son materiales de banda ancha que debido a sus propiedades son ideales para la fabricación de sensores que son prácticamente transparente a la luz visible; y por lo tanto no requieren de filtros para operar en las regiones visibles e infrarrojas.

GaN es un material adecuado para su uso en fotodetectores que operan en la región ultravioleta (UV). Para ciertas aplicaciones, como el seguimiento de misiles, la detección de llamas y las comunicaciones espaciales, se necesitan fotodetectores de muy alta velocidad y respuesta. GaN es muy resistente a la radiación y altas temperaturas, y lo convierten en un material adecuado para detectores UV que trabajan en entornos extremos [82, 83, 84, 85].

El detector fotoconductor basado en semiconductores puede verse como una resistencia sensible a la radiación, como se muestra esquemáticamente en la Figura 3.12.



**Figura 3.12** Diagrama de un típico circuito fotoconductor [86].

En dicha resistencia, la corriente es generada por los fotones entrantes que excitan los electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción, y durante este proceso algunos portadores son recolectados por uno de los electrodos. En pocas palabras, la corriente inducida por fotones  $I_{ph}$  está dada por

$$I_{ph} = q\eta A\Phi g$$

dónde

$q$  = carga electrónica,

$\eta$  = eficiencia cuántica (es decir, número de portadores generado por fotón incidente en el proceso de absorción),

$A$  = área del dispositivo expuesto a la radiación incidente,

$\Phi$  = flujo incidente, y

$g$  = ganancia fotoconductor.

Los dos parámetros influenciados por las características del material son la eficiencia cuántica y la ganancia fotoconductor. En su forma más simple, la ganancia fotoconductor está dada por

$$g = \frac{t}{t_t}$$

donde  $t$  es la vida útil del portador mayoritario, y  $t_t$  es el tiempo de tránsito del portador entre electrodos. Este tiempo de tránsito puede ser aproximado por

$$t_t = \frac{l^2}{\mu_e V_b}$$

donde  $l$  es el espacio entre electrodos,  $\mu_e$  es la movilidad de los electrones y  $V_b$  es la polarización aplicada.

Todas estas ecuaciones suponen que los fotones se absorben de manera uniforme en todo el fotoconductor, que el grosor de la muestra es pequeño en comparación con la longitud de difusión del portador minoritario y que no se produce una recombinación en la superficie o la interfaz de los portadores.

Pocos, si alguno, de estos supuestos se realizan en la práctica. Por lo tanto, generalmente se reporta el valor general de la capacidad de respuesta global, que se mide en términos de Amperes por Watt (A/W). El poder incidente es el poder que cae sobre el área total del dispositivo, incluidas, a veces, las regiones cubiertas por los electrodos de recolección. El flujo de fotones para un determinado nivel de potencia incidente es inversamente proporcional a la longitud de onda. La ganancia fotoconductor puede ser menor o mayor que 1, dependiendo de si la longitud de arrastre es mayor o menor que la separación entre electrodos. Un valor mayor que 1 implica que un portador libre se ha acumulado en un electrodo e inmediatamente ha sido reemplazado por la inyección de un portador equivalente en el electrodo opuesto. En efecto, el portador libre continúa circulando hasta que se pierde por recombinación o atrapamiento.

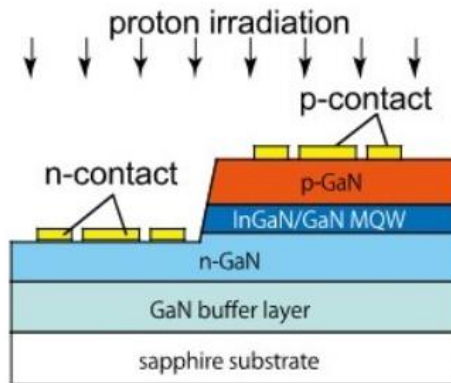
La velocidad de respuesta del dispositivo se mide por el tiempo que tarda la señal fotogenerada en aumentar del 10 al 90% de la diferencia entre la corriente oscura y la corriente de estado estable en la exposición a la luz (el llamado giro en tiempo, ton) o el tiempo que tarda la señal en caer del 90 al 10% de este valor cuando la luz se apaga (apagado). En general, estos tiempos están influenciados por la presencia de trampas de nivel profundo dentro de la banda prohibida del semiconductor. La influencia exacta de estas trampas es complicada, pero una imagen simple es la siguiente. En la oscuridad, la trampa está vacía, pero cuando se enciende la luz, los portadores móviles que llenan las trampas se pierden en el proceso de recolección. El tiempo de encendido es una función tanto del nivel de concentración de la trampa o trampas como de las secciones transversales para llenarlas. Cuando se apaga la luz, el tiempo que tarda la corriente en caer a su valor de corriente oscura se determina por el tiempo que tarda la trampa en vaciarse.

Analizando esta información, podemos concluir que la fabricación de un dispositivo fotoconductor con características superiores requiere el uso de material con alta eficiencia cuántica y alta ganancia fotoconductor para lograr una gran capacidad de respuesta y alta resistividad, lo que minimiza la corriente oscura y permite aplicar altas

polarizaciones. Además, es deseable una baja concentración de trampas para obtener tiempos de respuesta rápidos. De estos, el único parámetro intrínseco a cualquier material en particular es la eficiencia cuántica, que es proporcional al coeficiente de absorción a las energías de los fotones cerca del intervalo de banda. Los otros parámetros están algo relacionados y deben optimizarse durante la etapa de preparación del material, la etapa de fabricación del dispositivo o ambos [86].

Durante las últimas dos décadas, muchos estudios han examinado los fotodetectores UV basados en GaN con diferentes estructuras de dispositivos, como los diodos p-i-n, las estructuras metal-semiconductor-metal (MSM), y los diodos Schottky [85].

La forma más común de fotodiodo utilizado es el diodo p-i-n que consiste en una capa de contacto transparente muy dopada de tipo p en la parte superior de una capa absorbente no dopada y una capa de contacto muy dopada de tipo n en la parte inferior (Figura 3.13).



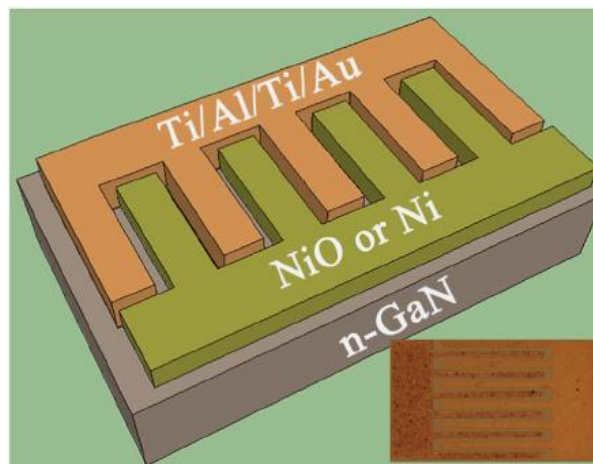
**Figura 3.13** GaN fotodiodo p-i-n [87].

Como hay muy pocos portadores de carga en la región intrínseca, la región de carga espacial llega completamente desde la región p hasta la n. Esto da como resultados detectores con varias ventajas importantes: son rápidos, estables, lineales y de bajo ruido. La desventaja principal de los diodos p-i-n es que, con concentraciones de dopaje moderadas en las regiones conductoras para baja resistencia, la región de agotamiento resultante es bastante delgada. Esto causa los problemas de, baja eficiencia cuando ocurre poca absorción en una región de agotamiento delgada, y capacitancia relativamente alta que disminuye la velocidad del dispositivo. Una regla general es que solo los portadores

generados dentro de la región de agotamiento se recolectan eficiente y rápidamente como fotocorriente. El objetivo es crear un diodo con una amplia región de agotamiento [88].

Algunos estudios se han realizado para mejorar los resultados de fotodetectores UV p-i-n basados en GaN. Su Sir Liu et al. han publicado diversos estudios relacionados con este tipo de dispositivos [89, 90, 91]. En uno de sus trabajos reporta resultados experimentales que indican que la densidad de corriente en oscuridad de la muestra es  $1.82 \times 10^{-11}$  A/cm<sup>2</sup>, y comenta que la corriente de fuga en oscuridad esta dado por el salto de portadores cargados a través de estados relacionados con defectos (trampas) localizados en la región de agotamiento [90].

El fotodetector MSM está hecho de dos diodos de barrera Schottky consecutivos (Figura 3.14).

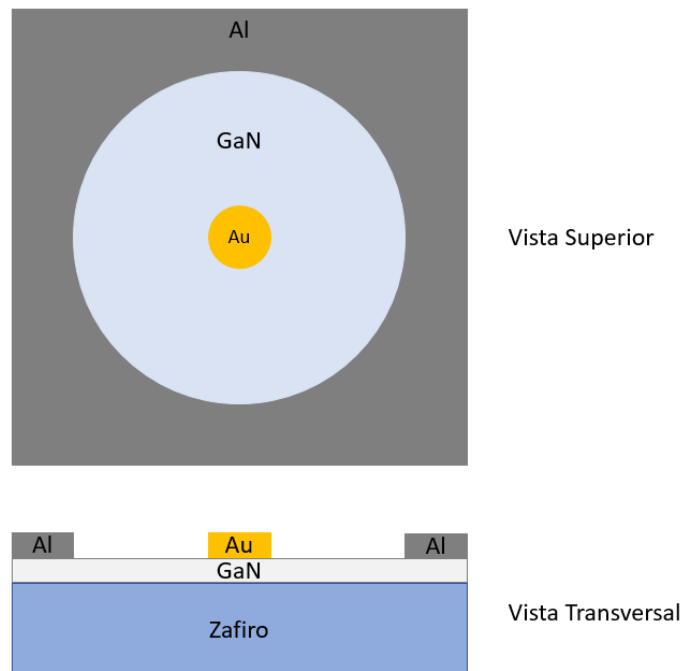


**Figura 3.14** Estructura esquemática de los PD de UV con electrodo de Ni o NiO [92].

Toda la capa del semiconductor, entre dos electrodos metálicos, se agota por completo bajo suficiente polarización. Los parámetros geométricos de un fotodetector MSM convencional determinan su rendimiento. El dispositivo consiste en alternar contactos metálicos depositados en la capa activa del semiconductor. Las estructuras MSM representan un diseño de fotodetector muy simple. Sus principales limitaciones incluyen una corriente oscura relativamente grande (ya que se requiere un voltaje de polarización) y una eficiencia cuántica reducida debido a la sombra del electrodo [88].

En las últimas dos décadas se han registrados estudios de diversos investigadores que han propuesto varios tipos de materiales y estructuras para mejorar el funcionamiento

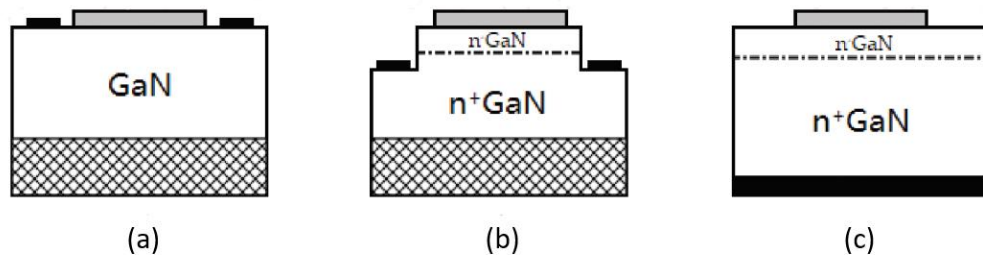
de los fotodetectores MSM. Dobrzanski et al. diseñó una estructura con contactos semitransparentes de Au/Ni obteniendo corrientes en oscuridad de  $10^{-7}$  A y  $10^{-5}$  A al ser polarizado inversamente a un voltaje de 1.5V [93]. Y. K. Su et al. diseñaron una estructura de peine utilizando diversos materiales como contactos; en su estudio reportan que, con un recocido adecuado, podrían mejorar las propiedades ópticas de las capas ITO y lograr una transmitancia máxima del 98% a 360 nm. Fabricaron sensores UV MSM basados en GaN con ITO, Au, Ni y Pt como electrodos de contacto. Se descubrió que podían lograr un máximo de 0.12 A de fotocorriente y un contraste de fotocorriente a corriente oscura superior a cinco órdenes de magnitud para el sensor UV ITO/n-GaN MSM recocido a 600 °C con un voltaje de polarización de 5 V. Para los contactos de Au se logró obtener una respuesta en oscuridad de  $10^{-7}$  A y  $10^{-6}$  A cuando fue iluminada con luz UV y polarizada inversamente a 1 V [94]. Wang Jun et al. diseñaron una estructura de peine con electrodos de Ni/Au sobre la superficie de GaN reportando una corriente en oscuridad de 1.03 nA con una polarización de 5 V, y de 15.3 nA con una polarización de 10 V. Bajo iluminación con  $\lambda=360$  nm de luz, la corriente fotoeléctrica del detector ultravioleta GaN MSM es 88.74 nA con una polarización de 5 V, y de 157.9 nA con una polarización de 10 V [95].



**Figura 3.15** Estructura de fotosensor tipo Schottky [96].

Los diodos Schottky son una buena alternativa a los detectores MSM debido al hecho de que estos detectores pueden funcionar en modo fotovoltaico, es decir, sin voltaje de polarización (y sin corriente oscura resultante). Un diodo Schottky requiere un contacto óhmico, uno Schottky, y una capa de semiconductor conductora como GaN de tipo n (Figura 3.15).

Los SBD basados en GaN tienen tres estructuras comunes: lateral, cuasi vertical y vertical.



**Figura 3.16** Esquemas de (a) lateral, (b) cuasi vertical, y (c) SBD verticales en GaN: la región gris es el contacto de Schottky, la región negra es el contacto óhmico y la región de la rejilla es el sustrato [63].

La Figura 3.16 muestra los esquemas de las tres estructuras. Los SBD laterales y cuasi verticales generalmente se fabrican en GaN crecidos en un sustrato extraño, como zafiro, SiC y Si. Para SBD lateral, el contacto Schottky y el contacto óhmico están en la misma superficie. Para los SBD cuasi verticales, primero se graba una meseta, seguida de una deposición de contacto óhmica en el GaN grabado y deposición de contacto de Schottky en la parte superior de la meseta. Los SBD verticales generalmente se fabrican en sustrato independiente de GaN depositando el contacto óhmico en la cara de nitruro y el contacto de Schottky en la cara de galio. Los SBD laterales son fáciles de fabricar y, por lo tanto, todavía se usan como vehículos de desarrollo para probar nuevos métodos de crecimiento de material y procesamiento de dispositivos, mientras que las estructuras cuasi verticales y verticales son preferidas para aplicaciones prácticas [63].

