

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



*“CARACTERIZACIÓN ÓPTICA Y ELÉCTRICA DE PELÍCULAS DELGADAS DE
ÓXIDO DE GALIO DE FASE BETA”*

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS**

PRESENTA:

MARIEL ALEXIS SUÁREZ LÓPEZ

DIRECTOR:

Dr. NICOLA RADNEV NEDEV

CO-DIRECTOR:

Dr. ABRAHAM ARIAS LEÓN

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

MAYO 2018

Índice

1. Introducción	4
2. Objetivos	6
2.1 Objetivos Particulares	6
3. Marco teórico	7
3.1 Luz Ultravioleta	7
3.2 Técnica de fabricación	7
3.2.1 β -Ga ₂ O ₃	7
3.2.2 Crecimiento epitaxial por haces moleculares (MBE)	11
3.2.2.1 Consideraciones de vacío	13
3.3.1 Sustrato c-Al ₂ O ₃	13
3.2.3.1 Evaporación térmica	15
3.2.3.1.1 Teoría cinética de los gases	16
3.3 Técnicas de Caracterización	17
3.3.1 Técnicas Ópticas	17
3.3.1.1 Elipsometría	18
3.3.1.1.1 Análisis de datos por elipsometría	23
3.3.1.1.2 Espesor de películas delgadas	24
3.3.1.3 Espectroscopia UV-VIS	25
3.3.1.3.1 Espectro electromagnético	27
3.3.1.3.1 Medición de transmitancia y absorbancia	28
3.3.1.3.1 Ley de Beer	29
3.3.2 Caracterización Eléctrica	30

3.3.2.1 Resistividad de bulo	30
3.3.2.3 Corriente-Voltaje (I-V)	30
3.3.2.3.1 Barrera Schottky	31
3.3.2.3.2 Medición fotoeléctrica	35
3.3.2.3.3 Mecanismos de transporte	36
4. Desarrollo experimental	38
4.1 Detalles experimentales de fabricación	38
4.2 Caracterización óptica	40
4.2.1 Elipsometría	40
4.2.2 Espectroscopía UV-Visible	42
4.3 Caracterización eléctrica	42
4.3.2 Corriente- Voltaje	44
5. Resultados y discusiones	45
5.1 Caracterización óptica	45
5.1.1 Elipsometría	45
5.1.2 UV-Vis	48
5.2 Caracterización Eléctrica	49
5.2.1 Curvas I-V	49
5.2.1.1 Muestra A	49
6. Conclusiones	52
7. Recomendaciones y trabajo futuro	54
8. Referencias bibliográfica	55
Anexos	60

Índice de Figuras

Figura 1 Representación de la estructura monoclinica del β -Ga ₂ O ₃	102
Figura 2 Representación esquemática para un sistema MBE	14
Figura 3 Sistema de depósito de alto vacío	17
Figura 4 Ondas ortogonales combinadas para demostrar la polarización	21
Figura 5 Configuración esquemática de una medición por elipsometría.	21
Figura 6 Cambio en la longitud onda viaje a través del aire	23
Figura 7. Esquema de medición por elipsometría	24
Figura 8. Modelo de medición por elipsometría	25
Figura 9. Diagrama de flujo para el análisis de datos	26
Figura 10. Descripción de la absorción parcial	28
Figura 11. Clasificación del espectro electromagnético.	29
Figura 12. La radiación de la potencia radiante.	28
Figura 13 Diagrama de bandas de energía de un semiconductor tipo n	33
Figura 14 Diagramas de bandas de energía	36
Figura 15 Diagrama de bandas de energía de unión de barrera Schottky	38
Figura 16. Estructura hexagonal de Al ₂ O ₃	40
Figura 17 Diagrama de las estructuras del β -Ga ₂ O ₃ con orientación (-201).	41
Figura 18 Representación esquemática de las estructuras de β -Ga ₂ O ₃	41
Figura 19 Elipsómetro J.A. Wollam - M2000	42
Figura 20 Sistema de depósito de alto vacío	44
Figura 21 Diagrama de películas con contactos de aluminio	
Figura 22 Sistema de caracterización de semiconductores Keithley 4200	45
Figura 23 Curvas obtenidas de la medición por elipsometría	46
Figura 24 Dependencia del espesor con la temperatura del sustrato.	48
Figura 25 Espectro UV-Vis del sustrato de Zafiro y películas de β -Ga ₂ O ₃	49
Figura 26 Espectro de UV-Vis, absorción a 275 nm.	50
Figura 27 Mediciones de Corriente-Voltaje	50
Figura 28 Curvas I-V características de β -Ga ₂ O ₃	52

1. Introducción

Actualmente la industria electrónica es uno de los sectores de mayor dinamismo a nivel mundial y se encuentra estrechamente vinculada a la innovación continua y al desarrollo de nuevas tecnologías que la mantengan a la vanguardia. En 2011 la producción global de electrónicos fue de 3,525 miles de millones de dólares, de los cuales el 32.7% de esta participación pertenece al área de los semiconductores, por lo que la búsqueda de nuevos materiales y tecnologías es indispensable para satisfacer las necesidades de esta industria.

Los óxidos semiconductores nanoestructurados están siendo objeto de una gran actividad de investigación durante los últimos años, asimismo, existe un gran interés en sus propiedades ópticas y electrónicas. Los óxidos conductores transparentes presentan transparencia óptica en el rango visible y una conductividad eléctrica que se puede variar en un rango muy amplio, cerca de los metales hasta la de los semiconductores [1], gracias a ello, los óxidos son candidatos idóneos para ser utilizados en aplicaciones tecnológicas, así como en la innovación de los dispositivos electrónicos actuales.

El óxido de galio (Ga_2O_3) es un material que forma parte de la familia de los óxidos conductores transparentes (TCO, por sus siglas en inglés, *Transparent Conductive Oxides*), a pesar de que ha sido conocido por décadas permaneció en la periferia de las principales investigaciones.

La evolución de los semiconductores en su tercera generación está entrando a lo que pudiera ser la fase final de su historia. En la primera generación se centró en la física cuántica de sólidos, en el entendimiento de las estructuras cristalinas y el estudio de los electrones y huecos. La segunda generación vio las aplicaciones técnicas y comerciales de los transistores y circuitos integrados. La tercera generación a la creación de sistemas cuánticos artificiales y sistemas de baja dimensión: pozos

cuánticos, superredes, cables cuánticos y puntos cuánticos. Esta generación parece estar llegando a su fin. [2]

Desde finales de los años ochenta, un gran número de investigadores se han enfocado en el potencial de los semiconductores con zona prohibida ancha como materiales de la “siguiente generación”. El Óxido de Galio ha llamado la atención como el material que detone a los semiconductores de cuarta generación. [3].

El β -Ga₂O₃ es la forma más común y mejor estudiada del óxido de galio, dado que es la única que se mantiene estable en todo el rango de temperaturas hasta llegar al punto de fusión. Es de interés en el área de la investigación debido a su disponibilidad y propiedades sobresalientes. [4]

Es un material con zona prohibida ancha (~4.8 eV) que presenta transparencia en el rango visible hasta el rango UV-C. Presenta un campo eléctrico de ruptura de hasta 8 MV/cm y una movilidad de los electrones de aproximadamente 300 cm²/V·s, lo que da como resultado una figura de mérito de Baliga (BFOM) más alta que la del 4H-SiC y GaN [5].

Con el constante avance tecnológico y la necesidad de mejorar la capacidad, la velocidad y la exigencia actual de disminuir los tamaños de los dispositivos semiconductores, pero conservando un bajo costo y calidad orillan a la búsqueda constante de nuevos materiales y la investigación de estos.

El óxido de galio presenta una amplia gama de posibles aplicaciones debido a sus propiedades, entre las más interesantes se encuentran las ópticas ya que son dependientes del ancho de la zona prohibida (*bandgap*). Un ejemplo de la aplicación más novedosa y relevante en los últimos años es su operación en el rango azul-ultravioleta y su aplicación como fotodetectores de UV.

El óxido de galio se a logrado obtener mediante varias técnicas en las cuales destacan; Molecular Beam Epitaxy, Sputtering y Pulsed Laser Deposition [6,7,8]

Las caracterización óptica y eléctrica desarrollada sobre las películas delgadas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ determinará sus propiedades, así como su potencial para la aplicación en dispositivos electrónicos y fotodetectores.

2. Objetivos

Estudiar las propiedades ópticas y eléctricas de películas delgadas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ crecidas mediante la técnica de epitaxia por haces moleculares (MBE, Molecular Beam Epitaxy por sus siglas en inglés) asistida por plasma bajo diferentes condiciones.

2.1 Objetivos Particulares

- Estudiar las propiedades ópticas de películas delgadas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ depositadas por MBE asistida por plasma
- Realizar mediciones por Elipsometría (SE, Spectroscopic Ellipsometry por sus siglas en inglés) de películas delgadas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.
- Realizar mediciones por Espectroscopía UV-Vis.
- Depositar contactos óhmicos de aluminio por evaporación térmica para la realización de la caracterización eléctrica de las películas.
- Caracterizar las películas eléctricamente mediante mediciones corriente-voltaje (I-V) en condiciones de oscuridad y bajo iluminación con fuentes con diferentes longitudes de onda.
- Evaluar los resultados obtenidos de cada una de las muestras comparando la eficiencia de cada una de las películas (obtenidas bajo diferentes condiciones) y determinar su aplicación como sensores optoelectrónicos en la región UV.

3. Marco teórico

3.1 Luz Ultravioleta

La radiación ultravioleta se puede categorizar en tres regiones: UV-A, UV-B y UV-C siendo las dos últimas perjudiciales para la vida ya que penetran las capas más superficiales de la piel causando quemaduras e incluso cáncer. por lo regular la mayoría los rayos UV-C son captados por la capa de ozono, pero algunos logran pasar a través de ella. La luz UV-C es usada (de manera artificial) como germicida en aire y/o agua ya que pueden penetrar en el ADN de los microorganismos y romperlos. Por lo que el presente trabajo estudiará estructuras realizadas con $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ para su potencial utilización como detectores de radiación UV tipo C. [9,10]

Nombre	Abreviatura	Longitud de onda (nm)
Ultravioleta A (onda larga)	UV-A	400 – 315
Ultravioleta B (onda media)	UV-B	315 – 280
Ultravioleta C (onda corta)	UV-C	280 – 100

Tabla 1 Clasificación de la radiación ultravioleta

3.2 Técnica de fabricación

3.2.1 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

La historia del óxido de Galio data de 1875 cuando el químico francés Lecoq de Boisbaudran describió el descubrimiento de un nuevo elemento, Galio: [4]

“Encontré algunos indicios de la probable existencia de un nuevo elemento en los productos del examen químico de una mezcla de la Mina Pierrelitte, Valle de Argeles, Pirineos.” [11]

Los sesquióxidos semiconductores, como el β -Ga₂O₃, han sido utilizados por varias décadas como TCO's para la fabricación de celdas de energía solar, dispositivos electrónicos y optoelectrónicos. Recientemente el β -Ga₂O₃ ha llamado la atención como monocristal y su disponibilidad como capas hetero- y homo-epitaxiales, lo que ha allanado el camino hacia nuevas áreas de aplicación. [12]

El óxido de Galio es un material que proporciona varias funciones importantes. Se ha demostrado que el tunelaje dependiente del spin ocurre a través de Ga₂O₃ cuando es utilizado como barrera aislante del túnel, mostrando la posibilidad de lograr uniones de menor resistencia con este material para formar barreras para aplicaciones de almacenamiento magnético. [13] Se ha obtenido una luminiscencia de 13.6 cd/cm² en dispositivos de película delgada electroluminiscente utilizando como película emisora al óxido de galio activado por manganeso demostrando que es un fósforo electroluminiscente.[14] Para aplicaciones fotocatalíticas, se ha informado que β -Ga₂O₃ muestra alta actividad y estabilidad hacia la degradación del benceno bajo irradiación UV. La alta actividad y estabilidad a largo plazo de β -Ga₂O₃ se atribuye a su mayor capacidad oxidativa y mayor área de superficie específica. [15]

Este material puede presentarse en diferentes formas: α -, β -, γ -, δ -, ϵ .

La fase alfa a pesar de tener la zona prohibida más ancha de las 5 fases ha sido escasamente estudiada. Recientemente se ha encontrado que una película de alta cristalinidad de α -Ga₂O₃ puede ser crecida por mist-CVD (las películas delgadas se depositan por la descomposición térmica de un precursor mezclado en varios

disolventes). Este material tiene un alto potencial para ser utilizado en una amplia gama de dispositivos. Como por ejemplo un reciente logro en los diodos de barrera Schottky con baja resistencia y un voltaje de ruptura alto. [15]

Se le suele considerar a la fase gamma como una fase particularmente problemática. Fue reportada en primera instancia por Böhm como el resultado de un secado rápido de un gel calentado a 450-500°C quien sugirió que posee una estructura defectuosa tipo espinela similar al γ -Al₂O₃ recientemente se ha logrado preparar a esta poliforma en su fase cristalina. [16]

La fase delta tiene una estructura que corresponde a los sesquióxidos de tierras raras tipo C. La forma ϵ , generalmente se forma a partir de la fase δ por calentamiento y tiene un patrón XRD característico, aunque no se ha encontrado un modelo para su estructura. [17]

La fase beta es la forma más común y mejor estudiada del Óxido de Galio, esta se mantiene estable térmica y químicamente en operación, las otras fases son metaestables a altas temperaturas (~750-900°C) y pueden adoptar la poliforma beta. Su estabilidad térmica permite producir monocristales en bulto y películas epitaxiales mediante procesos de alta temperatura. [18]

Los parámetros de red del para un ángulo de 103.7° son $a=12.23 \text{ \AA}$, $b=3.04 \text{ \AA}$, y $c=5.80 \text{ \AA}$ y su grupo espacial cristalográfico es C2/m [19] y su punto de fusión es ~1900°C [20]

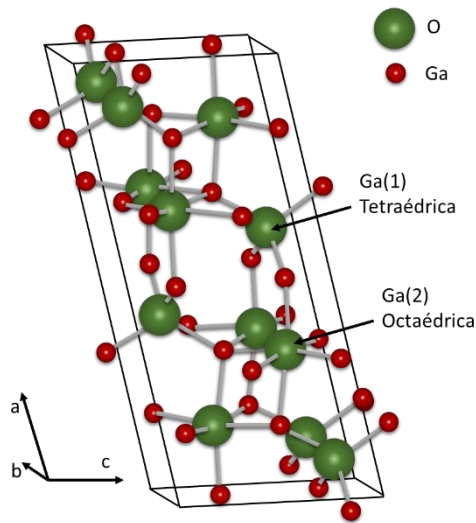


Figura 1 Representación de la estructura monoclinica simple de 20 átomos del $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

En la figura 1 se puede observar que los átomos de Galio ocupan dos posiciones en la estructura del $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ la tetraédrica (Ga (1)) y la Octaédrica (Ga(2))

Representa uno de los óxidos semiconductores más prometedores de la actualidad debido a su zona prohibida ancha (~ 4.9 eV) que es mayor comparada con Carburo de Silicio (SiC) y Nitruro de Galio (GaN). [21] En la tabla 1 se muestran algunas de las características y propiedades de este material.

