



*"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"*

*"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"*

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA
Maestría en Ciencias en Electrónica

**Diseño, fabricación y caracterización de un TFT
semitransparente con ZnO como capa activa y Al₂O₃ como
dieléctrico de compuerta.**

T E S I S

Presentada en cumplimiento de los requisitos para obtener el grado
de Maestro en Ciencias en Electrónica presenta:

Ing. Igor Borges Doren

Director de tesis: Dr. Dainet Bermán
Mendoza

Co-director de tesis: Dr. Roberto Gómez
Fuentes

Hermosillo, Sonora, México

agosto de 2020

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



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

Contenido

| | |
|--|----|
| ii) DEDICATORIA | 4 |
| iii) AGRADECIMIENTOS | 5 |
| IV) RESUMEN..... | 6 |
| V) ABSTRACT | 7 |
| VI) Lista de tablas | 8 |
| VII) Lista de figuras..... | 9 |
| Antecedentes | 12 |
| JUSTIFICACIÓN | 14 |
| HIPÓTESIS..... | 14 |
| OBJETIVOS..... | 14 |
| Objetivo general..... | 14 |
| Objetivos particulares | 14 |
| METAS | 15 |
| Capítulo 1. Materiales electrónicos | 16 |
| 1.1 Clasificación electrónica de los materiales | 16 |
| 1.1.1 Conductores | 16 |
| 1.1.2 Semiconductores | 16 |
| 1.1.3 Dieléctricos..... | 17 |
| 1.2 Teoría de Bandas de Energía en los materiales | 18 |
| 1.3 Aplicación de los materiales electrónicos..... | 19 |
| 1.3.1 Contactos Metálicos..... | 19 |
| 1.3.2 Dieléctrico de compuerta | 20 |
| 1.3.3 Capa activa | 21 |
| 1.4 Capa activa de óxido de zinc (ZnO) | 22 |
| 1.4.1 Propiedades cristalinas. | 23 |
| 1.4.2 Propiedades Ópticas | 24 |
| 1.4.3 Propiedades eléctricas. | 25 |
| 1.4.4 Técnica de síntesis de ZnO. | 26 |
| CAPÍTULO 2. “Fundamento de transistores de Efecto de Campo” y técnicas de caracterización..... | 29 |
| Introducción..... | 29 |
| 2.1 Transistores de efecto de campo (FET)..... | 30 |
| 2.1.1 Transistores de efecto de campo de puerta aislada..... | 30 |

| | |
|---|----|
| 2.1.2 Diferentes estructuras de TFTs | 32 |
| 2.1.3 Materiales utilizados en la fabricación de TFTs | 33 |
| 2.2 Técnicas de caracterización de los materiales usados en TFTs..... | 35 |
| 2.2.1 Difracción de rayos X..... | 35 |
| 2.2.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)..... | 37 |
| 2.2.3 Perfilometría. | 38 |
| 2.2.4 XPS..... | 39 |
| 2.2.5 EDS | 40 |
| CAPÍTULO 3. Metodología experimental | 42 |
| 3.1 Síntesis de materiales | 42 |
| 3.1.1 Síntesis de películas delgadas de Al ₂ O ₃ por Baño químico | 42 |
| 3.1.2 Síntesis de películas delgadas de ZnO por Sol-Gel..... | 43 |
| 3.1.3 Depósito de los contactos de Au..... | 43 |
| 3.2 Diseño de Experimentos | 44 |
| 3.3 Diseño y fabricación del transistor FET | 45 |
| 3.3.1 Simulación..... | 46 |
| 3.3.2 Características eléctricas de TFTs | 53 |
| CAPÍTULO 4: Resultados y análisis de resultados. | 55 |
| 4.1 Resultados de la caracterización de las películas Al ₂ O ₃ | 55 |
| 4.1.1 Patrones de DRX de las películas de Al ₂ O ₃ | 55 |
| 4.1.2 SEM y EDS para las películas de Al ₂ O ₃ | 56 |
| 4.1.3 Transmitancia y band gap de Al ₂ O ₃ | 57 |
| 4.1.4 XPS de Al ₂ O ₃ | 59 |
| 4.2 Resultados de la caracterización de las películas ZnO | 61 |
| 4.2.1 Resultados de DRX ZnO..... | 61 |
| 4.2.2 Resultados de XPS de ZnO. | 66 |
| 4.2.3 Resultado de trasmitancia de ZnO..... | 70 |
| 4.3 Resultados eléctricos. | 72 |
| Capítulo 5: Conclusiones..... | 82 |
| Conclusiones | 82 |
| Trabajo Futuro | 83 |
| Bibliografía | 84 |

ii) DEDICATORIA

A mi familia: mi madre Tania por la educación, la confianza, el apoyo, el esfuerzo y el amor que día a día me impulsan a lograr mis objetivos y a salir adelante.

Mi padre y mis abuelos por servir de inspiración, ejemplo y guía desde el lugar en que se encuentren.

A mis hermanas Susana e Isais, que a pesar de la distancia siempre han estado para para alentarme y aconsejarme.

A mi novia Hephzi, por su cariño y apoyo en todo momento vivido en esta etapa y a su familia también.

A mis amigos-hermanos Daniel, Noel, Raúl, Carlos, Javier, por apoyarme en esta travesía. A mis compañeros de aula tanto en Cuba como aquí en México por su compañerismo y colaboración porque ni la distancia ni el tiempo ni la pandemia han podido doblegar esta inseparable amistad. A la amistad que tanto en los momentos de júbilo como en situaciones difíciles hemos mantenido Julio, Gustavo, Joel, José Ángel, Gerardo y su familia, Pulido y su familia.

A todos los que de una forma u otra me han dado consejos, apoyo y ánimo para salir a delante.

iii) AGRADECIMIENTOS

A mi director y codirector: Dr. Dainet Berman Mendoza y Dr. Roberto Gómez Fuentes, respectivamente. Gracias a su guía, apoyo y enseñanzas a lo largo de esta etapa, gracias a ustedes ha sido posible la realización de este trabajo.

A la Dra. Mérida Sotelo Lerma por su colaboración, guía consejos, apoyo y por los recursos puestos a disposición del desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Antonio Ramos Carrasco por su colaboración, guía consejos, apoyo y por los recursos puestos a disposición del desarrollo de este proyecto.

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

A Guillermo Suarez Campos, por sus consejos, apoyo, guía e increíble amistad y proyectar siempre en mí un entusiasmo único.

Al Dr. Hiram Higuera Valenzuela y Al Dr. Rafael García Gutiérrez, por la ayuda brindada en los momentos requeridos.

A los técnicos del Centro de Nanociencias y Nanotecnología de Chiapas por su valiosa labor en las caracterizaciones del material empleado en esta tesis.

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

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT por el apoyo económico brindado durante la realización de esta maestría.

IV) RESUMEN

Este proyecto se basa en el diseño y la fabricación de un transistor de película delgada (TFT) semitransparente. La estructura del transistor es contactos superiores con compuerta inferior (Bottom-gate top-contact). El sustrato y el contacto de compuerta utilizados son óxido de estaño contaminado con flúor (FTO) y vidrio respectivamente. La síntesis de la película de óxido de aluminio (Al_2O_3) que tiene función de dieléctrico de compuerta se realizó por la técnica de baño químico (CBD). La síntesis de la capa activa de óxido de zinc (ZnO) se realizó empleando la técnica de sol-gel. Los contactos superiores de oro (Au), se obtuvieron por la técnica de sputtering. Se empleó el equipo DENTON VACUUM V, todos los parámetros de síntesis se mantuvieron constantes y se empleó una mascarilla con diferentes patrones en su geometría que permitió obtener transistores con diferentes anchos de canal. La simulación de los dispositivos se realizó con el software COMSOL MULTIPHYSICS. Las películas y los dispositivos que arrojaron mejores características fueron seleccionados para su fabricación. Las mediciones eléctricas de los dispositivos se realizaron con el equipo marca Keithley modelo 4200A-SCS. Las curvas I_d e I_g v/s V_{gs} e I_d v/s V_{ds} de los dispositivos fabricados son coherentes con los resultados de las mediciones eléctricas de un TFT.

V) ABSTRACT

This project is based on the design and manufacturing of a semi-transparent thin film transistor (TFT). The transistor's structure is Bottom-gate Top-Contact. The substrate and the gate contact were purchased commercially (FTO on glass). The synthesis of the aluminum oxide film (Al_2O_3) that has a gate dielectric function was performed by the chemical bath technique. The synthesis of the ZnO zinc oxide, active layer, was performed using the sol-gel technique. The upper gold contacts (Au) were obtained by the sputtering technique. The DENTON VACUUM V equipment was used, all the synthesis parameters were kept constant and a mask with different patterns in its geometry was used, which allowed transistors with different channel widths to be obtained. The simulation of the devices was carried out with the COMSOL MULTIPHYSICS software. Films and devices that yielded better features were selected for manufacturing. The electrical measurements of the devices were made with the equipment Keithley model 4200A-SCS. The I_d and I_g v/s V_{gs} and I_d v/s V_{ds} curves of the manufactured devices are consistent with the results of the electrical measurements of a TFT.

VI) Lista de tablas

Tabla 1. precursores empleados para la síntesis de Al_2O_3 .

Tabla 2. Precursores empleados en la síntesis de películas de ZnO .

Tabla 3. Diseño de experimento para la síntesis de Al_2O_3 .

Tabla 4. Diseño de experimento para la síntesis de ZnO .

Tabla 5. Propiedades de los materiales empleados en la simulación.

Tabla 6. Dimensiones de los bloques empleados en la simulación

Tabla 7. Parámetros a simulación.

Tabla 8. Relación del porcentaje atómico de los principales elementos presentes en las películas con el tiempo de depósito.

Tabla 9. Posición 2θ para los picos con mayor intensidad.

Tabla 10. Característica de las películas medidas.

VII) Lista de figuras

Figura 1. Clasificación de los materiales según la teoría de bandas de energía.

Figura 2. Estructura cristalina tipo wurtzita del ZnO [1].

Figura 3. Transmitancia de película delgada de ZnO en función de la longitud de onda [2].

Figura 4. Curva de $(\alpha hv)^2 v/s hv$, usada para determinar el gap óptico [2].

Figura 5. Relación entre la resistividad de las películas con el tratamiento térmico [3].

Figura 6. Spin Coater KW-4A.

Figura 7. Esquema de la estructura de transistores FET [4].

Figura 8. Diferentes estructuras de los transistores MOS: a) MOS P incremental, b) MOS N incremental, c) MOS P decremental y d) MOS N decremental.

Figura 9. Configuraciones de TFTs: (a) Top-gate bottom-contact and (b) Top-gate top-contact (c) Bottom-gate top-contact; and (d) Bottom-gate bottom-contact.

Figura 10. Diagrama esquemático de un difractor.

Figura 11. Microscopio electrónico de barrido [5]

Figura 12. Diagrama en bloques de un perfilómetro superficial [6].

Figura 13. Diagrama esquemático de un espectrómetro XPS [7].

Figura 14. Diagrama esquemático de un espectrómetro de energía [84].

Figura 15. Estructura del TFT fabricado [8].

Figura 16. Definición de bloques y materiales para la simulación 3D en COMSOL.

Figura 17. Estructura simplificada para la simulación en 2D.

Figura 18. Definición de geometrías y materiales para la simulación 2D en COMSOL.

Figura 19. Definición del mallado normal para la simulación 3D.

Figura 20. Definición del mallado extremadamente grande para la simulación 2D.

Figura 21. Vista frontal de la concentración electrónica.

Figura 22. Vista frontal del potencial eléctrico.

Figura 23. Flecha de densidad de corriente superficial.

Figura 24. Curva I_{ds} v/s V_d para la simulación F.

Figura 25. Característica transferencial de TFT canal n [9].

Figura 26. I_d v/s V_{gs} para TFT canal n [9].

Figura 27. Patrones de difracción de rayos-X de películas sin recocer y recocidas a 500°C , con sus respectivas micrografías [10].

Figura 28. Resultados de SEM para las películas de Al_2O_3 : a) 30min, b) 40min, c) 60min [11].

Figura 29. Resultados de EDS para las películas de Al_2O_3 : a) 30min, b) 40min, c) 60min [11].

Figura 30. Medición de transmitancia para las películas de Al_2O_3 [10].

Figura 31. Alta resolución de XPS $\text{Al } 2p$ y $\text{O } 1s$ películas delgadas de Al_2O_3 sin recocer y con recocido a 500°C [10].

Figura 32. Patrón de DRX para ZnO (Zincite) # de carta (01-089-7102).

Figura 33. Patrón de DRX para la muestra A y C [12], [13].

Figura 34. Patrón de DRX para la muestra B y D [14], [15].

Figura 35. Patrón de DRX para la muestra E y G [16], [17].

Figura 36. Resultado de XPS para la muestra C y D.

Figura 37. Ampliación de la posición $\text{O } 1s$ para las muestras C y D.

Figura 38. Ampliación de la posición $\text{C } 1s$ para las muestras C y D.

Figura 39. Ampliación de la posición $\text{Zn } 2p_{1/2}$, $\text{Zn } 2p_{3/2}$ para las muestras C y D.

Figura 40. Resultado de XPS para la muestra G.

Figura 41. Ampliación para la posición $\text{C } 1s$ de las muestras E y G.

Figura 42. Ampliación para la posición $\text{O } 1s$ de las muestras E y G.

Figura 43. Ampliación de las posiciones $\text{Zn } 2p_{1/2}$, $\text{Zn } 2p_{3/2}$ para las muestras E y G.

Figura 44. % de transmitancia para las muestras con tratamiento térmico.

Figura 45. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala logarítmica.

Figura 46. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala lineal.

Figura 47. I_d e $I_d^{0.5}$ v/s V_{gs} .

Figura 48. Voltage umbral para transistor con $L = 10\mu\text{m}$, muestra: G de ZnO , y película de óxido de aluminio con 60 minutos de tiempo de depósito.

Figura 49. I_d v/s V_{ds} .

Figura 50. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala logarítmica.

Figura 51. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala lineal.

Figura 52. I_d e $I_d^{0.5}$ v/s V_{gs} .

Figura 53. Voltage umbral para transistor con $L= 20\mu\text{m}$, muestra: G de ZnO, y película de óxido de aluminio con 60 minutos de tiempo de depósito.

Figura 54. I_d v/s V_{ds} .

Figura 55. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala logarítmica.

Figura 56. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala lineal.

Figura 57. I_d e $I_d^{0.5}$ v/s V_{gs} .

Figura 58. Voltage umbral para transistor con $L= 20\mu\text{m}$, muestra: H de ZnO, y película de óxido de aluminio con 60 minutos de tiempo de depósito.

Figura 59. I_d v/s V_{ds} .

Antecedentes

El gran auge alcanzado por la electrónica y la diversidad de aplicaciones de esta ciencia se deben en gran medida a un descubrimiento esencial “el transistor” [18]. Este dispositivo que en sus inicios reemplazó a las antiguas válvulas de vacío, es el núcleo de la evolución de la electrónica moderna. El descubrimiento del transistor se dio a conocer en diciembre de 1947, por un grupo de científicos (John Bardeen, Walter H. Brattain y William B. Shockley) que trabajaban para los laboratorios de la Bell Telephone Company [19].

El transistor de punta de contacto fue el primer dispositivo electrónico fabricado con la capacidad de obtener ganancia [20]. Las continuas pruebas y mejoras realizadas por estos científicos permitieron que en muy poco tiempo surgiera el transistor de unión bipolar, o BJT por sus siglas en inglés [21]. Este tipo de transistor es un dispositivo de estado sólido que se fabrica generalmente sobre un monocristal de semiconductores como son: silicio, germanio o arseniuro de galio. Luego se contamina el sustrato de forma muy controlada en tres zonas. La zona N con elementos donantes de electrones y la zona P con elementos donantes de aceptores o “huecos”. Las distribuciones de las uniones determinan el tipo de transistor PNP o NPN.

Posteriormente surgieron los transistores unipolares o transistores de efecto de campo FET (Field Effect Transistor), los cuales fueron teóricamente descubiertos en la década de 1920, pero en esos tiempos no se disponía de la tecnología para fabricarlos masivamente ni se les encontró una aplicación. No fue hasta 1953, que se construyó el primer prototipo de transistor unipolar. Los FET son también dispositivos de estado sólidos en los cuales se impone un campo eléctrico para controlar el flujo de los portadores de cargas presentes en un canal de conducción [22].

A principios de la década de los 50 del siglo XX Shockley propuso la estructura y fabricación de los primeros transistores de efecto de campo de unión (JFET) [23], su funcionamiento se basa en el control del paso de la corriente por el campo aplicado a la compuerta, constituida por una o varias uniones p-n. Luego para mediados de la década de los 60 se dieron a conocer los transistores de efecto de campo de unión metal-semiconductor (MESFET) [23], los cuales tienen un funcionamiento parecido al JFET,

pero en estos, el control del flujo de corriente se realiza mediante una unión metal-semiconductor. En épocas más recientes se desarrolló un tipo de transistor con una estructura (metal-óxido-semiconductor) MOSFET. En el cual el control de la corriente se logra a partir del efecto capacitivo debido a que el semiconductor se encuentra separado del contacto de la compuerta mediante una capa aislante la cual por lo general es de óxido de silicio SiO_2 [23].

Los TFTs son un tipo de transistores de efecto de campo hechos a partir de la superposición de películas delgadas. La fabricación de estos ofrece potenciales ventajas debido a su bajo costo, funcionalidad, producción en masa, baja temperatura, flexibilidad, entre otras. La incesante carrera por la mejora de este tipo de dispositivos debido a su potencial aplicación en: matrices de pantallas de display de cristal líquido (LCD), pantallas orgánicas, dispositivos fotodetectores, biosensores, en radiografía digital y aplicaciones de radiografía general ha propiciado el empleo de materiales novedosos con características, propiedades y desempeños superiores a los tradicionalmente utilizados para la fabricación de transistores [8].

El transistor de película delgada (TFT) fue el primer amplificador de estado sólido patentado, el beneficiario de dicha patente fue Julius Edgar Lilienfeld en el año 1930 [20]. El primer TFT funcional fue presentado por P.K Weimer en 1962, tenía una estructura muy simple y usaba como capa activa sulfuro de cadmio (CdS). Durante la década de los 60 se fueron empleando otros semiconductores como capa activa entre los que destacan: seleniuro de cadmio (CdSe), Teluro (Te), antimonio de indio (InSb), germanio Ge [24], entre otros. El desarrollo de los transistores a base de silicio produjo un freno en la expansión de los TFTs, pero el surgimiento de las matrices LCD y en especial los estudios realizados por Brody, quien en 1973 demostró que era posible controlar el estado de cada píxel de una matriz de 120×120 usando TFTs con CdSe como capa activa fueron factores claves que reimpulsaron la investigación y fabricación de estos dispositivos [18].

Para finales de la década de los 70 LeComber propuso el empleo del silicio amorfo hidrogenado ($\alpha\text{-Si:H}$) en la fabricación de TFTs e inmediatamente varios laboratorios se dieron a la tarea de desarrollar matrices activas de display de cristal líquido (AMLCDs

por sus siglas en inglés) sobre vidrio [8]. La década de los 90 marcó el surgimiento de TFTs orgánicos, los cuales presentan valores de movilidad electrónica similares a los transistores basados en silicio amorfo hidrogenado. En los años más recientes una serie de semiconductores transparentes han sido propuestos como materiales a emplear en la fabricación de TFTs.

En este trabajo se propone una estructura semi transparente con contactos superiores y compuerta inferior. Para ello se depositarán los materiales capa por capa con la siguiente secuencia: Au/ ZnO/Al₂O₃/FTO/vidrio. Así se obtendrá un TFT semitransparente con el semiconductor y el dieléctrico de compuerta sintetizados por métodos químicos. En el capítulo tres se especifican los pasos para la fabricación del dispositivo.

JUSTIFICACIÓN

Determinar las condiciones idóneas para la síntesis de ZnO como capa activa en transistores, estudiar sus propiedades ópticas, eléctricas, morfológicas y determinar el procesamiento adecuado que garantice un mejor desempeño del dispositivo.

HIPÓTESIS

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

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar y fabricar películas delgadas de ZnO y Al₂O₃ para su empleo como capa activa y dieléctrica respectivamente en transistores semitransparentes de películas delgadas.

Objetivos particulares

1. Establecer un método que permita la obtención de películas delgada de ZnO y Al₂O₃ bajo condiciones óptimas para el desarrollo de transistores.
2. Caracterizar química, morfológica y estructuralmente las películas obtenidas. Así como, estudiar su comportamiento óptico y eléctrico.

3. Diseñar el transistor en consideración con las películas de ZnO y Al₂O₃ con las mejores características.
4. Fabricar los transistores basados en las películas delgadas de ZnO y Al₂O₃ optimizadas.
5. Caracterizar la respuesta eléctrica (curva I-V) de los transistores obtenidos.

METAS

1. Establecer un método que permita la obtención de ZnO en películas delgada por métodos químicos, bajo condiciones óptimas para el desarrollo de transistores.
2. Realizar la caracterización química, morfológica y estructural de las películas de ZnO y Al₂O₃.
3. Realizar la caracterización óptica y eléctrica de la película de ZnO para obtener las características óptimas para desarrollar el transistor.
4. Realizar el diseño del transistor basado en la capa activa de ZnO.

Capítulo 1. Materiales electrónicos

1.1 Clasificación electrónica de los materiales

Existen diversas formas para clasificar los materiales. Por su estado de agregación, por su composición, por sus enlaces, por su capacidad para conducir o no la corriente eléctrica entre otras muchas. En este trabajo centraremos la atención en la clasificación relacionada con la conductividad eléctrica, determinando las características de conductores, semiconductores y dieléctricos.

1.1.1 Conductores

Los materiales conductores, generalmente metálicos, tienen resistividades menores a $10^{-4} \Omega - \text{cm}$, son buenos conductores del calor y la electricidad, poseen una elevada densidad, reflejan las ondas electromagnéticas y pueden ser fabricados por procesos simples o múltiples. Los enlaces metálicos se dan entre átomos metálicos. Los cationes forman estructuras cristalinas y los electrones ocupan los intersticios que quedan libres en ellos sin estar fijados en ningún catión concreto (mar de electrones). Los electrones están, libres, pero estabilizan la estructura al tener carga contraria a los cationes. la corriente eléctrica se debe al flujo de electrones.