P. Allegrini et al. crecieron GaN en sustrato de zafiro mediante la técnica epitaxia de haz molecular (MBE). Para la fabricación del dispositivo, las muestras se limpiaron en ácido antes de la realización de los contactos. Se evaporaron térmicamente sobre la película de GaN contactos óhmicos Al y contactos Schottky Ni para probar la estructura. Se dejó

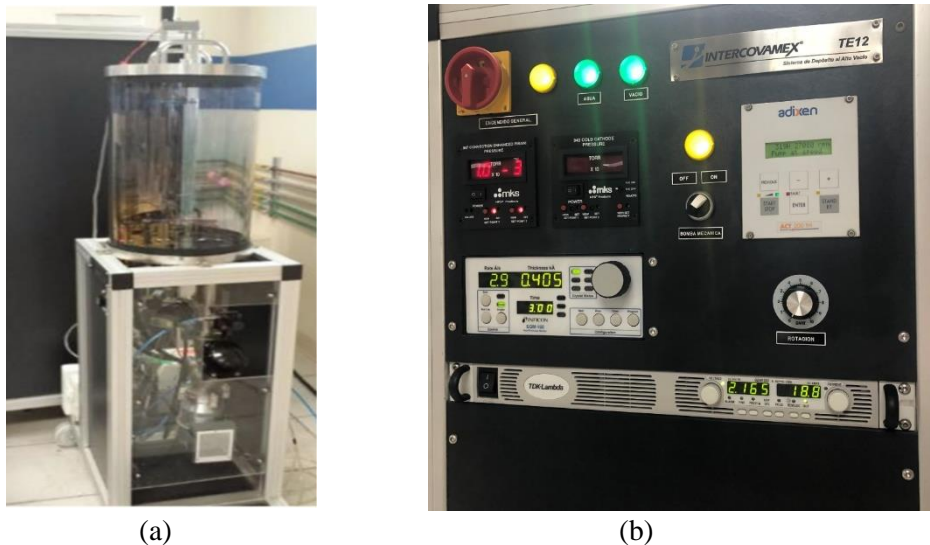
aproximadamente 1 mm<sup>2</sup> de superficie libre para la iluminación del dispositivo. Lograron obtener una corriente de fuga del orden de 10<sup>-10</sup> A cuando la muestra se polarizó inversamente a 1 V [97]. Q. Chen et al. reportan la fabricación y caracterización de detectores ultravioleta transparentes de barrera Schottky de geometría cuasi-vertical basados en estructuras n<sup>-</sup>/n<sup>+</sup>-GaN crecidas sobre sustratos de zafiro. Las medidas de respuesta espectral se realizaron utilizando iluminación a través de la barrera de metal transparente Schottky UV. La corriente de fuga inversa es de aproximadamente 80 nA a 25 V, mientras que la corriente bajo iluminación ( $\lambda=360\text{nm}$ ) es de 2.3x10<sup>-6</sup> A [98]. K. Wang et al. investigaron las características eléctricas de los contactos Schottky Au/n-GaN con diferentes espesores de película de Au hasta 1300 Å, utilizando técnicas de corriente-voltaje (I-V) y capacitancia-voltaje (C-V). Los resultados muestran una disminución en la calidad de los diodos Schottky al aumentar el espesor de la película de Au. Las mediciones I-V indican que los diodos Schottky de película delgada de Au (<500 Å) muestran características de rectificación significativamente mejores que las de las películas gruesas (> 500 Å). Los resultados de corriente de fuga, cuando el dispositivo es polarizado inversamente, aumentan rápidamente hasta llegar a 1μA cuando es polarizado hasta 20V [64].

## CAPITULO 4

### 4.1 Desarrollo experimental para la obtención de sensores UV tipo Schottky de Nitruro de Galio

El desarrollo experimental se planteó considerando los equipos y materiales disponible en el laboratorio del Instituto de Ingenieria de la Universidad Autónoma de Baja California. También se utilizaron los equipos disponibles en la empresa Furukawa México, principalmente para la elaboración de las máscaras para formación de contactos. Las muestras de películas de GaN se adquirieron a través de MTI Corporation, especialistas en materiales y equipos avanzados de laboratorio.

Para la evaporación de los contactos metálicos se utilizó un sistema de evaporación térmica INTERCOVAMEX TE 12P, el cual consiste en una campana de vidrio Pyrex, la cual se monta sobre una platina metálica, donde reside el sistema de bombeo y evaporación (Figura 4.1).



**Figura 4.1** Equipo de evaporación a alto vacío, (a) campana de vidrio Pyrex, (b) unidad de control.

La selección de los metales se fundamentó en la función de trabajo del metal (para formar un contacto óhmico y uno Schottky al ser depositado en la película de GaN), su disponibilidad, y la facilidad de procesamiento con los equipos disponibles.

Para la elaboración de las máscaras se utilizó una lámina de acero SK, la cual fue cortada mediante descargas eléctricas de alambre (WEDM). Las máscaras se cortaron con

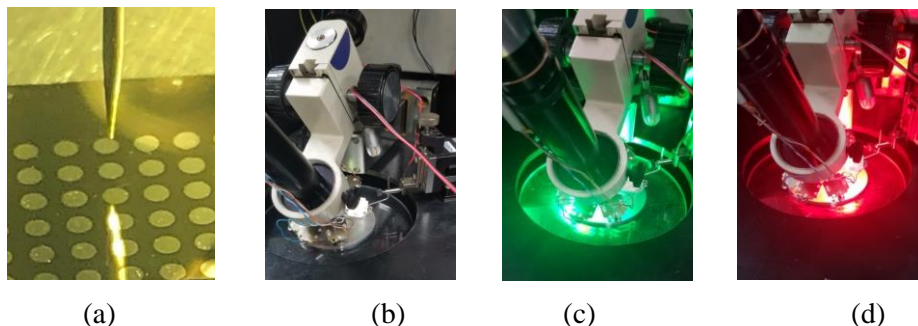
alambre de 0.3mm para poder garantizar las medidas del diseño deseado. Durante este proceso se alimenta un alambre de metal delgado de un solo hilo a través de la pieza de trabajo, la pieza está sumergida en un tanque de fluido dieléctrico. Este proceso se utiliza para cortar placas y hacer punzones, herramientas y matrices de cualquier material conductor, incluidos metales duros, que son demasiado difíciles de maquinar con otros métodos. Para los contactos con dimensiones menores a 0.5mm se utilizó una rejilla alfanumérica SPI con cuadros de 95  $\mu\text{m}$ .

Para la caracterización eléctrica se utilizó el modelo 4200-SCS de Keithley, es un analizador de parámetros modular totalmente integrado que realiza la caracterización eléctrica de materiales semiconductores y dieléctricos, y dispositivos semiconductores (Figura 4.2).



**Figura 4.2** Equipo de caracterización Keithley modelo 4200-SCS.

Este analizador se encuentra conectado a una cámara oscura la cual cuenta con un microscopio que permite enfocar la muestra y las puntas de tungsteno que nos permitirán hacer las mediciones (Figura 4.3 (a), (b)).



**Figura 4.3** (a) Vista de muestra y punta de tungsteno, (b) microscopio, (c) y (d) luz LED

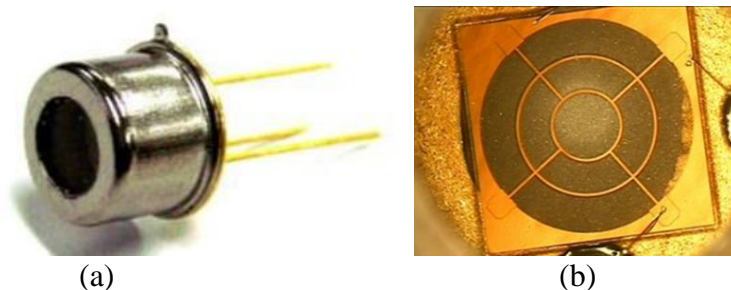
La cámara cuenta con un arreglo de LEDs de diferentes colores (longitudes de onda), los cuales se utilizaron para iluminar la muestra (Figura 4.3 (c), (d)).

Haciendo uso de los equipos y materiales descritos con anterioridad, se plantearon y desarrollaron diversas experimentaciones. Los resultados obtenidos en cada etapa de la experimentación fueron claves para el planteamiento de los experimentos posteriores. Los siguientes estudios representan de manera resumida aquellas experimentaciones que se consideran relevantes para el desarrollo del presente trabajo.

- Estudio y selección de diferentes metales que serán utilizados para la fabricación del dispositivo tipo Schottky.
- Estudio de la relación de las áreas de los contactos y sus efectos sobre el contacto tipo Schottky.
- Estudio de los efectos geométricos sobre la corriente de fuga, y ganancia bajo los efectos de luz UV.

#### 4.1.1 Estudio de las características eléctricas de fotodiodo comercial a base de GaN

La muestra obtenida para estudiar sus características eléctricas es un dispositivo en forma de chip encapsulado, el cual contienen como material base el nitruro de galio.



**Figura 4.4** Sensor UV-A a base de nitruro de galio (a), vista interna del sensor (b)

La muestra de la Figura 4.4 consiste en un fotosensor tipo Schottky de UV-A a base de nitruro de galio con alta capacidad de respuesta y baja corriente en oscuridad. La Figura 4.4 (b) muestra la parte interna del sensor, la imagen fue captada a través del cristal ubicado en la parte superior del encapsulado.

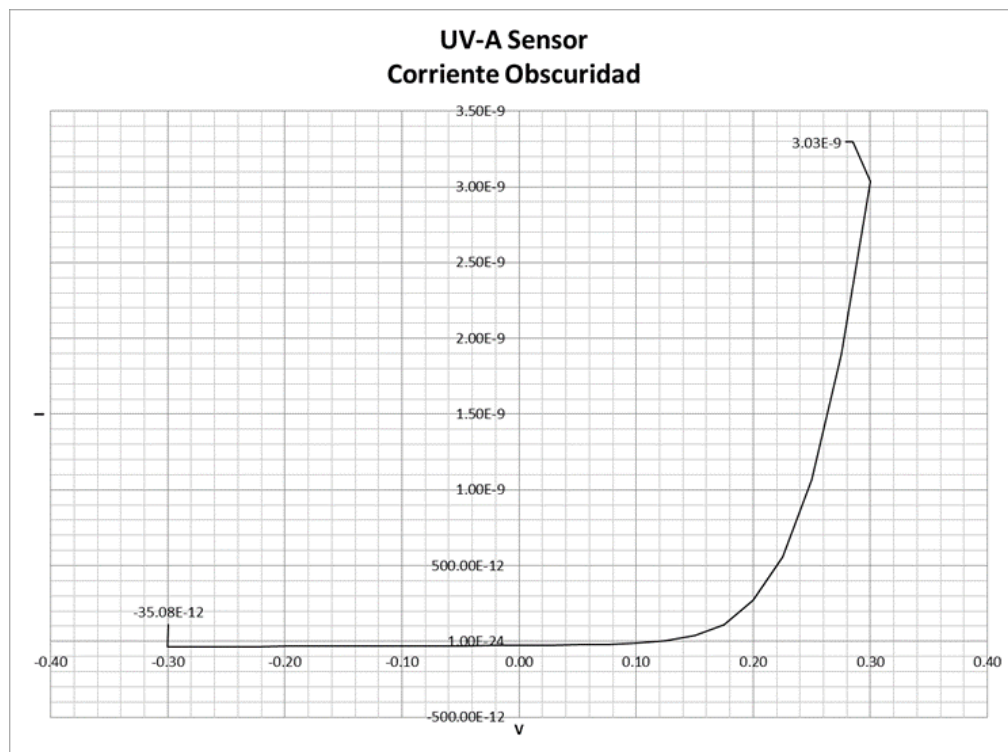
**Characteristics (at 25°C)**

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit	Test Conditions
Dark Current	$I_d$			90	nA	$V_r = 0.1$ V
Photo Current	$I_{ph}$	14.1	15.6	17.1	$\mu$ A	UVA Lamp, $1\text{mW}/\text{cm}^2$
Temperature Coefficient	$I_{tc}$		0.05		%/°C	UVA Lamp
Responsivity	R		0.18		A/W	$\lambda = 350$ nm, $V_r = 0$ V
Spectral Detection Range	$\lambda$	220		370	nm	10% of R
Active area			6.894		$\text{mm}^2$	

**Tabla 4.1** Características del sensor a 25°C [99].

Las características del dispositivo proporcionadas por el proveedor se encuentran en la Tabla 4.1, en donde podemos apreciar que el rango de detección para este sensor es de 220 a 370 nm, con una corriente en oscuridad de 90 nA cuando es probado con una polarización inversa de 0.1 V.

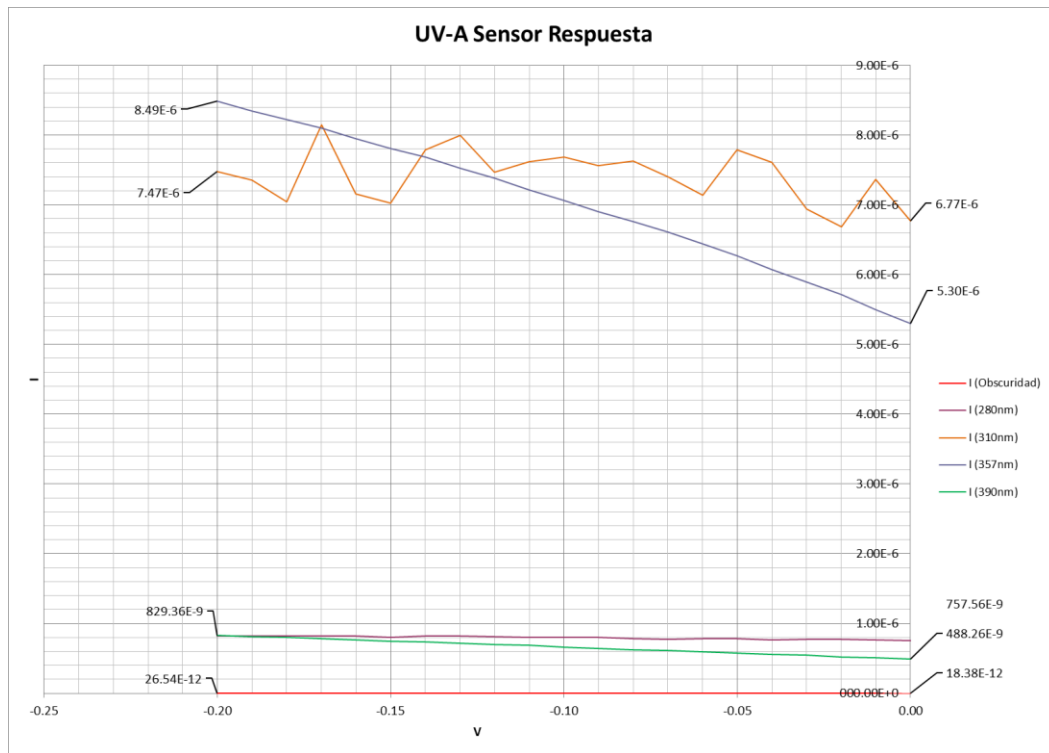
Para la caracterización eléctrica, el sensor UV-A se conectó al sistema de caracterización de semiconductores Keithley 4200-SCS, polarizándolo directa e inversamente. Las mediciones se tomaron considerando un tiempo de espera de 2 segundos y un retardo de barrido de 4 segundos.