Propiedades del $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$	
Estructura cristalina	Monoclínica $C_{2/m}$
Punto de fusión	$\sim 1900^\circ\text{C}$
Zona prohibida	~ 4.9 eV
Índice de refracción	~ 2
Constante dieléctrica	9.9-10.2

Tabla 2. Propiedades del $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Pese a su zona prohibida ancha, este material cuenta con una buena conductividad eléctrica debido a defectos intrínsecos causados por las vacantes de

oxígeno, lo que lo convierte en un semiconductor de tipo n cuando se crece en condiciones reductoras. [22]

Se ha mencionado que su zona prohibida es de ~4.9 eV, pero se han realizado mediciones con una variación desde el 4.2-4.9 eV. La posible razón de esta incertidumbre puede ser causada por la anisotropía del material monoclinico y por las diferencias en su proceso de preparación. [22]

Las propiedades electrónicas del β -Ga₂O₃ varían de aislante a conductor, dependiendo del proceso de preparación: temperatura del sustrato, composición del ambiente, postprocesamiento.

3.2.2 Crecimiento epitaxial por haces moleculares (MBE)

Molecular beam epitaxy (MBE) es un término utilizado para denotar el crecimiento epitaxial de películas semiconductoras compuestas por un proceso que involucra la reacciones de uno o más haces moleculares térmicos con una superficie cristalina bajo condiciones de ultra alto vacío. Esta técnica comúnmente se relaciona con la evaporación al vacío, pero ofrece un control mejorado sobre los flujos atómicos o moleculares que inciden para tener en cuenta las diferencias de los coeficientes de adherencia, y permite un cambio rápido de las especies de haces. [23]

La técnica de epitaxia por haces moleculares se utiliza comúnmente para el crecimiento de capas en semiconductores por la gran perfección cristalina que alcanza. El proceso de MBE produce el crecimiento epitaxial en un entorno de ultra alto vacío donde los haces moleculares de diferentes densidades inciden sobre un sustrato monocristalino calentado y diversas reacciones químicas ocasionan la deposición de monocapas sucesivas. Los átomos incidentes forman una capa cristalina sobre el material, es decir, una película epitaxial. Debido a la limpieza del ambiente de

crecimiento y el control preciso de la composición, las estructuras fabricadas por MBE se aproximan muy de cerca a los modelos idealizados utilizados en la teoría del estado sólido [24, 25]. Este proceso se ilustra esquemáticamente en la figura 2 que muestra los componentes esenciales necesarios para el crecimiento por MBE

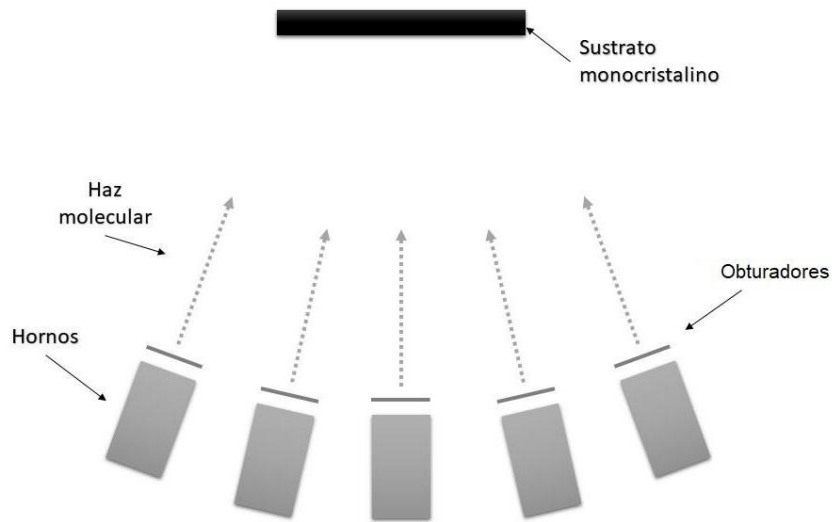


Figura 2 Representación esquemática para un sistema MBE

Debido al uso extensivo de paredes frías que rodean los hornos y el sustrato, los haces realizan, esencialmente, un solo paso a través de la cámara antes de condensarse en las paredes frías, y la presión en el sistema permanece muy baja. Esto mantiene la pureza de la película creciente y al mismo tiempo permite que la pistola de difracción de electrones reflectados de alta energía (RHEED) pueda operar sin presentar daño debido a corrosión o vapores residuales. El sistema RHEED provee de un patrón de difracción en una ventana revestida de fósforo lo que es indicativa del orden de la superficie del sustrato. Por lo tanto, se puede observar inmediatamente el efecto sobre la cristalinidad de la película debido a los cambios en las condiciones de crecimiento. [26]

3.2.2.1 Consideraciones de vacío

La esencia del concepto de MBE es que la superficie de crecimiento se mantiene limpia mediante ultra alto vacío; este ambiente de vacío que rodea al cristal en crecimiento debe de mantenerse tan bajo como sea posible para evitar la contaminación que pueda llegar a afectar a las propiedades eléctricas, la morfología de la película incluso si tiene o no lugar el crecimiento epitaxial. [26]

Para poner esto en perspectiva, se considera que el número n de átomos de gas que incide sobre el área de la superficie en unidad de tiempo es:

$$\phi = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}} \left(\frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^2} - \text{seg} \right)$$

Donde P es la presión del gas, m es la masa atómica, k es la constante de Boltzman y T es la temperatura absoluta.

Los niveles de pureza que deben de mantenerse dentro del sistema deben de ser extremadamente altos. Para muchos dispositivos semiconductores especializados, el nivel de impureza debe ser mucho menos de 10^{-6} ppm, por lo que es quizás sorprendente que niveles tan bajos puedan ser obtenidos. [27]

3.3.1 Sustrato c-Al₂O₃

El óxido de aluminio comúnmente conocido como Alúmina en sus varios niveles de pureza, es usado cada vez con mayor frecuencia en comparación con otro material cerámico. La alúmina de alta pureza se puede utilizar tanto en atmósferas oxidantes como reductoras a 1925 °C. [28]

Al igual que el $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, la Alúmina puede presentarse en diferentes fases cristalinas.

	SG	Tipo de estructura	Referencia
$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Fd3m	Espinela no estequiométrica desordenada cúbica	Snyder
$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	I4 ₁ /amd	Espinela no estequiométrica desordenada tetragonal	Paglia
$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	P2 ₁ /m	Estructura ortorrómbica sin espinela	Digne
$\gamma'\text{-Al}_2\text{O}_3$	P-4m2	Superestructura de espinela tetragonal	Paglia
$\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$	P-4m2	Superestructura de espinela tetragonal	Rooksby
$\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$	P2 ₁ 2 ₁ 2 ₁	Superestructura de espinela ortorrómbica	Levin Wang
$\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$	C2/m	Estructura monoclinica $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, estructura ordenada relacionada con la espinela	
$\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$	Fd3m	Espinela no estequiométrica desordenada cúbica	Snyder
$\kappa\text{-Al}_2\text{O}_3$	Pna2 ₁	Ortorrómbica	
$\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$			
$\rho\text{-Al}_2\text{O}_3$			
$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	R-3c	hexagonal-romboédrica, estructura de corindón	

Tabla 3 Datos estructurales de Alúminas

En la Tabla 3 se observa que el $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ es una estructura monoclinica al igual que el $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, puede ser derivada de una espinela, con deformación y orden completo de la distribución de iones de Al, que ahora son mitad tetraédricos y mitad octaedros. [29]

A pesar de que la forma más estable entre las alúminas es $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, la diferencia entre la estabilidad termodinámica entre este y $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ es probablemente muy pequeña, considerando el hecho de que para los compuestos isoestructurales correspondientes de Galio, la estabilidad global se invierte: $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, isoestructural con $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$, es más estable que $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. [30]

3.2.3.1 Evaporación térmica



Figura 3 Sistema de depósito de alto vacío

La evaporación es uno de los procesos más antiguos para la deposición de películas metálicas. Los materiales son calentados a hasta su punto de evaporación para formar una fina capa que cubra la superficie del material de interés. Para poder controlar la composición del material a depositar se maneja un sistema de vacío. [33]

El sistema está compuesto de una cámara de vacío, una bomba mecánica, una bomba turbomolecular, válvulas, medidores y otra instrumentación. En operación la válvula de la bomba mecánica es abierta para alcanzar en la cámara un nivel de presión de 1 Pascal. Si se requiere una presión más alta se cierra la válvula de la bomba mecánica [33]

3.2.3.1.1 Teoría cinética de los gases

Los gases se comportan de manera ideal a presiones bajas y se describen por la ley de los gases ideales. Si se comprime un gas, manteniendo constante su temperatura, se puede observar que aumentará la presión al disminuir el volumen, de igual manera si la presión disminuye aumentará el volumen del gas. La presión de un gas varía inversamente al volumen. A temperatura constante, el producto de la presión por el volumen de un gas es constante.

$$PV = N_{av}kT$$

Donde k, es la constante de Boltzmann y N_{av} es el número de Avogadro.

En algunos sistemas, la superficie del sustrato debe de estar extremadamente limpia antes de la deposición, la presencia de incluso la más pequeña cantidad de oxígeno o de algún otro elemento puede resultar en la contaminación del sustrato. [27]

La tasa ϕ de formación de esta capa es determinada por la tasa de incidencia de las moléculas del gas que impactan la superficie del sustrato y se relación a la presión por:

$$\phi = \frac{P}{\sqrt{2\pi mkT}} \left(\frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^2} - \text{seg} \right)$$

Donde m es la masa de la molécula. Lo cual puede ser reducido a:

$$\phi = \frac{2.63 \times 10^{20} P}{\sqrt{MT}} \left(\frac{\text{moléculas}}{\text{cm}^2} - \text{seg} \right)$$

Donde P es la presión en Pa y M es el peso molecular. Si asumimos que cada molécula se adhiere a cómo impacta en la superficie, entonces el tiempo requerido para formar una monocapa en la superficie es dado por:

$$t = \frac{N_s}{\phi} = \frac{N_s \sqrt{\pi m k T}}{P}$$

Donde N_s es el número de moléculas/cm² en la capa.

La presión y la temperatura determinan de igual manera un parámetro de suma importancia para la deposición de películas llamado camino libre medio λ (mean free path). Este parámetro es la distancia promedio que viaja la molécula antes de colisionar con otra molécula. λ es dada por:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi} p d^2}$$

Donde d es el diámetro de la molécula del gas que va del rango de 2 a los 5 Å. La evaporación usualmente se da bajo una presión de 10⁻⁴ Pa. A esta presión, una molécula de 4Å tendrá un λ de aproximadamente 60m. Durante la evaporación del aluminio, sus moléculas no interactúan con los otros gases por lo que tienden a viajar en línea recta desde la fuente de evaporación hasta el objetivo. [32]

3.3 Técnicas de Caracterización

Se utilizarán diversas técnicas de caracterización, con el fin de obtener información sobre sus propiedades y así valorar su utilidad y funcionalidad.