Propiedades:

- Suelen ser sólidos a temperatura ambiente.
- Tienen puntos de fusión y ebullición muy variado (aunque suelen ser más bien alto).
- Las conductividades térmicas y eléctricas son muy elevadas.
- Presentan brillo metálico.

Son muy solubles en estado fundido en otros metales formando aleaciones.

1.1.2 Semiconductores

Los materiales semiconductores son materiales cuya resistividad eléctrica está entre 10^{-4} y $10^{10} \Omega - \text{cm}$ y sus electrones de valencia están más ligados al núcleo, pero basta una pequeña cantidad de energía para que se comporten como conductores. Los semiconductores poseen una energía de banda prohibida entre 0.01 y 3.00 eV, todos los electrones se encuentran en la banda de valencia y ninguno en la banda de conducción, además poseen portadores de carga positivos (huecos) y negativos (electrones).

Aquellos semiconductores puros, los que su estructura no ha sido manipulada se les llama semiconductores intrínsecos. Los elementos semiconductores intrínsecos más empelados son el Germanio y el Silicio.

Los semiconductores extrínsecos se obtienen artificialmente añadiendo impurezas a los semiconductores intrínsecos. Existen dos clases de semiconductores impurificados: semiconductores tipo n y semiconductores tipo p. Un semiconductor tipo n posee más electrones libres que el correspondiente semiconductor intrínseco. A temperatura ambiente los electrones libres de un semiconductor tipo n provienen de los electrones sobrantes de las impurezas y de los electrones térmicos (o liberados por energía térmica), el número de electrones libres es mayor que el de huecos y por tanto la conductividad será mayor. Los huecos serán los portadores minoritarios y los electrones térmicos los portadores mayoritarios.

En un semiconductor tipo p existen huecos debido a la falta de electrones para formar enlaces covalentes. El número de huecos será por lo tanto mayor en un semiconductor tipo p que en el correspondiente semiconductor intrínseco. Los huecos serán los portadores mayoritarios y los electrones térmicos los portadores minoritarios

Los semiconductores más utilizados en el diseño y fabricación de dispositivos optoelectrónicos son los semiconductores II-VI, ya que los puntos cuánticos de estos compuestos se excitan con radiación electromagnética correspondiente a las regiones del espectro ultravioleta y visible. Los semiconductores II-VI están constituidos por zinc (ejemplo: ZnO, ZnS, ZnSe y ZnTe), cadmio (ejemplo CdS, CdSe y CdTe), mercurio (ejemplo HgS, HgSe y HgTe), entre otros elementos de transición en estado de oxidación M^{2+} .

1.1.3 Dieléctricos

Los materiales dieléctricos son aquellos que ofrecen una elevada oposición al paso de la corriente eléctrica. Entre las propiedades eléctricas más representativas de los aislantes o dieléctricos encontramos el voltaje de ruptura, la constante dieléctrica y los valores de resistividad. Existen materiales aislantes en estado sólido como: micas, porcelanas, madera, cerámicas entre otros. También los encontramos en estado líquido

por ejemplo barnices, aceites, líquidos sintéticos entre otros y hay sustancias y elementos gaseosos con propiedades dieléctricas como son: hidrógeno, nitrógeno, alógenos entre otros.

La característica que tienen en común los materiales dieléctricos es que su estructura atómica posee muy pocos o ningún electrón libre. Los enlaces de estos materiales no suelen romperse al someterlos a altos valores de tensión, lo que sucede en la gran mayoría de las ocasiones es que las cargas eléctricas se separan dando lugar a la formación de dipolos que se oponen a las fuentes de energía que los originan.

1.2 Teoría de Bandas de Energía en los materiales

La teoría de bandas permite entender los fenómenos de conductividad eléctrica en los materiales sólidos. Esta plantea que los átomos individuales presentan niveles de energía discretos, además establece que parte de los niveles son rellenados con electrones que se encuentran en un estado no excitado mientras otros niveles solo son ocupados cuando los electrones se encuentran en su estado excitado. También establece que los átomos emiten cierta cantidad de energía cuando los electrones pasan de un nivel excitado a otro con menos energía.

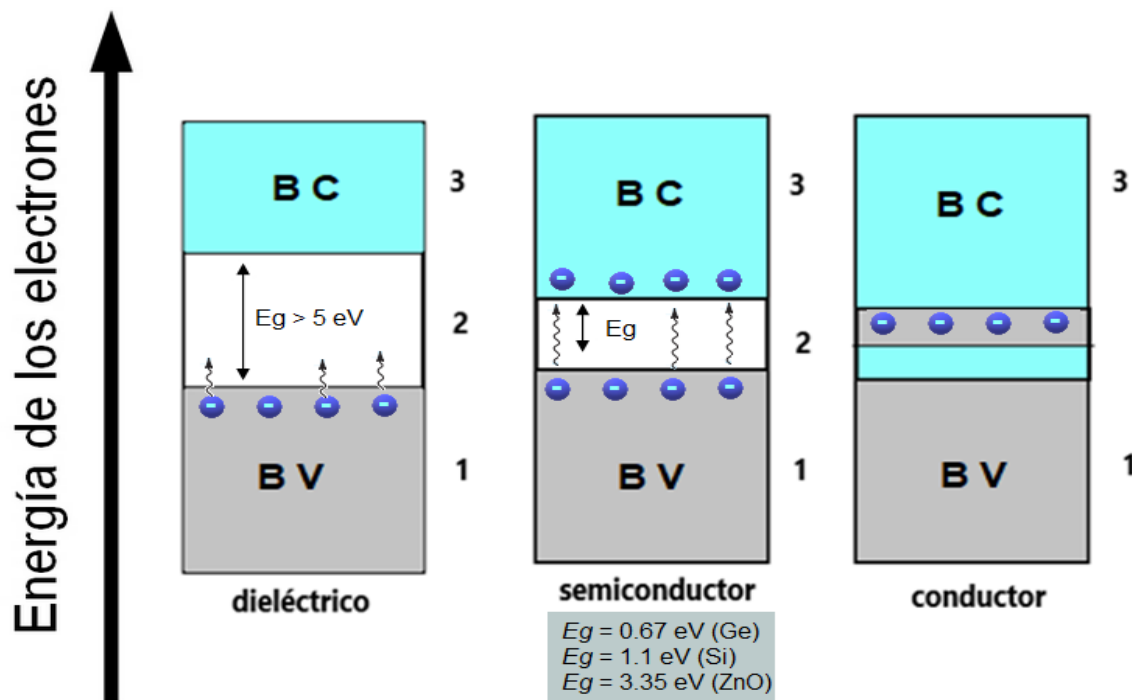


Figura 1. Clasificación de los materiales según la teoría de bandas de energía.

En los materiales conductores la banda de valencia y la de conducción se encuentran muy cercanas y en muchas ocasiones se solapan como se puede observar en la figura 1, la banda de valencia no se encuentra totalmente llena, incluso un suministro de energía muy pequeño puede hacer que los electrones se pasen a los niveles libres adyacentes.

En los materiales semiconductores y aislantes la banda de valencia y la de conducción se encuentran separadas por la denominada banda prohibida. Para la gran mayoría de los materiales semiconductores la barrera de energía que separa dichas bandas es inferior a 5 eV. Mientras para los materiales aislantes la brecha energética es superior a 5 eV e inferior a 10 eV. En semiconductores y aislantes todos los electrones se encuentran en la banda de valencia a una temperatura de 0°K.

1.3 Aplicación de los materiales electrónicos

1.3.1 Contactos Metálicos

Los metales son excelentes conductores de la electricidad y muy empleados en la industria de la electrónica. Determinar el material adecuado para ser empleado en la fabricación de cada dispositivo es todo un enorme campo de investigación y depende de muchos factores. En nuestro caso nos centraremos en el empleo de óxido de estaño dopado con flúor (FTO) como contacto de compuerta y las películas de oro como contactos de drenaje y fuente.

Los óxidos conductores transparentes (OTC) son compuestos con una baja resistividad eléctrica ($< 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$) [25], presentan una elevada transparencia en el espectro visible $> 80\%$ [25] y una alta concentración de electrones libres en su banda de conducción. Las películas (OTC) son fundamentalmente usadas como electrodos transparentes [26], escudo de interferencia electromagnética antiestática [26], películas delgadas de transistores transparentes entre otras. El óxido de indio contaminado con estaño (ITO) es el OCT más utilizado en la actualidad debido a su resistividad y transparencia óptica. Pero su costo se ha elevado muchísimo durante los últimos años debido al encarecimiento del indio que es un elemento que no abunda mucho en la naturaleza [26].

Por otra parte, el óxido de estaño SnO_2 presenta baja resistencia eléctrica, elevada transparencia en el rango visible del espectro electromagnético, pequeña banda prohibida, alta estabilidad química y térmica, reducido índice de toxicidad, bajo costo de fabricación entre otras propiedades y características interesantes. Tiene buenas propiedades adhesivas que le permiten ser depositado sobre diferentes sustratos como: vidrios, cerámicas, óxidos entre otros. Además, la concentración de portadores de carga y por consecuencia, la conductividad, puede incrementarse mediante la contaminación con Sb, Pt o F [27].

1.3.2 Dieléctrico de compuerta

Cada día incrementa la continua búsqueda de buenos aislantes eléctricos y en la industria electrónica se hace más imprescindible esta necesidad. Entre los diversos materiales aislantes destacan algunos óxidos metálicos aislantes como: óxido de magnesio (MgO), óxido de silicio (SiO_2), óxido de titanio (TiO_2), titanato de estroncio (SrTiO_3), óxido de aluminio (Al_2O_3) entre otros [28]. Estos materiales no presentan cargas libres y presentan un amplio intervalo de resistencia. Entre las aplicaciones más comunes está la de recubrimiento de herramientas de corte y mecanizado, capacitores, interconexiones, dieléctricos de compuerta entre otras.

Durante muchos años los MOSFET y los CMOSFET han empleado el SiO_2 como dieléctrico. Las películas delgadas de este material se han fabricado a lo largo de toda su evolución utilizando diferentes técnicas como: evaporación por bombardeo electrónico [29], evaporación por desbastado catódico [30], depósito químico en fase de vapor (CVD) térmica [31], CVD inducida por iones [31], CVD inducida por plasma entre otras. Pero, ha sido la constante carrera hacia la miniaturización y la optimización de estos transistores la que ha provocado que este material llegue a su límite.

El Al_2O_3 es considerado como uno de los mejores candidatos para aplicaciones como dieléctrico compuerta ya que es muy estable. Además, puede disminuir la recombinación electrónica, tiene un buen desempeño como aislante térmico y puede ser fabricado a bajas temperaturas [32] Entre las múltiples técnicas que se han empleado para obtener películas delgadas de Al_2O_3 se encuentran la técnica de deposición por vapor químico [32], evaporación térmica [33], evaporización por haz de electrones [34], pulverización

catódica [35] y depósito por baño químico [36] por mencionar algunas. De las técnicas antes mencionadas hay una que continúa llamando la atención de los investigadores debido a sus apreciables ventajas: la temperatura de crecimiento por lo general no supera los 100°C, la cual es más baja que la requerida en otros métodos como la evaporación al vacío o el CVD, lo cual evita la oxidación y corrosión cuando se utilizan sustratos metálicos; permite el uso de sustratos flexibles de puntos de fusión bajos; se obtienen por lo general películas muy homogéneas; se pueden introducir fácilmente agentes impurificantes, es un proceso simple, reproducible a gran escala y de bajo costo.

1.3.3 Capa activa

Los compuestos semiconductores están revolucionando la manera en que vivimos. Muchos de estos tienen un desempeño superior al alcanzado por el germanio (Ge) y el silicio (Si), que son los elementos semiconductores más utilizados. La existencia de los semiconductores binarios está regida por la regla del octeto, la cual es un postulado que se emplea en el contexto de la química donde se manifiesta la tendencia que tienen los átomos de completar con ocho electrones su último nivel de energía para alcanzar su estabilidad. Sujetos a esta regla están los semiconductores binarios de los grupos III-V; II-VI y I-VII [37].

Los compuestos formados por elementos de los grupos III y V de la tabla periódica tienen propiedades muy parecidas a los elementos semiconductores del grupo IV. Pero en estos los enlaces son parcialmente iónicos debido a la transferencia de electrones que ocurre entre los átomos del grupo III con los del grupo V [37]. Esta ionización causa significativos cambios en las propiedades de estos semiconductores. La misma se hace más fuerte e importante para los compuestos formados por los elementos de los grupos II y VI [38]. Muchos de los semiconductores II-VI presentan un band-gap superior a 1 eV lo que les permite ser utilizados en múltiples aplicaciones electrónicas. Los compuestos formados por los elementos de los grupos I y VII tienen en su gran mayoría un band-gap (> 3 eV) por lo cual son generalmente empleados como aislantes [39].

En los últimos tiempos se han descubierto semiconductores ternarios, cuaternarios y hasta de cinco elementos lo cual expande las posibilidades de aplicación de estos materiales. También se han descubierto algunos compuestos que contienen elementos

como el europio (Eu) y el manganeso que presentan una mezcla interesante de propiedades magnéticas y semiconductoras. Además, muchos compuestos orgánicos entre los que se encuentran la familia del poli-acetileno y di-poli-acetileno se pueden desempeñar como semiconductores. Algunos materiales cerámicos como el óxido de cobre (Cu_2O), dióxido de titanio TiO_2 y el óxido de zinc (ZnO) se pueden obtener con propiedades semiconductoras debido al dopaje o a la formación de vacancias en la red [40].

1.4 Capa activa de óxido de zinc (ZnO)

El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor de band-gap ancho con adecuadas propiedades físicas: densidad de 5.60 g/cm^3 , su peso molecular es 81.4 g , su superficie específica aproximada es $4.6 \text{ m}^2/\text{g}$, es insoluble en agua, pero soluble en ciertas disoluciones de bases fuertes y ácidas. Posee un diámetro de partícula que oscila entre 0.5 y $0.6 \mu\text{m}$, cristaliza en el sistema hexagonal compacto y tiene un índice de coordinación cuatro [41]. Lo que lo convierten en un excelente candidato para ser empleado en dispositivos electrónicos y optoelectrónicos [2]. Este es uno de los compuestos más iónicos de los semiconductores de la familia II-VI. Posee un band-gap directo de 3.35 eV a temperatura ambiente y una energía de enlace excitónica de 60 meV . Su alta energía de enlace le permite realizar una emisión estimulada a temperaturas mayores a 550 K [24].

Los defectos más comunes en este tipo de material son las vacancias de oxígeno y la presencia de Zn intersticial. La presencia de niveles profundos provenientes de defectos intrínsecos y extrínsecos del material permiten a las nanoestructuras de ZnO emitir en diferentes intervalos del azul, verde, amarillo y naranja-rojo [42]. Incluso puede ser sintetizado como película delgada transparente permitiéndole su empleo en la creciente tendencia de los dispositivos electrónicos transparentes. Estas películas pueden ser preparadas empleando tanto métodos físicos como químicos obteniéndose un material semiconductor tipo n [8]. Además, las mismas se pueden depositar sobre diferentes tipos de sustratos como son: silicio, cuarzo, zafiro y vidrio.

Se pueden lograr muchísimas nanoestructuras de este material que dependen tanto de la técnica empleada en su fabricación como de las variaciones en las condiciones de depósito y crecimiento del ZnO [43]. Entre las nano estructuras más requeridas se encuentran los nano-hilos [44], que se pueden obtener a bajas presiones de oxígeno sobre sustratos de zafiro y en ocasiones apoyado en procesos de nucleación. Las nano-agujas [45] de ZnO se han crecido sobre sustratos de silicio a temperaturas de 600°C y empleando bajas presiones de oxígeno. Se han obtenido también nanotubos de ZnO sobre sustratos de zafiro y empleando altas presiones de argón. Ha quedado reportado en la literatura la obtención de nano-columnas [45], nano-cintas [46], nano flores entre otras. Pero las estructuras más simples como nano-hilos [47] y nano-columnas [46] han demostrado mejor desempeño debido a su relación superficie/volumen.

1.4.1 Propiedades cristalinas.

El óxido de zinc presenta tres estructuras cristalinas básicas que son: blenda de zinc, sal de roca y wurzita. La estructura blenda de zinc se puede obtener haciendo crecer ZnO sobre sustratos con estructura cristalina cúbica, se obtiene comúnmente a presiones relativamente altas pero la estructura cristalina más estable para este compuesto en condiciones normales es hexagonal tipo wurzita [43]. Cada átomo de zinc se encuentra rodeado por un tetraedro de 4 átomos de oxígeno y viceversa. Dicha estructura cristalina se puede describir como una combinación alterna de planos de átomos de oxígeno y zinc agrupados a lo largo del eje z como se muestra en la figura 2. En condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente sus parámetros de red son: $a = 3.253 \text{ \AA}$ y $c = 5.213 \text{ \AA}$

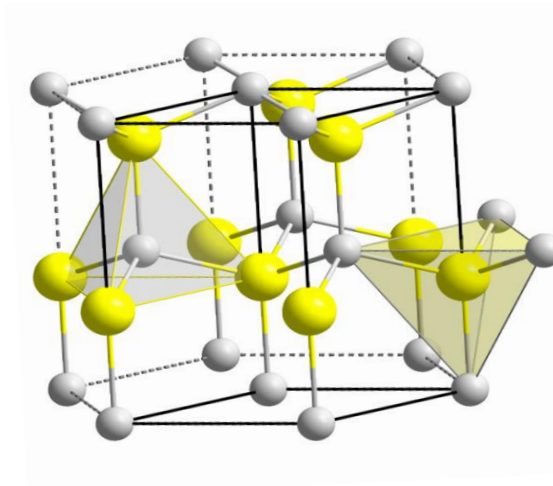


Figura 2. Estructura cristalina tipo wurtzita del ZnO [1].

1.4.2 Propiedades Ópticas

Se puede llegar a obtener las propiedades ópticas de los materiales semiconductores a través, de la obtención de sus constantes ópticas (índice de refracción n , coeficiente de absorción α y brecha de energía prohibida **gap**, E_g) [2]. Estas constantes se pueden obtener de medidas experimentales de la transmitancia espectral y de cálculos teóricos que tienen en cuenta varios fenómenos que ocurren en los espectros de transmitancia. La figura 3 muestra una gráfica de transmitancia v/s longitud de onda para el ZnO y la figura 4 una curva de $(\alpha hv)^2 v/s hv$ [41], [48].

Además, es importante mencionar que el óxido de zinc exhibe dos bandas de luminiscencia; una de longitud de onda corta que se encuentra cercana al borde de absorción del cristal y otra banda ancha de longitud de onda larga cuyo máximo está en el rango espectral correspondiente al color verde. Según se ha reportado en la literatura la luminiscencia del borde tiene una naturaleza excitónica y la luminiscencia verde es causada por transiciones de electrones desde donantes superficiales hasta aceptores profundos [2]. La transmitancia promedio en el espectro visible es superior al 90%.

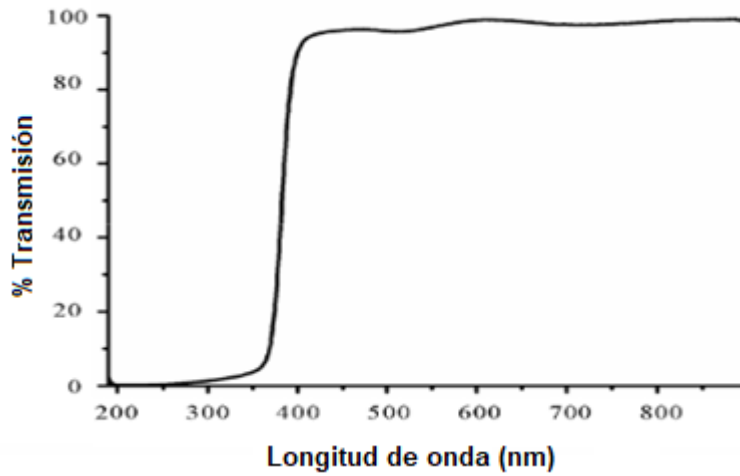


Figura 3. Transmitancia de película delgada de ZnO en función de la longitud de onda [2].

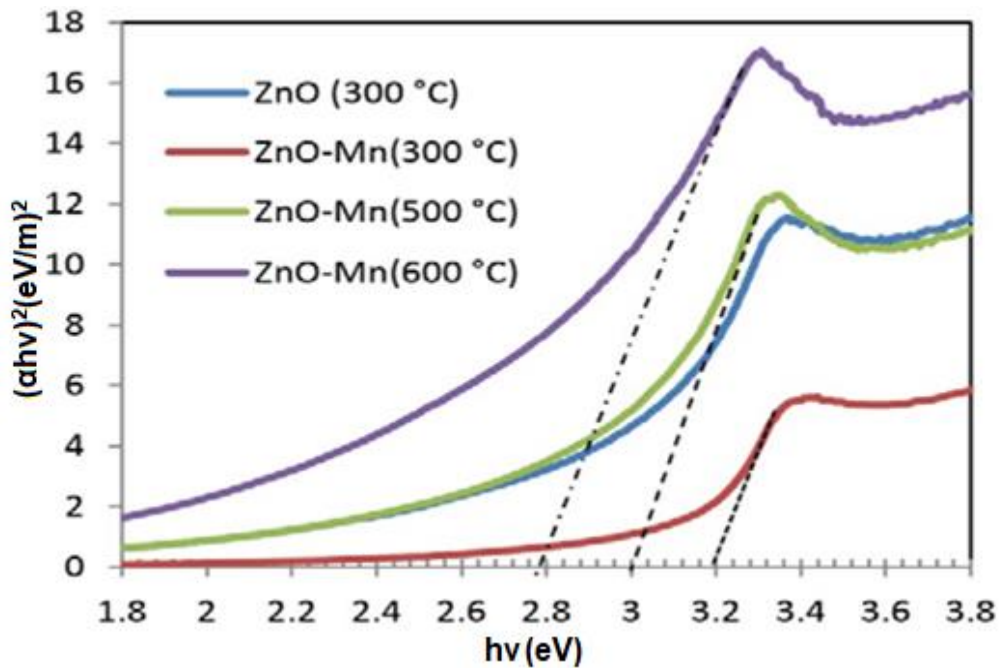


Figura 4. Curva de $(\alpha hv)^2 v/s hv$, usada para determinar el gap óptico [2].