**Gráfica 4.1** Resultados I-V en oscuridad para sensor UV-A

El Gráfico 4.1 muestra los resultados de corriente en obscuridad polarizando el fotosensor UV-A, el voltaje aplicado fue de -0.3 V a 0.3 V, el valor obtenido en polarización inversa fue de -35.08 pA, y en polarización directa 3.03 nA.

Para por medir su respuesta bajo luz UV, el sensor se ilumino con fuentes de 280 nm, 310 nm, 357 nm y 390 nm, las mediciones se tomaron cuando se polarizaba inversamente ya que se observó un mayor contraste con relación a su respuesta en obscuridad.



**Gráfica 4.2** Resultados I-V para sensor UV-A iluminado

En la Gráfica 4.2 podemos observar que el fotodetector respondió a las cuatro fuentes dando valores de corriente por arriba de los valores en obscuridad. Se graficaron valores absolutos de corriente para fácil interpretación de los resultados. La mayor respuesta a 0 V fue de 6.77  $\mu$ A para el led de 310 nm, sin embargo, su respuesta permanece relativamente constante al aumentar el voltaje. La respuesta para el led de 357 nm, a 0 V, es de 5.30  $\mu$ A, y se observa un incremento en la respuesta a medida que se aumenta el voltaje de polarización, el valor obtenido a -0.2 V es de 8.49  $\mu$ A.

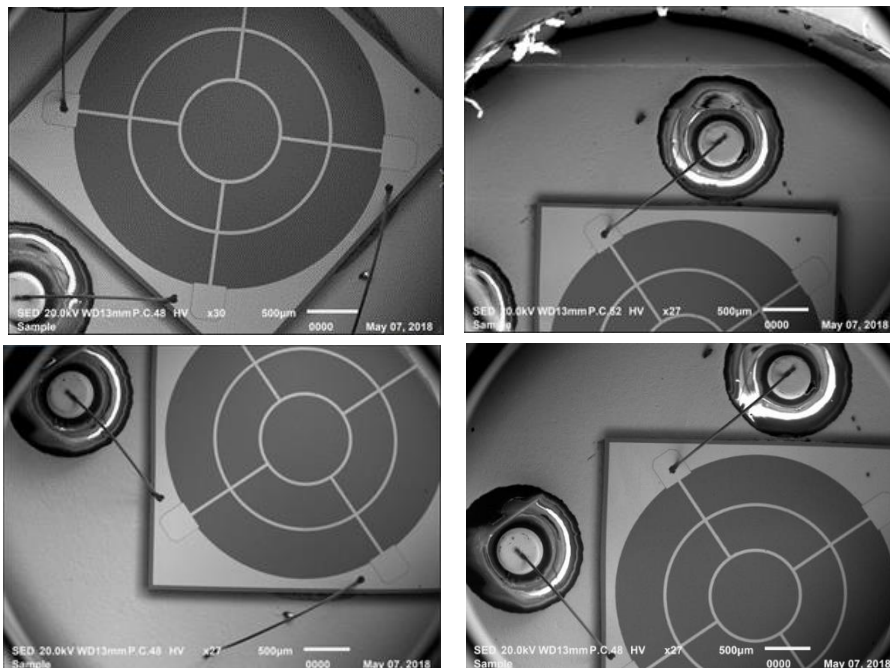
#### 4.1.2 Estudio de la morfología-topografía y análisis químico elemental de fotodiodo comercial a base de GaN

Para el estudio de la morfología-topografía y análisis químico elemental de fotodiodo comercial se utilizó el microscopio de barrido electrónico Jeol JSM-IT100 (Figura 4.5).



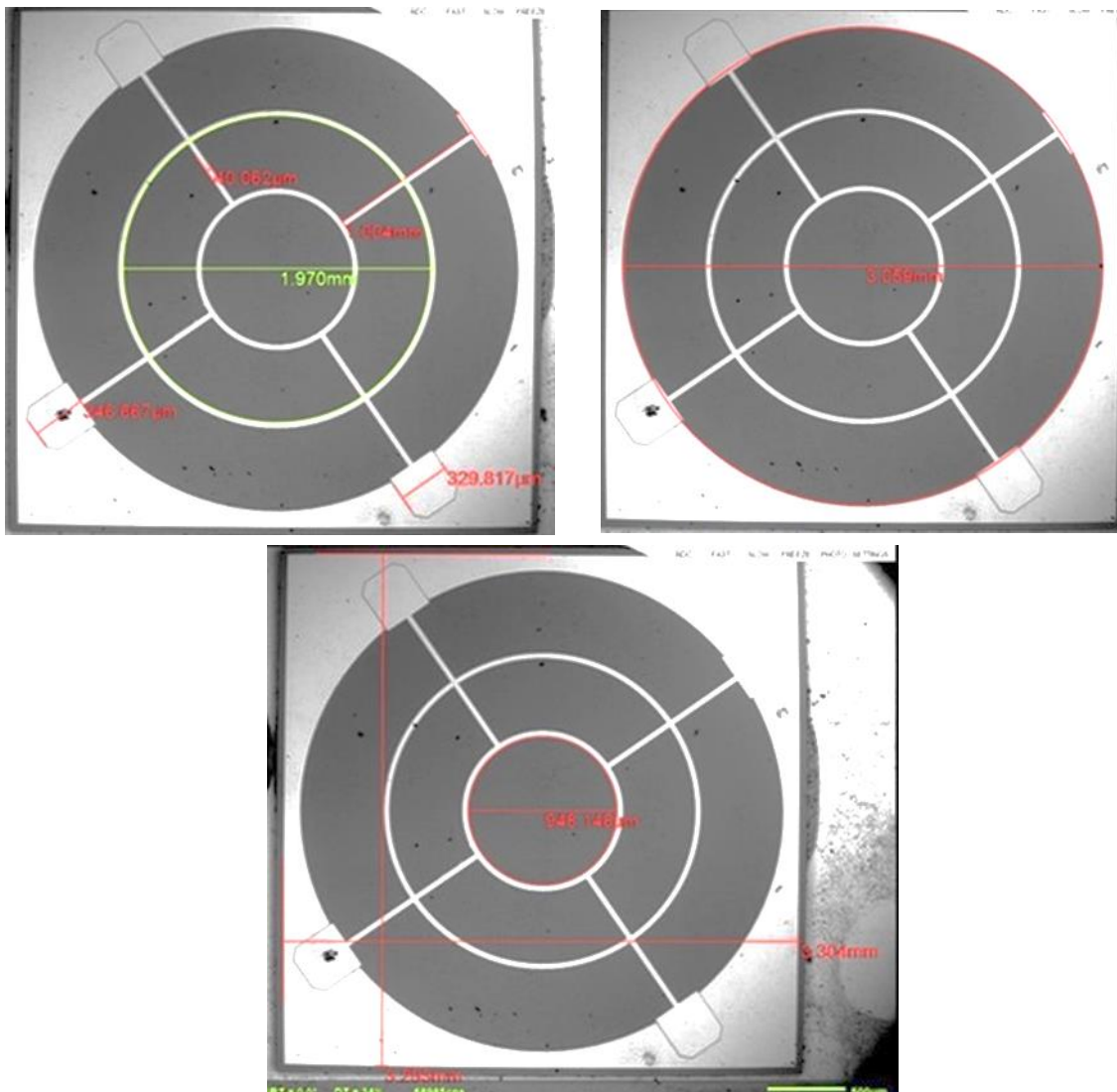
*Figura 4.5* microscopio de barrido electrónico Jeol JSM-IT100

La Figura 4.6 muestra morfología-topografía del fotodiodo comercial.



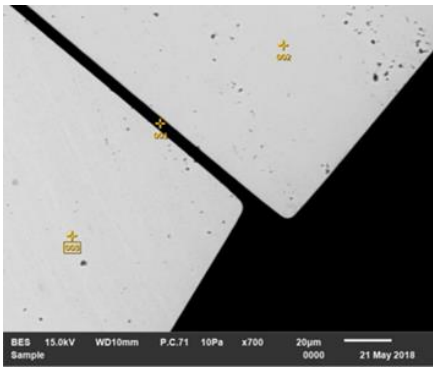
*Figura 4.6* Morfología-topografía de fotodiodo comercial

Este dispositivo cuenta con 3 terminales, una terminal está conectada a la estructura circular, y las dos restantes están conectadas al recuadro exterior del dispositivo. La parte activa del dispositivo, el cuadrado con una estructura de círculos se encuentra montada sobre un encapsulado con la finalidad de realizar los contactos necesarios para su comercialización.



**Figura 4.7** Dimensiones del fotodiodo comercial

En las Figura 4.7 podemos apreciar las medidas del dispositivo, la estructura es un cuadrado de 3.3 mm, y en la parte interna onde se encuentra la zona activa del semiconductor podemos apreciar un electrodo en forma de círculos, el diámetro de la zona activa es de 3 mm aproximadamente.



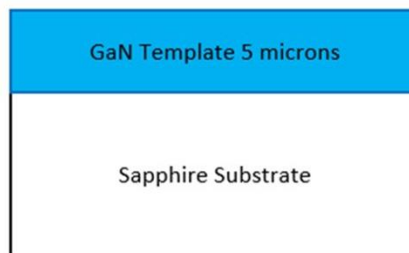
	O	Au	C	N	Si	Ga
001	4.08	24.70	3.29	7.76	2.00	58.18
002	1.02	90.93	3.15			4.90
003	1.04	91.68	3.00			4.29

**Figura 4.8** Análisis químico elemental del fotodiodo comercial

El análisis químico elemental (Figura 4.8) muestra que los contactos del dispositivo son de Au, y el material semiconductor utilizado es el nitruro de galio.

#### 4.1.3 Características de la película de GaN utilizada para la fabricación del dispositivo.

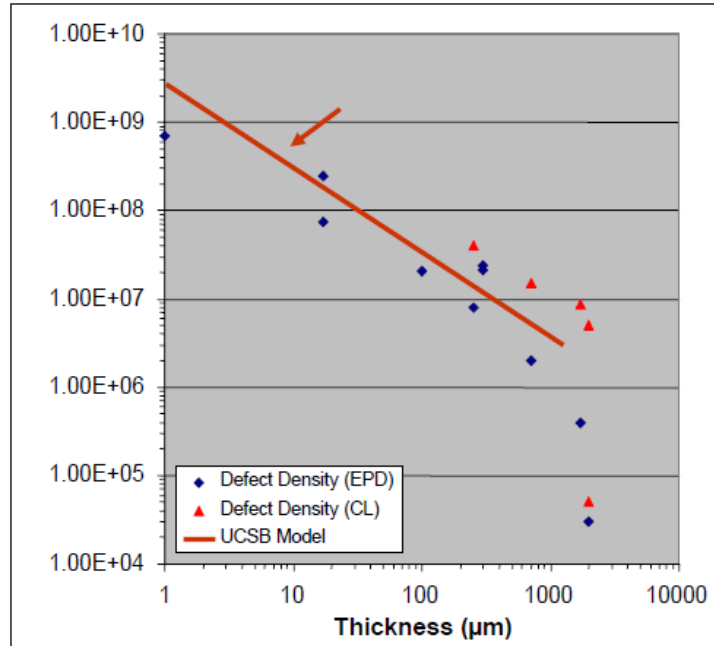
La muestra seleccionada para desarrollar el sensor tipo Schottky es una película de 5  $\mu\text{m}$  de GaN depositada sobre un sustrato de zafiro (0001) con dimensiones de 10 mm x 10 mm x 0.5 mm de espesor. La película de GaN se creció mediante el método basado en la epitaxia de fase de vapor de hidruro (HVPE). Durante el proceso de HVPE, HCl reacciona con Ga fundido para formar GaCl, que a su vez reacciona con  $\text{NH}_3$  para formar GaN.



**Figura 4.9** Muestra 5 $\mu\text{m}$  película de GaN sobre Zafiro

La Figura 4.9 es una ilustración del sustrato que se utilizará para crear un sensor tipo Schottky. La película de GaN tiene una conducción tipo-n, con una resistencia menor a 0.5 Ohm-cm; la cara de la superficie frontal es de Ga, tal como fue crecido. La superficie útil de la muestra es mayor a 90%, con una zona de exclusión de bordes de 1 mm. El

espesor de la capa GaN es de 5  $\mu\text{m}$  ( $\pm 10\%$ ) con rugosidad de 10 nm de RMS medido por el Wyko (interferómetro de luz blanca) para un área de 50  $\mu\text{m}$  x 50  $\mu\text{m}$ .



**Gráfica 4.3** Densidad de dislocación vs espesor para películas de GaN [100]

La densidad de dislocaciones, reportada por el proveedor de las muestras, está dada por la Gráfica 4.3 la cual es representativa para sus películas depositadas por el método de HVPE. La densidad de dislocación, de acuerdo con el espesor de la película de GaN de 5  $\mu\text{m}$ , es del rango de  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  a  $10^9 \text{ cm}^{-2}$ .

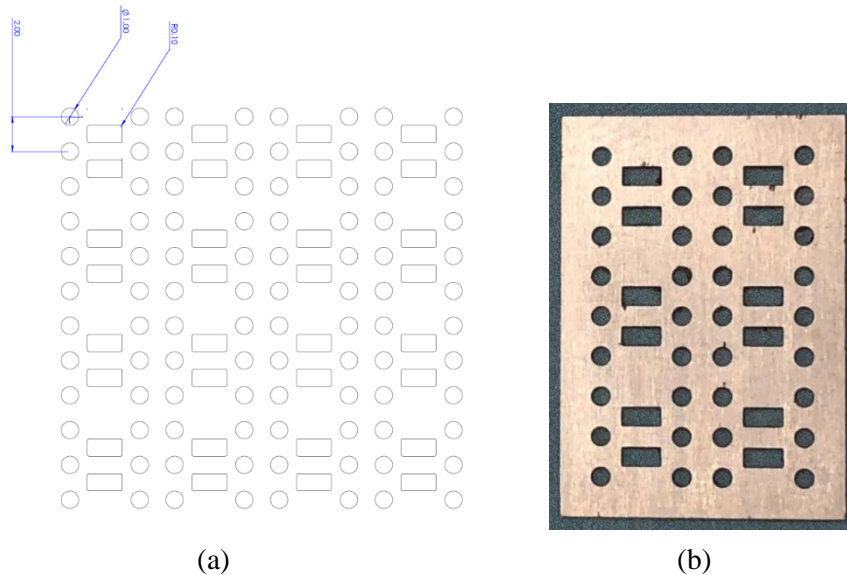
#### 4.1.4 Estudio y selección de diferentes metales que serán utilizados para la fabricación del dispositivo tipo Schottky.