3.3.1 Técnicas Ópticas

3.3.1.1 Elipsometría

Tal vez el método más sencillo para determinar el espesor de un óxido es comparar el color de la oblea con una tabla de colores de referencia, claramente, las comparaciones de la carta de colores son subjetivas y por lo tanto no son el mecanismo más preciso para determinar el espesor de óxido. Se puede obtener una medición más precisa utilizando técnicas como la elipsometría. [28]

La elipsometría mide los cambios en el estado de polarización de la luz, después de haber sido reflejada desde alguna superficie. El hecho de que sean medidos los cambios del estado de polarización, en lugar de la intensidad absoluta de la luz, hace de la elipsometría una técnica altamente sensible a la presencia de finas capas de algunos cuantos angstroms (Å). Como una herramienta no invasiva ni destructiva, la elipsometría requiere solamente de una fuente de luz de baja potencia (Cuando se monitorea el crecimiento de una película en tiempo real) y en consecuencia no afecta la mayoría de los procesos. [34]

La luz puede ser descrita como una onda electromagnética que viaja a través del espacio. Para fines de elipsometría, es adecuado discutir el comportamiento del campo eléctrico de la onda en el espacio y el tiempo, también conocido como polarización. Cuando el campo eléctrico tiene orientación y fase completamente al azar, se considera como luz no polarizada. Para la elipsometría, sin embargo, es de interés el tipo de campo eléctrico que sigue un camino específico y traza una forma distinta en cualquier punto. Esto se conoce como luz polarizada. Cuando dos ondas de campos eléctricos ortogonales están en fase, la luz resultante estará polarizada linealmente. Las amplitudes relativas determinan la orientación resultante. Si las ondas ortogonales están desfasadas en 90° e iguales en amplitud, la luz resultante es circularmente polarizada. La polarización más común es "elíptica", que combina ondas ortogonales de amplitud y fase arbitraria fija. Aquí es donde la elipsometría obtiene su nombre. [35]

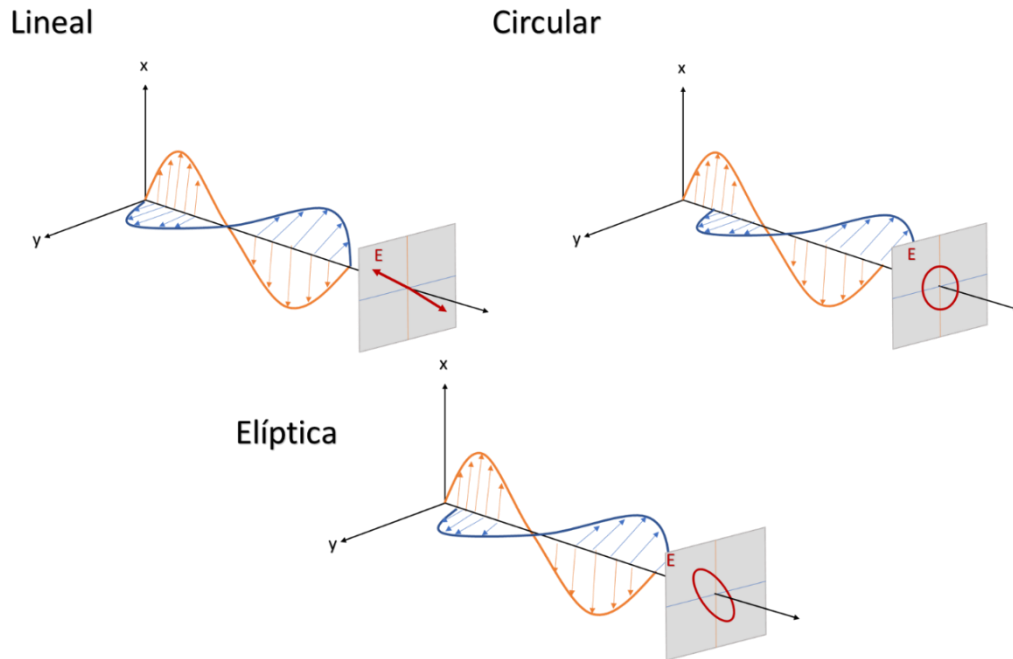


Figura 4 Las ondas ortogonales combinadas para demostrar la polarización

La técnica de elipsometría es sensible a varias características de los materiales, tales como: Grosor de la capa, Constantes ópticas (índice de refracción y coeficiente de extinción), Rugosidad de la superficie, Composición, Anisotropía óptica [36]

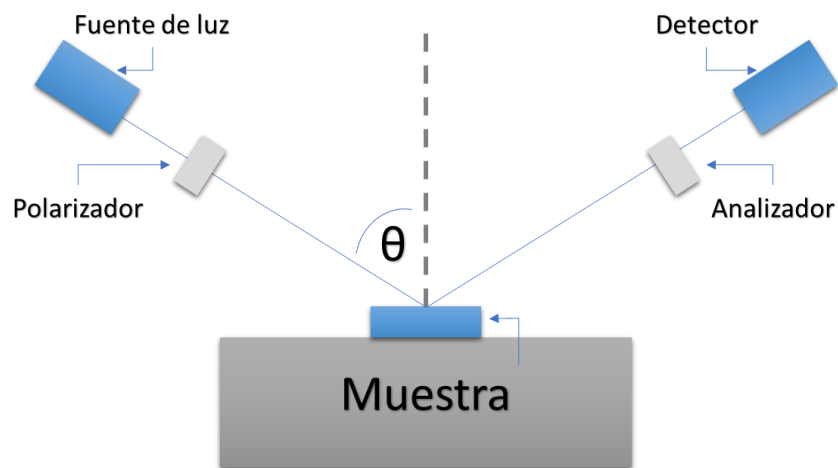


Figura 5 Configuración esquemática de una medición por elipsometría.

Sin embargo, hay dos restricciones generales en la medición de la elipsometría; específicamente: la rugosidad superficial de las muestras tiene que ser bastante pequeña, y la medición debe realizarse en incidencia oblicua.

Cuando la dispersión de la luz por la penetración superficial reduce gravemente la intensidad de la luz reflejada, la medición de la elipsometría se hace difícil ya que la elipsometría determina un estado de polarización a partir de su intensidad luminosa. Si el tamaño de la rugosidad de la superficie excede el 30% de una longitud de onda de medición, los errores de medición generalmente aumentan, aunque este efecto depende completamente del tipo de instrumento.

En elipsometría, se elige un ángulo de incidencia de manera que se maximiza la sensibilidad para la medición. Sin embargo, la elección del ángulo de incidencia varía según las constantes ópticas de las muestras. Para la caracterización de semiconductores, el ángulo de incidencia es típicamente 70-80°. [32]

Dos valores son usados para describir las propiedades ópticas que determinan cómo la luz interactúa con un material. Usualmente son representadas como un número complejo. El índice de refracción complejo (\tilde{n}) consiste en el índice de refracción (n) y el coeficiente de extinción (k):

$$\tilde{n} = n + ik$$

El índice v describe la velocidad de fase de la luz a medida que viaja en un material en comparación con la velocidad de la luz en el vacío, c :

$$v = \frac{c}{n}$$

La luz a medida que entra en un material con un índice mayor disminuye. Dado que las frecuencias de las ondas de luz permanecerán constantes, la longitud de onda se acortará. Mientras que el coeficiente de extinción describe la pérdida de energía de la onda en el material. Se relaciona con el coeficiente de absorción de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$$

La luz pierde intensidad en un material absorbente de acuerdo con la ley de Beer:

$$I(x) = I_0 e^{-i\alpha x}$$

De esta manera, el coeficiente de extinción relaciona el que tanto la luz se degrada en un material. En la Figura 6 se describe el comportamiento de las ondas de luz que viajan a través de dos materiales con distintas propiedades antes de regresar al ambiente. [37]

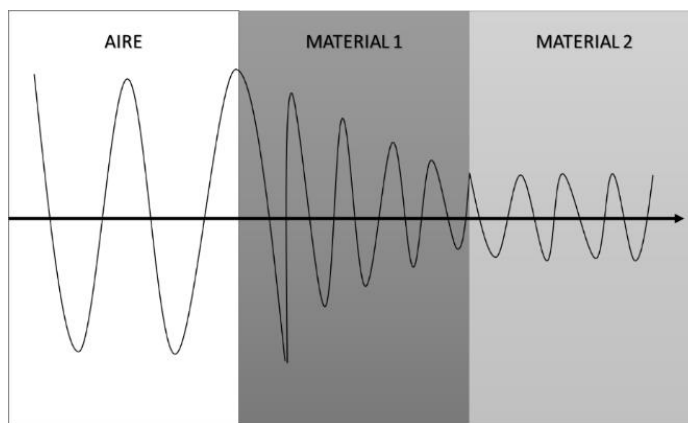


Figura 6 Cambio en la longitud onda viaje a través del aire pasando por dos diferentes materiales. La fase y la longitud de onda varían en cada material dependiente del índice de refracción de cada material.

La luz que está polarizada en paralelo al plano de incidencia se denomina p-. La que se encuentra perpendicular a este plano se llama s-, la "s" proviene del alemán "senkrecht" que se traduce como perpendicular (Figura 7).

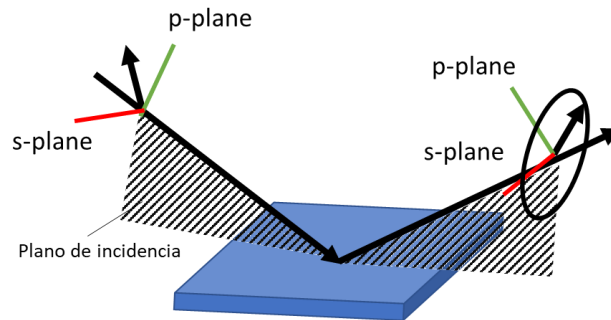


Figura 7. Esquema de medición por elipsometría

El principal interés de la elipsometría es como los componentes p- y s- cambian sobre la reflexión o la transmisión en relación con ellos. De esta manera, el haz de referencia es parte del experimento. Una polarización conocida es reflejada o transmitida de una muestra y la polarización de salida es medida. El cambio que se presente en esta será la medición de elipsometría. Comúnmente presentada de la siguiente manera. [38]

$$\rho = \tan(\Psi)e^{i\Delta}$$

Ψ (psi) y Δ (delta) son los ángulos que se presentan en el cambio en el estado de la polarización de los rayos incidente y reflejado, los proporciona el elipsómetro y están relacionados con parámetros físicos que caracterizan la superficie iluminada (espesor, índice de refracción y coeficiente de absorción).

Un ejemplo de este tipo de medición es mostrado en la Figura 8. La luz incidente es lineal con ambos componentes (p- y s-). Los componentes han sufrido un cambio en su amplitud y una diferencia de fase, la medición por elipsometría mide estos cambios. [38]

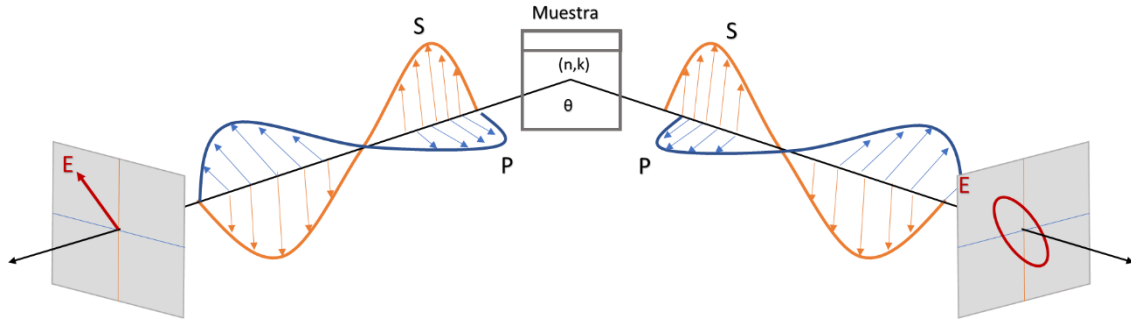


Figura 8. Modelo de medición por elipsometría

Para realizar este tipo de mediciones se requieren los siguientes componentes: Una fuente de luz, generador de polarización, muestra, analizador de polarización y un detector. El generador de polarización y el analizador están contruidos con componentes ópticos que manipulan la polarización: Polarizadores, compensadores y moduladores de fase. Comúnmente algunas configuraciones incluyen un analizador rotativo (RAE), polarizador rotativo (RPE), compensador rotativo (RCE) y un modulador de fase (PME). [38]

3.3.1.1.1 Análisis de datos por elipsometría

La elipsometría mide los cambios en la polarización de la luz para determinar las propiedades del material (muestra) que sean de interés, tal como el grosor de la película y las constantes ópticas. En el caso de un material en bulto, las ecuaciones derivadas para una sola reflexión pueden invertirse directamente para proporcionar las "pseudo" constantes ópticas de la medición de elipsometría, r:

$$\langle \varepsilon \rangle = \langle \varepsilon_1 \rangle + i \langle \varepsilon_2 \rangle = \langle \tilde{n} \rangle^2 = (\langle \tilde{n} \rangle + \langle \tilde{k} \rangle)^2 = \sin^2 \theta_i \left[1 + \tan^2 \theta_i \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)^2 \right]$$

Esta ecuación asume que no existen capas en la superficie de ningún tipo, sin embargo, en cualquier material en bulto, existe, comúnmente una superficie de óxido o rugosidad, y la inversión directa incluiría estas como parte de las constantes ópticas del

material en bulto (por eso las constantes obtenidas se llaman “pseudo”constantes ópticas). El procedimiento más común utilizado para deducir las propiedades del material por medio de las mediciones por elipsometría, sigue en general el diagrama de flujo de la Figura 9. [38]

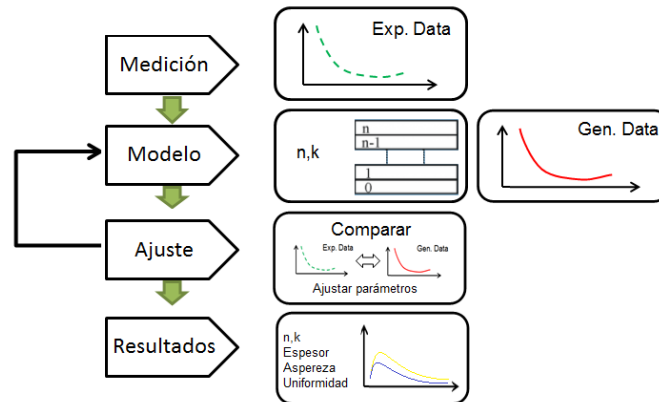


Figura 9. Diagrama de flujo para el análisis de datos de la medición por elipsometría

El análisis de datos se lleva a cabo de la siguiente manera: después de que la muestra es medida, se construye un modelo que describa de la mejor manera a la muestra medida. Este será utilizado para calcular la respuesta prevista de las ecuaciones de Fresnel que describen cada material con grosor y constantes ópticas. Si estos valores son desconocidos, se provee de una estimación con el propósito de un cálculo preliminar. Los valores calculados son comparados con los datos experimentales utilizando regresión. Se utiliza el Error Cuadrático Medio (MSE, por sus siglas en inglés) para cuantificar la diferencia entre las dos curvas, la mejor respuesta corresponde al MSE más bajo. [33]

3.3.1.1.2 Espesor de películas delgadas

El espesor de las películas es determinado por la interferencia entre la luz reflejada de la superficie y la luz que viaja a través de la película. Dependiendo de la fase relativa de la luz de reintegración a la reflexión de la superficie, la interferencia

puede definirse como constructiva o destructiva. La interferencia involucra tanto a la amplitud como a la información de la fase. La información de la fase de Δ es altamente sensible a las películas hasta el espesor de la submonocapa.