1.4.3 Propiedades eléctricas.

Posee un band-gap directo de 3.35 eV a temperatura ambiente. En dependencia del método de fabricación y ejecución del proceso se pueden obtener películas con valores de resistividad entre $2.25 \times 10^5 - 1.7 \times 10^{-1} \Omega cm$, con una cantidad de portadores libres

que se encuentra entre $1.86 \times 10^{16} - 1.16 \times 10^{18}$ [2] y alta movilidad electrónica [49]. Los valores de conductividad de este material están estrechamente relacionados con los defectos, principalmente a los átomos de zinc intersticiales. Las vacancias de oxígeno conducen a la regeneración de trampas y conducen a un incremento de la concentración de portadores en los límites de grano. La figura 5 muestra la relación entre la resistividad de las películas con el tratamiento térmico.

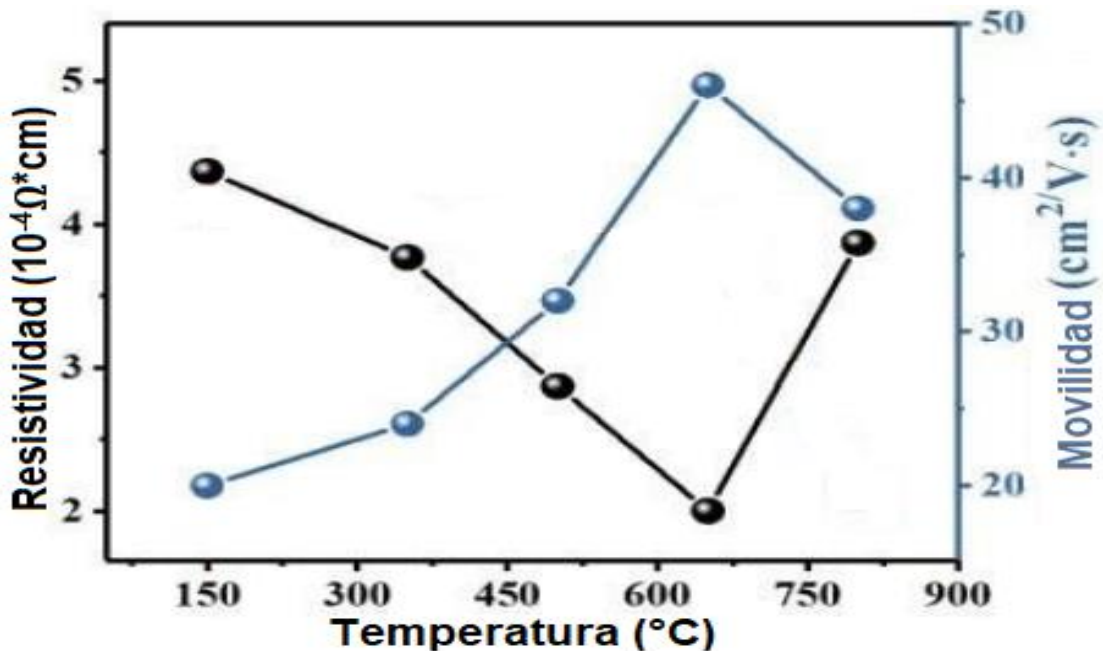


Figura 5. Relación entre la resistividad de las películas con el tratamiento térmico [3].

1.4.4 Técnica de síntesis de ZnO.

El proceso de sol-gel es una vía alternativa para la obtención de películas delgadas pues emplea equipamiento simple, permite producir estructuras multicapas y obtener óxidos de naturaleza complicada [39]. Consiste en el paso de un estado líquido a un estado de gel a través de reacciones de policondensación. Un sol es una dispersión estable de partículas coloidales o polímeros en un solvente, las partículas pueden ser amorfas o cristalina. Mientras un gel es una red continua tridimensional de partículas de sol que encierran una fase líquida.

Existen varios sistemas que pueden ser empleados en la síntesis de películas de óxidos, el que emplearemos en nuestro caso consiste en la disolución de un precursor que se convierte en óxido después de ser aplicado sobre un sustrato. La disolución cambia su

viscosidad mientras se evapora el disolvente gelificando finalmente sobre la superficie del sustrato. La conversión total a óxido requiere tratamiento térmico con lo cual se disminuye el espesor de la película y como resultado final una dura y densa película de material [50].

Existen cuatro reacciones (hidrólisis, y los tres tipos de condensación) que están involucradas en la transformación de un precursor molecular en una red de óxido. La estructura y morfología del óxido resultante depende en gran medida de la contribución de cada una de ellas. Estas contribuciones pueden ser optimizadas mediante el ajuste de las condiciones experimentales relativas a parámetros internos como: (naturaleza del átomo metálico y de los grupos alquilo del alcóxido, entre otras) y a parámetros externos como son: (proporción agua/alcóxido, catalizador, concentración, disolvente y temperatura de reacción) [51].

Las técnicas más empleadas de deposición del sol sobre el sustrato son: inmersión o dip coating, centrifugación o spin coating, deposición por flujo laminar y pulverización [52]. En nuestro caso se empleó el método de centrifugación o spin Coating. Este método requiere poco material para realizar los recubrimientos, es un proceso rápido y existen una gran variedad de equipos comerciales para implementarlo como los que se muestran en la figura 6.



Figura 6. Spin Coater KW-4A.

Este método se basa en el equilibrio entre dos fuerzas: la fuerza centrífuga y fuerza de fricción. La primera empuja la película de líquido hacia fuera, y por otro lado la segunda actúa radialmente hacia el centro. El espesor de la película varía con la velocidad de rotación, con la concentración del sol y con la modificación de algún que otro factor como: la viscosidad, la tensión superficial y los cambios de temperatura.

CAPÍTULO 2. “Fundamento de transistores de Efecto de Campo” y técnicas de caracterización.

Introducción

Un transistor es un dispositivo semiconductor generalmente con tres terminales. Existen dos clasificaciones básicas para estos: transistores de unión bipolar (BJT) [4] y transistores de efecto de campo (FET) [53]. Los BJT están conformados por dos uniones pn, unión emisor-base y unión colector base con una capa común, además de contactos metálicos en cada una de las capas. En estos, el control de la corriente I_{ce} se realiza regulando la corriente que circula por su terminal base. Mientras los FETs son dispositivos semiconductores de tres terminales también en los cuales el control de la corriente es realizado mediante la imposición de un campo eléctrico. En los transistores de efecto de campo existe por lo general un único tipo de portador de carga y un valor grande de impedancia de entrada [23]. Los FETs se pueden fabricar con menores dimensiones que los transistores bipolares [54], además presentan bajo consumo de energía y disipación de potencia mínima lo cual los convierte en los dispositivos ideales para ser empleados en circuitos de alta gama de integración como son las compuertas lógicas y los microprocesadores [55]. En este trabajo nos centraremos en el estudio de los transistores de efecto de campo grupo al que pertenecen los TFTs.

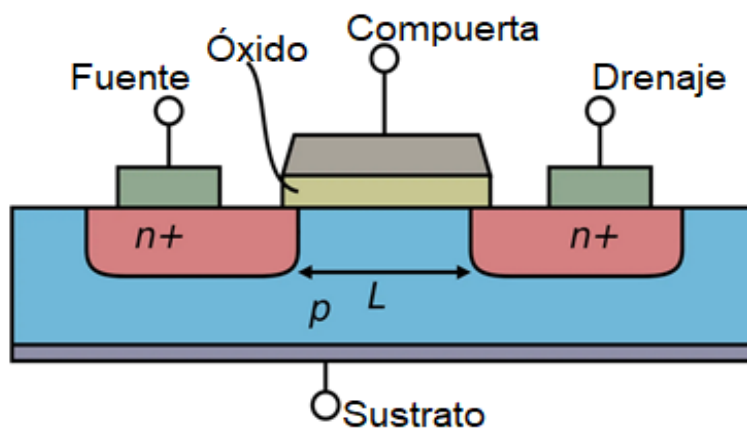


Figura 7. Esquema de la estructura de transistores FET [4].

2.1 Transistores de efecto de campo (FET)

Los FET son dispositivos que pueden ser de unión o de puerta aislada y pueden utilizarse en tres regiones de trabajo que son:

- Zona óhmica o línea: en esta región el transistor se comporta como una resistencia variable dependiente del valor de la tensión existente entre los terminales de la compuerta y la fuente [56].
- Zona de saturación: región en la cual el transistor se comporta como amplificador y se comporta como una fuente de corriente controlada por la diferencia de potencial existente entre los terminales de la compuerta y la fuente [56].
- Zona de corte: es la región de trabajo en la cual no existe flujo de corriente a través del drenaje del transistor [56].

Muy relacionada con las regiones de trabajo están las aplicaciones de los FET [56]. Pueden ser utilizados como resistores variables por voltage, amplificadores de baja frecuencia, osciladores, amplificadores de radio frecuencias, aisladores o separadores entre otras muchas [57].

2.1.1 Transistores de efecto de campo de puerta aislada.

Existen múltiples estructuras de transistores de efecto de campo de puerta aislada [58]. Entre las más empleadas se encuentran las que se muestran en la figura 8.

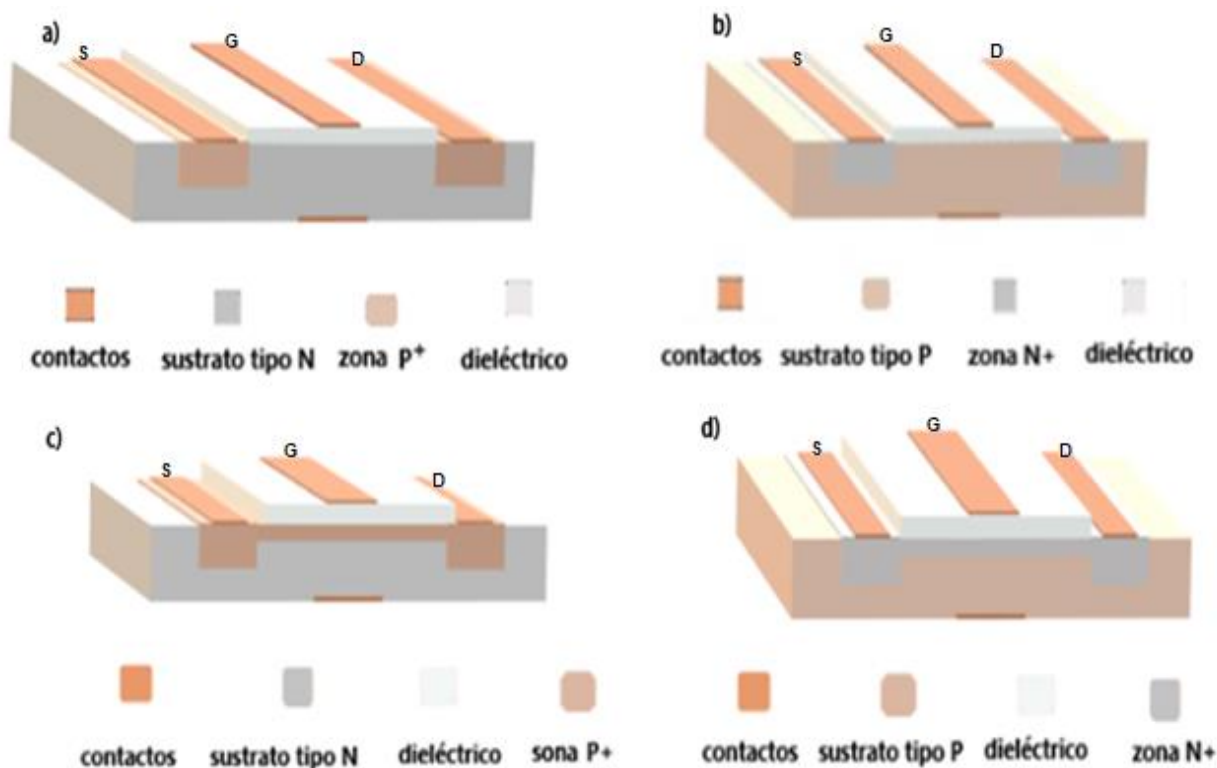


Figura 8. Diferentes estructuras de los transistores MOS: a) MOS P incremental, b) MOS N incremental, c) MOS P decremental y d) MOS N decremental.

Los P MOS incrementales presentan una estructura como la mostrada en la figura 8a, estos dispositivos presentan dos regiones tipo P⁺ debajo de los contactos de drenaje y de fuente separadas por un semiconductor tipo N lo que impide el flujo de corriente de drenaje a la fuente para un valor de tensión de 0 V aplicado entre el terminal de compuerta y el sustrato [59]. Pero si se aplica una tensión negativa de módulo cada vez mayor se puede aumentar la concentración de huecos cercanos a la superficie del dieléctrico entre las dos zonas tipo P⁺ permitiendo que para un valor umbral determinado ocurra un flujo ordenado de huecos y de esta forma un flujo de corriente entre los terminales de drenaje y fuente [60].

En los transistores MOS N incremental los terminales de fuente y drenaje se encuentran separados por una región del semiconductor tipo P como se muestra en la figura 8b. Para una tensión de 0 V aplicada en la compuerta la corriente que circula entre el drenaje y la fuente es esencialmente cero [59]. Pero si incrementamos el valor de tensión entre

la compuerta y el sustrato podremos lograr que incremente proporcionalmente a este aumento de tensión la concentración de electrones en la superficie del dieléctrico que se encuentra entre las dos regiones tipo N^+ que están debajo de los contactos pertenecientes a los terminales de drenaje y de fuente permitiendo así el flujo de corriente de drenaje hacia el terminal fuente [56].

En los P MOS decreméntales hay una zona de semiconductor tipo P, la cual es preconcebida desde el proceso de fabricación, que une las dos regiones tipo P^+ que se encuentran debajo de los contactos de los terminales de drenaje y de fuente como se muestra en la figura 8c. Implicando que exista un canal por el cual pueda existir un flujo de corriente entre los terminales de drenaje y fuente incluso para valores de tensión positivos aplicados entre la compuerta y la fuente [60].

En los MOSFET decreméntales canal N existe una estrecha región de semiconductor tipo N, resultado de impurezas introducidas durante la fabricación del dispositivo, que une a las dos regiones N^+ que están debajo de los contactos metálicos pertenecientes a los terminales de drenaje y de fuente como se muestra en la figura 8d [59]. Esto provoca que pueda existir un flujo de corriente entre el drenaje y la fuente incluso cuando la tensión entre la compuerta y el sustrato es de 0 V. Determinándose también que la tensión de encendido del dispositivo sea un valor negativo de voltaje.

2.1.2 Diferentes estructuras de TFTs

Al igual que para los MOSFET existen diferentes estructuras posibles para los Transistores de película delgada (TFTs), las cuatro estructuras básicas para este tipo de transistores se pueden observar en la figura 9. Las estructuras que cuentan con la compuerta como contacto superior (Top-gate) [61] se subdividen en dos clases, la que cuenta con los contactos de drenaje y fuente dentro de la capa activa y por otro lado la que cuenta con los contactos correspondientes a los terminales de drenaje y fuente inmersos en la región del dieléctrico que se encuentra sobre la capa activa. Las estructuras que cuentan con el contacto correspondiente a la compuerta como capa inferior (Bottom-gate) también se subdividen en dos clases, pero estas son mucho más utilizadas que las estructuras (Top-gate) fundamentalmente porque son capaces de soportar mayores valores de corriente de drenaje, son más versátiles en el proceso de

fabricación de estos dispositivos y son capaces de garantizar un valor de tensión de activación más bajo [8]. Es importante destacar que el funcionamiento de este tipo de transistores es similar al de los MOSFET descritos con anterioridad [61].

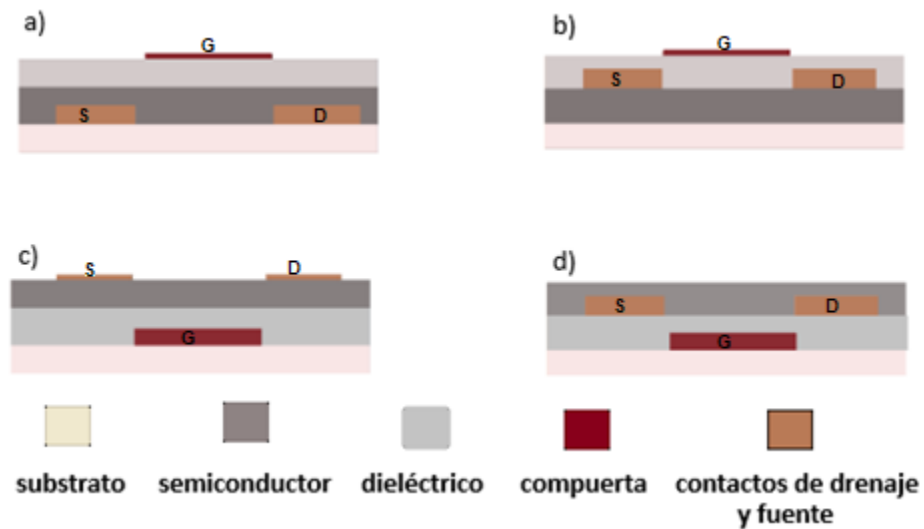


Figura 9. Configuraciones de TFTs: (a) Top-gate bottom-contact and (b) Top-gate top-contact (c) Bottom-gate top-contact; and (d) Bottom-gate bottom-contact.

2.1.3 Materiales utilizados en la fabricación de TFTs

La industria de los semiconductores está estrechamente vinculada al empleo del silicio como materia prima fundamental. Pero en los últimos años la necesidad de desarrollar transistores con novedosas características ópticas y de flexibilidad han abierto posibilidad de que la ciencia de los materiales impulse y motive a muchos investigadores a desarrollar dispositivos con materiales y materias primas alternativas lo que se ha traducido en el desarrollo de dispositivos menos costosos con métodos de fabricación más simples. La fabricación de TFTs ha sido influenciada por estos métodos de fabricación alternativos, lográndose obtener TFTs orgánicos, TFTs con óxidos semiconductores como capa activa y muchos más TFTs con otros semiconductores binarios, ternarios y cuaternarios como capa activa [18].

En este trabajo se propone una estructura con contactos superiores y compuerta inferior (Bottom-gate top-contact) se empleó FTO como contacto correspondiente a la compuerta,

Al_2O_3 como dieléctrico de compuerta, ZnO como capa activa y Au como contactos correspondientes a los terminales de drenaje y de fuente.

FTO

Es muy transparente a la luz visible y altamente reflectante a las longitudes de onda pertenecientes a la zona del infrarrojo. SnO_2 es muy económico y por lo tanto aplicable en tecnologías de bajo costo. Las películas delgadas de SnO_2 : F (FTO) presentan una movilidad electrónica dos veces superior a los de SnO_2 : Sb y por lo tanto mejores características como película selectiva [62]. Los parámetros relevantes de su comportamiento son: la densidad de electrones N , la movilidad electrónica μ y el espesor de la película. Valores de N de $3 * 10^{26} \text{ m}^{-3}$ y μ de $4 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Vs}$, son requeridos para obtener una baja emisión térmica en el IR. Pueden ser obtenidos a muy bajos costos por métodos químicos como Spray pirolisis [63] con resistividades que varían de 4 a $6 * 10^{-4} \Omega\text{cm}$ (resistividad superficial cercana a $R_s = 10 \Omega$) y transmitancias del orden de 80 - 90% en el rango de 300-1500 nm [64].

Al_2O_3

El Al_2O_3 se ha podido sintetizar en forma de películas delgadas con una elevada transparencia en los rangos de las longitudes de onda de la luz visible [65]. El grosor de estas películas obtenidas por el método de baño químico varía desde unos 30 hasta 420 nm en función del tiempo de depósito. Estas películas presentan una estructura amorfa y valores de corrientes de fuga que les permiten ser empleadas como dieléctrico de compuerta [10]. Presentan un valor de resistividad que varía entre $(1 * 10^{12} - 1 * 10^{16}) \Omega * \text{cm}$ [66].

ZnO

El ZnO es un material muy versátil con amplio band-gap de aproximadamente 3.4 eV, alta movilidad electrónica, que sintetizado en películas delgadas mediante el método de sol-gel se puede obtener con una alta transparencia en el rango de las longitudes de onda de luz visible [2]. Las películas de ZnO son recocidas a temperaturas elevadas lo cual garantiza la obtención de películas muy cristalinas. El grosor de estas películas puede variar desde 8 - 600 nm en función de la cantidad de veces que se repita el

procedimiento de crecimiento de las películas. La resistividad de las películas puede variar $2.25 * 10^5 - 1.7 * 10^{-1} \Omega cm$ y la concentración de portadores libres suele encontrarse entre $1.86 * 10^{16}$ y $1.16 * 10^{18} cm^{-3}$ [43].

Au

El depósito de películas delgadas de Au por la técnica de sputtering es muy utilizado en la fabricación de memorias, sensores, contactos de transistores entre otros [67]. La principal ventaja que resulta de emplear contactos de este material está en la elevada conductividad y la característica antioxidante de este elemento. La selección del material adecuado para los contactos garantiza un comportamiento óhmico entre la superficie del semiconductor y los contactos [68].

2.2 Técnicas de caracterización de los materiales usados en TFTs.

Los materiales empleados en la fabricación de dispositivos electrónicos deben ser estudiados y caracterizados adecuadamente. Existen muchas técnicas y equipos que brindan información de la estructura, la morfología, las características ópticas y las características eléctricas de las películas delgadas. En esta sección se presentan las técnicas más utilizadas en la caracterización de materiales.

2.2.1 Difracción de rayos X.

La técnica de difracción de rayos X (Rx) permite la identificación de fases cristalinas debido a que todos los sólidos cristalinos poseen su difractograma característico. Los rayos X usados en difracción tienen longitudes de onda en el rango $0.5 - 2.5 \text{ \AA}$. La radiación que se utiliza para la cristalografía suele ser monocromática (o casi), es decir, que es una radiación X que contiene exclusivamente (o casi) una única longitud de onda, y para ello se suelen utilizar los llamados monocromadores, que consisten de un sistema de cristales que, basándose en la ley de Bragg son capaces de "filtrar" (por el propio proceso de interacción de los rayos X con los cristales) una radiación policromática y "dejar pasar" sólo una de las longitudes de onda [69].