Los metales que fueron seleccionados para la formación de contactos óhmicos y Schottky fueron el aluminio y oro respectivamente. La función de trabajo de GaN utilizada como referencia es de 4.1 eV que, al entrar en contacto con el aluminio, con función de trabajo de 4.08 eV, tendera a formar un contacto óhmico. En el caso del oro, el cual tiene una función de trabajo de 5.1 eV, mayor a la de GaN de 4.1 eV, se espera que forme un contacto Schottky.

Material	Función de trabajo (eV)	Reportado por:
Aluminio	4.08	Handbook of Chemistry and Physics
Oro	5.1	Handbook of Chemistry and Physics
GaN	4.1	Foresi [75]

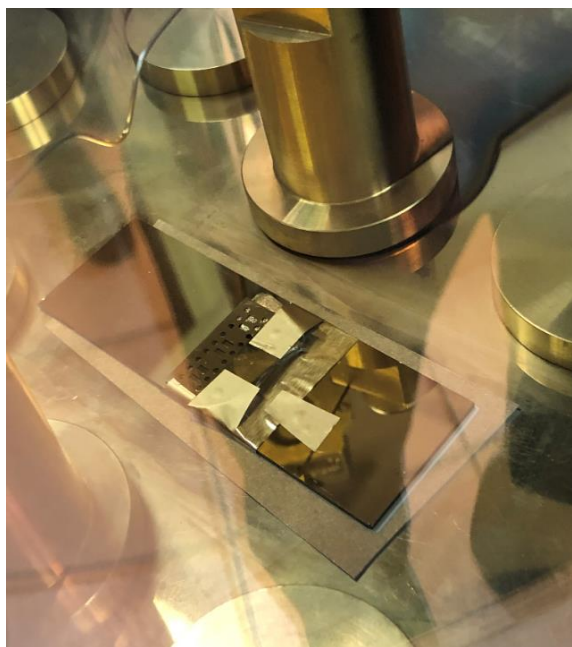
**Tabla 4.2** Funciones de trabajo de materiales utilizados en la experimentación.

Para depositar los contactos metálicos, se diseñó una máscara de matriz de círculos y rectángulos (Figura 4.10) con el objetivo de poder hacer mediciones I-V, tomando en cuenta variables como: tipo de metal, área del contacto, y distancia entre contactos.



**Figura 4.10** Máscara metálica para depositar contactos por evaporación. (a) dibujo de diseño de máscara. (b) máscara metálica fabricada por medio de WEDM.

La muestra de zafiro/GaN se fijó sobre un vidrio Corning, colocándose posteriormente la máscara metálica sobre la muestra. La muestra se introdujo en la campana de vidrio Pirex para la evaporación de los contactos metálicos (Figura 4.11).



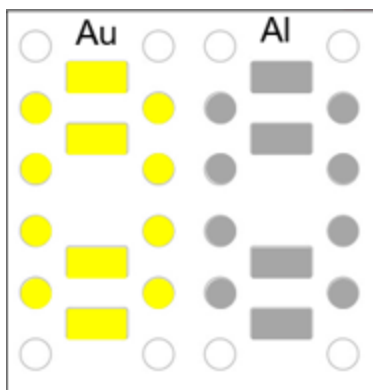
**Figura 4.11** Montaje de muestra en el interior de la campana de vidrio Pirex.

En la superficie de la película de GaN se evaporaron los contactos metálicos de oro y aluminio bajo las condiciones de operación registradas en la Tabla 4.3.

Parámetros	Valores (Au)	Valores (Al)
Presión de vacío	$10^{-5}$ torr	$10^{-5}$ torr
Corriente	17.7 amp	16.9 amp
Razón de evaporación	3.6 Å/seg	4.0 Å/seg
Espesor (de acuerdo con microbalanza de cuarzo)	0.638 kÅ	0.394 kÅ

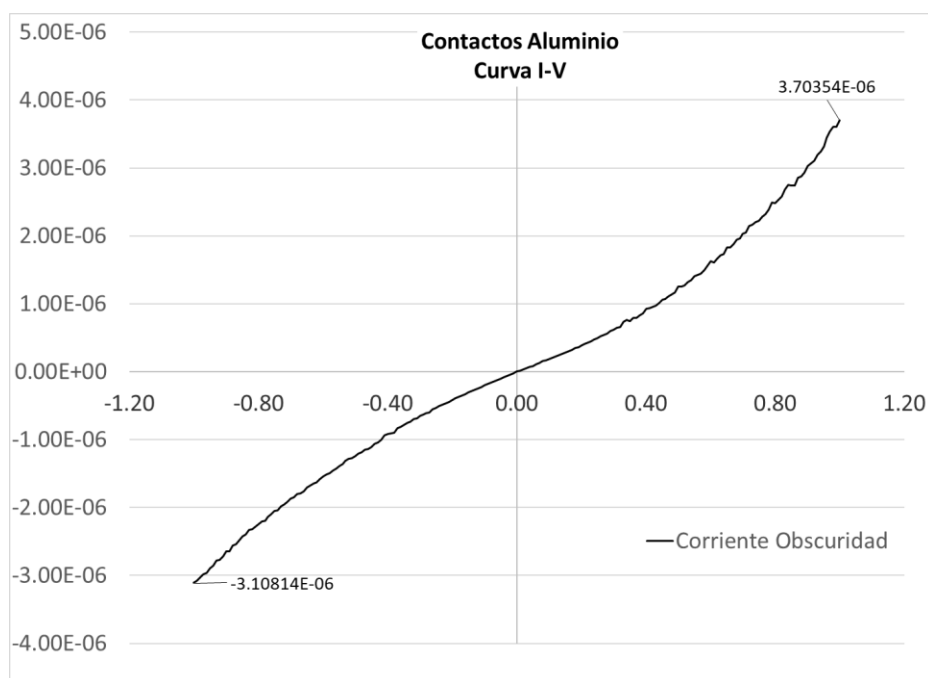
**Tabla 4.3** Condiciones de operación para la evaporación de los contactos de oro y aluminio. El espesor real es de aproximadamente 10 veces el valor de la microbalanza ( $638 \text{ \AA} = 638 \text{ nm}$ ).

Después de la evaporación se pudieron obtener contactos uniformes de oro y aluminio como se muestra en la siguiente Figura 4.12.



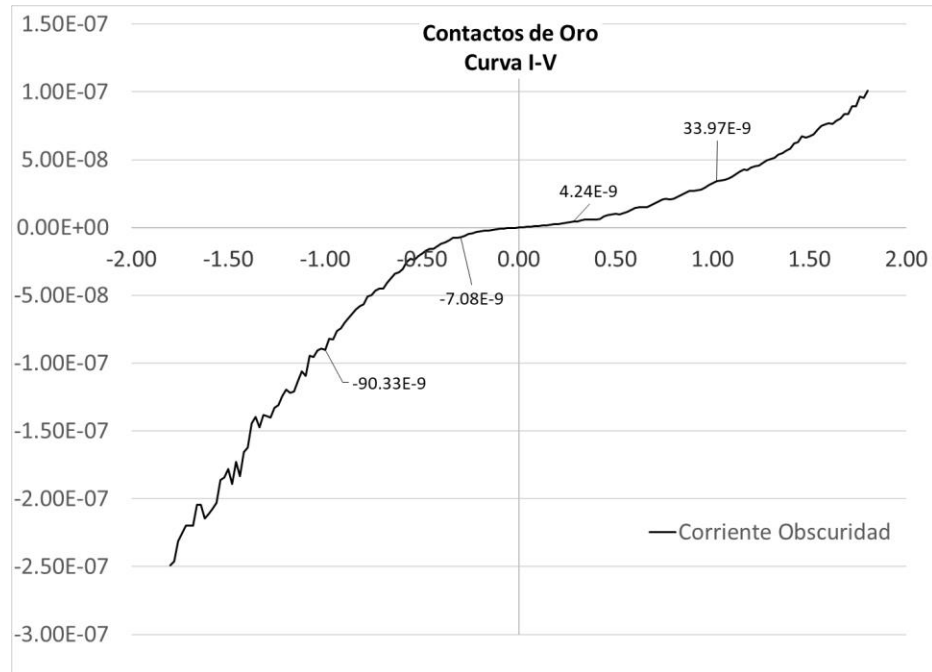
**Figura 4.12** Arreglo de los contactos de oro y aluminio depositados sobre película de GaN.

Para determinar si los contactos evaporados cumplían con las características óhmicas y Schottky, se procedió a tomar las mediciones de las características I-V mediante el equipo de sistema de caracterización de semiconductores Keithley 4200-SCS.



**Gráfica 4.4** Curva I-V para contactos de aluminio redondos medidos en oscuridad.

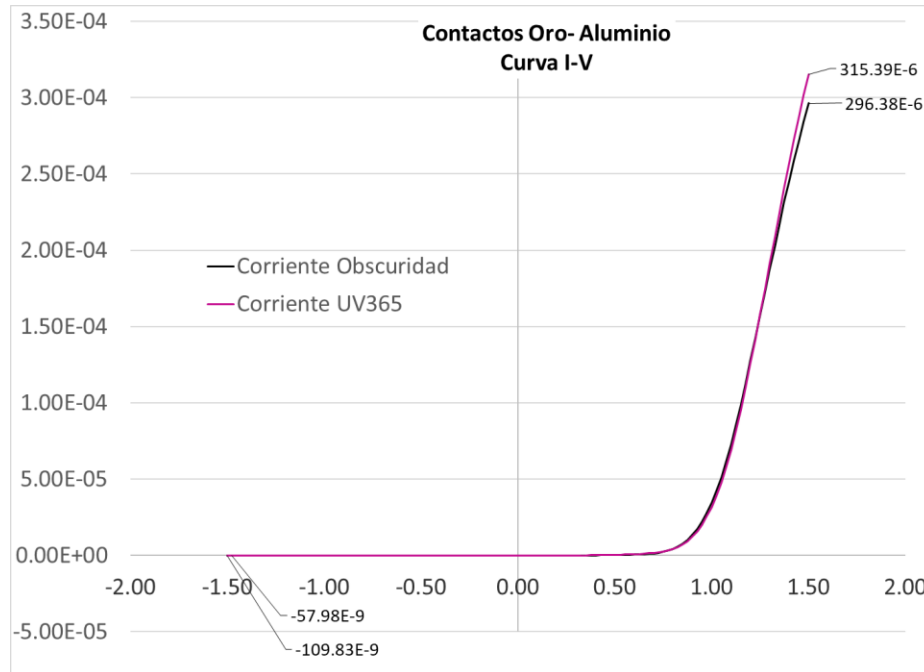
La polarización directa e inversa de dos contactos de aluminio proporcionan corrientes en oscuridad del orden de  $10^{-6}$  A cuando son polarizados a 1 V. De acuerdo con la curva I-V, el aluminio tiende a formar un contacto del tipo óhmico (Gráfica 4.4).



**Gráfica 4.5** Curva I-V para contactos de oro redondos medidos en oscuridad.

Al polarizar dos contactos de oro se puede apreciar que para 1 V se obtienen respuesta de corriente del orden de  $10^{-9}$  A. En la curva I-V se puede observar que los contactos de oro presentan un comportamiento tipo rectificador limitando la corriente en la interfaz metal-semiconductor (Gráfica 4.5).

En base a los resultados obtenidos podemos utilizar el contacto de oro como rectificador (Schottky) y el contacto de aluminio como óhmico. El contacto de oro se conectará a la terminal positiva del caracterizador, y el aluminio al negativo, de esta manera estaríamos esperando incrementar la energía de los electrones en el contacto de Au cuando lo polaricemos inversamente. Como consecuencia de la polarización inversa estaríamos aumentando la barrera para los electrones en GaN, y así evitar que pasen portadores del semiconductor al oro. Las lecturas de corriente se tomarán en oscuridad y con luz UV de 365 nm (UV365) para ver si podemos obtener un contraste significativo entre ellas.



**Gráfica 4.6** Curva I-V para medición entre un contacto de oro y uno de aluminio. Mediciones en oscuridad e iluminado con luz UV365.

Con una polarización directa de 1.5 V podemos observar corrientes en oscuridad del orden de  $10^{-4}$  A; bajo polarización inversa los valores de corrientes obtenidos son del orden de  $10^{-10}$  A. Al iluminar la muestra con luz UV365 pudimos obtener una respuesta, sin embargo no fue suficiente para crear un incremento relativo  $\Delta I/I_d = (I_{ph} - I_d)/I_d$  significativo en relación con la respuesta en oscuridad, donde  $I_{ph}$  es la corriente bajo iluminación mientras que  $I_d$  es la corriente en oscuridad. En polarización inversa, iluminando con luz UV365, se logró obtener 2 veces la respuesta en oscuridad (Gráfica 4.6).

#### 4.1.5 Estudio de la relación de las áreas de los contactos y sus efectos sobre el contacto tipo Schottky.

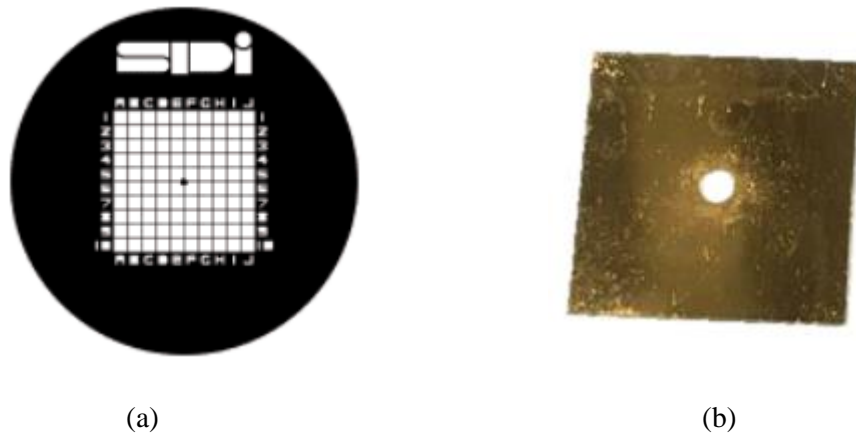
Durante las primeras experimentaciones con contactos de oro y aluminio se obtuvieron varias observaciones, a continuación, se mencionan las más relevantes para este trabajo:

- Con los contactos de aluminio se dificulta obtener un buen contacto y mediciones repetitivas.
- Los contactos de oro son más estables al igual que sus mediciones.

- No se observa una contribución significativa de la corriente generada por luz UV365 al utilizar contactos de 1 mm de diámetro de oro y aluminio.

Debido a la inestabilidad de los contactos de aluminio, se decidió utilizar solamente oro para la fabricación de los contactos metálicos. El uso de dos contactos de oro, con las mismas dimensiones, nos dio como resultado una curva I-V con corrientes muy similares bajo polarización inversa y directa (Gráfica 4.5). Tomando en consideración los resultados presentados por Dobos et al. [73], se decidió reducir el área de uno de los contactos para limitar la corriente y obtener comportamientos de rectificación tipo Schottky bajo polarización.