La elipsometría es usualmente requerida para medir películas cuyo espesor se encuentra en los rangos de los sub-nanómetros a unos cuantos micrómetros. A medida que las películas se vuelven más gruesas que unos cuantos de decenas de micrones, las oscilaciones de interferencia tienden a ser cada vez más difíciles de resolver, excepto aquellas cuyas longitudes de onda infrarrojas más largas. En este caso se prefieren otras técnicas de caracterización.

La medición de espesor requiere de igual manera que una porción de la luz viaje a través de toda la película y regrese a la superficie. Si el material absorbe luz, las mediciones por instrumentos ópticos será limitadas a películas delgadas y semi-opacas. Esta limitación puede ser evitada si se dirige la medición a una región espectral de menor absorción. [38]

3.3.1.3 Espectroscopia UV-VIS

La espectroscopia ultravioleta-visible o espectrofotometría UV-VIS implica la espectroscopia de fotones en la región de radiación ultravioleta-visible. Utiliza la luz en los rangos visible y adyacentes (el ultravioleta (UV) cercano y el infrarrojo (IR) cercano. [39]

En esta región del espectro electromagnético, las moléculas se someten a transiciones electrónicas.

La espectroscopia UV-VIS se basa en el análisis de la cantidad de radiación electromagnética (en el rango de longitudes de onda del ultravioleta y visible) que puede absorber o transmitir una muestra en función de la cantidad de sustancia

presente. Todas las técnicas de absorción suponen que cuando una radiación incide sobre una muestra se produce una absorción parcial de esta radiación, la que se debe de una transición entre los niveles energéticos de la sustancia: átomo, molécula o ion X, pasando ésta al estado excitado, X* y el resto de radiación es transmitida. Así analizando una u otra podemos relacionar la cantidad de sustancia activa presente en la muestra.

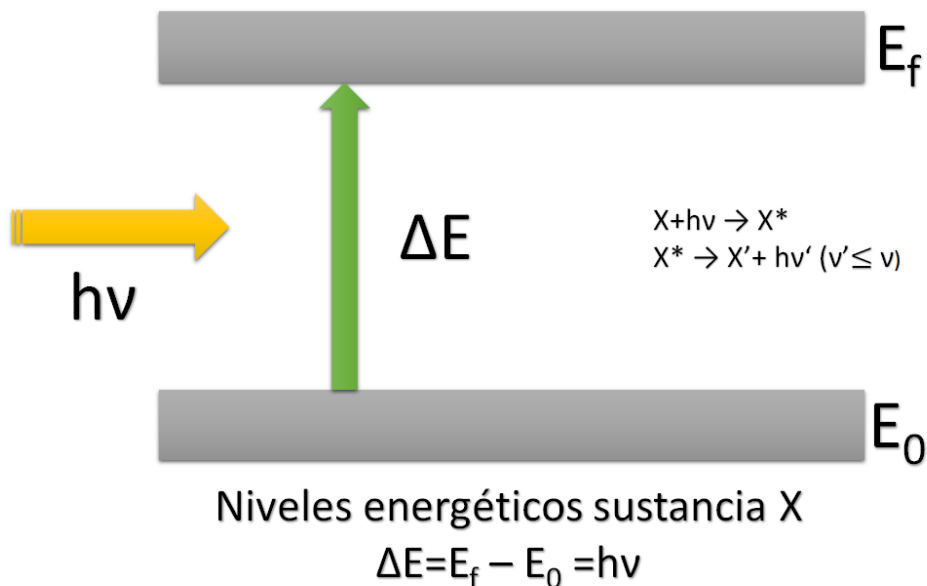


Figura 10. Descripción de la absorción parcial de la radiación electromagnética y la transición que se produce entre los niveles energéticos de un átomo a su estado excitado.

El diferencial de energía (ΔE) es característico de cada muestra, lo que proporciona un análisis cualitativo de un analito en una muestra. Además, la cantidad de energía absorbida o transmitida es proporcional a la concentración de X. La proporcionalidad entre intensidad de luz absorbida o transmitida y la concentración de analito se define por la ley de Lambert-Beer. [40]

3.3.1.3.1 Espectro electromagnético

Como se observa en la Figura 11, el espectro electromagnético abarca una enorme gama de longitudes de onda y frecuencia. Son indicadas de igual manera las regiones espectrales principales. La forma en la que están divididas las zonas se basa en los métodos para detectar y/o generar las diferentes clases de radiación. Se puede observar que la región visible, en comparación con otras regiones, es pequeña. Incluso en métodos espectroquímicos no solo se emplea radiación visible, sino que también utiliza radiación ultravioleta, a pesar de la incapacidad del ojo humano para detectarla se le llaman métodos ópticos.

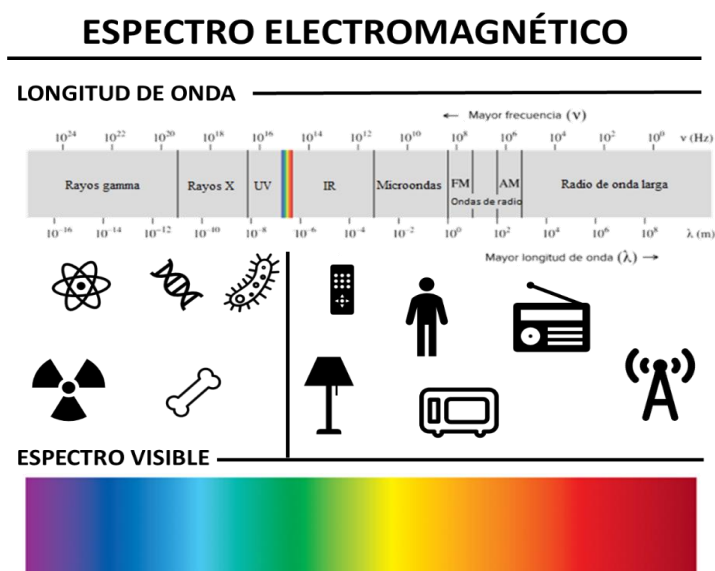


Figura 11. Clasificación del espectro electromagnético según su longitud de onda.

Tipo de espectroscopía	Intervalo de longitud de onda	Tipo de transición cuántica
Emisión de rayos gamma	0.005 - 1.4 Å	Nuclear
Absorción, emisión, fluorescencia y difracción de rayos X	0.1 – 100 Å	Electrón interno
Absorción ultravioleta en el vacío	10 – 180 nm	Electrones de enlace
Absorción, emisión, fluorescencia ultravioleta-visible	180 – 780 nm	Electrones de enlace

Absorción infrarroja y dispersión Raman	0.78 – 300 μm	Rotación/Vibración de moléculas
Absorción de microondas	0.75 – 375 mm	Rotación de moléculas
Resonancia de giro electrónico	3 cm	Espín de electrones en campo magnético
Resonancia magnética nuclear	0.6 – 10 m	Espín de electrones en campo magnético

Tabla 4. Métodos espectroscópicos comunes basados en la radiación electromagnética

En la Tabla 4 se enlistan los valores de la longitud de onda para las regiones del espectro que se consideran importantes para propósitos analíticos, en la última columna se observan los tipos de transiciones nucleares, atómicas o cuánticas moleculares que sirven como base para las diferentes técnicas espectroscópicas.

3.3.1.3.1 Medición de transmitancia y absorbancia

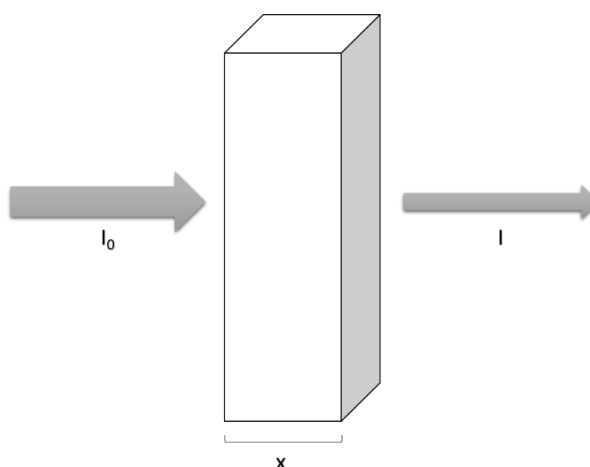


Figura 12. La radiación de la potencia radiante inicia I_0 es atenuada y se transforma en energía transmitida P con una longitud de trayectoria x .

Los métodos cuantitativos de absorción requieren de dos medidas: una antes de que el haz pase a través del medio que contiene el analito (I_0) y otra después (I). dos

términos que se usan ampliamente en la espectrometría por absorción y que relacionan estas medidas, son la transmitancia y la absorbancia.

La transmitancia se refiere a la cantidad de luz que atraviesa a un material a una determinada longitud de onda. Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo transparente cierta cantidad de luz atravesará el material y otra porción será absorbida. La transmitancia y la absorbancia son dos maneras de interpretar un mismo fenómeno. Para medir estos fenómenos se hace pasar un haz de luz de una longitud de onda determinada sobre el (o los) materiales y se mide el haz que pasa a través del material para determinar su transmitancia o la cantidad de luz absorbida para determinar su absorbancia.

3.3.1.3.1 Ley de Beer

La ecuación;

$$A = \log \frac{I_0}{I} \text{ Figura 12)}$$

representa a la ley de Beer en él un haz de radiación monocromático paralelo de potencia I_0 choca de forma perpendicular contra la superficie del bloque. Después de atravesar una longitud x de material, que contiene n átomos, iones o moléculas absorbentes, su potencia disminuye hasta un valor I como resultado de la absorción. Mostrando de esta manera cuanta luz que absorbe el material evaluado.

Sin embargo, bajo ciertas circunstancias, la ley de Beer se rompe y da una relación no lineal. Estas desviaciones se pueden clasificar en tres categorías:

- Desviaciones reales: estas son desviaciones fundamentales debido a las limitaciones de la ley misma.
- Desviaciones químicas: son desviaciones observadas debido a especies químicas específicas de la muestra que se analiza.

- Desviaciones del instrumento: son desviaciones que ocurren debido a la forma en que se realizan las mediciones de absorbancia. [41]

3.3.2 Caracterización Eléctrica

3.3.2.1 Resistividad de bulto

La resistividad de bulto ρ es una propiedad eléctrica intrínseca relacionada a la corriente de arrastre de los portadores en materiales como metales y semiconductores. Desde un punto de vista macroscópico, la resistividad ρ puede ser vista como la normalización de la resistencia de bulto (R) por sus dimensiones geométricas, el área de la sección transversal ($A=Wt$) a través de la cual fluye la corriente y la distancia entre los dos contactos ideales L , la resistividad es dada por:

$$\rho = \frac{RA}{L} \Omega \cdot m \text{ ó } \Omega \cdot cm$$

Para capas delgadas de semiconductores, la resistividad laminar ρ_s es usada comúnmente en lugar de la resistividad de bulto ρ . La resistividad laminar ρ_s es la resistividad de bulto dividido por el grosor de la muestra. [42]

3.3.2.3 Corriente-Voltaje (I-V)

Es una relación que es comúnmente representada por un gráfico o un diagrama entre la corriente eléctrica que pasa a través de un dispositivo, circuito o un material y el voltaje.

Las gráficas obtenidas se utilizan para determinar los parámetros básicos de un dispositivo y para modelar su comportamiento en un circuito eléctrico. Al resultado de esta caracterización se le conoce como curvas I-V. [43]

Las mediciones de corriente-voltaje de los dispositivos semiconductores convencionales es quizá la medición más sencilla y rutinaria realizada, nos proporciona información valiosa sobre la calidad de los materiales utilizados. [42]

La caracterización más simple I-V implica una resistencia, que de acuerdo con la Ley de Ohm exhibe una relación lineal entre la tensión aplicada y la corriente eléctrica resultante. Sin embargo, incluso en este caso, los factores ambientales tales como la temperatura o las características del material de resistencia de la resistencia pueden producir una curva no lineal.