La interacción de los Rx con la materia esencialmente ocurre mediante dos procesos: a) Algunos fotones del haz incidente son desviados sin pérdida de energía, constituyen la

radiación dispersada exactamente con la misma λ que la radiación incidente (es la que origina el fenómeno de la difracción) [70]. b) Los fotones pueden sufrir una serie de choques inelásticos al incidir sobre un blanco y su energía incrementa la T de la muestra o da lugar al fenómeno de fluorescencia. Un haz monocromático (es decir de una única longitud de onda) sufre una atenuación de carácter excepcional, proporcional al espesor que atraviesa. La atenuación procede de varios factores: a) el cuerpo se calienta, b) se produce radiación fluorescente.

La ley de Bragg nos relaciona la longitud de onda (λ) de un haz incidente con el ángulo que produce difracción (θ) en una serie de planos cristalinos del material con una separación (d). Esta ley establece la condición esencial que debe cumplirse para que ocurra la difracción $n\lambda = 2d\sin\theta$ [71].

La técnica de difracción de rayos X con incidencia rasante (GIXRD): se usa fundamentalmente para caracterizar materiales depositados o crecidos sobre sustratos tanto amorfos como monocristalinos, pudiendo realizar identificación de fases, cambios de fase, cálculo de tamaño de grano, deformaciones de red, estudios en perfil, estado de oxidación, propiedades mecánicas superficiales. Esta técnica se caracteriza por ser no destructiva y con sensibilidad superficial: adicionalmente se basa en la teoría cinemática la cual es bien conocida y sencilla de aplicar [72].

Un difractómetro está compuesto por una fuente de rayos-X móvil o fija, un detector móvil que registra los rayos-X que forman un ángulo 2θ con los cuales se difracta el haz de forma constructiva y arroja una figura característica de difracción. En la figura 10 se pueden observar los componentes de este instrumento.

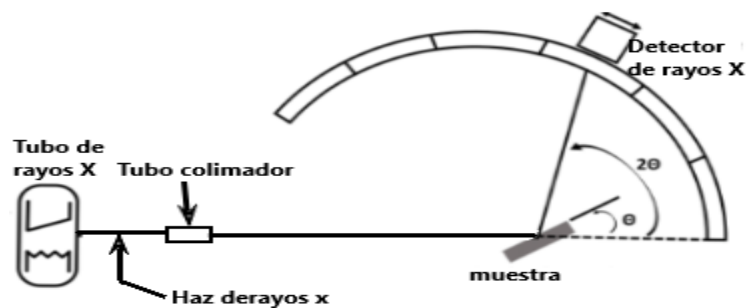


Figura 10. Diagrama esquemático de un difractómetro.

2.2.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico que se muestra en la figura 11, es un instrumento capaz de brindar una resolución superior a los microscopios ópticos y permite examinar la superficie y la textura de las películas delgadas. Este instrumento permite analizar objetos a una escala muy fina. La microscopía electrónica de barrido es un método no destructivo en el cual realizar el análisis y la preparación de las muestras es muy simple.

El SEM parte de concentrar un haz inicial de electrones haciéndolo pasar a través de una serie de lentes electromagnéticas hasta lograr obtener un diámetro cercano a los 10 nm. Este haz prácticamente puntual se recorre sobre toda la superficie de la muestra debido a la acción de las bobinas de deflexión presentes en la columna del instrumento [73]. Cuando este haz interactúa con la superficie son producidos electrones secundarios los cuales inciden sobre un detector generándose un fotón electrón asociado a la incidencia previa de cada electrón. Finalmente, los electrones secundarios son dirigidos hacia un osciloscopio de rayos catódicos tras un paso previo de preamplificación [74].

Este instrumento garantiza una correspondencia punto a punto entre la muestra que se examina y la imagen formada. De esta manera la imagen queda dividida en muchos elementos fotográficos los cuales son integrados en una única imagen a partir del sistema de procesamiento de imágenes instalado previamente en el instrumento. Por lo tanto, podemos obtener en una sola imagen información sobre la textura y la apariencia cúbica del material de estudio [5].

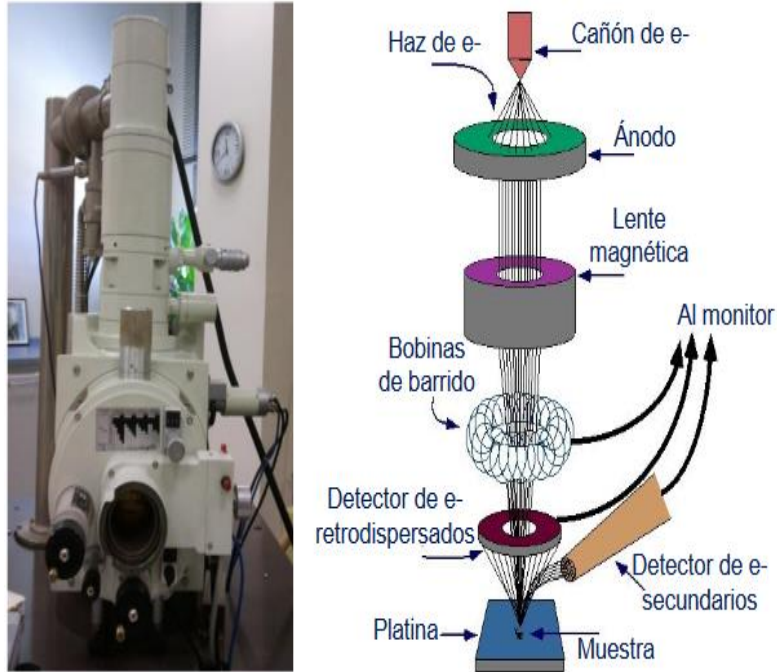


Figura 11. Microscopio electrónico de barrido [5]

2.2.3 Perfilometría.

La Perfilometría es la técnica de caracterización que se emplea para medir el perfil de una superficie y de esta manera cuantificar su rugosidad [75]. El perfilómetro que se muestra en la figura 12, es un instrumento capaz de proporcionar una imagen topográfica de la superficie. Este instrumento está equipado con una punta o aguja, que puede realizar movimientos verticales y laterales, una unidad de monitoreo de desplazamiento, un soporte para sustratos, un marco de aislamiento de vibración, un controlador de sistema entre otros elementos que se observan en la figura 12 [6].

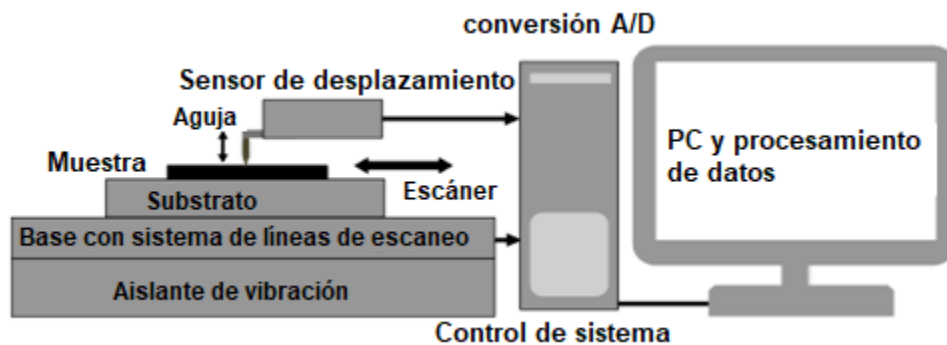


Figura 12. Diagrama en bloques de un perfilómetro superficial [6].

2.2.4 XPS

La espectroscopía electrónica para análisis químico ESCA o XPS es una de las técnicas analíticas de espectroscopía electrónica. Es el método de caracterización de superficie más utilizado en la actualidad. Esta técnica combina la información composicional y química permitiendo la identificación de todos los elementos presentes en concentraciones superiores al 0.1% excepto el hidrógeno y el helio. Brinda también información sobre grupos orgánicos, estructuras aromáticas o insaturadas, estado de oxidación, átomos enlazantes entre otras [76].

XPS es una técnica basada en el efecto fotoeléctrico, la cual consiste en irradiar con fotones de rayos X blandos la superficie que se quiere analizar. Las radiaciones más usadas son Mg y Al K α con energías de 1253.6 y 1486.6 eV, respectivamente. Es posible obtener el espectro de energías de ligadura de los electrones de los átomos midiendo la energía cinética de los electrones emitidos a causa de la irradiación [77].

El espectro XPS está formado por una serie de picos producido por los choques inelásticos de los electrones que pierden la mayor parte de su energía antes de abandonar la muestra. La energía de los rayos X usados limita los niveles electrónicos de cada elemento así que solo foto-emiten los niveles con mayor sección eficaz de absorción de fotones. Para cada elemento químico se observa siempre un conjunto de picos característicos que permiten identificarlo claramente, utilizándose habitualmente el pico foto electrónico más intenso o pico principal y comparándolo con los existentes en las bases de datos establecidas [78].

Los componentes básicos de un equipo XPS son: el sistema de vacío, la fuente de rayos X, el analizador de energía del electrón y un sistema de datos. La condición de vacío para la medición se debe a que la composición superficial de la muestra debe permanecer invariable en el transcurso del experimento y los fotoelectrones deben viajar entre la muestra y el detector sin colisiones que les puedan restar energía. Por lo general el área que puede ser irradiada varía desde unos pocos centímetros hasta decenas de micrómetros. La figura 13 muestra el diagrama esquemático de un espectrómetro XPS [79].

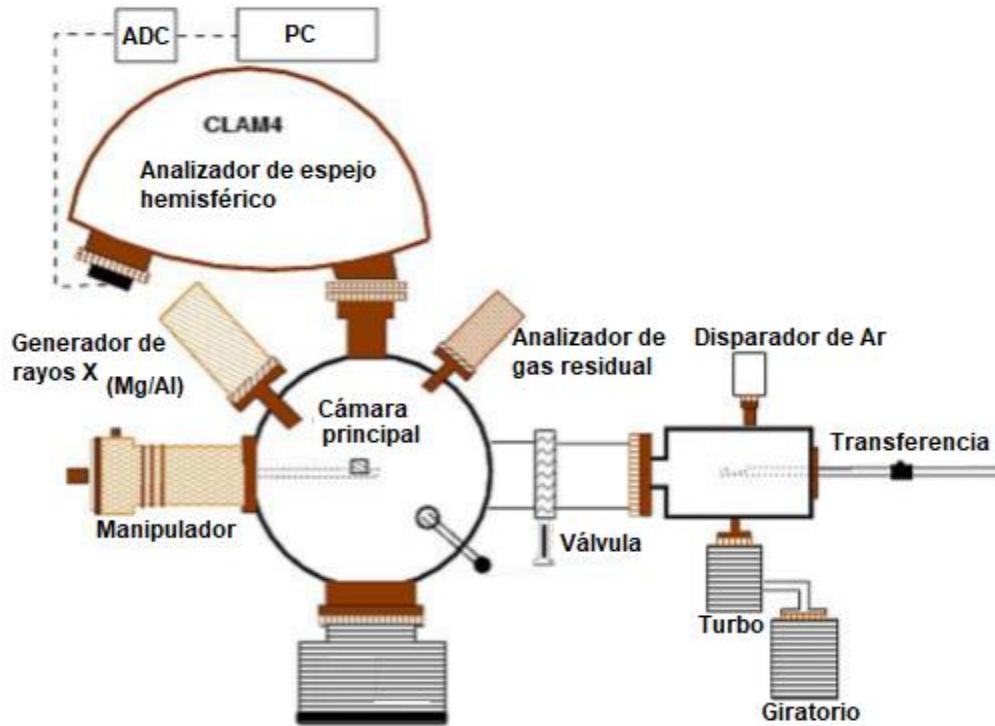


Figura 13. Diagrama esquemático de un espectrómetro XPS [7].

2.2.5 EDS

La técnica de Espectroscopía de Energía Dispersiva (EDS por sus siglas en inglés) permite analizar la composición elemental de cada muestra. Para lograr realizar este análisis se excita la muestra con un haz de electrones acelerados y se mide la energía de los rayos X generados. Procesando esta señal se puede conformar un perfil o mapa de composición de la muestra [80]. El espectrómetro realiza dos funciones básicas: detecta los rayos X, separa los rayos detectados en un espectro según su energía.

Las partes fundamentales de espectrómetro son: el analizador multicanal, el procesador electrónico y el detector. El analizador multicanal almacena y calibra las señales correspondientes a cada diferente región del espectro. El procesador electrónico establece el tiempo necesario para analizar cada rayo X y asignarle su correspondiente canal dentro del analizador multicanal [81]. El detector genera señales de tensión proporcionales a los niveles de energía de los rayos X incidentes. La resolución de este instrumento se define como la achura a la mitad de la línea espectral y está en los

mejores casos entre 130 y 140 eV. En la figura 14 se muestra el diagrama esquemático de un espectrómetro de energía.

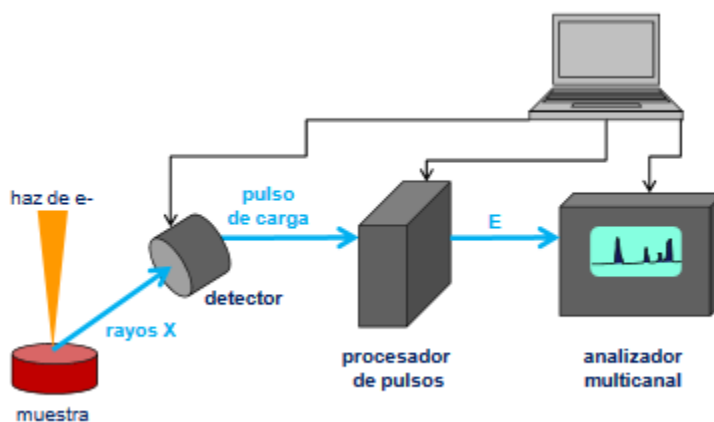


Figura 14. Diagrama esquemático de un espectrómetro de energía [82].

CAPÍTULO 3. Metodología experimental

En este capítulo se revisa la metodología experimental para el desarrollo de transistores de películas delgadas que emplean ZnO como capa activa. Para la fabricación de estos se emplearon métodos químicos como sol-gel y depósito por baño químico.

La estructura del capítulo se divide en dos partes, primero se revisa el proceso de síntesis de cada uno de los materiales y luego el proceso de fabricación del dispositivo. También se explica y se describe cada uno de los pasos realizados durante la realización del proyecto.

3.1 Síntesis de materiales

3.1.1 Síntesis de películas delgadas de Al_2O_3 por Baño químico

La técnica de depósito por baño químico se basa en la precipitación controlada de un compuesto insoluble en solución acuosa o no acuosa, generalmente alcalina, por medio de la liberación lenta de iones metálicos [83]. En un inicio se parte de varias soluciones acuosas separadas, por lo general: una contiene un compuesto que aporta los iones metálicos, otra contiene la fuente de iones no metálicos, una tercera contiene un agente acomplejante y una última proporciona los aniones OH^- , que le permiten regular el pH. Luego se introducen cada una de las soluciones en un mismo recipiente hasta obtener en una única solución las sales de los elementos del compuesto que se desea formar. La tabla 1, muestra los precursores empleados en nuestro caso.

| | | | | |
|----------------|----------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| agua destilada | $Al_2(SO_4)_3$ | (Trietanolamina) Tea | Buffer (NH_4 Cl) | Solución total 100ml |
|----------------|----------------|----------------------|---------------------|----------------------|

Tabla 1. precursores empleados para la síntesis de Al_2O_3 .

Posteriormente el sustrato donde se requiere la formación de la película es sumergido en la solución al mismo tiempo que esta es sometida a un proceso de calentamiento, agitación o ambos simultáneamente. Con el paso del tiempo comienza a ocurrir una reacción química que permite la formación de la película en la superficie del sustrato. La temperatura a la cual se mantiene la solución, la velocidad con la cual es agitada y la concentración de cada uno de los elementos son los parámetros del depósito y los que

a su vez determinan las propiedades físicas, estructurales, eléctricas y ópticas de las películas.

3.1.2 Síntesis de películas delgadas de ZnO por Sol-Gel

La técnica de sol-gel consiste en el paso de una solución de estado líquido a un aspecto gelatinoso a través de varias reacciones de policondensación. Existen cuatro reacciones (hidrólisis, y los tres tipos de condensación) que están involucradas en la transformación de un precursor molecular. La influencia de cada una de las reacciones puede ser optimizada mediante el ajuste de las condiciones experimentales relativas a parámetros internos como: naturaleza del átomo metálico y de los grupos alquilo del alcóxido, entre otras y a parámetros externos como son: proporción agua/alcóxido, catalizador, concentración, disolvente y temperatura de reacción.

En nuestro caso se emplearon los precursores mostrados en la tabla 2.

| Precursor de zinc | estabilizador | solvente |
|----------------------|----------------------|-------------|
| acetato de zinc 1.5g | Trietanolamina 0.5ml | Etanol 12ml |
| nitrate de zinc 1.5g | Trietanolamina 0.5ml | Etanol 12ml |

Tabla 2. Precursores empleados en la síntesis de películas de ZnO.

3.1.3 Depósito de los contactos de Au.

Para la fabricación de los contactos se empleó la técnica de depósito por evaporación catódica (sputtering). Esta técnica consiste en el bombardeo de una superficie con partículas energéticas y la condensación de los átomos eyectados sobre determinado sustrato. En la mayoría de las ocasiones se emplean iones positivos de gases neutrales pesados como es el caso del argón para bombardear las superficies. Además, permite que se puedan realizar los depósitos de películas a baja presión en sistemas muy versátiles. El sistema de sputtering empleado para el depósito de los contactos es el DENTON VACUUM V, la presión a la que se mantuvo la muestra fue constante e igual a 60 *mT*. El objetivo empleado contaba con un 99.99% de pureza de oro y se colocó a una altura de 13 *cm* sobre la base del sustrato. Todos los depósitos se realizaron a temperatura ambiente, dentro de una atmósfera de argón y manteniendo una corriente

constante de 10 mA y una duración de dos periodos de 5 min, debido a especificaciones técnicas del equipo. También se utilizó una mascarilla con diferentes patrones geométricos lo que permitió obtener transistores con diferentes anchos de canal.

3.2 Diseño de Experimentos

Para la síntesis de las películas de Al₂O₃ se emplearon los precursores presentes en la tabla 1, sustratos de vidrio cubiertos con FTO, recipiente con capacidad de almacenamiento de 100 ml, micropipetas y agitador magnético. Primero se mezclaron en un recipiente los compuestos que se muestran en la tabla 1. Luego dicho recipiente se introdujo en el equipo LAUDA E - 100, el cual tiene la función de mantener una temperatura constante durante todo el proceso de la reacción. La temperatura establecida en el caso que nos ocupa es de 70°C y los tiempos de depósito se muestran en la tabla 3.

| tiempo de depósito | tiempo de recocido |
|--------------------|--------------------|
| 30 minutos | 1 hora |
| | 2 horas |
| 40 minutos | 1 hora |
| | 2 horas |
| 60 minutos | 1 hora |
| | 2 horas |

Tabla 3. Diseño de experimento para la síntesis de Al₂O₃.

Se repitió cada depósito asociado a los tiempos de depósitos que se presentan en la tabla 3. Luego se procedió al recocido de las películas estableciéndose con anterioridad los tiempos para cada una de las muestras. Para el proceso de recocido se empleó una mufla TER-LAB, la cual se configuró para mantener 500°C durante una y dos horas en dependencia de la muestra.

| velocidad de giro | temperatura de recocido | # de repeticiones | Muestra |
|-------------------|-------------------------|-------------------|---------|
| | | | |

| | | | |
|---------|-------|---|---|
| 450 RPM | 450°C | 4 | A |
| | | 6 | B |
| | 550°C | 4 | C |
| | | 6 | D |
| 550 RPM | 450°C | 4 | E |
| | | 6 | F |
| | 550°C | 4 | G |
| | | 6 | H |

Tabla 4. Diseño de experimento para la síntesis de ZnO.

En el caso de las películas de ZnO se emplearon los precursores mostrados en la tabla 2, como estabilizador se utilizó Trietanolamina y como solvente el volumen de etanol referido en dicha tabla. La técnica de depósito del gel sobre el sustrato empleada fue la centrifugación, para la cual se empleó un equipo comercial CHEMAT TECHNOLOGY (SPIN-COATER KW-4A) y una placa de calentamiento modelo KW-4AH. La tabla 4 muestra los valores que se le impusieron al equipo para la síntesis de las películas, así como el número de veces que se repitió el proceso. La placa de calentamiento se utilizó a una temperatura de 150°C. Sobre ella se colocó el sustrato sobre el cual se estaba haciendo el depósito por un tiempo de 10min que transcurría entre cada uno de los ciclos de centrifugación. Todos los ciclos de centrifugación se realizaron con una duración de 50 seg.

3.3 Diseño y fabricación del transistor FET

En la fabricación del transistor con contactos superiores y compuerta inferior (Bottom-gate top-contact) se empleó sustrato de vidrio cubierto con FTO, sobre el cual se depositó Al_2O_3 usando la técnica de depósito por baño químico. Como capa activa se empleó ZnO, el cual fue depositado por la técnica de sol-gel y los contactos correspondientes al drenaje y a la fuente se depositaron empleando la técnica de evaporación catódica, utilizando una mascarilla el equipo DESK-5 STANDARD. La figura 15 muestra la estructura del TFT fabricado.

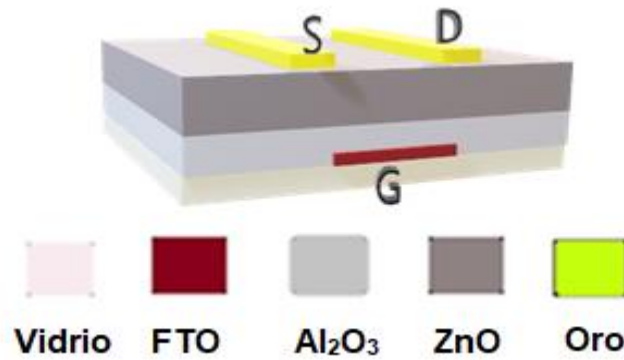


Figura 15. Estructura del TFT fabricado [8].

El primer paso para la fabricación del TFT consiste en cortar los sustratos de 4 pulgadas, en cuadros de 2.5 cm de lado. Luego el FTO es grabado utilizando ácido clorhídrico y zinc purificado. Posteriormente estos sustratos son sometidos a un proceso de limpieza, el cual garantizará la correcta adhesión de las siguientes capas que formaran parte de la estructura del transistor. Para la limpieza se emplea alcohol isopropílico y el baño ultrasónico marca BRANSON 1800.