Para depositar los contactos metálicos de menor área, se utilizó una rejilla alfanumérica SPI con cuadros de  $95\ \mu\text{m}$  (Figura 4.13(a)), y para el contacto grande de 2 mm de diámetro se fabricó una nueva mascara (Figura 4.13(b)).



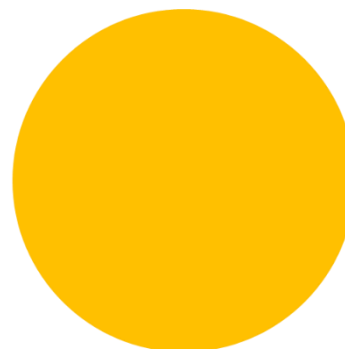
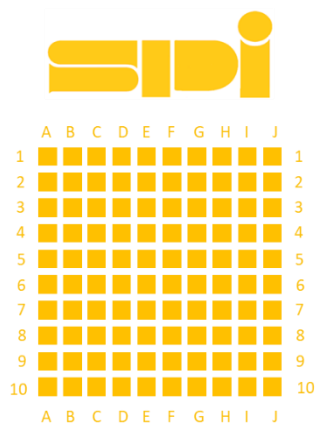
**Figura 4.13** (a)rejilla SPI con cuadros de  $95\ \mu\text{m}$ , (b)mascara para contactor circular de 2 mm de diámetro.

Los contactos se depositaron en dos pasos sobre una nueva muestra de película de GaN. Primero se depositó el contacto de oro de 2 mm de diámetro y posterior mente los contactos de la rejilla de  $95\ \mu\text{m}$ . Las condiciones y resultados de la evaporación térmica se muestran en la Tabla 4.4.

Parámetros	Valores (2 mm)	Valores (95 μm)
Presión de vacío	10 <sup>-5</sup> torr	10 <sup>-5</sup> torr
Corriente	16.4 amp	17.7 amp
Razón de evaporación	2.8 Å/seg	2.8 Å/seg
Espesor (de acuerdo con microbalanza de cuarzo)	0.500 kÅ	0.505 kÅ

**Tabla 4.4** Condiciones de operación para la evaporación de los contactos de oro. El espesor real es de aproximadamente 10 veces el valor de la microbalanza (500 Å = 500 nm).

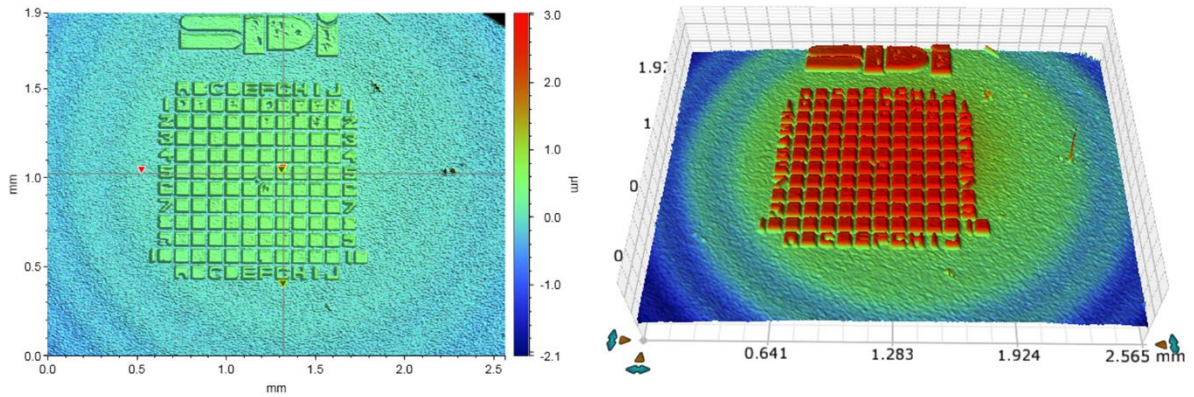
Los contactos de oro obtenidos por evaporación térmica se pueden apreciar en la Figura 4.14. Cuando se utilizó la rejilla SPI para la evaporación de los contactos, no solo se obtuvieron los contactos de 95 μm, también se lograron obtener contactos con la forma de las letras SPI, dichas letras vienen como identificación en las rejillas de esta compañía.



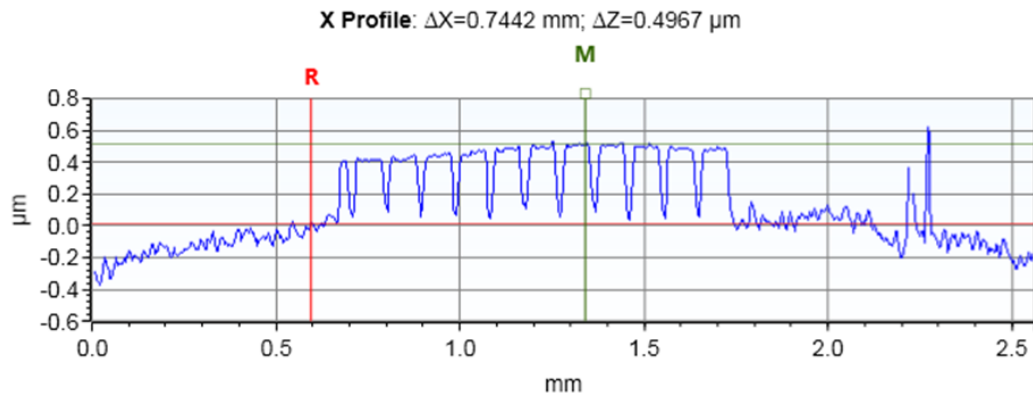
**Figura 4.14** Arreglo de contactos de oro depositados sobre película de GaN

Los espesores obtenidos fueron estimados en base a los resultados proporcionados por la microbalanza de cuarzo multiplicado por un factor de 10 veces, este factor se calculó en base a resultados históricos de otras evaporaciones. Para comprobar la estimación del espesor, la muestra se analizó con el perfilómetro óptico Bruker modelo ContourGT-K.

La figura 4.15 muestra las imágenes obtenidas con el perfilómetro óptico Bruker, en la zona de los contactos de 95  $\mu\text{m}$ .



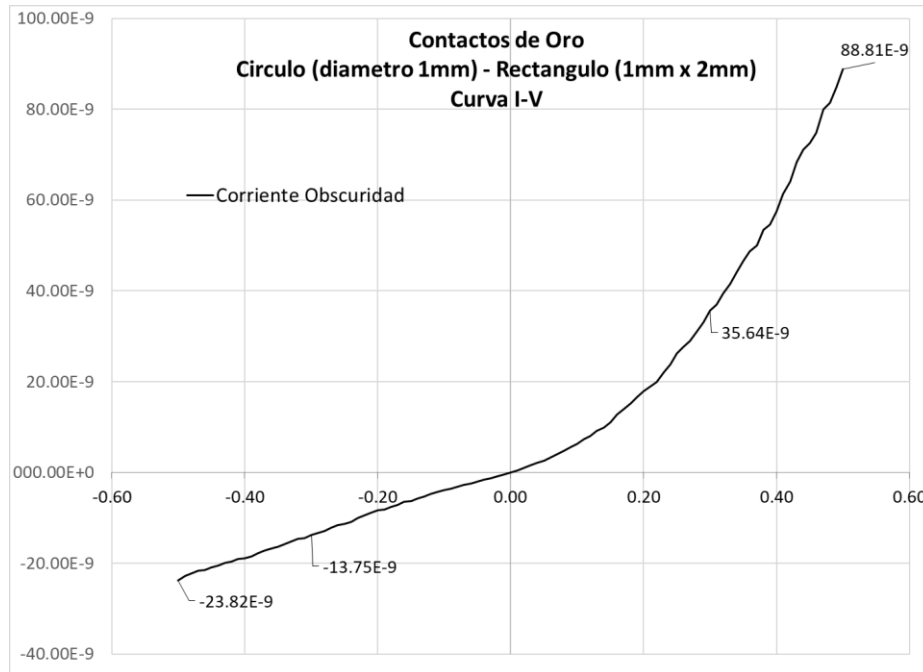
**Figura 4.15** Imagen de contactos de oro obtenidas con el perfilómetro óptico.



**Figura 4.16** Imagen con la medición de las alturas de los contactos de 95  $\mu\text{m}$ .

La altura de los contactos de oro de 95  $\mu\text{m}$  obtenidas mediante el perfilómetro óptico es de 497 nm aproximadamente, el resultado es muy similar al calculado con los valores de la microbalanza de cuarzo.

De la primera evaporación (Figura 4.12), se tomaron lecturas de corriente en oscuridad para dos contactos de oro, un contacto de 1 mm de diámetro y otro rectangular de 1 x 2 mm. Los datos obtenidos fueron graficados para poder apreciar el comportamiento bajo polarización directa e inversa.



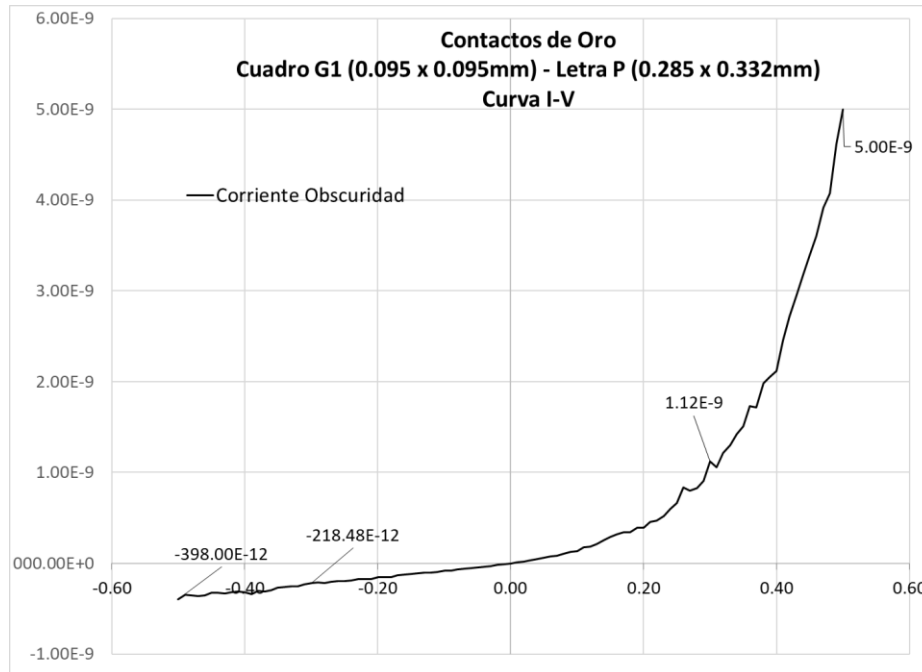
**Gráfica 4.7** Curva I-V para medición entre contactos de oro (circular de 1mm de diámetro-rectángulo de 1 x 2mm).

En la Gráfica 4.7 podemos observar que, bajo polarización inversa, el contacto de menor área tiende a rectificar la corriente, la relación del cociente corriente directa/corriente inversa es de 3.7 veces. El área del contacto menor, el cual tiene un diámetro de 1 mm, es de  $0.7854 \text{ mm}^2$ , mientras que el área aproximada del contacto cuadrado es de  $2 \text{ mm}^2$ , una relación de áreas de 2.5 veces. Cuando analizamos la corriente a 0.3 V podemos observar que se obtiene un cociente de 2.59 veces, con una corriente en polarización directa de  $88.81 \times 10^{-9} \text{ A}$ , y una en polarización inversa de  $13.75 \times 10^{-9} \text{ A}$ .

Para incrementar la relación entre áreas se tomó el contacto pequeño G1 del arreglo presentado en la Figura 4.14, y como contacto grande se tomó la parte de color verde de la letra P (Figura 4.17).



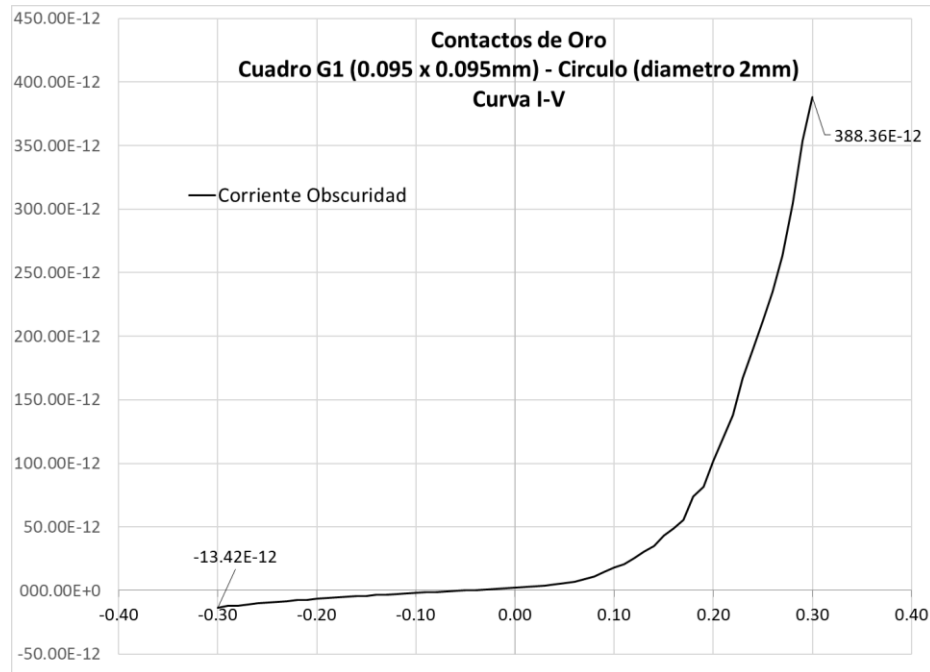
**Figura 4.17** Letra P utilizada como contacto de mayor área (sección verde de la letra P).



**Gráfica 4.8** Curva I-V para medición entre contactos de oro (cuadro G1 de 0.095 x 0.095 mm – sección letra P de 0.285 x 0.332 mm).

El área del contacto G1 es de 0.0090 mm<sup>2</sup>, y el área del contacto más grande (sección de la letra P) es de 0.0946 mm<sup>2</sup>, la relación entre las áreas de los contactos es de 10.5 veces. En la Gráfica 4.8 podemos observar que la corriente en polarización directa (0.5 V) es de 5.0x10<sup>-9</sup> A, mientras que en polarización inversa (0.5 V) se obtuvo una corriente de 0.398x10<sup>-9</sup> A, una relación del cociente corriente directa/corriente inversa de 12.56 veces. Para efectos comparativos, se analizó el cociente cuando el dispositivo es polarizado directa e inversamente a 0.3 V, el resultado fue de 5.13 veces, obteniendo una corriente en polarización directa de 1.12x10<sup>-9</sup> A, y de 0.218x10<sup>-9</sup> A en polarización inversa.