La transconductancia y el voltaje Early de un transistor, así como los mecanismos de transporte a través de un óxido; son ejemplos de parámetros tradicionalmente medidos con la ayuda de una gráfica de I-V, o el equipo de laboratorio que traza los gráficos en tiempo real en un osciloscopio. [44, 45]

3.3.2.3.1 Barrera Schottky

Un contacto metal-semiconductor rectificador se conoce como barrera Schottky, la barrera potencial que se forma, cuando un metal se pone en contacto con un semiconductor, resulta en la formación de una región con alta resistencia (zona de agotamiento) cerca de la interfaz metal-semiconductor con baja concentración de portadores móviles. [46]

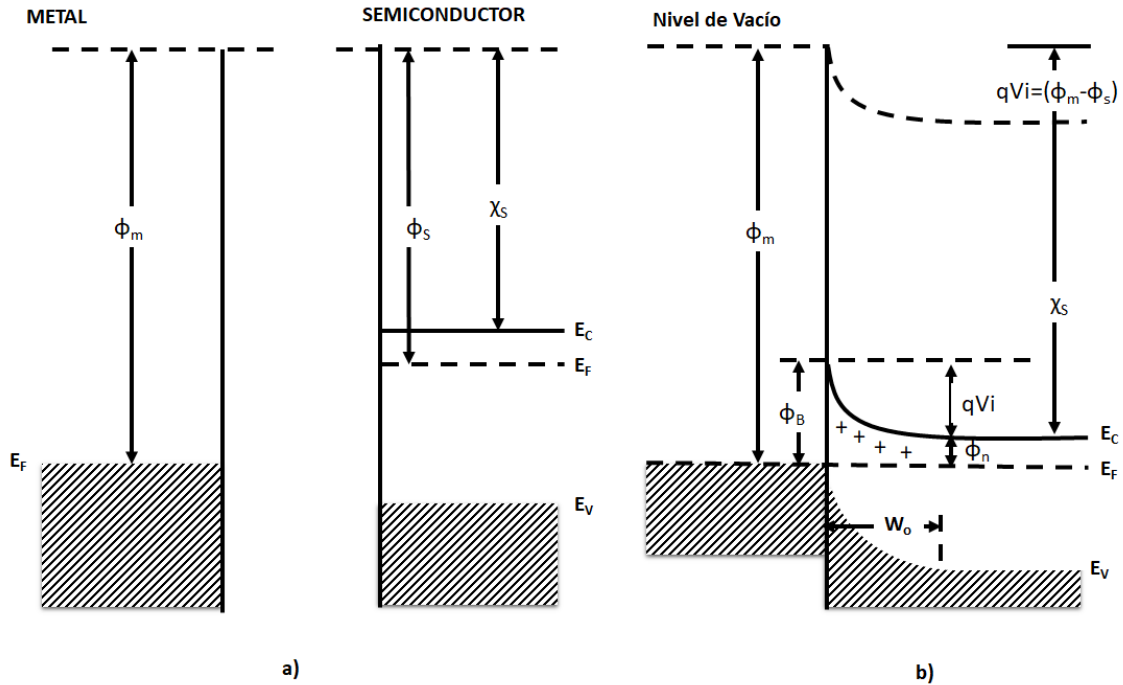


Figura 13 Diagrama de bandas de energía de un semiconductor tipo n y un metal ($\Phi_m > \Phi_s$) a) materiales neutros separados entre sí y b) equilibrio térmico después de que el contacto ha sido hecho

La figura 13 ilustra el proceso de la formación de la barrera, el segmento (a) muestra al diagrama de la banda de energía de un metal con la función de trabajo Φ_m y el semiconductor tipo n con la función de trabajo Φ_s la cual es pequeña con respecto a Φ_m . La función de trabajo de un metal se define como la cantidad de energía requerida para elevar un electrón del nivel de Fermi al nivel de vacío. El nivel de vacío es el nivel de energía de un electrón justo fuera del metal con una energía cinética de 0. La función de trabajo Φ_m tiene una contribución de volumen debido al potencial periódico de la red cristalina y una contribución de superficie debido a la posible existencia de una capa de dipolo en la superficie. La función de trabajo Φ_s del semiconductor se define de manera similar y es una variable dado que el nivel de Fermi varía con el dopaje. Un parámetro importante de la superficie que no depende del dopaje es la afinidad del electrón χ_s , la cual se define como la diferencia de energía de un electrón entre el nivel de vacío y el borde inferior de la banda de conducción. [46]

El segmento (b) muestra el diagrama de bandas de energía después de que el contacto ha sido hecho y se ha alcanzado el equilibrio, cuando los dos materiales han

sido llevados al contacto, los electrones de la banda de conducción del semiconductor, los cuales poseen una energía mayor que la del metal, penetran en este hasta que el nivel de Fermi de los dos lados coincida. A medida que los electrones se mueven del semiconductor hacia el metal, la concentración de electrones libres en la región cercana a la unión disminuye. El decremento de la concentración de electrones en el semiconductor cerca de la interfaz se representa como un incremento de la separación entre la banda de conducción E_c y el nivel de Fermi E_F y asumiendo que en equilibrio térmico E_F permanece constante, la banda de conducción E_c se dobla, como se muestra en la figura 13(b). Los electrones de la banda de conducción que cruzan hacia el metal dejan una carga positiva de donadores ionizados, así que la región del semiconductor cercana al metal se agota de electrones móviles. Por lo tanto, una carga positiva se establece en el lado del semiconductor de la interfase y los electrones que cruzan hacia el metal forman una fina capa de carga negativa. Consecuentemente un campo eléctrico es establecido del semiconductor hacia el metal. [46]

Debería de ser evidente que desde que el ancho de banda prohibida del semiconductor no cambia al hacer contacto con el metal, la banda de valencia E_v , se moverá hacia arriba paralelamente con la banda de conducción E_c . También el nivel de vacío en el semiconductor seguirá las mismas variaciones como E_c . Esto se debe a que se asume que la afinidad del electrón en el semiconductor permanecerá invariable incluso después del contacto con el metal. Para un sistema en equilibrio térmico Metal-Semiconductor el punto importante para determinar la altura de la barrera es que el nivel de vacío deberá permanecer continuo a través de la región de transición. Por lo tanto, el nivel de vacío del semiconductor deberá aproximarse al nivel de vacío del metal gradualmente para preservar la continuidad. El doblez de la banda, entonces, es igual a la diferencia entre los dos niveles de vacío, lo cual es igual a la diferencia entre las dos funciones de trabajo. Esta diferencia está dada por

$$qV_i = (\Phi_m - \Phi_s)$$

donde V_i esta expresada en Volts y es conocida como diferencia de potencial de contacto o potencial incorporado de la unión. ϕ_B es el potencial de barrera que un electrón que se mueve del semiconductor hacia el metal en equilibrio térmico (como se observa en la figura 14, la barrera se modifica cuando se aplica un voltaje positivo al metal) tiene que superar.

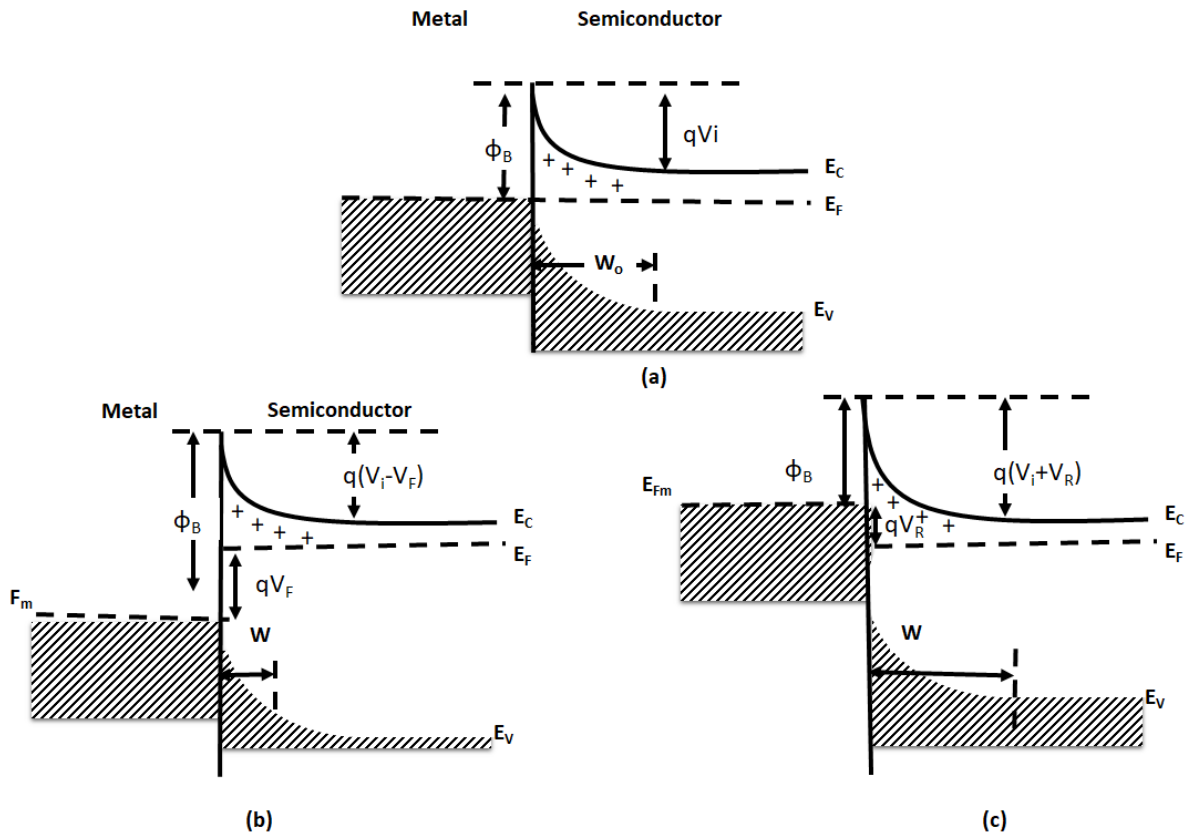


Figura 14 Diagramas de bandas de energía del contacto rectificador metal-semiconductor tipo n (a) Situación de equilibrio térmico (b) Polarización directa; y (c) Polarización inverso

La figura 14 (a) representa el diagrama de bandas de energía en equilibrio térmico del contacto. En el equilibrio, el rango en el cual los electrones cruzan la barrera del semiconductor hacia el metal es balanceado por el rango en el cual los electrones cruzan la barrera en la dirección opuesta y sin corrientes de flujo netas. Dado que la región de agotamiento en el semiconductor tiene pocos portadores móviles, su resistencia es muy alta en comparación con las resistencias del metal y el bulto del semiconductor es neutral y prácticamente todo el voltaje aplicado externamente aparece en la región de agotamiento. El voltaje aplicado altera el

diagrama de bandas en equilibrio, cambiando el total de la curvatura de las bandas y modificando la caída de potencial en la región de agotamiento. Cuando el semiconductor se hace negativo con respecto al metal por un voltaje $V=V_F$ el ancho de la región de agotamiento es reducida y el voltaje que cruza por esta región disminuye de V_i a (V_i-V_F) como se muestra en la figura 14 (b). Los electrones en el lado del semiconductor ven ahora una barrera reducida y como resultado el flujo de electrones del semiconductor hacia el metal es incrementado por encima de su valor bajo equilibrio térmico. Sin embargo, el flujo de electrones del metal no cambia de su valor de equilibrio. Esto se debe prácticamente no ocurre una caída de voltaje en el metal, así que Φ_b no es afectado por el voltaje de polarización.

En la figura 14 (c) se muestra el diagrama de la banda de energía para un contacto con polarización inversa. Aquí el semiconductor es polarizado positivo con respecto al metal por una tensión $V = -V_R$ y la caída potencial a través de la región de agotamiento se incrementa a $(V_i + V_R)$. El flujo de electrones desde el semiconductor hacia el metal se reduce por debajo de su valor de equilibrio mientras que el flujo desde el lado del metal permanece prácticamente sin cambios. Esto conduce a una corriente que fluye en la dirección opuesta, que es pequeña en comparación con la corriente de avance.

3.3.2.3.2 Medición fotoeléctrica

El método fotoeléctrico es el método más acertado y directo para determinar Φ_B . Cuando una luz monocromática incide en un metal en contacto con un semiconductor la energía del fotón $h\nu$ es mayor que la altura de la barrera, pero menor que el ancho de zona prohibida que el semiconductor, los fotones incidentes excitaran algunos electrones del metal sobre la barrera. La corriente fotoeléctrica resultante I_{ph} para $(h\nu-\Phi_B) \gg 3kT$ es dada por la teoría de Fowler:

$$I_{ph} = B(h\nu - \phi_b)^2$$

Donde B es la constante de proporcionalidad. Si $\sqrt{I_{ph}}$ se grafica como una función de $h\nu$, una línea recta es obtenida que se intercepta en el eje $h\nu$ y da directamente la altura de la barrera Φ_B . [46]

3.3.2.3.3 Mecanismos de transporte

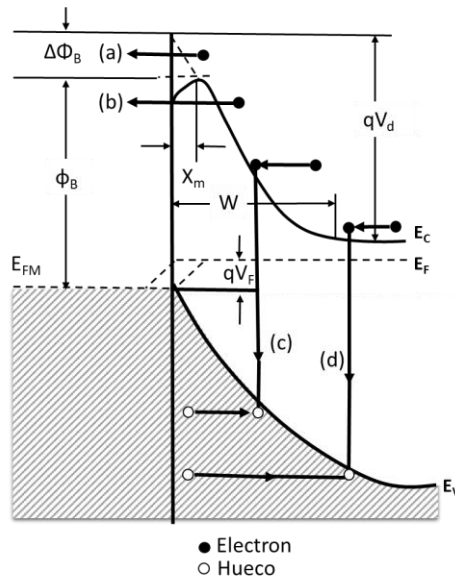


Figura 15 Diagrama de bandas de energía de una unión de barrera Schottky con polarización directa en un semiconductor tipo n. Las líneas punteadas muestran el cuasi nivel de Fermi.

La corriente fluye en un diodo de barrera Schottky debido al cambio de transporte del semiconductor en el metal o en la dirección contraria. Se tienen 4 diferentes mecanismos por el cual puede ocurrir el transporte de portadores. (a) emisión termoiónica sobre la barrera, (b) tunelaje a través de la barrera, (c) recombinación (o generación) de portadores en la región de agotamiento, y (d) recombinación portadores en la región neutral del semiconductor que es equivalente a la inyección de portadores minoritarios en la región neutral. El proceso (a) es usualmente el mecanismo dominante en las uniones de barrera Schottky en Si y GaAs y conduce a las características ideales del diodo. Los otros mecanismos (b) y (c) se alejan del comportamiento ideal. La figura 15 representa de manera esquemática estos

procesos para una barrera Schottky con polarización directa en un semiconductor tipo n.

4. Desarrollo experimental

Para la caracterización de las estructuras de β -Ga₂O₃ se utilizaron diferentes técnicas para realizar las mediciones, en esta sección se detallan los procesos involucrados en estas actividades: Elipsometría, Espectroscopia UV-Vis y Mediciones Corriente-Voltaje.

4.1 Detalles experimentales de fabricación

Para la fabricación de estas estructuras se crecieron películas delgadas de Ga₂O₃ en su fase β sobre cuartos de oblea de zafiro (c-Al₂O₃) mediante el proceso de Molecular Beam Epitaxy asistido por plasma (PA-MBE). Los cuartos de oblea de Zafiro son de 2" de diámetro con pulido en un sólo lado, el sustrato está orientado en la dirección (1000).