La película de Al₂O₃ empleada como capa dieléctrica presenta un espesor cercano a 200nm presenta una estructura cristalina amorfa, una transparencia adecuada en el espectro visible y fue depositada empleando la técnica de baño químico. La película de ZnO presenta una orientación predominante en el plano [002] y un valor de transmitancia cercano al 90% y fue depositada empleando la técnica de sol-gel. Los contactos depositados presentan una separación de canal que puede variar desde 20 hasta 80μm en pasos de 20μm empleando la técnica de depósito por sputtering con un espesor de 50nm aproximadamente.

3.3.1 Simulación

El proceso de diseño se sustentó en el empleo del software COMSOL MULTIPHYSICS. Este software está basado en el análisis y la resolución de fenómenos físicos y de ingeniería por el método de elementos finitos. COMSOL permite modelar diferentes estructuras, fenómenos, materiales, cargas, entre otros parámetros. Tiene interfaces con diferentes programas de diseño, presenta módulos por aplicación y soluciones específicas. Cuenta con múltiples librerías para aplicaciones y materiales las cual se pueden modificar y actualizar.

El empleo de la simulación como una herramienta en este trabajo garantiza la comprensión de algunos fenómenos que ocurren en el dispositivo mientras son modificados algunos parámetros o condiciones físicas. Este software le brinda la posibilidad a los usuarios de seleccionar la dimensión espacial en la que quiere realizar la simulación (3D, 2D, 1D). Además, permite establecer parámetros, parametrizar diferentes geometrías, definir materiales y formas diferentes para los contactos, modificar múltiples propiedades del material como son: densidad de trampas, concentración de dopantes, velocidad de generación y de recombinación entre otras muchas.

COMSOL permite construir diferentes tipos de mallados con diferentes dimensiones lo que permite obtener simulaciones con alta fidelidad en los casos que se emplean mallados muy finos. El software también nos brinda la flexibilidad para obtener estudios estacionarios y/o transitorios y la facilidad de visualizar los resultados.

La simulación está conformada por dos grandes bloques. El primero contiene el procesamiento numérico conformado por métodos de integración y discretización. Mientras el otro bloque está conformado en gran medida por los diferentes modelos físicos entre los que se encuentra el modelo de recombinación (Shockley Read Hall), (Fermi – Dirac y Boltzmann statistics).

El transporte de cargas es simulado resolviendo una serie de ecuaciones diferenciales fundamentales para semiconductores en las cuales cada punto discreto es determinado en función del mallado definido. La ecuación de Poisson relaciona el potencial eléctrico con la distribución espacial de carga y está incluida dentro de los modelos matemáticos que utiliza el COMSOL, incluyen la movilidad de carga y las trampas de iones. La ecuación 1 es de las más importantes.

$$\nabla(\epsilon_r \nabla V) = q(n - p + N_A^- - N_D^+) \text{ Ecuación (1).}$$

Dónde

V: potencial eléctrico.

ϵ_r : permitividad relativa del semiconductor.

q: carga del electrón.

n: densidad de electrones libres.

p : densidad de huecos libres.

N_D^+ : densidad de cargas ionizadas donoras.

N_A^- : densidad de cargas ionizadas aceptoras.

Mientras las ecuaciones de transporte son descritas por la siguiente relación: ´

$$J_n(x) = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{Ecuación (2).}$$

$$J_p(x) = q\mu_p p(x)E(x) + qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{Ecuación (3).}$$

Donde:

μ_n : movilidad de electrones.

μ_p : movilidad de huecos.

D_n : difusión de electrones.

D_p : difusión de huecos.

J_n : densidad de corriente de electrones.

J_p : densidad de corriente de huecos.

Además, COMSOL se apoya de la ecuación de continuidad de portadores que está dada por:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \Delta J_n + G_n - U \quad \text{Ecuación (4).}$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{1}{q} \Delta J_p + G_p - U \quad \text{Ecuación (5).}$$

Donde:

G_n : tasa de generación de electrones.

G_p : tasa de generación de huecos

U : tasa de recombinación para electrones y huecos.

En nuestro caso se realizó la simulación tanto en 2D como en 3D, en cada uno de los casos se definió la geometría correspondiente los materiales y las condiciones iniciales.

Para la estructura en 3D se definieron 5 bloques como se muestra en la figura 16:

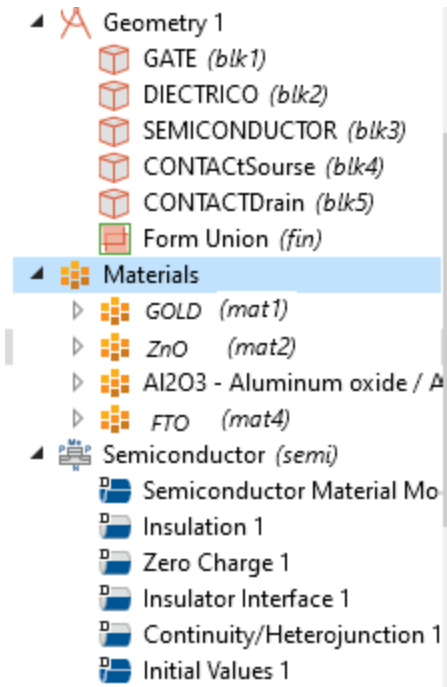


Figura 16. Definición de bloques y materiales para la simulación 3D en COMSOL.

Los materiales empleados en la simulación son presentados en la figura 16 en orden descendente empezando por los contactos superiores, capa activa, aislante de compuerta y por último contacto de compuerta. La tabla 5 muestra las propiedades de los contactos y la capa activa empleados en la simulación y la tabla 6 las dimensiones.

| Parámetros | GOLD | ZnO | FTO | Al ₂ O ₃ |
|--|---|--------------|---------------------|--------------------------------|
| Conductividad eléctrica (S/m) | $4,55 * e^7$ | $0.95e^{-4}$ | $2.95e^5 - 8.35e^6$ | 0 |
| Permitividad relativa | 1 | 8.6 -10.2 | 1 | 5,7 |
| Band gap (eV) | 0,01 | 3.37 | 3,5 - 3,9 | 6.5-9.5 |
| Afinidad electrónica (eV) | 2,3 | 3.9 | | |
| Densidad de estados efectivos en banda de valencia (1/m ³) | $\left(\frac{T}{300[K]}\right)^{\frac{3}{2}} * 1.04e19[1/cm^3]$ | $5e^{10}$ | | |
| Densidad de estados efectivos en banda de conducción (1/m ³) | $\left(\frac{T}{300[K]}\right)^{\frac{3}{2}} * 1.04e19[1/cm^3]$ | $0.01e^{10}$ | | |

| | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------------------------|-------------|
| Movilidad de electrones (cm ² /(V*s)) | 30 - 1000 | 40 | 7-10 | |
| Movilidad de huecos (cm ² /(V*s)) | 0,1 | 60 | 0.3-0.35 | |
| Permeabilidad relativa | 1 | 8.6 -10.2 | | |
| Coefficiente de expansión térmica (1/K) | $14e^{-6}$ | $4.77e^{-5}$ | | $6.5e^{-6}$ |
| Constante de presión (J/(kg*K)) | | | | 730 |
| Densidad (kg/m ³) | 19300 | 5600 | | 3965 |
| Conductividad térmica W/(m*K) | > 3.5 | 50 | | 35 |
| Módulo de Young (Pa) | 79 GPa | 102.89GPa | | 400 |
| Poisson ratio | 0,42 a 0,44 | | | 0,22 |
| Resistividad (Ω*cm) | $2,21e^{-8}$ | 1 a 100 | $8.35e^{-4}$ $- 2.95e^{-3}$ | $+ 1e^{12}$ |
| Referencia de temperatura (K) | 298 | 298 | 298 | 298 |

Tabla 5. Propiedades de los materiales empleados en la simulación.

| | Ancho | Profundidad | Altura |
|----------------------|-------|-------------|----------|
| GATE | 12 | 13 | 0.1; 0,2 |
| Dieléctrico | 12 | 12 | 0,3 |
| Semiconductor | 12 | 12 | 0,3 |
| Contactos superiores | 1 | 10 | 0,05 |

Tabla 6. Dimensiones de los bloques empleados en la simulación.

Para la simulación en 2D se definió la capa activa como un polígono rectangular, luego se definieron los contactos superiores con una línea poligonal abierta al igual que el contacto correspondiente a la compuerta. En la definición de materiales solo fue necesario utilizar el ZnO correspondiente a la capa activa con las propiedades presentadas en la tabla 5. El software asume que los contactos correspondientes al drenaje y a la fuente son óhmicos, esto se logra definiendo en la física del semiconductor dichos contactos como Metal Contact 1 y Metal Contact 2 como muestra la figura 16. Al definir en la física del semiconductor el contacto de compuerta como Thin Insulator Gate 1 podemos garantizar un contacto óhmico, además, podemos definir un grosor para un dieléctrico de compuerta con características ideales. Estas definiciones permiten

simplificar la simulación y optimizar el desempeño de los recursos de máquina para el estudio de la capa activa del dispositivo.

La simplificación de la estructura se puede apreciar en la figura 17.



Figura 17. Estructura simplificada para la simulación en 2D.


















- ▲  Geometry 1
 -  Semiconductor (*r1*)
 -  Contactos superiores (*pol1*)
 -  Gate (*pol2*)
 -  Form Union (*fin*)
- ▲  Materials
 - ▶  Zinc Oxide (*mat1*)
- ▲  Semiconductor (*semi*)
 -  Semiconductor Material Model 1
 -  Insulation 1
 -  Zero Charge 1
 -  Insulator Interface 1
 -  Continuity/Heterojunction 1
 -  Initial Values 1
 -  Metal Contact 1
 -  Metal Contact 2
 -  Thin Insulator Gate 1

Figura 18. Definición de geometrías y materiales para la simulación 2D en COMSOL.

Luego de definir los bloques, las propiedades de estos y de los materiales que los forman se procede a definir el mallado. La simulación se realizó con diferentes dimensiones para las mallas, pero la que garantizó mejores resultados en relación con el tiempo de simulación fue el mallado normal para el caso de la simulación 3D y el extremadamente grande para la simulación 2D como se muestra en las figuras 19 y 20 respectivamente.

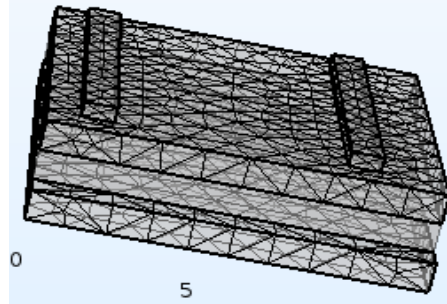


Figura 19. Definición del mallado normal para la simulación 3D.



Figura 20. Definición del mallado extremadamente grande para la simulación 2D.

La simulación se realizó con los parámetros que se muestran en la tabla 6. Los mejores resultados se obtuvieron para la simulación F. Las figuras 21, 22 y 23 los muestran.

| | | | | | | |
|------------|---|---|----|---|---|----|
| Gate | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 | 4 |
| Drenaje | 3 | 6 | 10 | 3 | 6 | 10 |
| Fuente | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Simulación | A | B | C | D | E | F |

Tabla 7. Parámetros a simulación.

Simulación F:



Figura 21. Vista frontal de la concentración electrónica.



Figura 22. Vista frontal del potencial eléctrico.



Figura 23. Flecha de densidad de corriente superficial.

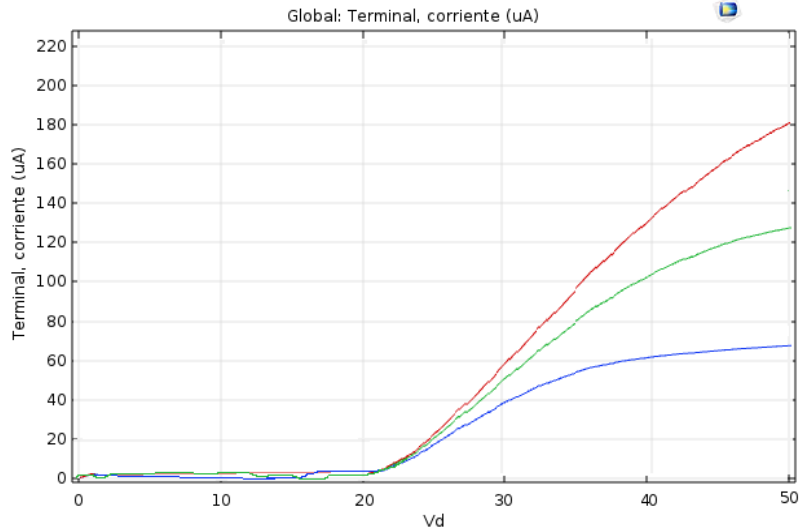


Figura 24. Curva I_{ds} v/s V_d para la simulación F.

3.3.2 Características eléctricas de TFTs

Para los transistores canal n, un valor de tensión positivo en la compuerta provoca la acumulación de electrones cerca de la superficie del dieléctrico de compuerta. Esto a su vez causa un aumento en la conductancia del material lo que implica un aumento de la corriente de drenaje (I_d). Por otra parte, un valor de tensión negativo en la compuerta implica una reducción en la concentración de electrones en la superficie del dieléctrico lo que implica que no existan portadores de carga en el área correspondiente al canal del transistor y por tanto el valor de la corriente de drenaje es casi despreciable.

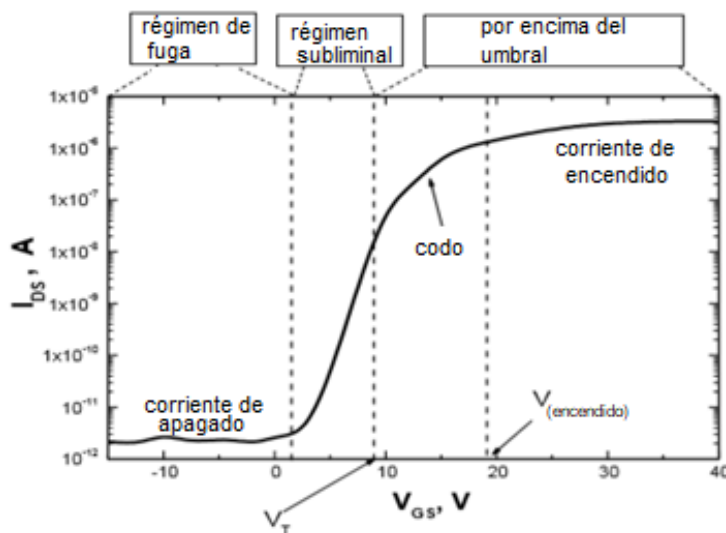


Figura 25. Característica transferencial de TFT canal n [9].

Otro parámetro eléctrico importante en la caracterización de TFTs es el voltaje de activación del transistor. Este es definido como el valor de tensión a partir del cual comienza a conducir el dispositivo a través del canal. El voltaje de activación puede determinarse como el comienzo de la transición de la corriente de encendido en la gráfica de I_d vs V_{ds} .

La pendiente sublineal de las características transferenciales debe ser lo suficientemente grande para asegurar la rápida transición entre el estado de encendido y el de apagado del dispositivo. Este parámetro tiene una fuerte dependencia de la densidad de defectos en el canal del material.

El voltaje de activación puede ser determinado graficando la corriente de drenaje en función de la tensión de compuerta fijando para ello un valor pequeño de tensión de drenaje, la ecuación 6 muestra la relación de estos parámetros.

$$I_D = K_n \frac{W}{L} [V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2}] V_{DS} \text{ Ecuación (6).}$$

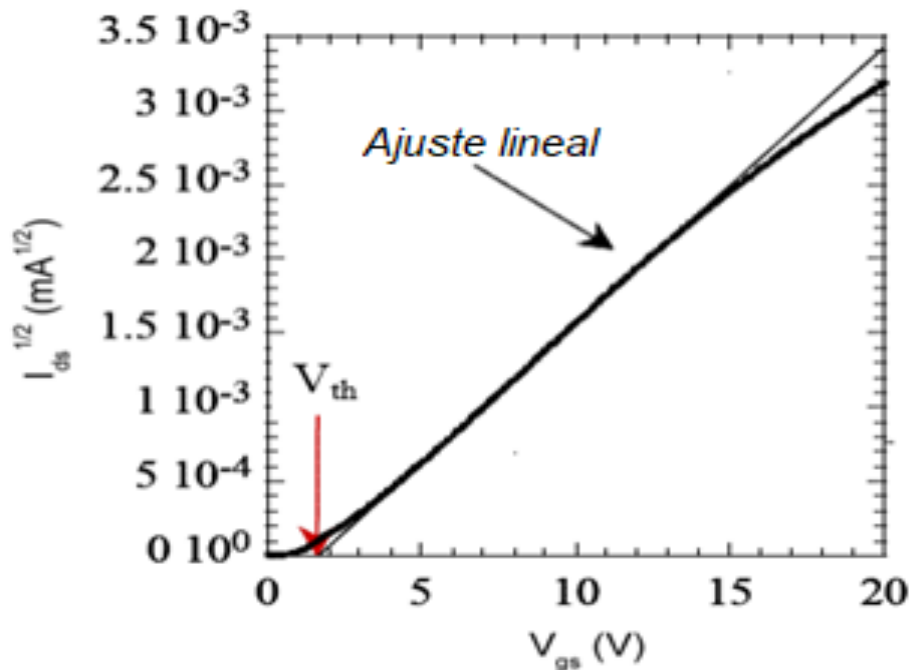


Figura 26. I_d v/s V_{gs} para TFT canal n [9].

CAPÍTULO 4: Resultados y análisis de resultados.

4.1 Resultados de la caracterización de las películas Al_2O_3

En esta sección se presentan los resultados de las caracterizaciones realizadas a las películas de Al_2O_3 , las condiciones en las que se realizaron las mediciones, las aproximaciones y los desarrollos matemáticos en los casos requeridos.

4.1.1 Patrones de DRX de las películas de Al_2O_3

Los patrones de difracción de rayos-X de las películas de Al_2O_3 se presentan en la figura 27, los resultados se obtuvieron con 40 kV de tensión, 44 mA de corriente. La ausencia de picos implica que las películas tienen una naturaleza predominante amorfa, situación normal en este tipo de películas dieléctricas.

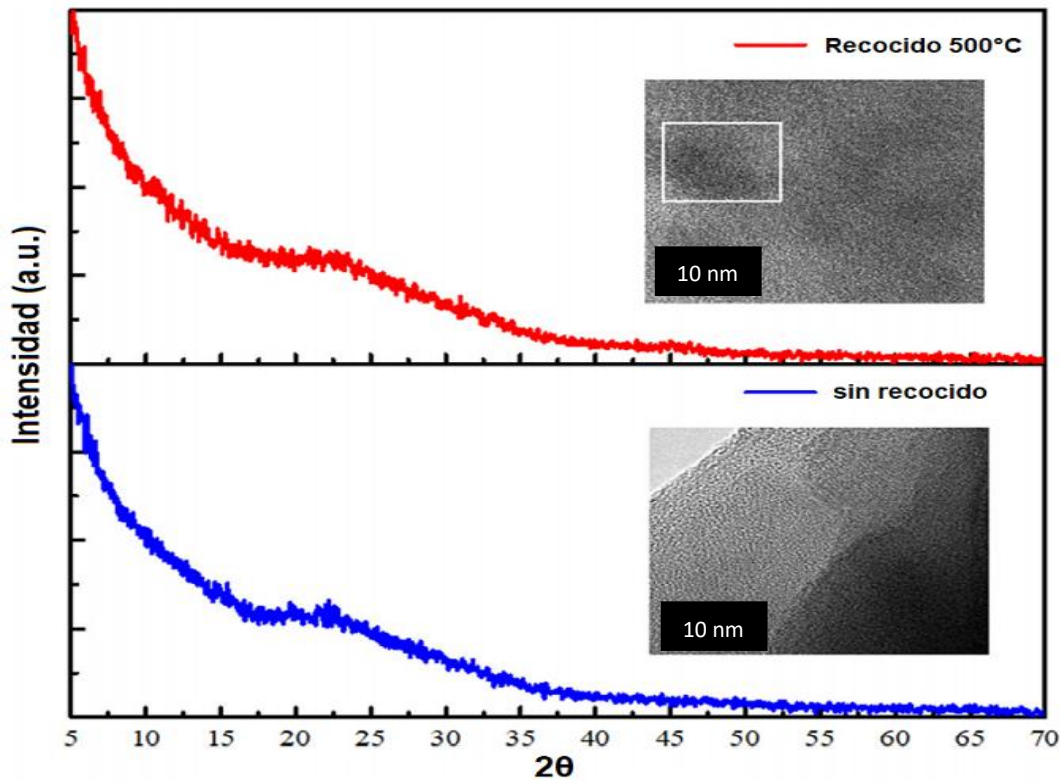


Figura 27. Patrones de difracción de rayos-X de películas sin recocer y recocidas a 500°C , con sus respectivas micrografías [10].

4.1.2 SEM y EDS para las películas de Al₂O₃

Para identificar las características superficiales de las películas de Al₂O₃ sobre FTO que están depositadas a su vez sobre un sustrato de vidrio se realizó la caracterización superficial per medio de SEM con una ampliación de 5000X con una tensión de 20Kv. También se presenta la proporción de los elementos químicos que aparecen en las películas por medio de los resultados de las mediciones de EDS. En la tabla 8 se puede observar el incremento del porcentaje atómico de Al a medida que aumenta el tiempo de depósito, como se puede observar en la figura 29, la energía asociada a este elemento tiene mayor intensidad también en proporción directa con el tiempo de depósito.

| Elementos | % atómico para 30min de depósito | % atómico para 40min de depósito | % atómico para 60min de depósito |
|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Al | 3,75 | 4,35 | 5,24 |
| O | 75,35 | 73,51 | 72,53 |

Tabla 8. Relación del porcentaje atómico de los principales elementos presentes en las películas con el tiempo de depósito.

Como se puede observar en la tabla 8, el porcentaje atómico de oxígeno decrece ligeramente al igual que el de estaño a medida que incrementa el tiempo de depósito, esto puede ocurrir porque incrementa el grosor de la película de Al₂O₃ y por tanto se deja de obtener influencia en la medición de la película de FTO que se encuentra debajo de esta. La presencia de los picos energéticos asociados a los otros elementos que se aprecian, están relacionados con el sustrato de vidrio.