Para seguir incrementando la relación entre áreas se procedió a tomar uno de los contactos de 95 μm y el círculo de 2 mm de diámetro (Figura 4.10), de esta manera tendríamos una relación de áreas de 348.8 veces, en donde el área del cuadro es de 0.0090 mm<sup>2</sup>, y 3.14 mm<sup>2</sup> para el contacto grande circular.



**Gráfica 4.9** Curva I-V para medición entre contactos de oro (cuadro G1 de 0.095 x 0.095 mm – círculo grande Ø 2 mm).

La Gráfica 4.9 muestra el comportamiento del dispositivo al ser polarizado a 0.3V. En polarización directa se lograron obtener corrientes de  $388.36 \times 10^{-12}$  A, mientras que en polarización inversa se logró una corriente de  $13.42 \times 10^{-12}$  A. El cociente, corriente directa/corriente inversa, obtenido fue de 28.93 veces.

#### 4.1.6 Estudio de la relación de distancia entre contactos y sus efectos sobre la corriente de fuga, y ganancia bajo los efectos de luz UV.

Los resultados obtenidos durante el estudio de la relación de las áreas de los contactos y sus efectos sobre el contacto tipo Schottky se encuentran resumidos en la Tabla 4.5.

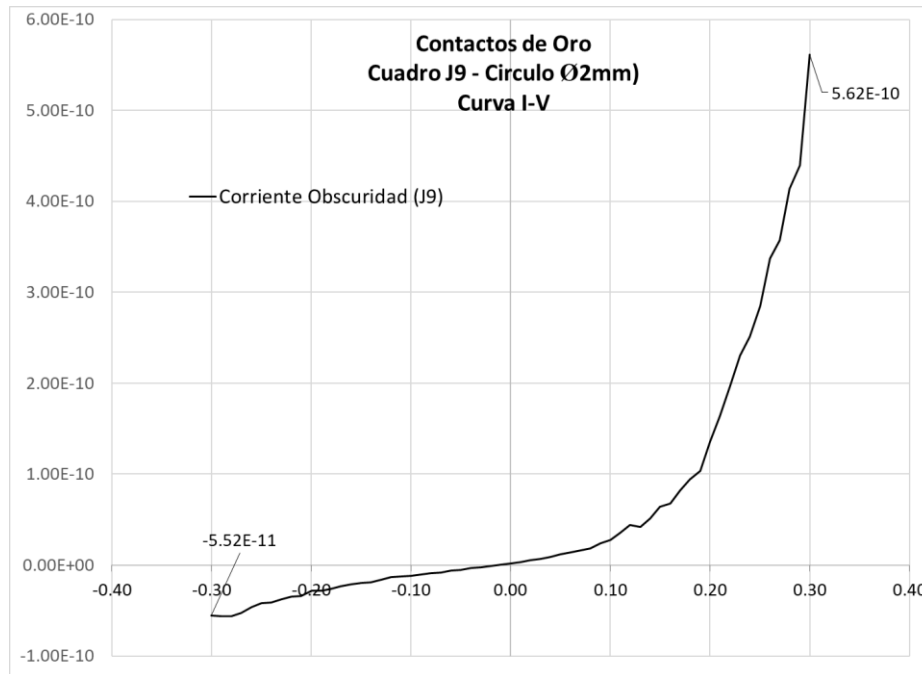
Contactos	Cociente de áreas	Cociente de corriente a 0.3V	Corriente polarización inversa (0.3V)	Corriente polarización directa (0.3V)
Cir Ø 1 mm-Rec	2.5 veces	2.59 veces	$13.75 \times 10^{-9}$ A	$35.64 \times 10^{-9}$ A
G1- Letra P	10.5 veces	5.13 veces	$0.218 \times 10^{-9}$ A	$1.12 \times 10^{-9}$ A
G1-Cir Ø 2 mm	348.8 veces	28.93 veces	$13.42 \times 10^{-12}$ A	$388.36 \times 10^{-12}$ A

**Tabla 4.5** Resultados del estudio de la relación de las áreas de los contactos.

El análisis de estos resultados nos permite observar que a medida que se aumenta el cociente entre las áreas de los contactos se obtiene un incremento en el cociente de la corriente inversa/corriente directa, es decir, se mejora el contacto tipo Schottky. Las Curvas I-V de las Gráficas 4.7, 4.8, y 4.9 nos permiten ver este comportamiento claramente.

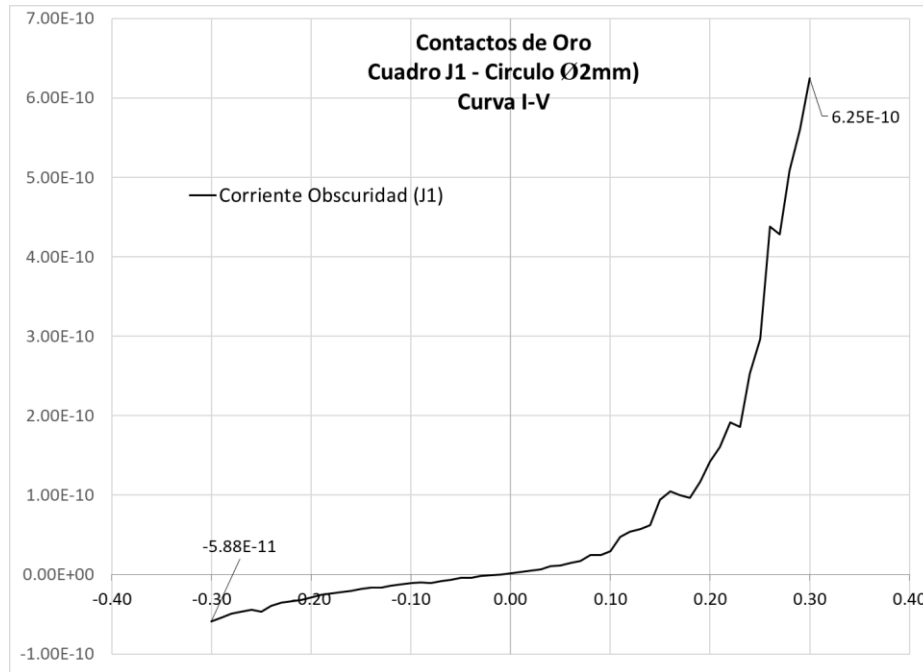
La combinación G1-Cir Ø 2 mm es la que presenta una menor corriente en polarización inversa ( $388.36 \times 10^{-12}$  A), este resultado nos favorece ya que si logramos una corriente bajo iluminación similar a la obtenida en la gráfica 4.6 (aproximadamente  $100 \times 10^{-9}$  A), podremos obtener un incremento relativo  $\Delta I/I_d = (I_{ph} - I_d)/I_d$  significativo en relación con la respuesta en oscuridad.

La disminución de la corriente se puede explicar con la reducción del área del contacto ( $95 \mu\text{m}$ ), sin embargo, la distancia entre contactos es otra variable que debe ser analizada para entender su relación con la disminución en la corriente, principalmente la corriente bajo polarización inversa. Para evaluar esta variable se utilizó la muestra de la Figura 4.10, manteniendo el círculo de Ø 2 mm constante y variando los cuadros de  $95 \mu\text{m}$ .



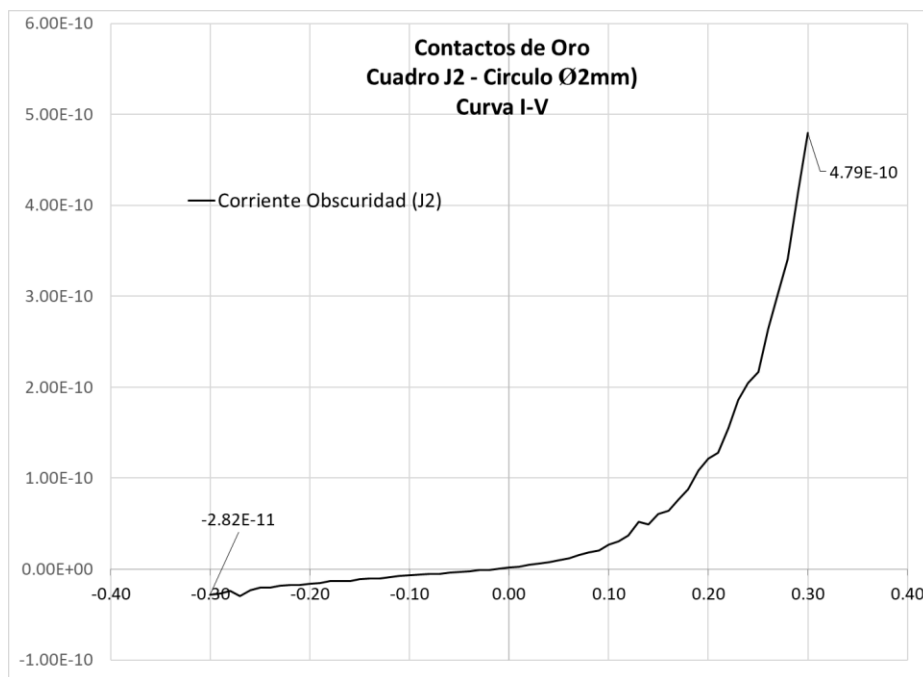
**Gráfica 4.10** Curva I-V para medición entre contactos de oro J9 – Círculo Ø 2 mm.

La distancia que existe entre el contacto J9 y el círculo Ø 2 mm es de 3.0 mm, la corriente obtenida bajo polarización inversa es de  $5.52 \times 10^{-11}$  A (Gráfica 4.10).



**Gráfica 4.11** Curva I-V para medición entre contactos de oro J1 – Circulo Ø 2 mm.

La distancia que existe entre el contacto J1 y el círculo Ø 2 mm es de 2.7 mm, la corriente obtenida bajo polarización inversa es de  $5.88 \times 10^{-11}$  A (Gráfica 4.11).



**Gráfica 4.12** Curva I-V para medición entre contactos de oro J2 – Circulo Ø 2 mm.

La distancia que existe entre el contacto J2 y el círculo Ø 2 mm es de 2.7 mm, la corriente obtenida bajo polarización inversa es de  $2.82 \times 10^{-11}$  A (Gráfica 4.12).

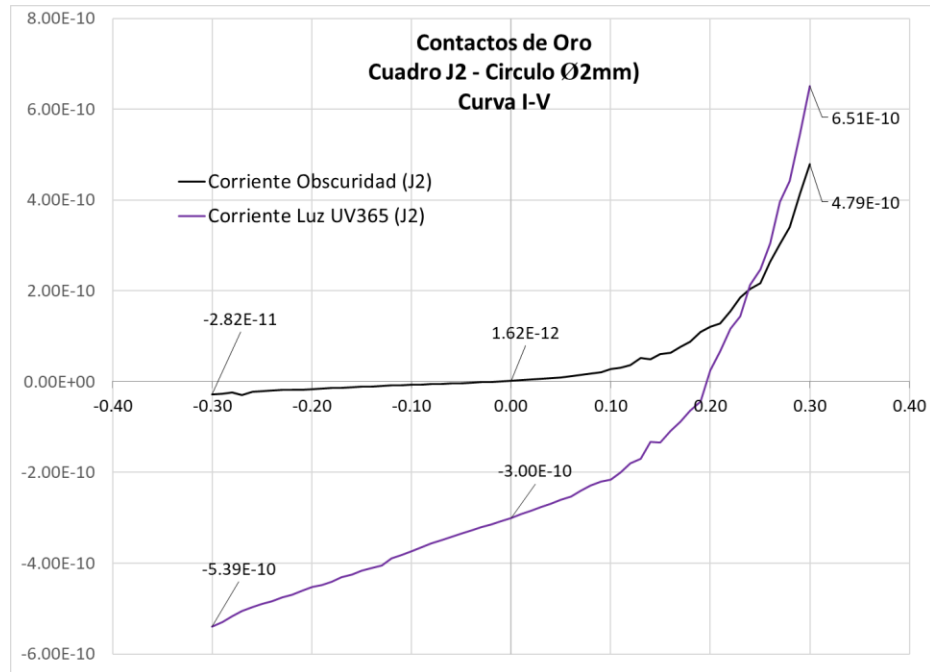
Los resultados obtenidos con los contactos J9, J1 y J2 de 95 µm, y el círculo Ø 2 mm se encuentran en la Tabla 4.6.

Contacto	Distancia entre contactos	Corriente polarización inversa 0.3V
J9 – Círculo Ø 2 mm	3.0 mm	$5.52 \times 10^{-11}$ A
J1 – Círculo Ø 2 mm	2.7 mm	$5.88 \times 10^{-11}$ A
J2 – Círculo Ø 2 mm	2.7 mm	$2.82 \times 10^{-11}$ A

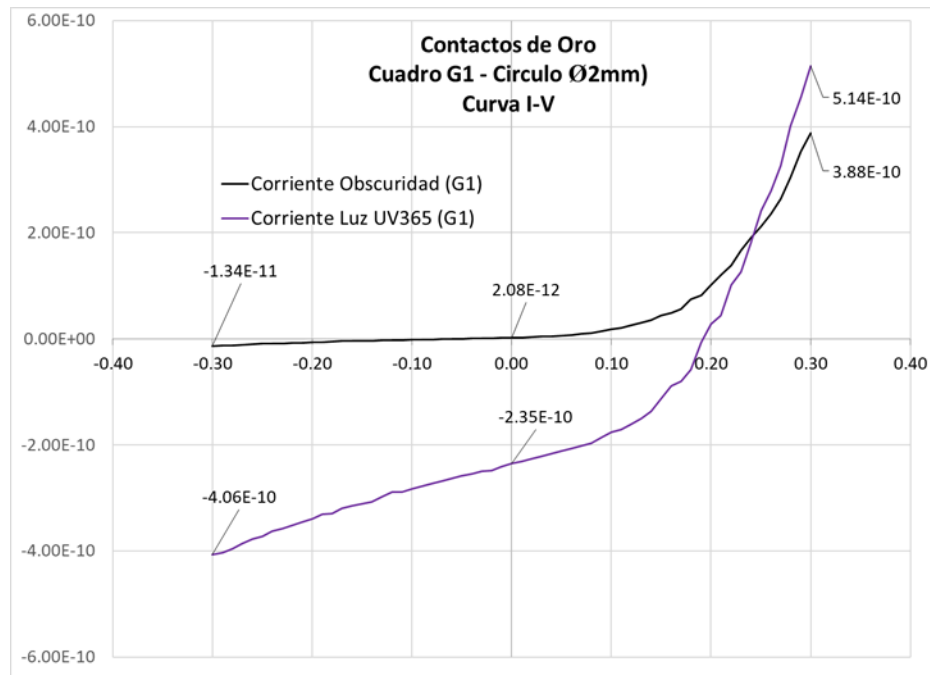
**Tabla 4.6** Resultados del estudio de la relación de las áreas de los contactos.