La técnica utilizada para el crecimiento de las películas fue MBE utilizando Galio elemental mientras que el flujo de oxígeno se suministró por un plasma de O₂ generado por medio de radiofrecuencia se reportaron las siguientes condiciones de crecimiento: [6,49]

Muestra	Temperatura del sustrato (°C)	Flujo de O ₂ (sccm)	Plasma Power (W)
A	700	1	300
B	750	1	300
C	650	1	300
D	700	1.25	200
E	700	1	200
F	750	1.25	200

GH	750	1	200
I	700	1.5	300
J	750	1.5	300
K	650	1.5	300

Tabla 3 Condiciones de crecimiento

Para la elaboración de las películas de β -Ga₂O₃ fueron utilizados sustratos de zafiro cristalino (c-Al₂O₃) cuya superficie está orientada en el plano C (0001) de la estructura hexagonal (Figura 16).

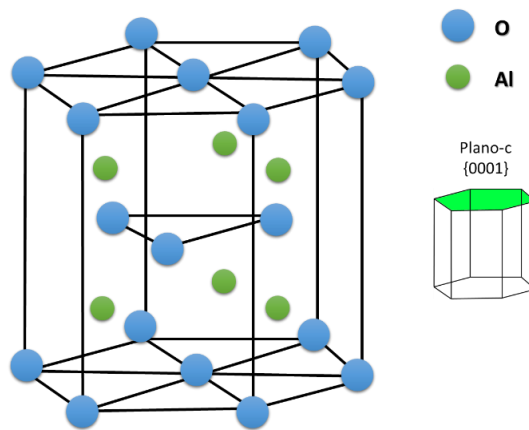


Figura 16. Estructura hexagonal de Al₂O₃

Las películas depositas el β -Ga₂O₃ por medio de la técnica de MBE sobre el sustrato de zafiro presentan una orientación (-201) como se muestra en la figura 17. [28]

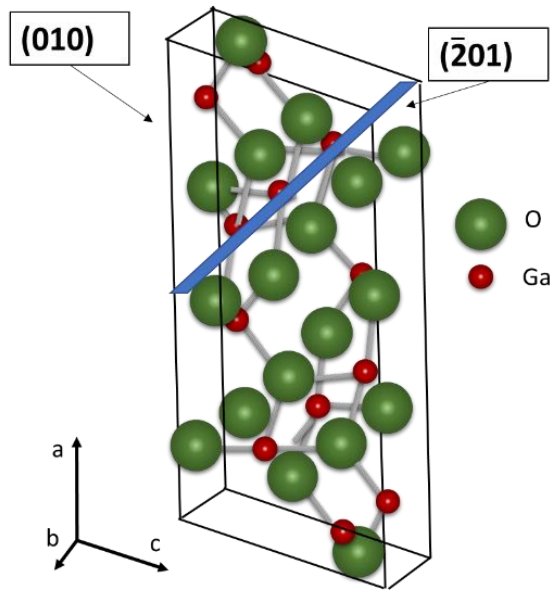


Figura 17. Diagrama de las estructuras del $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ con orientación $(\bar{2}01)$.

El arreglo de la estructura formada por el sustrato de zafiro con el $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ junto a los contactos de aluminio se muestra en la Figura 18.

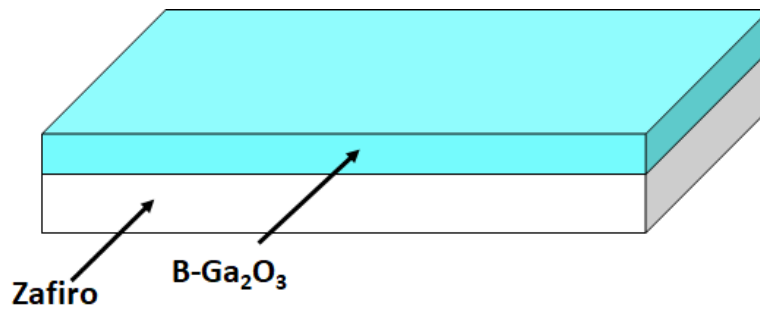


Figura 18. Diagrama de las estructuras fabricadas para el estudio.

4.2 Caracterización óptica

4.2.1 Elipsometría

Los espesores de las películas fueron obtenidos mediante la técnica de elipsometría.

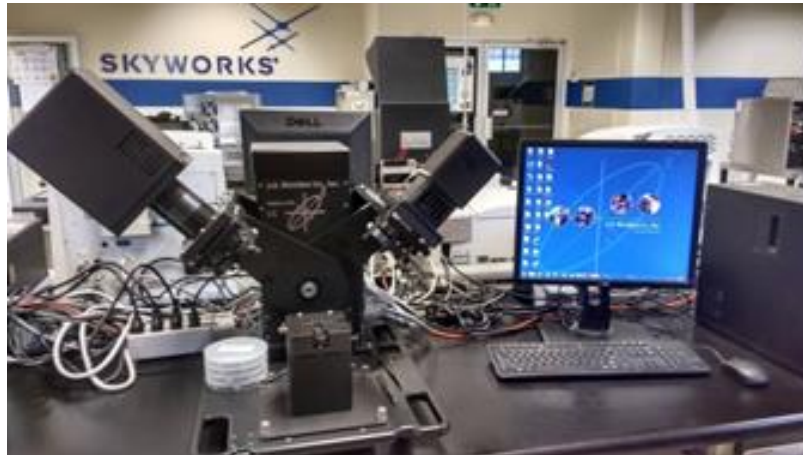


Figura 19. Elipsómetro J.A. Wollam - M2000

Las constantes ópticas y los grosores de las películas se determinaron por Elipsometría utilizando el modelo de Cauchy.

El modelo Cauchy funciona para materiales transparentes, es decir, funciona cuando el material no presenta absorción óptica en el espectro visible (como lo son Ga_2O_3 y Al_2O_3) y consecuentemente de manera general tiene una dispersión normal lo que significa una disminución monótona del índice de refracción con incremento en la longitud de onda.

Este modelo asume que el índice de refracción n puede ser representado como la función que varía lentamente de la longitud de onda.

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}$$

Donde A, B y C son coeficientes que se pueden determinar para un material ajustando la ecuación a índices de refracción medidos en longitudes de onda conocidas. Para este material el ajuste se dio de los 300 a los 1000 nm, rangos donde las películas son transparentes. [6]

4.2.2 Espectroscopía UV-Visible

Los espectros de transmisión de las muestras fueron obtenidos con el espectrómetro UV-Vis Shimadzu 2600. Las mediciones se realizaron en un rango de 200 a 800 nm. Inicialmente se utilizó un sustrato de $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ como referencia, el sustrato contaba con las mismas características que los utilizados durante los crecimientos. El $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ al contar con un bandgap mayor al del $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, proporciona un espectro que exhibe una transmisión mayor comparado con las muestras que contienen películas, de tal forma que se puede asumir que toda variación respecto al espectro del sustrato es contribuida por el $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ depositado.

4.3 Caracterización eléctrica

4.3.1 Deposición de contactos de aluminio

Con el fin de evaluar las muestras mediante mediciones I-V se depositaron contactos de aluminio en las muestras de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$.

El depósito se llevó a cabo mediante evaporación térmica en un sistema de depósito de alto vacío de la marca Intercovamex modelo TE12.

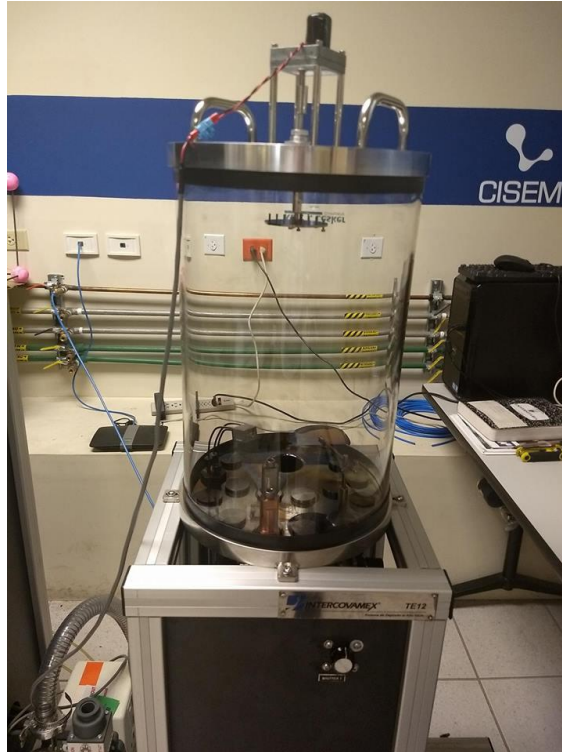


Figura 20. Sistema de depósito de alto vacío

Los contactos metálicos obtenidos cuentan con un área de $70 \times 70 \mu\text{m}^2$ con una distancia entre ambos de $30 \mu\text{m}$.

En la figura 21 se observa el esquema de estos contactos.

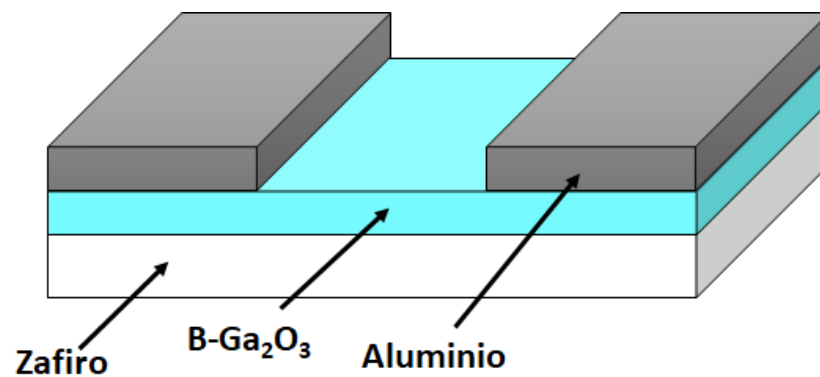


Figura 21. Diagrama de la estructura con los contactos de aluminio para la caracterización eléctrica.

4.3.2 Corriente- Voltaje

Las mediciones de Corriente-Voltaje (I-V) se llevaron a cabo en oscuridad, así como luz visible y UV para estudiar los efectos y la posibilidad de utilizar estas estructuras como sensores de UV-C.

La medición I-V se realiza con corriente lateral entre estos contactos en oscuridad y diferentes fuentes de iluminación ultravioleta y luz visible. Estas mediciones se realizaron en un Sistema de Caracterización de Semiconductor Keithley 4200. (Figura 22)



Figura 22 Sistema de caracterización de semiconductores Keithley 4200

5. Resultados y discusiones

Se describen a continuación los resultados obtenidos de la caracterización óptica y eléctrica de las estructuras de β -Ga₂O₃

5.1 Caracterización óptica

5.1.1 Elipsometría

El espesor de las películas de β -Ga₂O₃ depositadas sobre Al₂O₃ fueron medidas inicialmente utilizando la librería generada en la tesis doctoral descrita en el punto 4.1.1 arrojando los siguientes resultados para las muestras evaluadas:

Para la **muestra A** con un MSE de 3.226 lo que nos indica una desviación del modelo muy baja, con un espesor de 8.62 ± 0.036 nm y una rugosidad de 1.82 ± 0.023 nm.

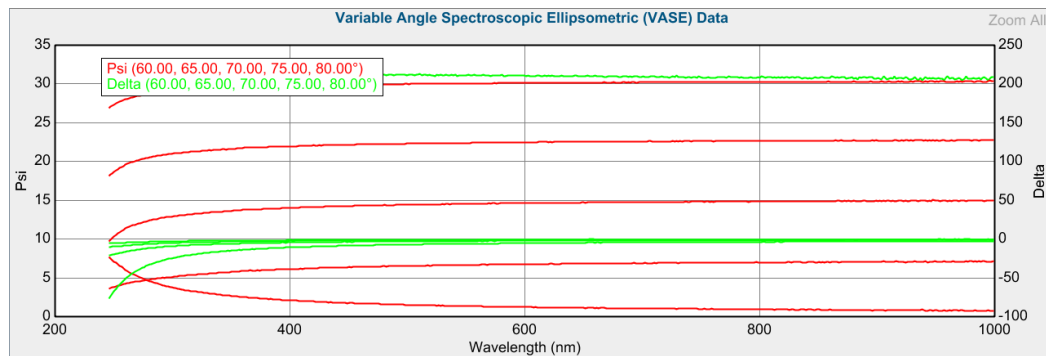


Figura 23. Curvas obtenidas de la medición por elipsometría de la muestra A

Para la **muestra B** con un MSE de 1.82 lo que nos indica una desviación del modelo muy baja, con un espesor de 6.53 ± 0.025 nm y una rugosidad de 1 ± 0.017 nm.

Posteriormente se utilizó el modelo de Cauchy para determinar los grosores de las películas. Los resultados obtenidos para n una $\lambda = 632.8$ (Láser Helio-Neón) fueron:

Temperatura de crecimiento	Flujo O ₂ (sccm)	Grosor	Rugosidad	n para $\lambda = 632.8$ nm
650	1	13.1	0.65	1.864
700	1	12.1	0.78	1.868
750	1	11.6	1.02	1.876
650	1.5	18.8	0.54	1.875
700	1.5	17.1	0.36	1.879
750	1.5	16.7	0.48	1.873

Tabla 6 Espesores e índice de refracción obtenidos utilizando el modelo Cauchy

En la tabla 6 se observa una dependencia del grosor de la película con respecto a la temperatura de crecimiento en el que para un flujo de O₂ de 1 (SCCM) el grosor decrementa de 13.1 a 11.6 nm para una variación de la temperatura de 650 a 750°C. De igual manera se aprecia un aumento significativo del grosor al aumentar el flujo de O₂ dando como resultado la película más delgada con una temperatura de crecimiento de 750°C y un flujo de O₂ de 1 sccm, así como la película con el mayor grosor a 650°C y un flujo de 1.5 sccm. en la figura 24 se muestra gráficamente este resultado.