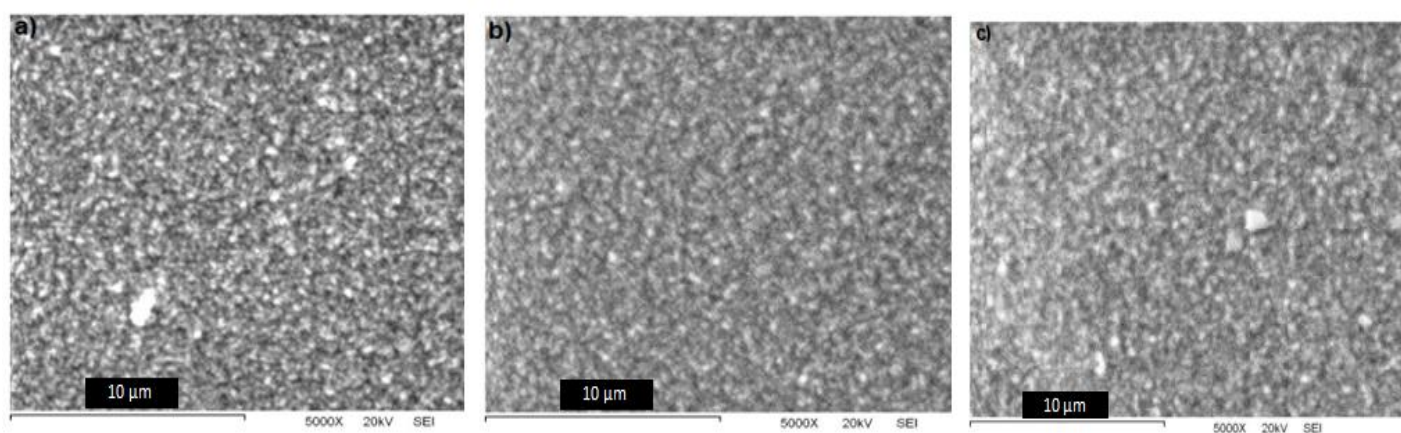


Figura 28. Resultados de SEM para las películas de Al₂O₃: a) 30min, b) 40min, c) 60min [11].

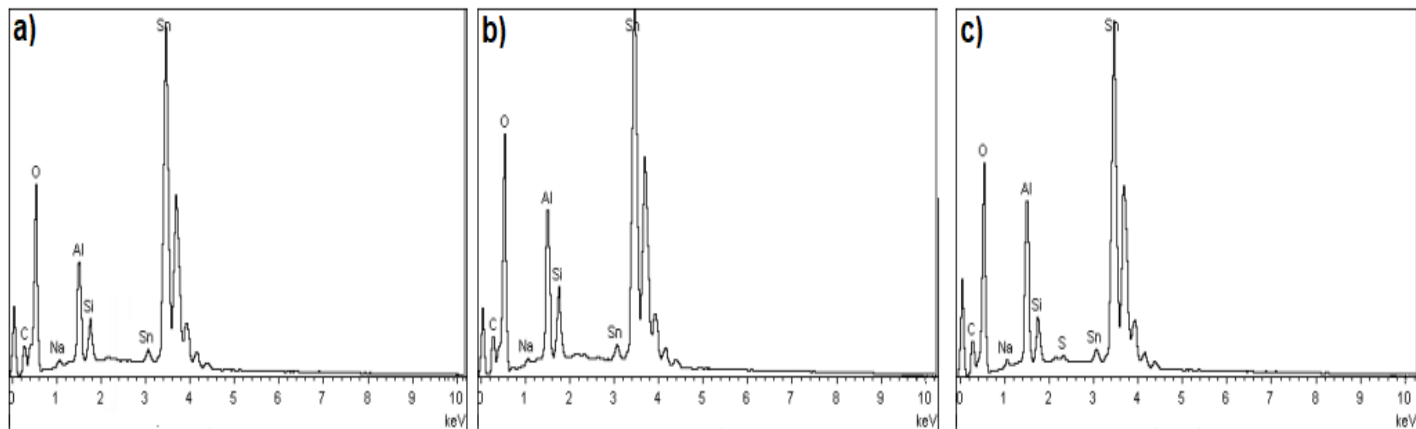


Figura 29. Resultados de EDS para las películas de Al_2O_3 : a) 30min, b) 40min, c) 60min [11].

4.1.3 Transmitancia y banda prohibida de Al_2O_3

La figura 30 muestra el porcentaje de transmitancia y el valor de energía de banda prohibida para las películas de Al_2O_3 , como se puede verificar el valor de la transmitancia está próximo a 90 % lo que corrobora su utilización como película delgada transparente. Las diferencias entre el sustrato y las películas delgadas se ven en la región UV, donde el porcentaje de transmitancia, a una longitud de onda de 200 nm, disminuye a partir del 55% para las películas recocidas, mientras para el sustrato de cuarzo limpio disminuye a partir del 75%, lo que demuestra que el principal efecto de disminución de la transmitancia se debe a la presencia de las películas y, por lo tanto, depende de su naturaleza específica. La disminución de la curva de transmitancia se completa a 0 siguiendo un modelo de transición fundamental, para lograrlo se realizó una extrapolación que garantizó que se superaran las limitaciones del instrumento de medición, en la cual fue empleada una función sigmoïdal para longitudes de onda inferiores a 200 nm, las líneas discontinuas en la figura 30 a) muestran el resultado de la aproximación realizada.

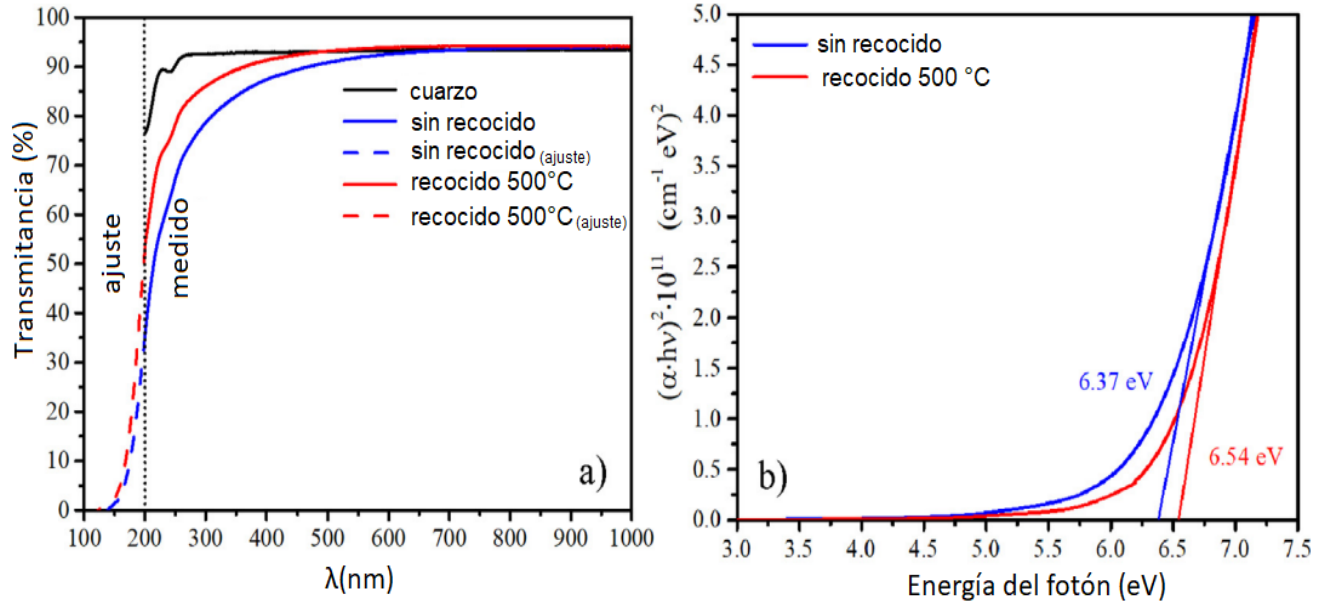


Figura 30. Medición de transmitancia para las películas de Al_2O_3 [10].

Se empleó el modelo de Tauc para la estimación. Según el cual, la determinación de la energía de (E_g) se realiza al encontrar la intersección del ajuste lineal extrapolado a la ordenada cero, en el gráfico de coeficiente de absorción por la energía del fotón al cuadrado contra la energía del fotón, que queda expresada como se muestra en la ecuación 7.

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

A: constante.

E_g : energía de la banda prohibida.

$h\nu$: energía del fotón.

A: coeficiente de adsorción. Se calculó con la ecuación de Beer-Lambert

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln(T) \quad \text{Ecuación 8.}$$

d : espesor.

T : transmitancia.

Los valores estimados de energía de la banda prohibida (E_g) fueron de 6.37 y 6.54 eV para las películas sin recocer y recocidas como se puede observar en la 30 b).

4.1.4 XPS de Al_2O_3

La figura 31 muestra los resultados del análisis de XPS para las películas de Al_2O_3 obtenidas con 30 minutos de tiempo de depósito. Como se puede observar en dicha figura, la intensidad del espectro de energía asociado al O 1s que se encuentra entorno a los 532 eV incrementa desde cerca del 40% hasta cerca del 70% al ser recocidas las películas a una temperatura de 500°C. Lo que evidencia la transformación de los hidróxidos de aluminio en óxidos de aluminio. Además, se observa un ligero corrimiento del punto de máxima energía cercano a 1 eV causada por la disminución de los enlaces Al-OH y el aumento de los enlaces Al-O.

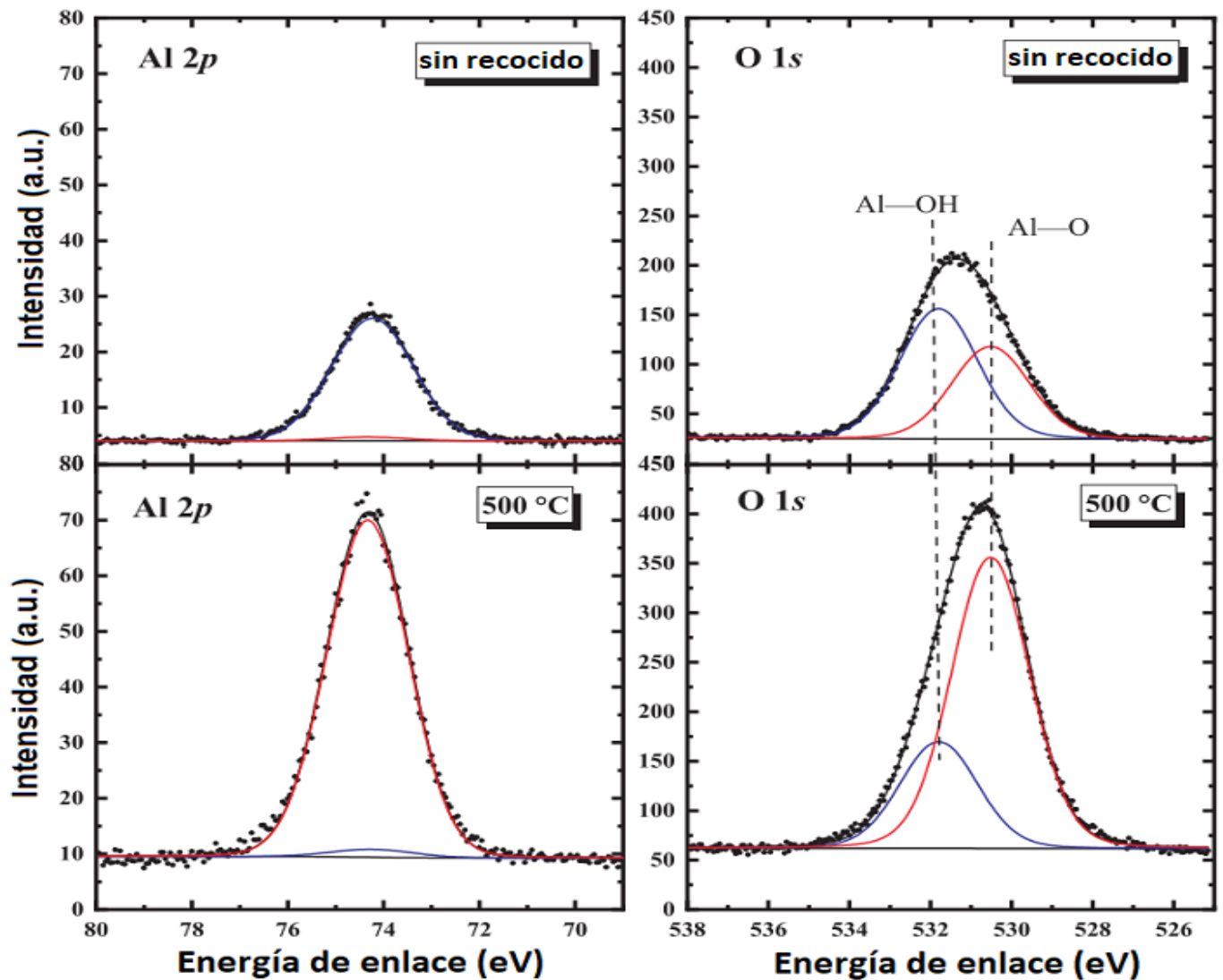


Figura 31. Alta resolución de XPS Al 2p y O 1s películas delgadas de Al_2O_3 sin recocer y con recocido a 500 °C [10].

Para el caso del espectro del Al 2p el desplazamiento del máximo de energía es prácticamente despreciable mientras la intensidad asociada al mismo casi se duplica como se puede observar en la figura 31. Esto puede estar relacionado a un cambio en el entorno químico local del Al después del recocido y a la transformación que sufre la muestra por factores térmicos.

4.2 Resultados de la caracterización de las películas ZnO

En esta sección se presentan los resultados de las caracterizaciones realizadas a las películas de ZnO, las condiciones en las que se realizaron las mediciones y los software utilizados para procesar la información obtenida en cada medición.

4.2.1 Resultados de DRX ZnO

La figura 32 muestra los nueve picos de mayor intensidad correspondientes al óxido de zinc (Zincite, hexagonal) presente en la carta con código (01-089-7102), la cual se encuentra entre las referencias que emplea el software X'Pert HighScore Plus.

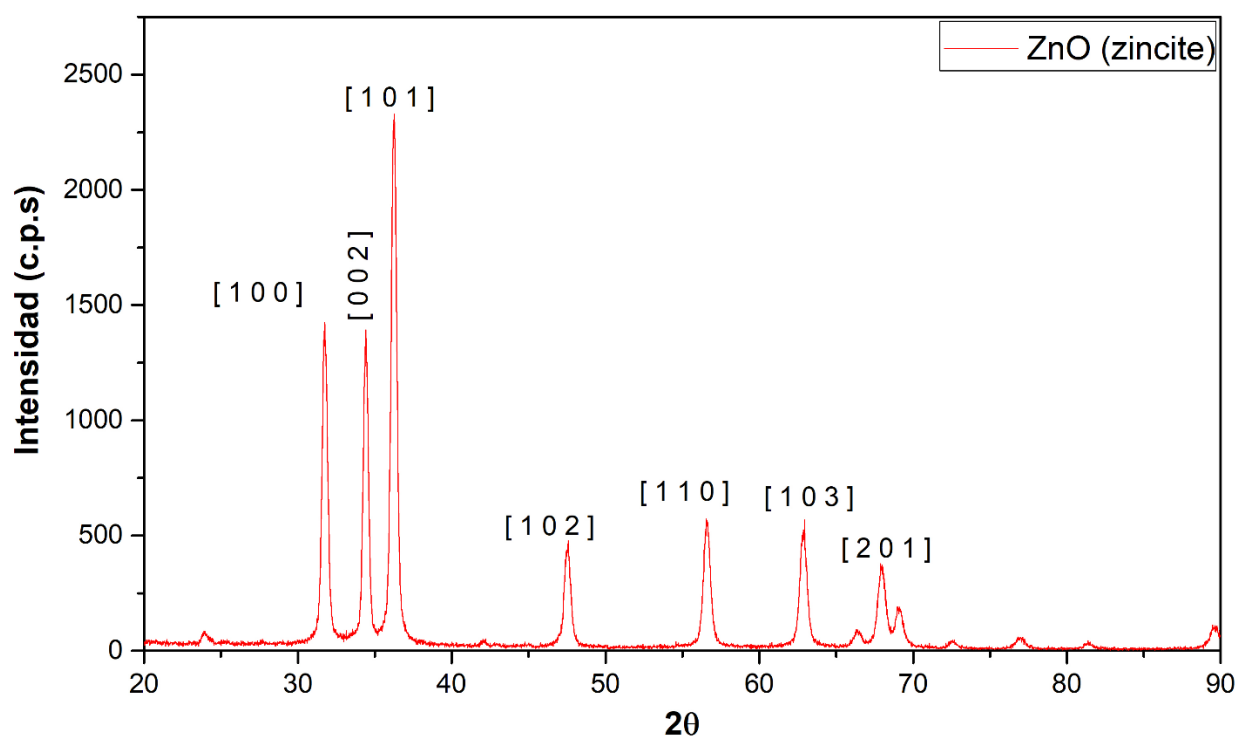


Figura 32. Patrón de DRX para ZnO (Zincite) # de carta (01-089-7102).

Los resultados de DRX se obtuvieron para 40 kV de tensión, 44 mA de corriente, un tiempo de duración de 4.0000 grados/min en pasos de 0.2 *grados*.

| Muestra | Primer pico | Segundo Pico | Tercer pico | Cuarto pico | quinto pico | sexto pico | séptimo pico |
|---------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| A | 31,7869 | 34,4436 | 36,2131 | - | - | - | - |
| B | 31,7869 | 34,45 | 36,3607 | 56,7213 | 63,1393 | 68,0082 | - |
| C | 31,7663 | 34,4378 | 36,22 | - | - | - | - |
| D | 31,7799 | 34,4524 | 36,3594 | 56,72 | 63,1387 | 68,001 | - |
| E | 31,72 | 34,399 | 36,24 | 47,41 | 56,59 | 62,763 | 67,89 |

| | | | | | | | |
|---|---------|-------|---------|-------|---|-------|---------|
| F | - | - | - | - | - | - | - |
| G | 31,6885 | 34,43 | 36,2787 | 47,71 | - | 62,86 | 68,0656 |
| H | - | - | - | - | - | - | - |

Tabla 9. Posición 2θ para los picos con mayor intensidad.

La tabla 9 muestra la posición (2θ) de los picos principales obtenidos para las muestras fabricadas a partir de los parámetros establecidos en la tabla 4 del capítulo anterior.

En la figura 33 se presenta el Patrón de DRX para las muestras A y C, se pueden apreciar solo tres de los principales picos de intensidad que según la carta con # (01-089-7102), empleada como referencia, deberían existir. Además, la intensidad de estos picos es relativamente baja.

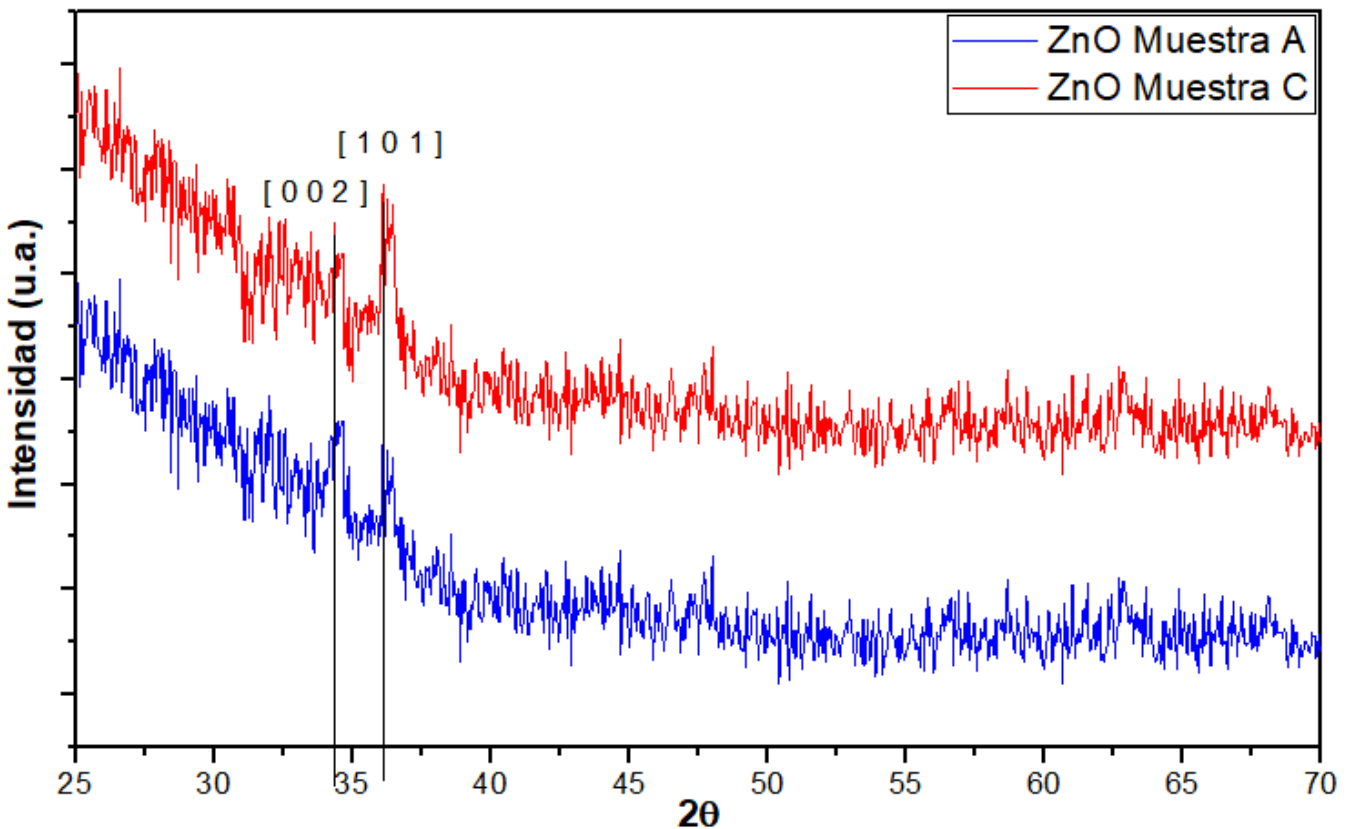


Figura 33. Patrón de DRX para la muestra A y C [12], [13].