Se seleccionaron los contactos J9, J1 y J2 debido a que los contactos están directamente conectados con el contacto circular Ø 2 mm, es decir, no existe otro contacto entre ellos y el contacto circular Ø 2 mm. En base a los resultados podemos observar que la distancia entre los contactos no es un factor predominante cuando se encuentran en el rango de 2.7–3.0 mm, sin embargo, si comparamos estos resultados con el obtenido entre los contactos G1- Letra P ( $0.218 \times 10^{-9}$  A), en el cual la distancia entre contactos es de 0.45 mm, podemos apreciar una reducción de aproximadamente 4 veces la corriente. Tomando en cuenta la lectura entre los contactos G1-Letra P, pudiéramos pensar que, al incrementar la distancia entre contactos, de 0.45 mm a 3.0 mm, la corriente disminuirá, posiblemente ocasionado por la caída de voltaje que se genera a través del semiconductor.

Se tomaron lecturas, en oscuridad y bajo iluminación UV365, de diversos contactos de 95 µm, de los cuales se seleccionaron aquellos que presentaron una menor corriente de fuga, y un mayor incremento de su respuesta bajo iluminación UV365, cuando fueron polarizados inversamente.



**Gráfica 4.13** Curva I-V para medición entre contactos de oro J2 – Circulo Ø 2 mm. Corrientes en oscuridad y bajo iluminación con luz UV365.



**Gráfica 4.14** Curva I-V para medición entre contactos de oro G1 – Circulo Ø 2 mm. Corrientes en oscuridad y bajo iluminación con luz UV365.

Las curvas I-V (Gráfica 4.13, 4.14) muestran los resultados obtenidos para los contactos J2-circulo Ø 2 mm y G1-circulo Ø 2 mm. Las muestras se polarizaron directa e

inversamente tomando las lecturas de la corriente generada en oscuridad y bajo iluminación.

Lo que nos interesa analizar de estos resultados es el incremento relativo de la corriente bajo iluminación con respecto a la corriente en oscuridad, a 0.3V, 0V y -0.3V. Para calcular el incremento relativo utilizaremos la ecuación,

$$\frac{\Delta I}{I_d} = \frac{(I_{ph} - I_d)}{I_d}$$

donde  $I_{ph}$  es la corriente bajo iluminación mientras que  $I_d$  es la corriente en oscuridad.

Los resultados obtenidos para los dos arreglos de contactos se presentan en la siguiente Tabla.

Contactos	$\Delta I/I_d$ (0.3V)	$\Delta I/I_d$ (0V)	$\Delta I/I_d$ (-0.3V)
J2-cir Ø 2 mm	0.36	184.19	18.11
G1-cir Ø 2 mm	0.32	111.98	29.29

**Tabla 4.7** Valores  $\Delta I/I_d$  a 0.3V, 0V, -0.3V.

Los resultados del incremento relativo ( $\Delta I/I_d$ ) de los dos arreglos de contactos muestran un incremento similar cuando son polarizados directamente, posiblemente con el incremento del voltaje esta relación tendera a cero y se dificulte apreciar la contribución de la corriente generada bajo iluminación. El máximo incremento se puede obtener cuando el voltaje es 0 V, este resultado es de gran interés debido a que se obtiene un dispositivo que no requiere de polarización para su funcionamiento. Bajo polarización inversa, la contribución de la corriente generada por la luz UV es significativa, obteniéndose incrementos relativos de 18.11 y 29.29 con respecto a la corriente generada en oscuridad. A medida que el voltaje aumenta, el incremento relativo va disminuyendo, sin embargo, mientras la pendiente de la corriente en oscuridad se mantiene constante, la corriente generada por la luz UV tiende a presentar un comportamiento exponencial, lo cual pudiera resultar en un incremento de la corriente generada bajo iluminación a medida que aumentamos el voltaje.

## Conclusiones

En las dos últimas décadas Furukawa Electric ha buscado desarrollar aplicaciones que hagan uso de sus desarrollos tecnológicos relacionados con el crecimiento de cristales GaN y dispositivos a base de GaN. El continuo desarrollo en técnicas de crecimiento de cristales y películas de GaN tienen como objetivo mejorar su calidad al disminuir las dislocaciones de su red y así mejorar sus propiedades morfológicas, cristalinas y ópticas. El desempeño de los dispositivos a base de GaN, depende en gran medida de la calidad de la película o cristal.

Para los estudios se utilizaron muestras que consisten en una película de 5µm de GaN depositada sobre un sustrato de zafiro (0001) con dimensiones de 10mm x 10mm x 0.5mm de espesor. Se depositaron y estudiaron las propiedades de contactos Al y Au depositados sobre la película de GaN sin ningún proceso de limpieza para evitar agregar otras variables a la experimentación.

Los contactos de 1mm de diámetro de Al, presentaron corrientes del orden de  $10^{-6}$  A cuando son polarizados con un voltaje de 1 V, conservando una simetría de su curva I-V al ser polarizados directa e inversamente. El contacto, aun cuando muestra una ligera desviación de la dependencia lineal de la corriente vs. voltaje, se puede considerar como un contacto óhmico. La corriente en los contactos de 1mm de diámetro de Au fue del orden  $10^{-8}$  A con una polarización de 1 V, sus curvas I-V muestran características cercanas a las de un contacto rectificador.

Al polarizar el dispositivo a 1.5 V, haciendo uso de un contacto de Au y uno de Al, se logró obtener una curva I-V similar a la característica para un diodo Schottky, la corriente en polarización directa fue ~5.1 veces más grande que la corriente en polarización inversa. Al iluminar el dispositivo con luz UV la corriente obtenida incrementa ~ 6 % en polarización directa (de  $\sim 296 \times 10^{-6}$  a  $\sim 315 \times 10^{-6}$  A) y aproximadamente el doble en polarización inversa (de  $\sim 58 \times 10^{-9}$  a  $\sim 110 \times 10^{-9}$  A). En ambos sentidos de polarización, el incremento de la corriente no fue significativo con respecto a la corriente obtenida en oscuridad. El resultado obtenido indica que no es posible obtener un sensor de luz UV con alta responsividad usando contactos con la misma área, a pesar de que tengan diferentes funciones de trabajo.

Al polarizar un contacto cuadrado de  $95\ \mu\text{m}$  relativamente a un contacto circular de  $2\ \text{mm}$  de diámetro, con separación entre los contactos de  $2.7\ \text{mm}$ , se logró obtener una curva I-V característica de un diodo Schottky, la relación entre la corriente de polarización directa contra la inversa fue de  $\sim 29$  veces. Los resultados se obtuvieron sobre contactos que no fueron sometidos a un tratamiento térmico.

Este mismo dispositivo, al ser iluminado con luz UV, logró obtener un incremento relativo de la corriente  $\sim 30$  veces, de  $13 \times 10^{-12}$  a  $4.06 \times 10^{-10}$  A, bajo una polarización inversa a  $-0.3\text{V}$ . Otros de los resultados observados son los valores logrados a  $0\text{V}$ , en obscuridad se registró una corriente de  $1.62 \times 10^{-12}$  A, mientras que bajo iluminación se obtuvo una corriente de  $3.0 \times 10^{-10}$  A, un incremento relativo de  $\sim 185$  veces. Estos resultados nos muestran que el dispositivo puede ser operado con voltajes muy bajos, o inclusive, sin polarización. No es recomendable usar el dispositivo bajo polarización directa como sensor debido a que el incremento relativo de la corriente por iluminación UV no es significativo con respecto a la corriente en obscuridad y el consumo de energía es alto. Los resultados obtenidos muestran la posibilidad de fabricar un sensor de luz UV con alta responsividad el cual no necesita ser alimentado con una fuente externa de energía.

### **Futuras Investigaciones**

Aun cuando los resultados obtenidos son satisfactorios, existen otras variables a considerar para reducir la corriente de fuga, y/o aumentar la respuesta bajo iluminación.

- Tratamiento térmico para mejorar la unión metal/GaN.
- Tratamiento de la superficie de GaN antes de depositar los contactos para reducir la cantidad de defectos y mejorar la barrera Schottky.
- Reducir el espesor de los contactos de Au para evaluar su efecto sobre la respuesta bajo iluminación.
- Optimizar la geometría y el diseño del dispositivo para incrementar la respuesta bajo iluminación.

## Bibliografía

- [1] J. Gale, J. Bradshaw, Z. Chen, A. Garg and D. Gomez, "Sources of CO<sub>2</sub>," in *IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage*, United Kingdom, p. 30.
- [2] G. C. Team, «Global Carbon Atlas,» Global Carbon Atlas, 2019. [En línea]. Available: <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>. [Último acceso: 21 Enero 2020].
- [3] K. Hamada, «Present status and future prospects for electronics in electric vehicles/hybrid electric vehicles and expectations for wide-bandgap semiconductor devices,» *Power Devices and Sensors*, vol. Vol 2, pp. 1-4, 2010.
- [4] F. Arena and L. Mezzana, "The Automotive CO<sub>2</sub> Emissions Challenge," Arthur D. Little, 2014.
- [5] J. Wilson, "Silicon Labs," 2020. [Online]. Available: <http://silabs.com>. [Accessed 26 1 2020].
- [6] R. Retting, "Pedestrian Traffic Fatalities by State," Governors Highway Safety Association, Washington, DC, 2017.
- [7] D. C. S. A. Adnan Shaout, "Advanced Driver Assistance Systems - Past, Present and Future," The University of Michigan Dearborn, The Electrical and Computer Engineering Department, Dearborn, Michigan, 2011.
- [8] X. Mosquet, M. Andersen and A. Arora, "A ROADMAP TO SAFER DRIVING THROUGH ADVANCED DRIVER ASSISTANCE SYSTEMS," The Boston Consulting Group for the Motor & Equipment Manufacturers Association, Washington, D.C., 2015.
- [9] S. Royo y M. Ballesta-García, «An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles,» *Applied sciences*, vol. 9, nº 4093, pp. 2-3, 2019.
- [10] P. Pickering, "GaN Devices Power the Next Generation of LiDAR Systems," *Electronic Design*, pp. 1-4, 2018.
- [11] S. Labs, "Adding UV Sensing to Wearables & Consumer Applications," *Silicon Labs*, pp. 1-7, 2014.
- [12] D. Ehrentraut, E. Meissner and M. Bockowski, *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, Berlin Heidelberg: Springer, 2010.
- [13] G. V. Research, "Grand View Research," 11 2017. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/gan-gallium-nitride-semiconductor-devices-market>. [Accessed 1 2020].
- [14] B. G. Streetman and S. K. Banerjee, *Solid State Electronic Devices*, Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, Inc, 2015.
- [15] A. W. E.N. Mokhov, *Single Crystals of Electronic Materials*, Woodhead Publishing, 2019.
- [16] P. T. J. Al, «Propiedades estructurales y ópticas de compuestos,» *Tumbaga*, vol. 6, pp. 201-214, 2011.

- [17] M. Meneghini and E. Z. Gaudenzio Meneghesso, *Power GaN Devices*, Switzerland: Springer, 2017.
- [18] C. G. E. B. K. F. B. M. G. E. G. G. M. Farahmand, "Monte Carlo simulation of electron transport in the III-nitride," *Transactions on electronic devices*, vol. 48, no. 3, pp. 535-542, 2001.
- [19] M. Suzuki y T. Uenoyama, «Strain effect on electric and optical properties of GaN/AlGaIn quantum-well lasers,» *Journal of Applied Physics*, nº 80, p. 6868, 1996.
- [20] J. D. T. Sanchez y A. B. Alfonso, «El nitruro de galio y sus aleaciones,» *Mundo Nano*, vol. 5, nº 1, pp. 42-58, 2012.
- [21] C. Z. A. T. H. M. Romualdo A. Ferreyra, «Group III Nitrides,» *Springer International Publishing*, pp. 743-827, 2017.
- [22] E. F. Schubert, "Rensselaer School of Engineering," [Online]. Available: <https://www.ecse.rpi.edu/research>. [Accessed 16 2 2012].
- [23] D. Anderson y N. Apsley, «The Hall effect in III-V semiconductor assessment,» *Semiconductor Science and Technology*, nº 1, pp. 187-202, 1986.
- [24] S. Todat, «GaN materials,» *semiconductor today Compounds&AdvancedSilicon*, vol. 12, nº 2, pp. 78-79, 2017.
- [25] STR, «STR Group,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.str-soft.com/products/cvdsim/HVPE/>. [Último acceso: 24 2 2020].
- [26] H. Maruska and J. J. Tietjen, "The Preparation and Properties of Vapor-Deposited Single-Crystal GaN," *Applied Physics Letters*, 1969.
- [27] R. Yu, B. Zhang, L. Zhang, YongzhongWu, H. Hu, L. Liu y Y. Shao, «Fabrication of Pyramid Structure Substrate Utilized,» *mdpi journal crystals*, vol. 9, p. 547, 2019.
- [28] C. R. Miskys, M. K. Kelly, O. Ambacher y M. Stutzmann, «Freestanding GaN-substrates and devices,» *phys. stat*, vol. 0, nº 6, pp. 1627-1650, 2003.
- [29] Y.-H. Wu, Y.-H. Yeh, K.-M. Chen, Y.-J. Yang y W.-I. Lee, «Free-standing a-plane GaN substrates grown by HVPE,» Department of Electrophysics, National Chiao Tung University, Hsinchu City 30010, Taiwan , 2014.
- [30] A. Segal, D. Bazarevskiy, M. V. Bogdanov and E. Yakovlev, "Modeling analysis of AlN and AlGaIn HVPE," *Physica Status Solidi*, vol. 6, pp. 329-332, 2009.
- [31] W. Utsumi, H. S. H. Kaneko, T. Watanuki, K. Aoki y O. Shimomura, «Single crystal growth of gallium nitride by slow-cooling of its congruent melt under high pressure,» *Nature Materials* 2, pp. 735-738, 2003.
- [32] T. Paskova, R. Kroeger, S. Figge, D. Hommel, B. M. V. Darakchieva, A. H. N. M. W. E. Preble y M. Tutor, «High-quality bulk a-plane GaN sliced from boules in comparison to heteroepitaxially grown thick films on r-plane sapphire,» *Applied Physics Letters*, 2006.