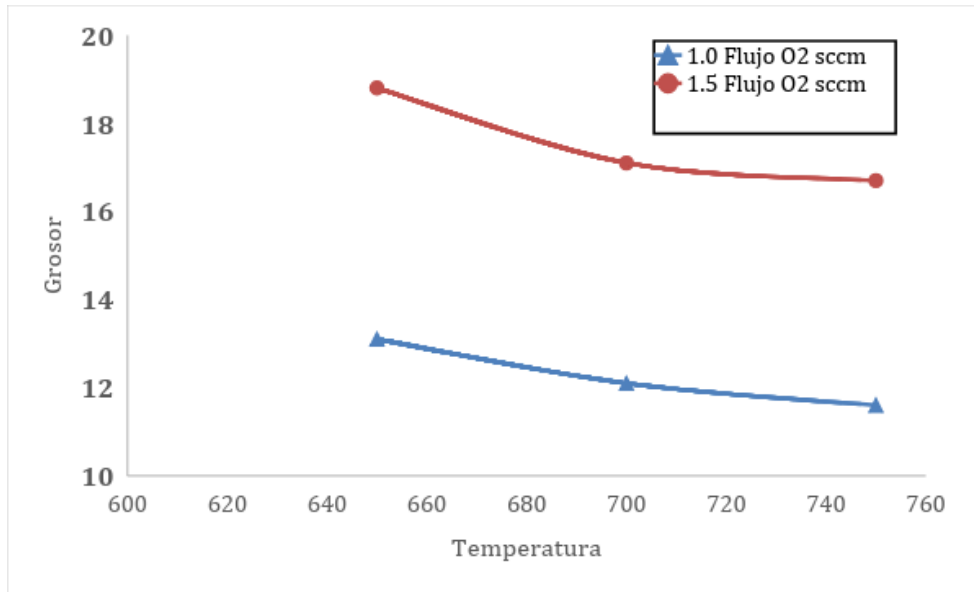


Figura 24 Dependencia presentada del espesor con respecto a la temperatura del sustrato.

Esto se debe a que a mayor temperatura del sustrato se presentará de igual manera el aumento a la desorción de las moléculas Ga_2O_3 en la superficie de crecimiento. mientras que un mayor flujo de oxígeno no permite la desorción, lo que resultaría en una mayor tasa de crecimiento. se puede resumir en los siguientes enunciados:

A mayor temperatura de sustrato menor grosor de película.

A mayor flujo de oxígeno mayor tasa de crecimiento.

Sin embargo, al presentarse el fenómeno de desorción de las películas y tener películas más delgadas estas serían de mayor calidad debido a que las moléculas de Ga_2O_3 que se “pierdan” serán las que se encuentren más débilmente ligadas a la estructura.

5.1.2 UV-Vis

La figura 25 nos muestra los resultados de la espectroscopia UV-Vis del zafiro, así como de las estructuras de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, con las condiciones en las que fueron crecidas con anterioridad de 200 y 300 W de potencia del plasma con temperaturas de 700 y 750°C.

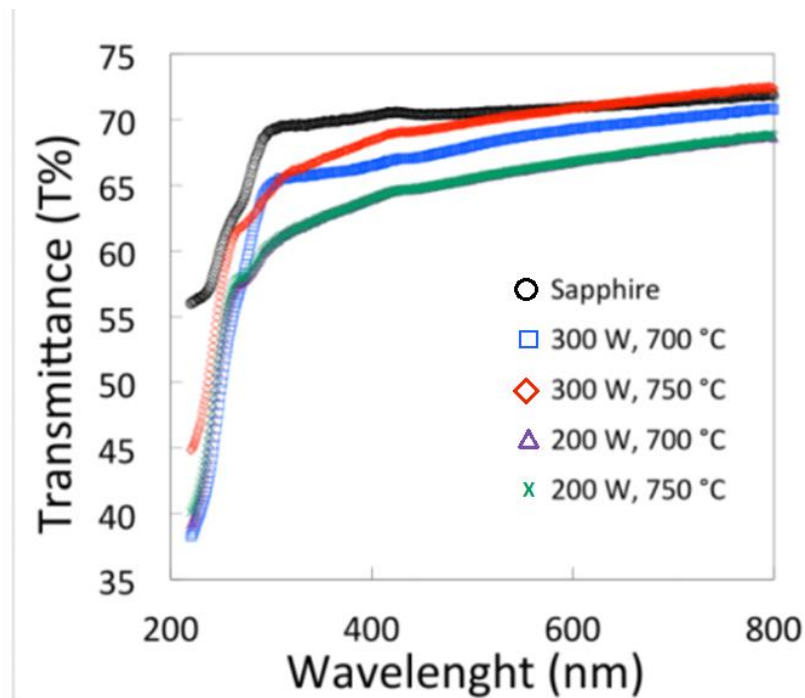


Figura 25 Espectro UV-Vis del sustrato de Zafiro y películas delgadas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$

Puede ser observado en esta gráfica que el Zafiro (círculo negro) muestra una mayor transmitancia en comparación con las estructuras de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ sobre zafiro, cabe mencionar que el zafiro no presenta una transmitancia del 100% debido a que se encuentra pulido únicamente por una cara. De igual manera se puede apreciar que las estructuras crecidas a una potencia de 300 W presentan una mayor transmitancia que las de 200 W. Es evidente de la misma manera el papel de la temperatura juega un rol de suma importancia en la transmitancia ya que las muestras que fueron crecidas con

una potencia de 300 W a 750°C presentan mayor transmitancia que el resto de las estructuras.

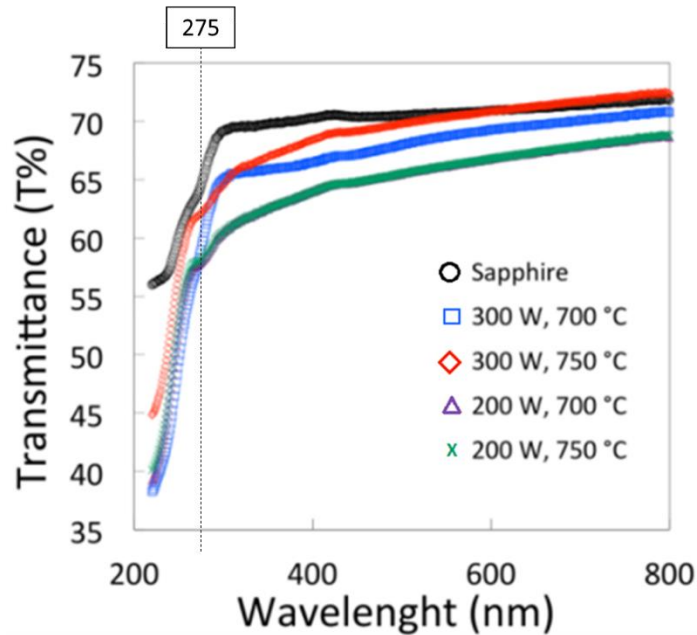


Figura 26 Espectro de UV-Vis, se observa que la absorción a una longitud de onda inferior a 275 nm.

En la figura 25 se observa que todas las estructuras comienzan a absorber en una longitud de onda inferior a los 275 nm, en la tabla 1 se muestra la clasificación de la luz ultravioleta, UV-C va desde los 280 nm hasta los 100 nm, por lo que estas estructuras absorben en esta región.

5.2 Caracterización Eléctrica

5.2.1 Curvas I-V

5.2.1.1 Muestra A

En la figura 26 se muestra el resultado de someter a las estructuras a las mediciones de corriente-voltaje bajo dos parámetros, mediciones en oscuridad y luz ultravioleta, donde se presenta claramente la interacción de la muestra a la radiación

ultravioleta. Estas mediciones se llevaron a cabo en intervalos de 0 a 10 V y de 0 a -10 V.

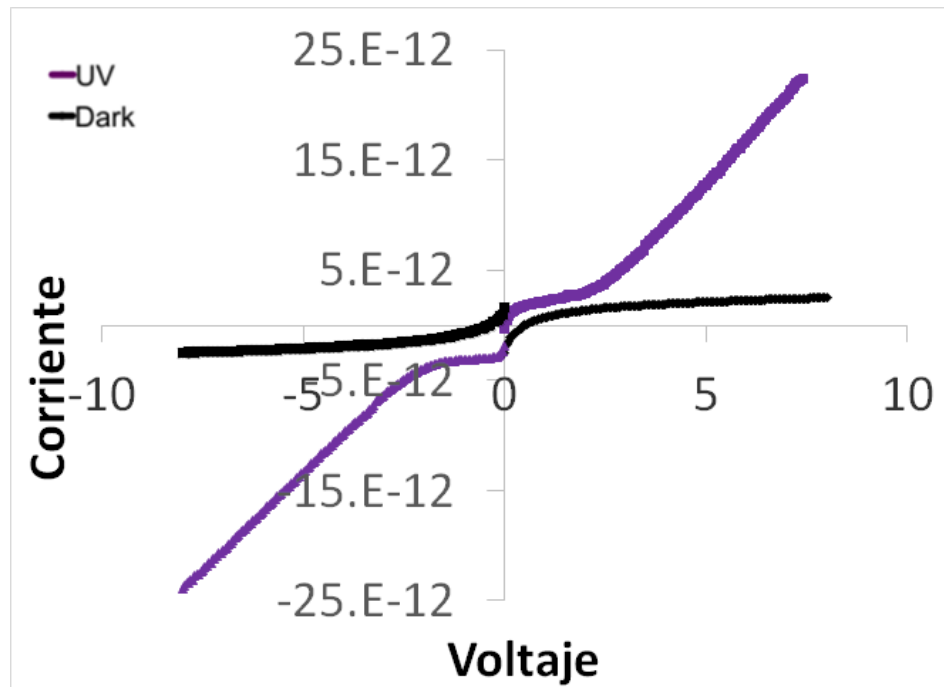


Figura 27 Mediciones de Corriente-Voltaje en oscuridad y bajo luz Ultravioleta

Estos resultados (Figura 26) nos indican que las muestras no reaccionan en la oscuridad, sino que detectan luz ultravioleta. Se debe de observar que en esta figura se muestra una respuesta a la luz ultravioleta (254 nm) bajo la cual fueron irradiadas las películas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ y con la que presentaron conductividad, pero de igual manera pudiera referirse que las muestras responden a luz ultravioleta en general y no en específico del tipo C.

Posteriormente y con la finalidad de determinar y comprobar que el tipo de luz ultravioleta que las muestras detectan es del tipo C se realizaron nuevas mediciones para obtener las curvas I-V características de las películas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$, las cuales, fueron evaluadas tanto en oscuridad como en luz ultravioleta UV-C (254 nm), UV-A (366 nm), para descartar que las muestras pudieran estar reaccionando posiblemente a luz visible se someten a una fuente de luz verde (532 nm) y una fuente de luz roja (650 nm).

Al observar el comportamiento eléctrico de las estructuras bajo las diferentes fuentes de iluminación antes mencionadas, en la figura 27 presentan las diferentes curvas I-V obtenidas de cada una, en la cual la curva correspondiente a los 254 nm (Luz UV-C) es la única fuente de iluminación que las películas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ detectan.

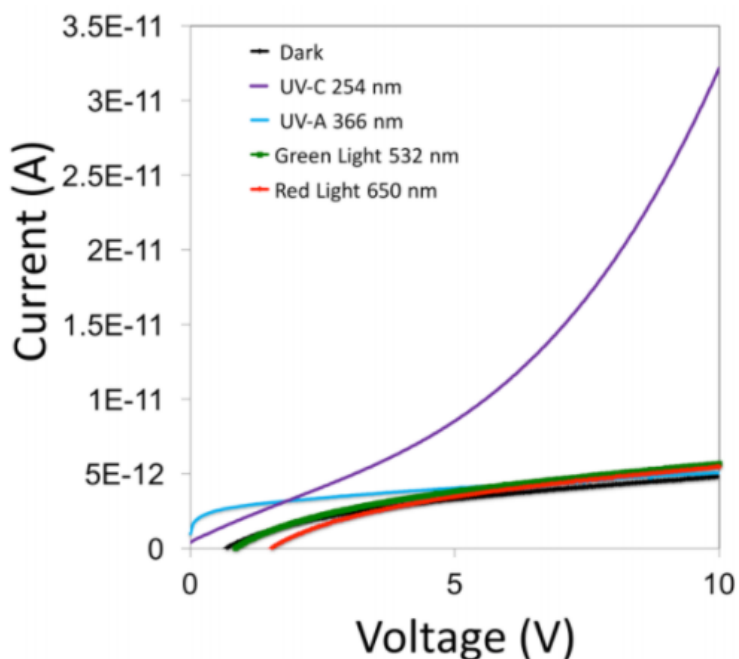


Figura 28 Curvas I-V características de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ en oscuridad y bajo diferentes fuentes de iluminación

Al realizar una comparación de resultados, los obtenidos con los espectros de UV-Vis y los que fueron obtenidos con las curvas I-V se puede observar que ambas técnicas concuerdan en que la absorción de las muestras de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ se presente en longitudes de onda menores a 275 nm. Esto nos indica que el material en efecto absorbe en la región UV-C.

6. Conclusiones

Las películas crecidas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-201) sobre $c\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0000) pulido por un lado fueron evaluadas mediante diferentes técnicas de caracterización óptica y eléctrica.

Los grosores calculados por elipsometría muestran una dependencia con la temperatura del sustrato, la cual se manejó en un rango de 650 a 750°C y flujo de oxígeno, de 1 a 1.5 sccm. Las muestras que se trabajaron con una menor temperatura del sustrato (650°C) y un mayor flujo de oxígeno (1.5) presentaron el mayor crecimiento.