En la figura 33 se presenta el patrón de DRX para la muestra C, en esta se puede apreciar rodeado de mucho ruido solo el tercer pico asociado al ZnO según la carta # (01-089-7102) empleada como referencia. La orientación de dicho pico se encuentra en la

dirección (1 0 1). La existencia de este único pico se debe a la reorientación que ocurre en los cristales de ZnO en esa dirección al ser recocidas las muestras a más altas temperaturas. Esto es coherente con nuestro diseño de experimento debido a que la muestra C y la muestra A presentan parámetros de fabricación similares con la diferencia que la muestra A se recoció a una temperatura de 450°C mientras la temperatura de recocido para la muestra C fue 550°C.

La figura 34 muestra el patrón de DRX para las muestras B y D. Se pueden apreciar 6 de los principales picos correspondientes al ZnO para la muestra B según la carta con # (01-089-7102). La obtención de este patrón se corresponde con lo previsto según las condiciones de fabricación de la película. Como se puede observar en la tabla 4 del capítulo 3, la muestra B presenta dos capas más que la muestra A esto implica que el grosor de la muestra B sea mayor que el de la muestra A según está reportado en la bibliografía, por tanto, el patrón de DRX para esta muestra presenta mayor intensidad y cantidad de picos característicos del ZnO.

En la figura 34 se pueden apreciar 6 picos asociados al patrón de DRX para la muestra D, según la carta usada de referencia con # (01-089-7102). Cinco de los picos presentan una intensidad menor que la de los picos presentes en la muestra B. Mientras el segundo pico con orientación cristalográfica (0 0 2), presenta un incremento en la intensidad. Esto es provocado por la reorientación cristalográfica en la dirección (0 0 2) que predomina en las películas al aumentarse la temperatura de recocido. Es importante mencionar que también ocurre un ligero desplazamiento del máximo en los picos.

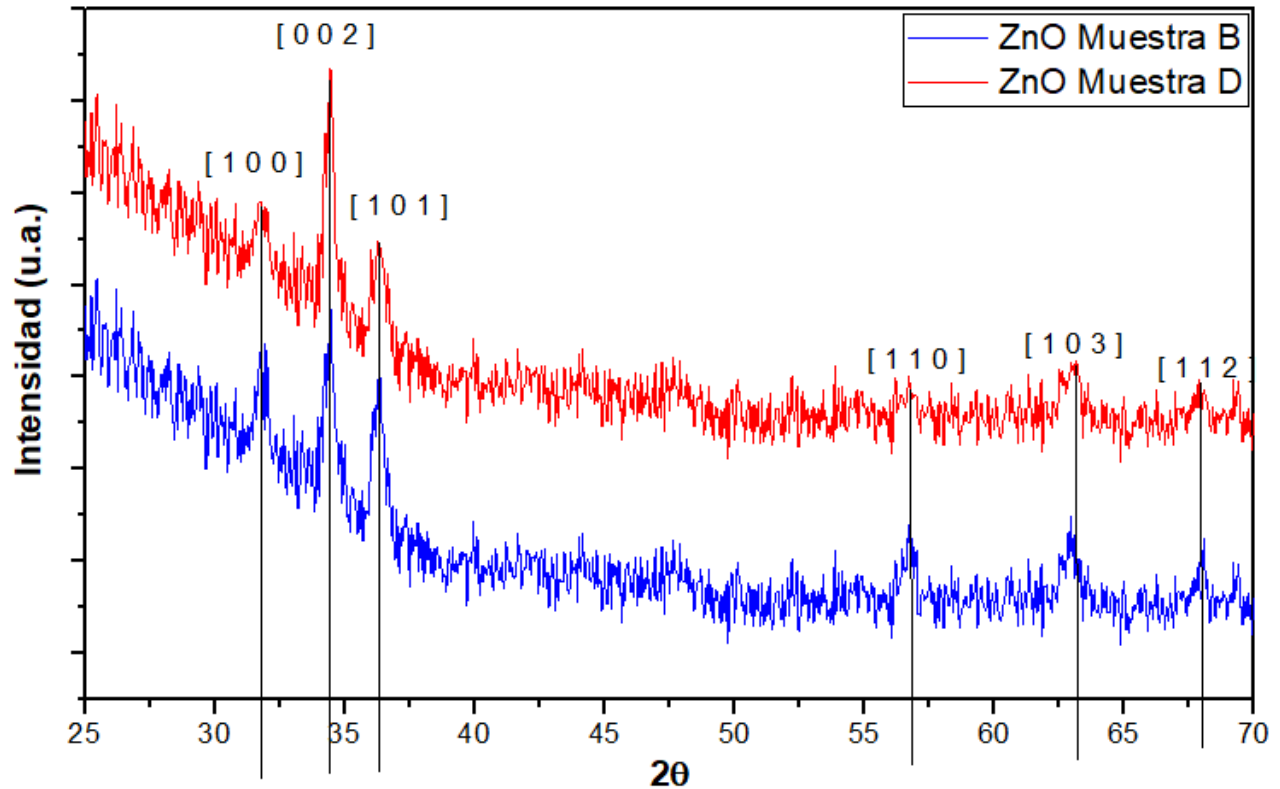


Figura 34. Patrón de DRX para la muestra B y D [14], [15].

La figura 35 muestra el patrón de DRX para las muestras E y G. Se pueden apreciar en la muestra E 7 de los principales picos correspondientes al ZnO según la carta con # (01-089-7102). Como se puede apreciar esta muestra presenta intensidad máxima en la orientación (0 0 2) y los otros 6 picos, aunque con menor intensidad, pero se encuentran bien definidos.

En la misma figura se aprecian 6 de los correspondientes picos principales del ZnO para la muestra G. Similar a lo que sucede con las muestras B y D, cinco de los picos presentan una intensidad menor que la de los picos presentes en la muestra E. Mientras el segundo pico con orientación cristalográfica (0 0 2), presenta un incremento en la intensidad. Además, el pico con orientación (1 1 0) desaparece y el séptimo pico se reorienta en la dirección (1 1 2). Esto es provocado también por la reorientación cristalográfica que ocurre al aumentarse la temperatura de recocido. La orientación cristalográfica predominante en este caso es también en la dirección (0 0 2). Es

importante mencionar que también ocurre un ligero desplazamiento del máximo en los otros picos.

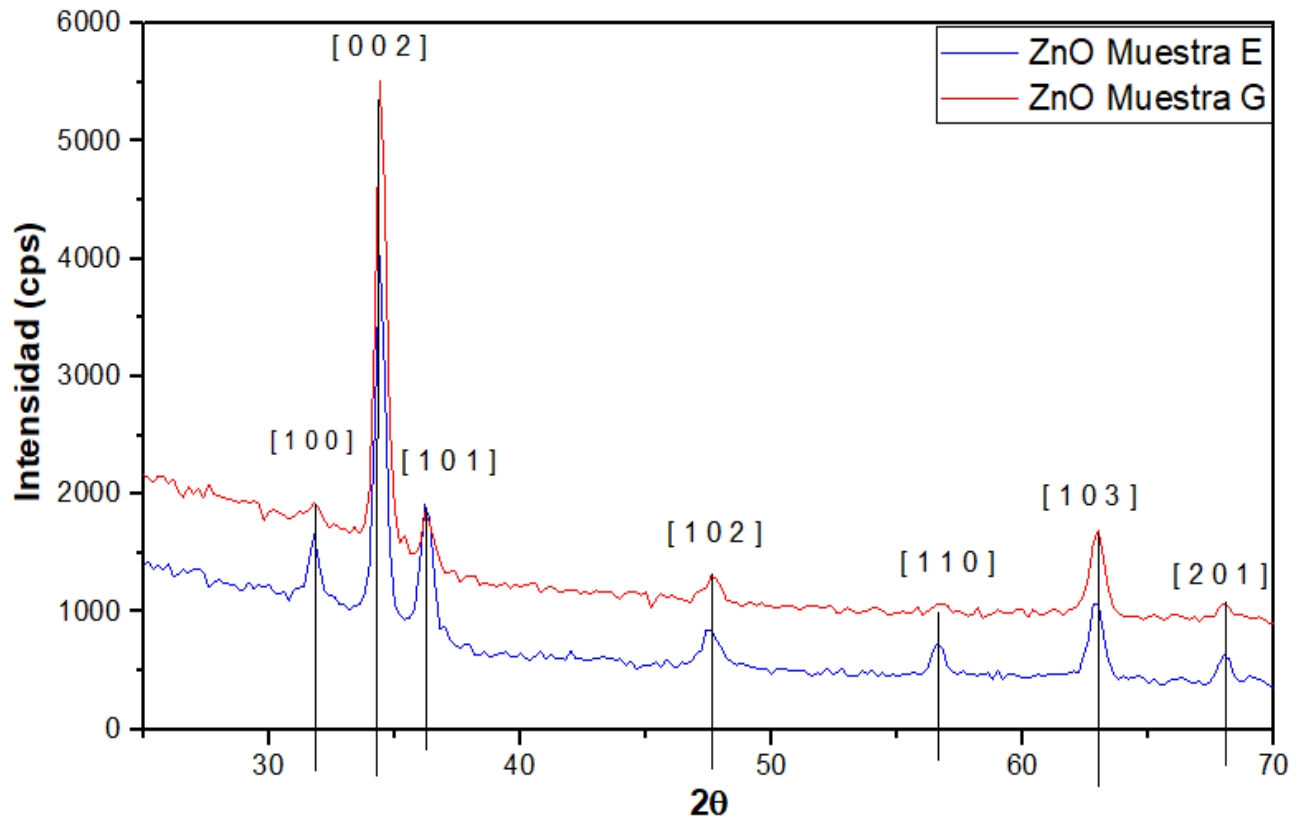


Figura 35. Patrón de DRX para la muestra E y G [16], [17].

4.2.2 Resultados de XPS de ZnO.

Antes de iniciar el análisis de XPS se realizó una limpieza con iones de argón sobre la superficie de la muestra con el propósito de eliminar cualquier posible contaminación del medioambiente. Los resultados de las mediciones fueron analizados en el software X Spectral Data Processor (SDP) v4.1. instalado en el equipo de medición y posteriormente graficados en OriginPro 2016.

La figura 36 muestra los resultados de XPS analizados en el para la muestra C y D.

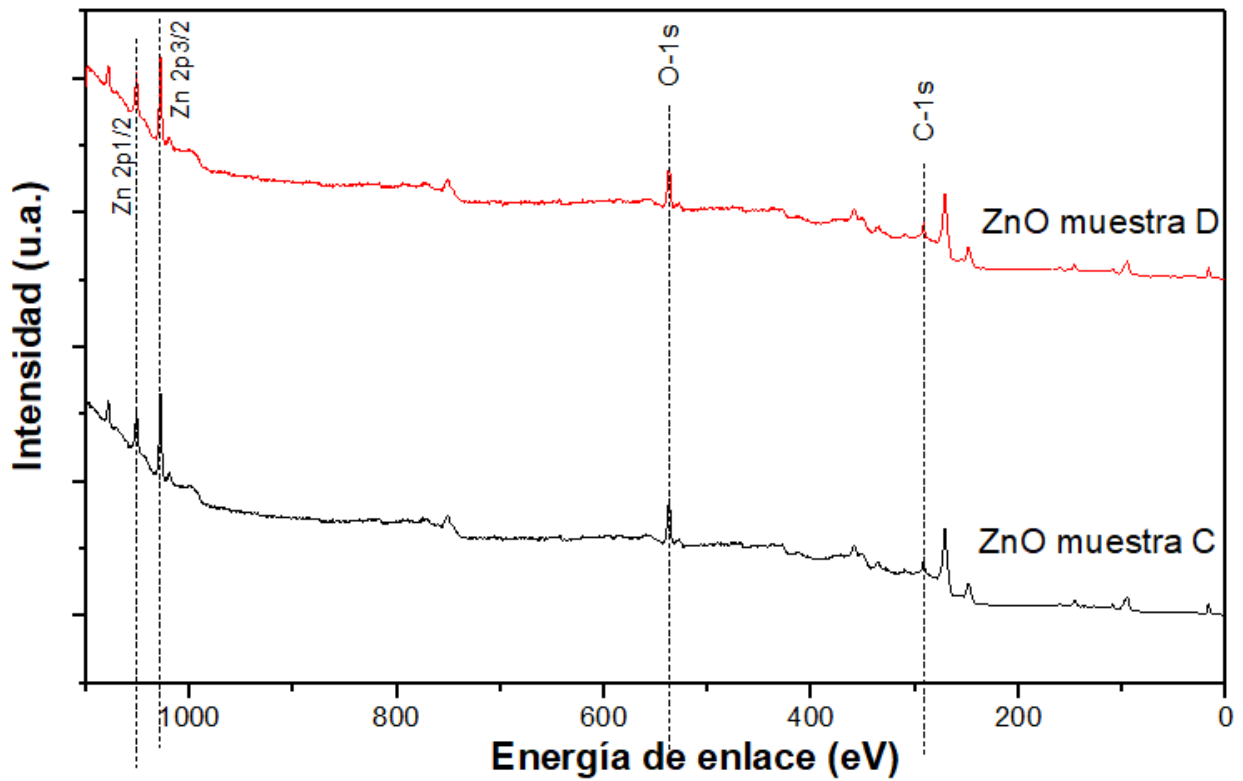


Figura 36. Resultado de XPS para la muestra C y D.

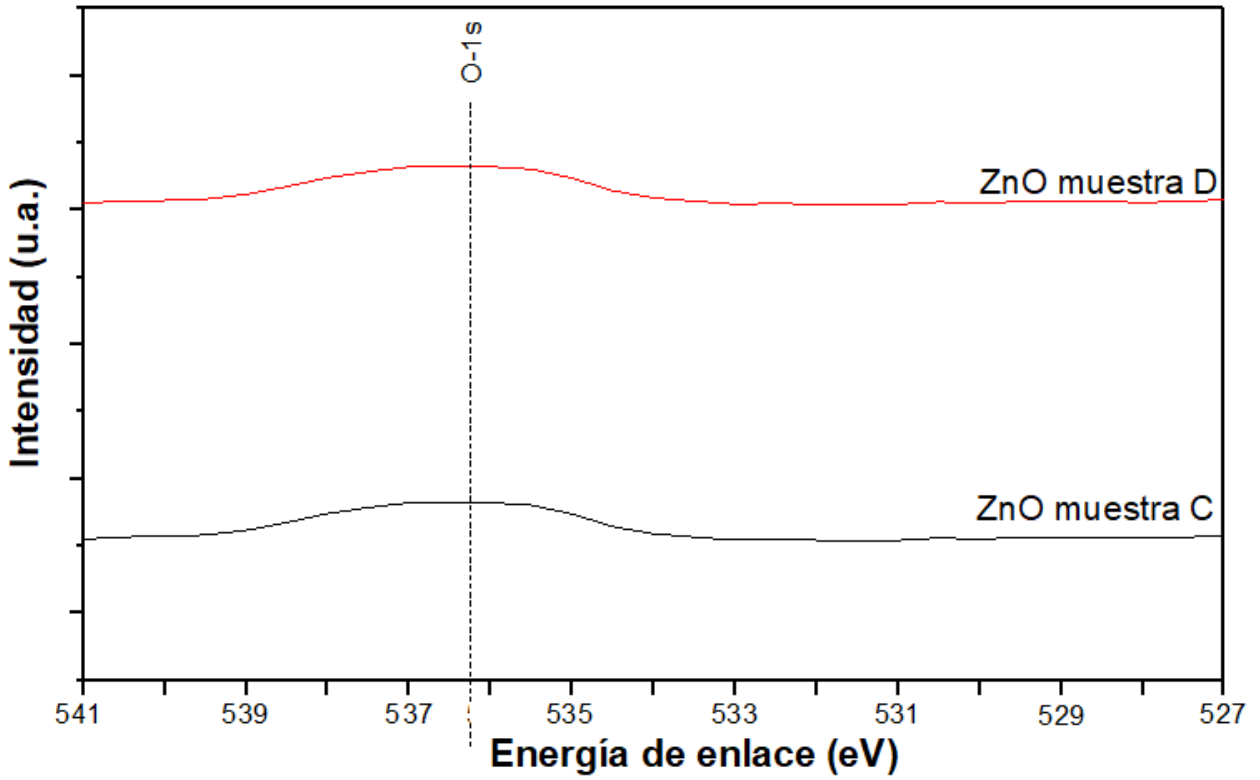


Figura 37. Ampliación de la posición O 1s para las muestras C y D.

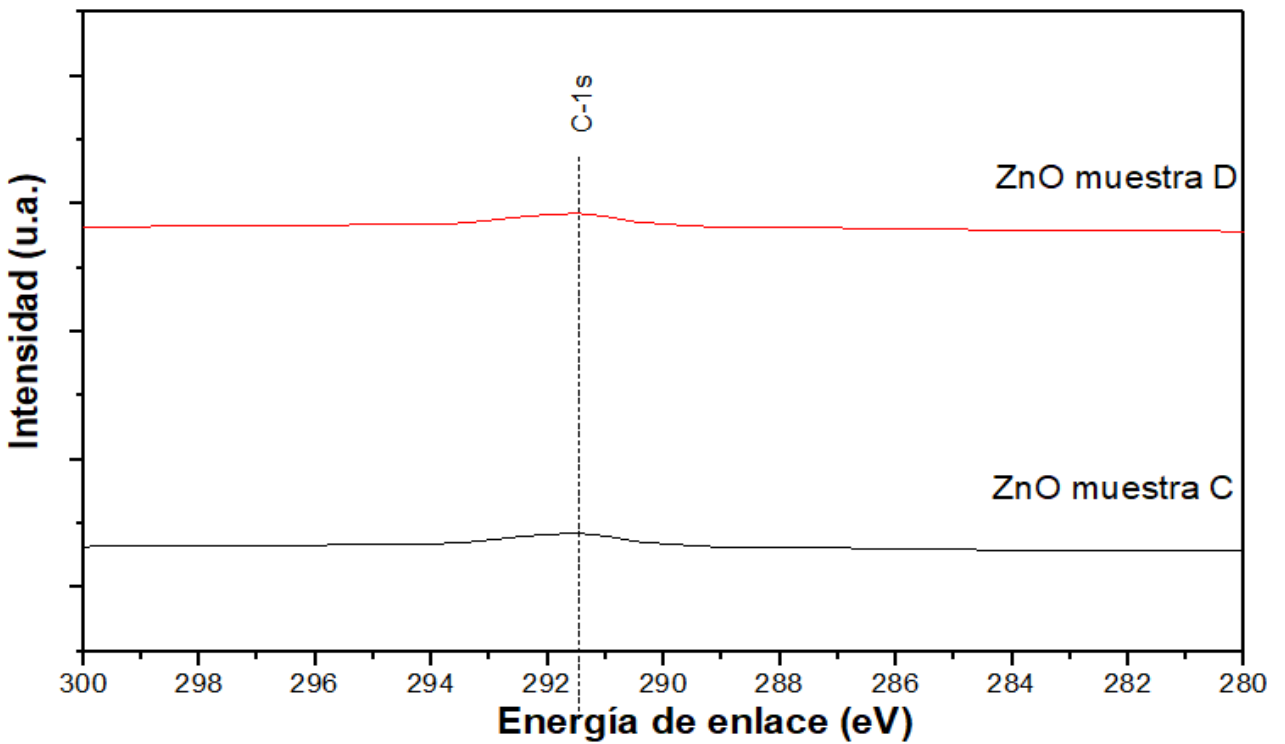


Figura 38. Ampliación de la posición C 1s para las muestras C y D.

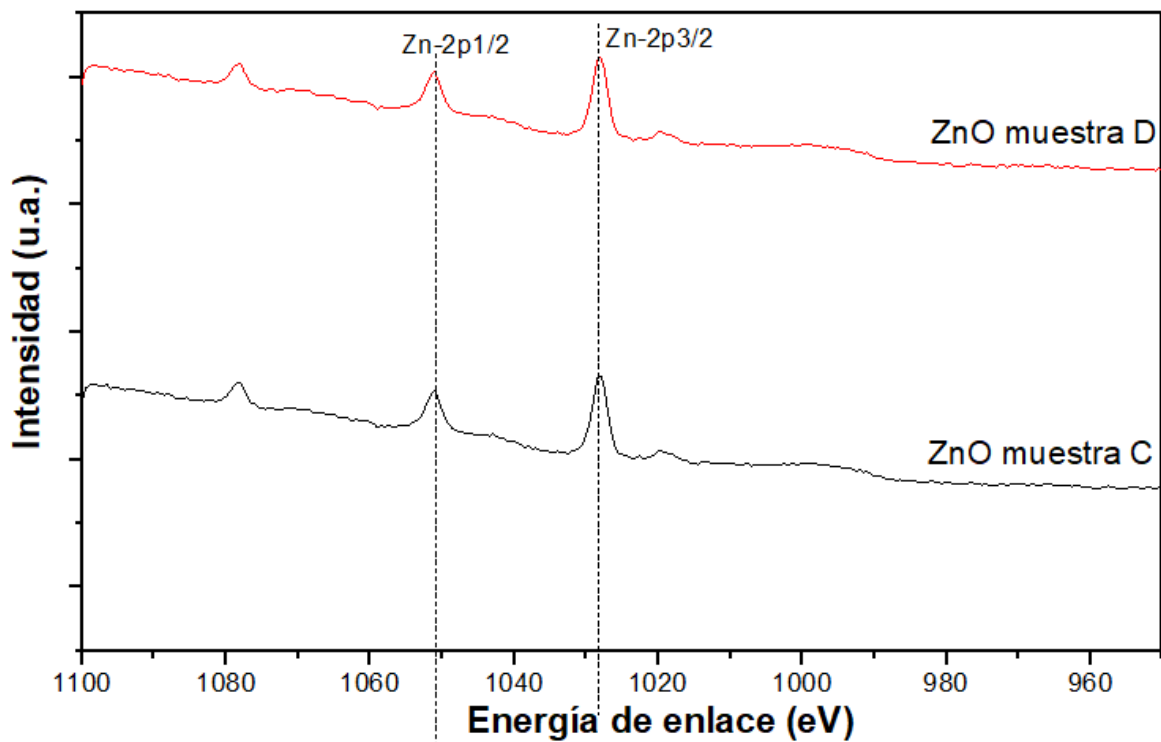


Figura 39. Ampliación de la posición $Zn\ 2p_{1/2}$, $Zn\ 2p_{3/2}$ para las muestras C y D.