- [33] K. Hoshino, N. Yanagita, M. Araki y K. Tadatomo, «Effect of low-temperature GaN buffer layer on the crystalline quality of subsequent GaN layers grown by MOVPE,» *Journal of Crystal Growth*, vol. 298, pp. 232-234, 2007.
- [34] Y. Tanaka, J. Ando, D. Iida, M. Iwaya, S. Kamiyama, H. Amano y I. Akasaki, «All MOVPE grown nitride-based LED having sub mm underlying GaN,» *Physica Status Solidi*, vol. 5, p. 3073, 2008.
- [35] H. Amano, N. Sawaki y I. Akasaki, «Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer,» *Applied Physics Letters*, vol. 48, p. 353, 1986.
- [36] K. Matsumoto, H. Tokunaga y A. Ubukata, «High Growth Rate MOVPE,» de *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, Berlin, Heidelberg, Springer, 2010, pp. 120-133.
- [37] R. Doradziński, R. Dwiliński, J. Garczyński, L. P. Sierzputowski y Y. Kanbara, «Ammonothermal Growth of GaN Under Ammono-Basic Conditions,» de *Technology of Gallium Nitride Crystal Growth*, Berlin Heidelberg, Springer Series in Materials Science, 2010, p. 137.
- [38] T. M., M. Richter y R. Niewa, «Chemistry of Ammonothermal Synthesis,» *Inorganics*, vol. 2, pp. 29-78, 2014.
- [39] M. Razeghi, «Semiconductor Characterization Techniques,» de *Fundamentals of Solid State Engineering*, Boston, MA, Springer, 2006, pp. 521-549.
- [40] W. Zhou, R. P. Apkarian, Z. L. Wang y D. Joy, «Fundamentals of Scanning Electron Microscopy,» de *Scanning Microscopy for Nanotechnology*, New York, NY, Springer, 2006, pp. 1-40.
- [41] A. K., K. S.A., K. S.B. y A. A.M., «Scanning Electron Microscopy: Principle and Applications in Nanomaterials Characterization,» de *Handbook of Materials Characterization*, Springer, 2018, pp. 113-145.
- [42] T. U. o. Iowa, «Central Microscopy Research Facility,» [En línea]. Available: <https://cmrf.research.uiowa.edu/scanning-electron-microscopy>. [Último acceso: 29 2 2020].
- [43] «Nano Science Instruments,» [En línea]. Available: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/>. [Último acceso: 29 2 2020].
- [44] N. Podraza y G. Jellison Jr., *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*, London, UK: Elsevier, 2017.
- [45] G. Yu, G. Wang, H. Ishikawa, M. Umeno, T. Soga, T. Egawa, J. Watanabe y T. Jimbo, «Optical properties of wurtzite structure GaN on sapphire around fundamental absorption edge (0.78–4.77 eV) by spectroscopic ellipsometry and the optical transmission method,» *Applied Physics Letters*, vol. 70, 1997.
- [46] a. d. sharma, «MP Study,» 27 7 2016. [En línea]. Available: <http://mpstudy.com/v-characteristic-curves/>. [Último acceso: 2 3 2020].

- [47] D. M.J. y P. F., *Electrical Characterization of Semiconductor Materials and Devices*, Switzerland: Springer, 2017.
- [48] E. P. C. Corporation, «Efficient Power Conversion,» Efficient Power Conversion Corporation, 2020. [En línea]. Available: <https://epc-co.com/epc/GalliumNitride/WhatisGaN.aspx>. [Último acceso: 5 3 2020].
- [49] R. Lasers, «RPMC Lasers,» RPMC Lasers, 31 8 2018. [En línea]. Available: <https://blog.rpmclasers.com/gallium-nitride-gan-laser-diodes>. [Último acceso: 5 3 2020].
- [50] S. Nakamura, «InGaN-Based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes,» *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 35, nº 1B, pp. 74-76, 1996.
- [51] S. Porowski, I. Grzegory, S. Krukowski, M. Leszczynski, P. Perlin y T. Suski, «Blue lasers on high pressure grown GaN single crystal substrates,» *Europhysics News*, vol. 35, nº 3, pp. 63-69, 2004.
- [52] P. a. Radio-Electronics, «Physics and Radio-Electronics,» 2013-2015. [En línea]. Available: <http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-and-circuits/semiconductor-diodes/lightemittingdiodeledconstructionworking.html>. [Último acceso: 7 3 2020].
- [53] S. Singh, «researchgate,» 29 5 2014. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/200071029>. [Último acceso: 7 3 2020].
- [54] C. C. f. G. Nitride, «University of Cambridge,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.gan.msm.cam.ac.uk/projects/uv>. [Último acceso: 7 3 2020].
- [55] A. Lidow, «How to GaN: Intro to Gallium Nitride (GaN) Transistor Technology,» *EEWeb*, 2013.
- [56] Q. Z. Liu y S. S. Lau, «A review of the metal-GaN contact technology,» *Solid State Electronics*, vol. 42, nº 5, pp. 677-691, 1998.
- [57] G. Heidelberger y J. Bernát, «High-power SiO<sub>2</sub>/AlGaIn/GaN metal-oxide-semiconductor heterostructure field-effect transistors,» *Applied Physics Letters*, 2005.
- [58] A. Lidow, J. Strydom, M. d. Rooij y D. Reusch, *GaN Transistors for Efficient Power Conversion*, El Segundo, California, USA: Wiley, 2015.
- [59] U. K. Mishra y J. Singh, «Metal Semiconductor Junction: Schottky Barrier,» de *Semiconductor Device Physics and Design*, Netherlands, Springer, 208, p. 219.
- [60] J.-P. Colinge y C. A. Colinge, «Metal-Semiconductor Contacts,» de *Physics of Semiconductor Devices*, New York, NY, Springer, 2002, p. 148.
- [61] B. G. Stretman y S. K. Banerjee, «Metal-Semiconductor Junctions,» de *Solid State Electronic Devices*, Upper Saddle River, NJ, Pearson, 2015, p. 231.
- [62] B. L. Sharma, «Physics of Schottky Barriers Junctions,» de *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, New York, NY, Plenum Press, 1984, p. 3.

- [63] Y. Wang, «GaN-Based Schottky Diode,» de *Disruptive Wide Bandgap Semiconductors, Related Technologies, and Their Applications*, IntechOpen, 2018, pp. 103-121.
- [64] K. Wang, R. X. Wang, S. Fung, C. D. Beling, X. D. Chen, Y. Huang, S. Li, S. J. Xu y M. Gong, «Film thickness degradation of Au/GaN Schottky contact characteristics,» *Material Science and Engineering*, vol. 117, pp. 21-25, 2005.
- [65] H. P, D. T, H. K y S. N., «Schottky barrier on n-type GaN grown by hydride vapor phase epitaxy,» *Applied Physics Letters*, vol. 63, p. 2676, 1993.
- [66] K. MRH, D. T, H. P, H. K y S. N, «The barrier height and interface effect of Au-n-GaN Schottky diode,» *Applied Physics*, vol. 28, pp. 1169-1174, 1995.
- [67] G. JD, F. MS, G. RJ, P. FM y C. CY, «Study of Schottky barriers on n-type GaN grown by low-pressure metalorganic chemical vapor deposition,» *Applied Physics Letters*, vol. 67, p. 2657, 1995.
- [68] W. L, N. MI, L. T-H, K. MA y C. Q, «High barrier height GaN Schottky diodes: Pt/GaN and Pd/GaN,» *Applied Physics Letters*, vol. 68, p. 1267, 1996.
- [69] K. EV, K. NI, D. VA, I. KG y C. CH, «Schottky barriers on n-GaN grown on SiC,» *Journal of Electronic Materials*, vol. 25, p. 831, 1996.
- [70] P. AT, S. AC, K. MA y A. I, «Characterization of Pd Schottky barrier on n-type GaN,» *Electronics Letters*, p. 68, 1996.
- [71] S. AC, P. AT, A. K. M, C. Q, Y. JW y A. I, «Schottky barrier properties of various metals on n-type GaN,» *Semiconductor Science and Technology*, vol. 11, pp. 1464-1467, 1996.
- [72] B. V. Daelea y G. V. Tendeloo, «The role of Al on Ohmic contact formation on n-type GaN and AlGaIn/GaN,» *APPLIED PHYSICS LETTERS*, vol. 87, 2005.
- [73] L. Dobos, B. Pecz, L. Toth, Z. H. Zs.J. Horvath a, A. Toth, E. Horvath, B. Beaumont y Z. Bougriou, «Metal contacts to n-GaN,» *Applied Surface Science*, vol. 253, pp. 655-661, 2006.
- [74] Z. FAN, S. MOHAMMAD, W. KIM, O. AKTAS, A. BOTCHKAREV, K. SUZUE y MORKOC, «Ohmic Contacts and Schottky Barriers to n-GaN,» *Journal of Electronic Materials*, vol. 25, nº 11, 1996.
- [75] J. S. Foresi y T. D. Moustakas, «Metal contacts to gallium nitride,» *Appl. Phys.*, vol. 62, pp. 2859-2861, 1993.
- [76] K. Wanga, R. Wanga, S. Funga, C. Belling, X. Chena y Y. Huang, «Film thickness degradation of Au/GaN Schottky contact characteristics,» *Materials Science and Engineering*, pp. 21-25, 2005.
- [77] H. Zhang, E. J. Miller y E. T. Yua, «Analysis of leakage current mechanisms in Schottky contacts to GaN and Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N/GaN grown by molecular-beam epitaxy,» *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol. 99, 2006.

- [78] P. Pipinys y V. Lapeika, «Analysis of Reverse-Bias Leakage Current Mechanisms in Metal/GaN Schottky Diodes,» *Hindawi Publishing Corporation Advances in Condensed Matter Physics*, vol. 2010, p. 7 pages, 2010.
- [79] K. R. Peta y M.-D. Kim, «Leakage current transport mechanism under reverse bias in Au/Ni/GaN Schottky barrier diode,» *Superlattices and Microstructures*, vol. 113, pp. 678-683, 2018.
- [80] T. Boles, L. Xia, A. Hanson, A. Kaleta y C. McLean, «Reverse Leakage Current and Breakdown Voltage Improvements in GaN Schottky Diodes,» de *CS MANTECH Conference*, Denver, Colorado, USA, 2014.
- [81] M. R. H. Khan, P. Hacke y T. Detchprohm, «The barrier height and interface effect of Au-n-GaN Schottky diode,» *Journal of Physics D Applied Physics*, vol. 28, pp. 1169-1174, 1999.
- [82] M. Razeghia y A. Rogalskib, «Semiconductor ultraviolet detectors,» *Journal of Applied Physics*, vol. 79, p. 7433, 1996.
- [83] C.-J. Lee, C.-H. Won, J.-H. Lee, S.-H. Hahm y H. Park, «Selectively Enhanced UV-A Photoresponsivity of a GaN MSM UV Photodetector with a Step-Graded Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N Buffer Layer,» *Sensors*, vol. 17, p. 1684, 2017.
- [84] J. THEYIRAKUMAR, G. GOPIR, B. YATIM, H. SANUSI, P. M. MAHMUD y T. HOE, «Testing and Calibration of an Ultraviolet-A Radiation Sensor Based on GaN Photodiode,» *Sains Malaysiana*, vol. 40, pp. 21-25, 2011.
- [85] Y. Z. Chiou, Y. K. Su, S. J. Chang y C. H. Chen, «GaN metal-semiconductor interface and its applications in GaN and InGaN metal-semiconductor-metal photodetectors,» *IEE Proc.-Optoelectron*, vol. 150, pp. 115-118, 2003.
- [86] D. K. Wickenden, Z. Huang, D. B. Mott y P. K. Shu, «Development of Gallium Nitride Photoconductive Detectors,» *JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST*, vol. 18, nº 2, pp. 217-225, 1997.
- [87] Toyohashi, «Phys Org,» 8 12 2014. [En línea]. Available: <https://phys.org/news/2014-12-achilles-heel-gan-based-harsh-environments.html>. [Último acceso: 24 3 2020].
- [88] S. U. y H. JF, «Solar-blind UV detectors based on wide band gap semiconductors,» de *Observing Photons in Space*, New York, NY, Springer, 2013, pp. 467-477 .
- [89] S.-S. Liu, P.-W. Li, W. Lan y Y.-C. Cheng, «The improvement of GaN p-i-n UV sensor by 8-pair AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> superlattices structure,» *Materials Science and Engineering*, vol. 126, nº 1, pp. 33-36, 2006.
- [90] S.-S. Liu, P.-W. Li, W. Lan y W.-j. Lin, «The improvements of GaN p-i-n UV sensor on 1° off-axis sapphire substrate,» *Materials Science and Engineering*, vol. 121, nº 1-2, pp. 86-91, 2005.
- [91] L. Y. Sir, P.-W. Li, W. H. Lan y W.-J. Lin, «Improvements of AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> p-i-n UV sensors with graded AlGa<sub>N</sub> layer for the UV-B (280–320 nm) detection,» *Materials Science and Engineering*, vol. 122, nº 3, pp. 196-200, 2005.

- [92] L. Lia, Z. Liub, L. Wangb, B. zhanga, Y. Liua y J.-P. Ao, «Self-powered GaN ultraviolet photodetectors with p-NiO electrode grown by thermal oxidation,» *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. 76, pp. 61-64, 2018.
- [93] L. DOBRZANSKI, A. JAGODA, K. GORA y K. PRZYBOROWSKA, «Properties of metal-semiconductor-metal and Schottky barrier GaN detectors,» *OPTO-ELECTRONICS REVIEW*, vol. 10, nº 4, pp. 291-293, 2002.
- [94] Y. K. Su, S. J. Chang, C. H. Chen, J. F. Chen, J. K. S. G. C. Chi, W. C. Lai y J. M. Tsai, «GaN Metal–Semiconductor–Metal Ultraviolet Sensors With Various Contact Electrodes,» *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol. 2, nº 4, pp. 366-371, 2002.
- [95] W. Jun, Z. Degang, L. Zongshun, F. Gan, Z. Jianjun, S. Xiaomin, Z. Baoshun y Y. Hui, «Metal-semiconductor-metal ultraviolet photodetector based on GaN,» *SCIENCE IN CHINA*, vol. 46, nº 2, pp. 198-203, 2003.
- [96] B. Roul, M. Kumar, M. K. Rajpalke, T. N. Bhat y S. B. Krupanidhi, «Binary group III-nitride based heterostructures: band offsets and transport properties,» *Journal of Physics*, vol. 48, p. 21pp, 2015.
- [97] P. ALLEGRINI, P. CALVANI, M. GIROLAMI, G. CONTE y M. ROSSI, «UV Schottky Sensors Based on Wide Bandgap Semiconductors,» *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2010.
- [98] Q. Chen, J. W. Yang, A. Osinsky, S. Gangopadhyay, B. Lim, M. Z. Anwar y M. A. Khan, «Schottky barrier detectors on GaN for visible–blind ultraviolet detection,» *Applied Physics Letters*, vol. 70, p. 2277, 1997.
- [99] Genicom, «gen uv,» 2013. [En línea]. Available: [http://www.geni-uv.com/download/eng/UV\\_Sensor/UV-A\\_Sensor/GUVA-T21GD-U.pdf](http://www.geni-uv.com/download/eng/UV_Sensor/UV-A_Sensor/GUVA-T21GD-U.pdf). [Último acceso: 8 4 2020].
- [100] M. Corporation, «mtixtl,» 1994. [En línea]. Available: <https://www.mtixtl.com/xtlflyers/Dislocation.pdf>. [Último acceso: 8 4 2020].