Los resultados presentados en las gráficas de la caracterización de UV-Vis muestran que estas películas comienzan a absorber por debajo de los 275 nm la cual se encuentra dentro de la zona de UV-C. De acuerdo con lo observado en la figura 30 se observa que las muestras crecidas con una potencia de plasma de 300 W tienden a ser más transparentes ya que exhibieron una transmitancia mayor que las que fueron crecidas a 200 W. Por lo que existe una relación de la transmitancia y la potencia del plasma.

De la misma manera se evaluó esta dependencia con las curvas I-V sometiendo a las muestras bajo diferentes fuentes de iluminación, así como en oscuridad, demostrando que cuando se mantiene iluminada con UV-C se muestra un incremento de la corriente.

Las mediciones eléctricas realizadas bajo diferentes tipos de iluminación mostraron que responden únicamente a la ultravioleta tipo C, por lo que son candidatos excelentes para la detección.

Los resultados de este trabajo fueron presentados en una ponencia en el IX Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería en Materiales (CNCIM 2018) llevado a cabo en la Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz (UTCV) bajo el título de

Caracterización óptica y eléctrica de películas delgadas de $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ fabricadas mediante crecimiento epitaxial por haces moleculares sobre $c\text{-Al}_2\text{O}_3$. (Anexo 1)

7. Recomendaciones y trabajo futuro

Una vez concluida la tesis, se considera como trabajo futuro de las muestras de β -Ga₂O₃ crecidas sobre c-Al₂O₃ explorar nuevas técnicas de fabricación.

Molecular Beam Epitaxy es una técnica confiable, pero resulta costosa y complicada para ser utilizada en la producción a gran escala de dispositivos optoelectrónicos

Una técnica propuesta es Pulsed laser deposition (PLD) la cual es una técnica simple, es eficaz en relación con el costo, rápida, versátil y escalable. [50]

De igual manera se puede extender el estudio al obtener películas mediante otros métodos, como oxidación térmica a partir de Arseniuro de Galio o Nitruro de Galio. [51,52]

Se puede realizar la síntesis de β -Ga₂O₃ a través del método Sol-Gel utilizando como precursores Isopropóxido de galio [Ga(OC₃H₇)₃] y una solución acuosa de Cloruro de Galio (GaCl₃). [53,54]

Se considera interesante evaluar las propiedades ópticas, eléctricas y estructurales de las películas que puedan ser obtenidas por estas diferentes técnicas y relacionar su calidad y utilización al método empleado.

8. Referencias bibliográfica

1. Secretaría de Economía. (2012). Monografía: Industria Electrónica en México. Dirección General de Industrias Pesadas y de Alta Tecnología Sitio web: http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/monografia_industria_electronica_Oct2012.pdf
2. Smith, T. (1991). Semiconductor science: the fourth generation. *Proceedings of the IEEE*, 79(8), 1181-1187.
3. Shizuo Fujita (2015), Wide-bandgap semiconductor materials: For their full bloom, Japanese Journal of Applied Physics.
4. Stepanov, S., Nikolaev, V., Bougrov, V., & Romanov, A. (2015). Gallium oxide: properties and applications - A review.
5. Geller, S. (1960). Crystal Structure of β -Ga₂O₃. *The Journal Of Chemical Physics*, 33(3), 676-684.
6. Arias, A., Nedev, N., Ghose, S., Rojas-Ramirez, J., Mateos, D., Curiel Alvarez, M., Pérez, O., Suárez, M., Valdez-Salas, B. and Droopad, R. (2018). Structural, Optical, and Electrical Characterization of β -Ga₂O₃ Thin Films Grown by Plasma-Assisted Molecular Beam Epitaxy Suitable for UV Sensing. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, pp.1-6.
7. Rebien, M., Henrion, W., Hong, M., Mannaerts, J., & Fleischer, M. (2002). Optical properties of gallium oxide thin films. *Applied Physics Letters*, 81(2), 250-252.
8. Splith, D., Müller, S., Schmidt, F., von Wenckstern, H., van Rensburg, J., Meyer, W., & Grundmann, M. (2013). Determination of the mean and the homogeneous barrier height of Cu Schottky contacts on heteroepitaxial β -Ga₂O₃ thin films grown by pulsed laser deposition. *Physica Status Solidi (A)*, 211(1), 40-47.
9. Ultraviolet Radiation: A Hazard to Children and Adolescents. (2011). *PEDIATRICS*, 127(3), 588-597.
10. El Ghissassi, F., Baan, R., Straif, K., Grosse, Y., Secretan, B., & Bouvard, V. et al. (2009). A review of human carcinogens—Part D: radiation. *The Lancet Oncology*, 10(8), 751-752.

11. L. de Boisbaudran (1875), *The Philosophical magazine; a journal of theoretical, experimental and applied physics*, 414.
12. Ricci, F., Boschi, F., Baraldi, A., Filippetti, A., Higashiwaki, M., & Kuramata, A. et al. (2016). Theoretical and experimental investigation of optical absorption anisotropy in β -Ga₂O₃. *Journal Of Physics: Condensed Matter*.
13. Li, Z., de Groot, C., & Moodera, J. (2000). Gallium oxide as an insulating barrier for spin-dependent tunneling junctions. *Applied Physics Letters*, 77(22), 3630-3632.
14. Miyata, T., Nakatani, T., & Minami, T. (2000). Manganese-activated gallium oxide electroluminescent phosphor thin films prepared using various deposition methods. *Thin Solid Films*, 373(1-2), 145-149.
15. Hu, A., & Apblett, A. (2014) *Nanotechnology for Water Treatment and Purification* (p. 101). Springer.
16. Tamba, D., Kubo, O., Oda, M., Osaka, S., Takahashi, K., & Tabata, H. et al. (2016). Surface termination structure of α -Ga₂O₃ film grown by mist chemical vapor deposition. *Applied Physics Letters*, 108(25), 251602.
17. Rodríguez Delgado, M., Morterra, C., Cerrato, G., Magnacca, G., & Otero Areán, C. (2002). Surface Characterization of γ -Ga₂O₃: A Microcalorimetric and IR Spectroscopic Study of CO Adsorption. *Langmuir*, 18(26), 10255-10260.
18. Riedel, R., & Chen, I. (2012). *Ceramics science and technology volume 2*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
19. Ghose, S., Rahman, M., Rojas-Ramírez, J., Caro, M., Droopad, R., Arias, A., & Nedev, N. (2016). Structural and optical properties of β -Ga₂O₃ thin films grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal Of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology And Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, And Phenomena*.
20. J.A. Kohn, G. Katz & J.D. Broder (1957), *Characterization of β -Ga₂O₃ and its Alumina Isomorph, ϑ -Al₂O₃*, *Am. Mineral*
21. Anshu Goyal, Brajesh S. Yadav, O. P. Thakur, A. K. Kapoor (2013). Structural and Optical Characterization of β -Ga₂O₃ Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition. Environmental Science and Engineering book series

22. Hajnal, Z., Miró, J., Kiss, G., Réti, F., Deák, P., Herndon, R., & Kuperberg, J. (1999). Role of oxygen vacancy defect states in then-type conduction of β -Ga₂O₃. *Journal Of Applied Physics*, 86(7), 3792-3796.
23. Cho, A., & Arthur, J. (1975). Molecular beam epitaxy. *Progress In Solid State Chemistry*, 10, 157-191. [http://dx.doi.org/10.1016/0079-6786\(75\)90005-9](http://dx.doi.org/10.1016/0079-6786(75)90005-9)
24. Rahman, M., Ghose, S., Gatabi, J., Rojas-Ramirez, J., Pandey, R., & Droopad, R. (2016). Heteroepitaxial growth and characterization of BiFeO₃ thin films on GaAs. *Materials Research Express*.
25. Pamplin, B. (1980). *Molecular beam epitaxy* (1st ed.). Oxford: Pergamon Press.
26. Arthur, J. (2002). Molecular beam epitaxy. *Surface Science*, 500(1-3), 189-217.
27. Sorab K. Ghandhi pag. (1994). *VLSI FABRICATION PRINCIPLES Silicon and Gallium Arsenide 2nd Edition*. New York: Wiley-Interscience.
28. *Aluminum Oxide | Al₂O₃ Material Properties*. (2018). *Accuratus.com*. Retrieved 17 January 2018, from <http://accuratus.com/alumox.html>
29. Busca, G. (2014). *Heterogeneous catalytic materials* (pp. 139-141). S.I.: Elsevier Science Ltd.
30. Bare, S., Busca, G., Hadjiivanov, K., & Nemeth, L. (2014). *Advances in catalysis* (1st ed., p. 357). Elsevier Inc.
31. Gottschalch, V., Mergenthaler, K., Wagner, G., Bauer, J., Paetzelt, H., Sturm, C., & Teschner, U. (2009). Growth of β -Ga₂O on Al₂O₃ and GaAs using metal-organic vapor-phase epitaxy. *Physica Status Solidi (A)*, 206(2), 243-249.
32. Jaeger, R. (2014). *Introduction to microelectronic fabrication* (pp. 129-132). Singapore: Pearson Education South Asia.
33. Barrera, C. E1.; F. J. C. Martínez1 R. Vázquez-Rodríguez y M. Ortega. (2016). Aplicaciones de la elipsometría espectroscópica y su uso en la caracterización de materiales utilizados en la captación de energía solar. Sitio web:<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Ecosolar/Ecosolar15/HTML/articulo01.htm>
34. *Polarized Light - J.A. Woollam Co.*. (2016). *J.A. Woollam Co.*. Retrieved 1 December 2016, from <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/polarized-light>

35. *Ellipsometry*. (2016). *Uta.edu*. Retrieved 1 December 2016, from <http://www.uta.edu/optics/research/ellipsometry/ellipsometry.htm>
36. Fujiwara, H. (2007). *Spectroscopic ellipsometry* (1st ed.). Chichester, England: John Wiley & Sons.
37. *Light and Materials - J.A. Woollam Co.*. (2017). *J.A. Woollam Co.*. Retrieved 18 April 2017, from <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/light-and-materials>
38. *Ellipsometry Measurements - J.A. Woollam Co.*. (2017). *J.A. Woollam Co.*. Retrieved 30 May 2017, from <https://www.jawoollam.com/resources/ellipsometry-tutorial/ellipsometry-measurements>
39. *Espectrometría ultravioleta-visible*. (2016). *Espectrometria.com*. Retrieved 1 December 2016, from: http://www.espectrometria.com/espectrometra_ultravioleta-visible.
40. Retrieved 1 December 2016, from <http://Diffuse Reflectance IR and UV-vis Spectroscopy: Modern Methods in Heterogeneous Catalysis>
41. Skoog Douglas A., Holler F. James, Crouch Stanley R (2008) *Principios de análisis instrumental*. México: CENGAGE Learning
42. Kasap, S., & Capper, P. *Springer handbook of electronic and photonic materials* (pp. 410-427). Springer.
43. *Cram101 textbook outlines to accompany Fuel cell fundamentals, Fritz B. Prinz, 2nd edition*. (2012) (1st ed.).
44. Library, i. (2016). *Current-voltage characteristic, 2016 | iCloud eBook Library - eBooks | Read eBooks online. Ipad-library.net*. Retrieved 1 December 2016, from http://www.ipad-library.net/articles/Current-voltage_characteristic, 2016
45. S. M. Sze and Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc., (2007).
46. Sharma, B. (1984). *Metal semiconductor schottky barrier junctions and their applications* (pp. 1-45). New York: Plenum Press.
47. Alain C. Diebold. *Handbook of Silicon Semiconductor Metrology*, (2001).
48. Neamen, D. (2012). *Semiconductor physics and devices*. (pp.512-520) New York: McGraw-Hill Higher Education.

49. Arias L. Abraham (2015). "Efectos de la Radiación Ultravioleta y Visible en Materiales Nanoestructurados Basados en Óxidos de Silicio y Galio para Aplicaciones en Dispositivos Optoelectrónicos. (Tesis de Grado) Universidad Autónoma de Baja California, Baja California, México.
50. Eason, R. (2007). *Pulsed laser deposition of thin films*. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, pp.4-10.
51. Zhou, Y., Ahyi, C., Isaacs-Smith, T., Bozack, M., Tin, C., Williams, J., Park, M., Cheng, A., Park, J., Kim, D., Wang, D., Preble, E., Hanser, A. and Evans, K. (2008). Formation, etching and electrical characterization of a thermally grown gallium oxide on the Ga-face of a bulk GaN substrate. *Solid-State Electronics*, 52(5), pp.756-764.
52. Ryszard Korbutowicz and Joanna Prazmowska (2010). Wet Thermal Oxidation of GaAs and GaN, Semiconductor Technologies, Jan Grym (Ed.), ISBN: 978-953-307-080-3
53. Brinker, C. and Scherer, G. (1990). *Sol-gel science*. Boston: Academic Press.
54. Sinha, G., Ganguli, D. and Chaudhuri, S. (2006). Crystallization and optical properties of finite sized β -Ga₂O₃ in sol-gel derived Ga₂O₃:SiO₂ nanocomposites. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 18(49), pp.11167-11176.

Anexos

Anexo 1

**IX Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería
en Materiales otorga**

la presente Constancia a:

MARIEL ALEXIS SUÁREZ LÓPEZ

quien presentó la contribución:
Caracterización óptica y eléctrica de películas delgadas de β -Ga₂O₃ fabricadas mediante
crecimiento epitaxial por haces moleculares sobre e-Al₂O₃
en el VIII Congreso Nacional de Ciencia e Ingeniería en Materiales
celebrado en la Universidad Tecnológica del Centro de Veracruz, Ver del 21 al 23 de marzo de 2018.


ELIZABETH REYES CHÁVEZ
RECTORA


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA
DEL CENTRO DE VERACRUZ


CONGRESO NACIONAL DE CIENCIA
E INGENIERÍA EN MATERIALES

SEP | Centro de Trabajo 306UTD0626
Cerve de la Institución: 306UTD06272 | STPS: UTC041509TU470013