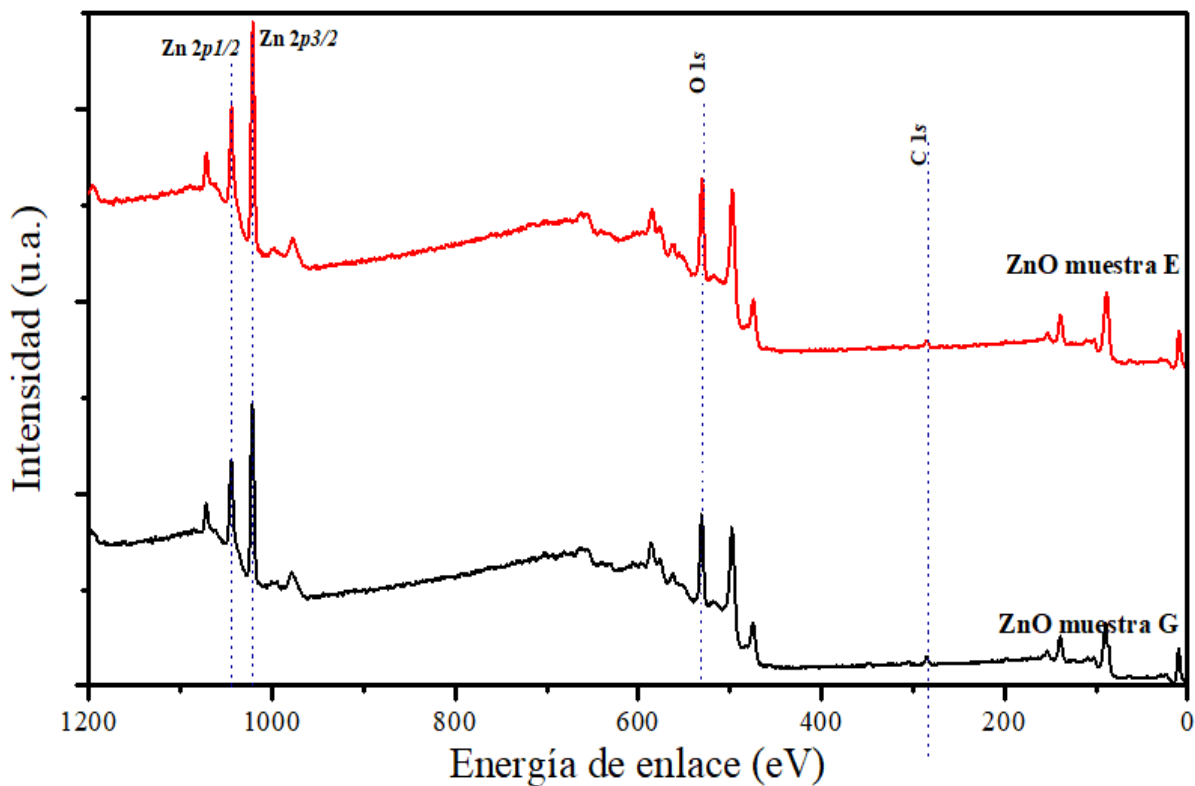


Figura 40. Resultado de XPS para la muestra G.

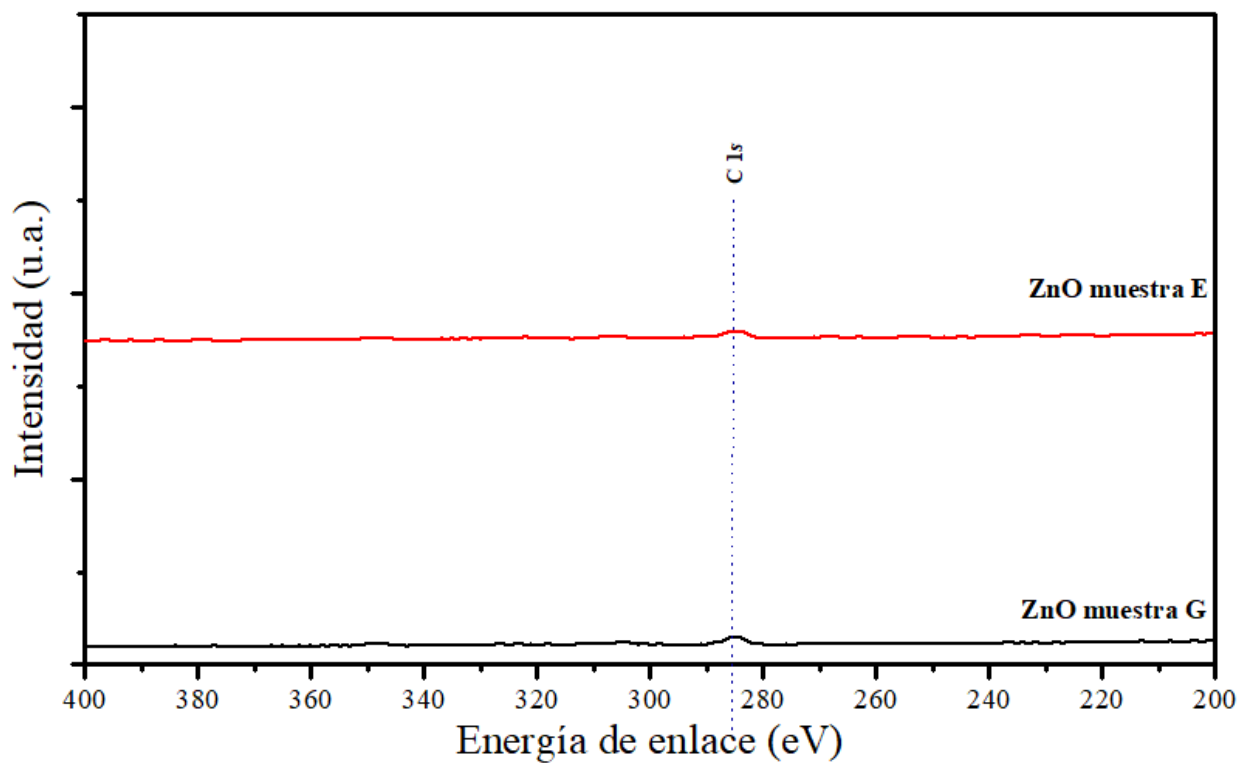


Figura 41. Ampliación para la posición C 1 s de las muestras E y G.

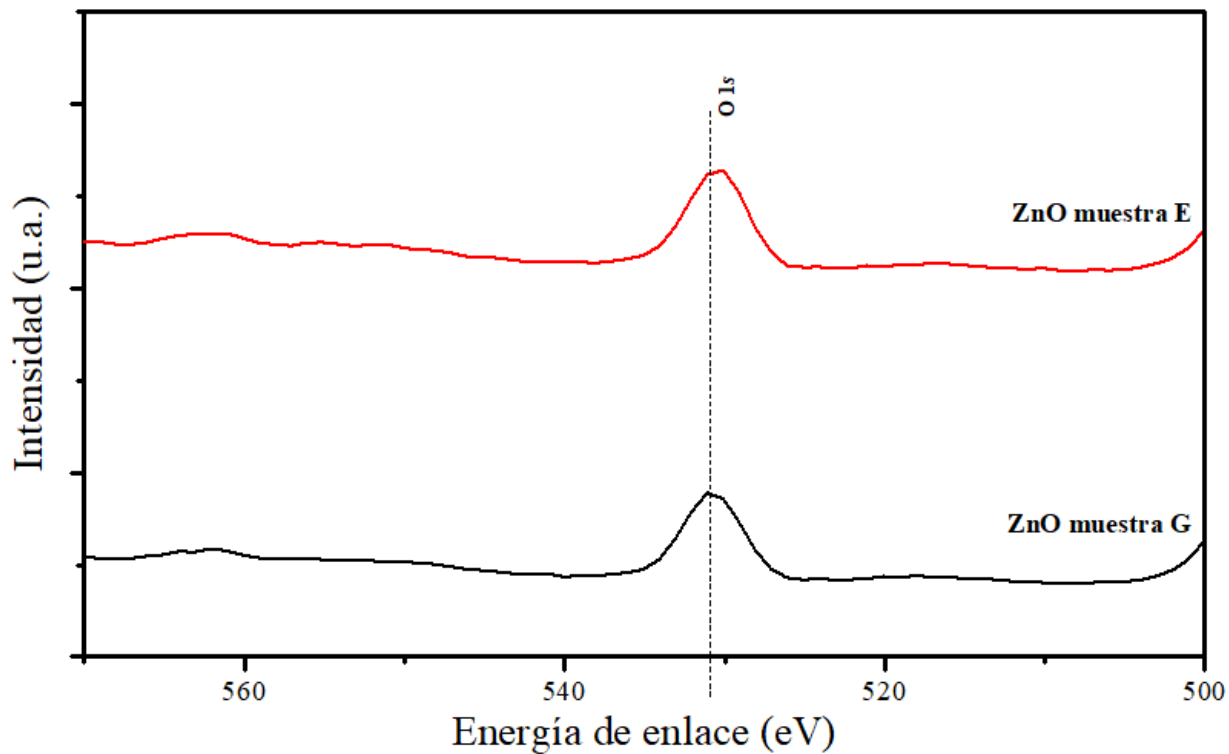


Figura 42. Ampliación para la posición O 1 s de las muestras E y G.

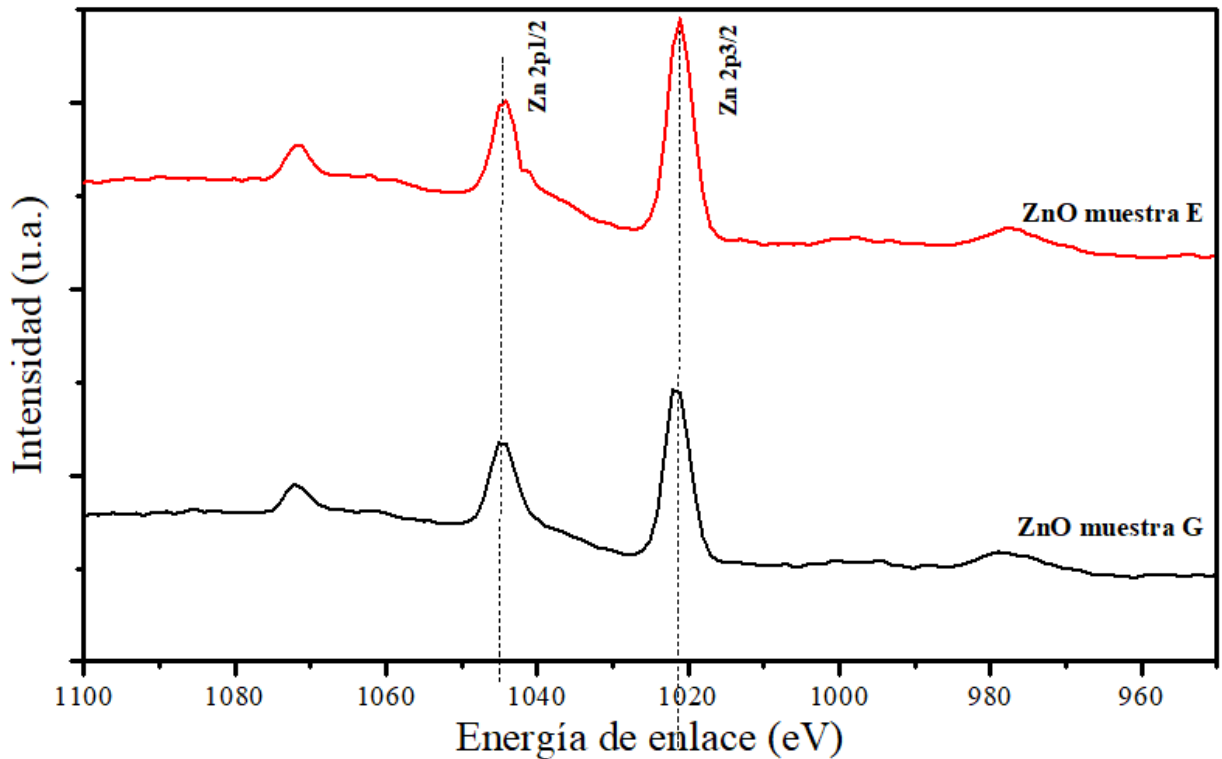


Figura 43. Ampliación de las posiciones $Zn\ 2p_{1/2}$, $Zn\ 2p_{3/2}$ para las muestras E y G. La espectroscopía por foto electrones de rayos X muestra como la intensidad de los picos correspondientes a los diferentes porcentajes atómicos de las muestras se recorren a lo largo del eje de energía. Los niveles energéticos encontrados por XPS para el zinc (Zn) y el oxígeno (O) fueron $2p_{1/2}$ y $2p_{3/2}$ respectivamente. Todas las energías de enlace fueron calibradas usando como referencia al carbono 1s. Las energías de uniones fueron tomadas a partir del centro del pico obtenido por un ajuste Gaussiano-Lorentziano.

4.2.3 Resultado de transmitancia de ZnO.

La figura 44 muestra la transmitancia para las películas que han recibido tratamiento térmico. Los valores de transmitancia observados están por encima del 80% lo que garantiza que las películas de ZnO obtenidas pueden ser utilizadas como películas delgadas transparentes. El valor más elevado de transmitancia se obtuvo para la muestra G mientras el más bajo se obtuvo para la muestra D. este resultado es coherente con lo que está reportado en la bibliografía pues las películas con más espesor tienden a tener valores de transmitancia más bajos. Al realizarse las mediciones de transmitancia de las

películas sobre sustrato de vidrio no fue posible realizar las aproximaciones debidas para estimar el valor de la energía de la banda prohibida.

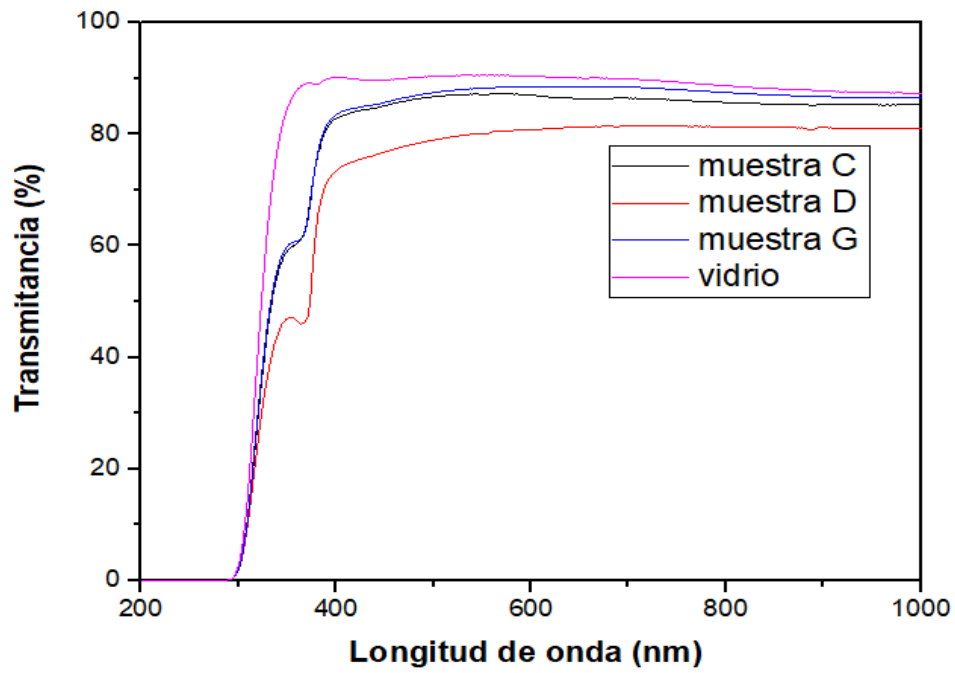


Figura 44. % de transmitancia para las muestras con tratamiento térmico.

4.3 Resultados eléctricos.

Para realizar las mediciones eléctricas de los dispositivos fabricados se empleó el equipo marca Keithley modelo 4200A-SCS. Este sistema permite realizar diferentes mediciones sin tener que modificar las conexiones físicas. Este equipo cuenta con un porta-muestras y tres micro manipuladores que facilitan la correcta conexión para medir los dispositivos, en nuestro caso los TFTs. Con el objetivo de agilizar el proceso de medición se crea un proyecto dentro del cual se establecen los parámetros que se requieren medir y se configura el equipo para la realización de cada una de las mediciones. De esta forma solo se requiere cambiar de dispositivo y garantizar la correcta colocación de las puntas para realizar las mediciones.

Los mejores resultados de las mediciones realizadas se obtuvieron para los dispositivos presentados en la tabla 10.

| Transistor | Largo de canal | Tiempo de depósito de Al_2O_3 | Temperatura de recocido | Muestra de ZnO |
|------------|------------------|---|-------------------------|----------------|
| 1 | 10 μm | 60 min | 550 grados | G |
| 2 | 20 μm | 60 min | 550 grados | G |
| 3 | 20 μm | 60 min | 550 grados | H |

Tabla 10. Característica de las películas medidas.

Transistor 1:

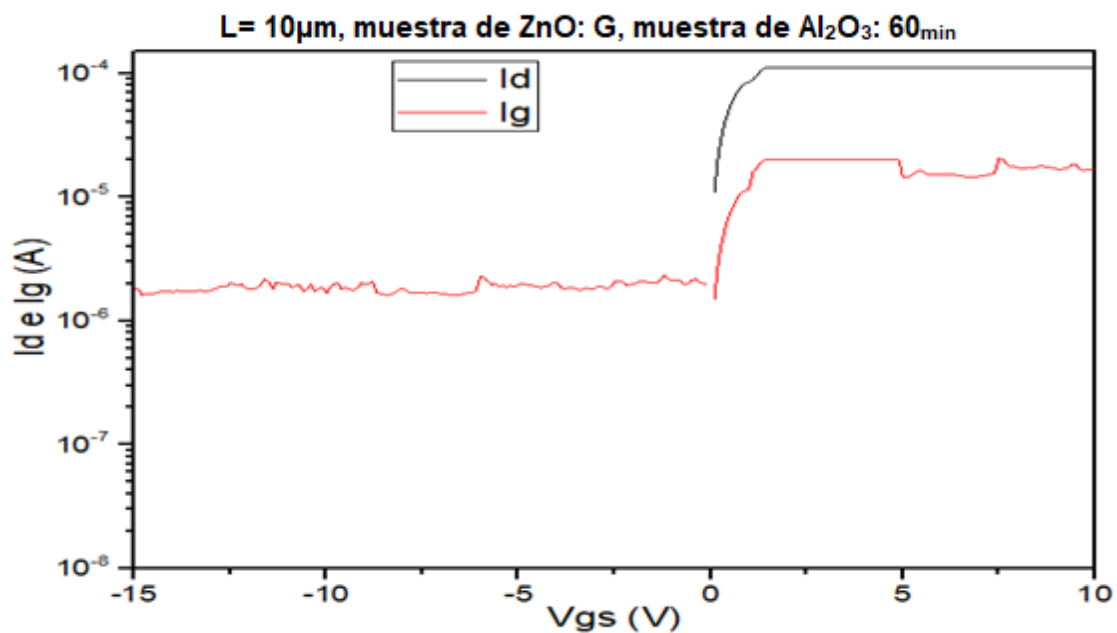


Figura 45. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala logarítmica.

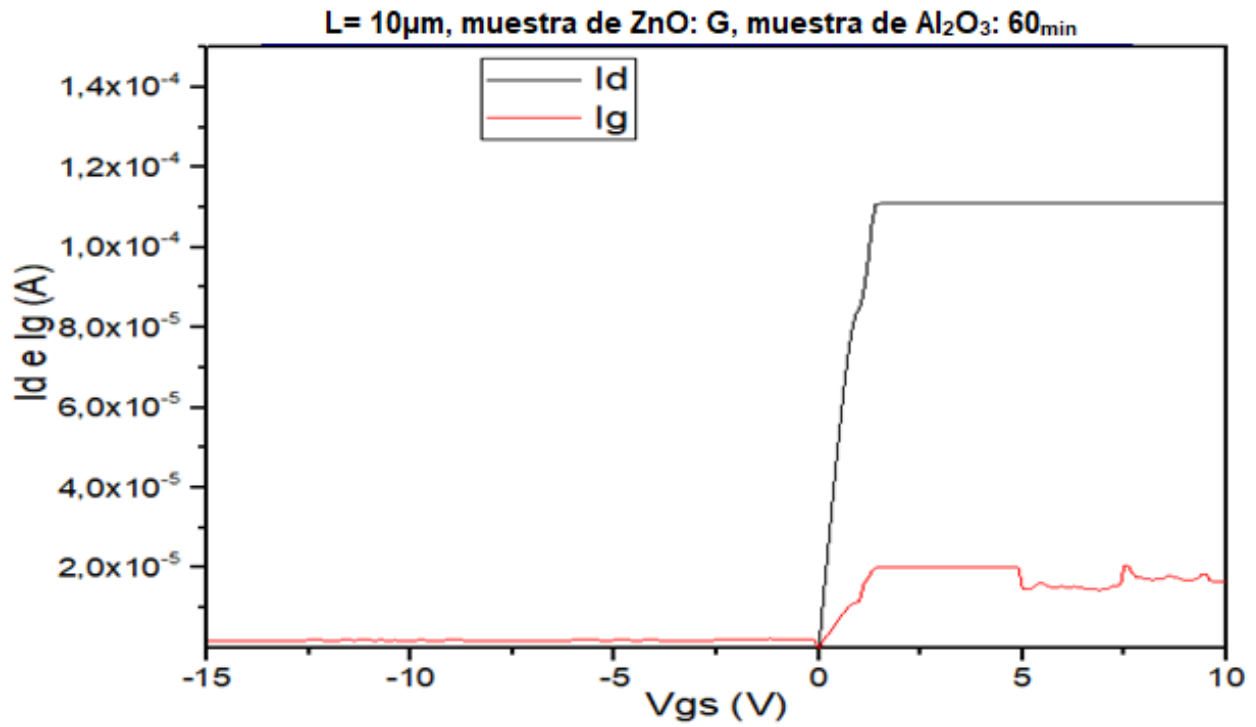


Figura 46. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala lineal.

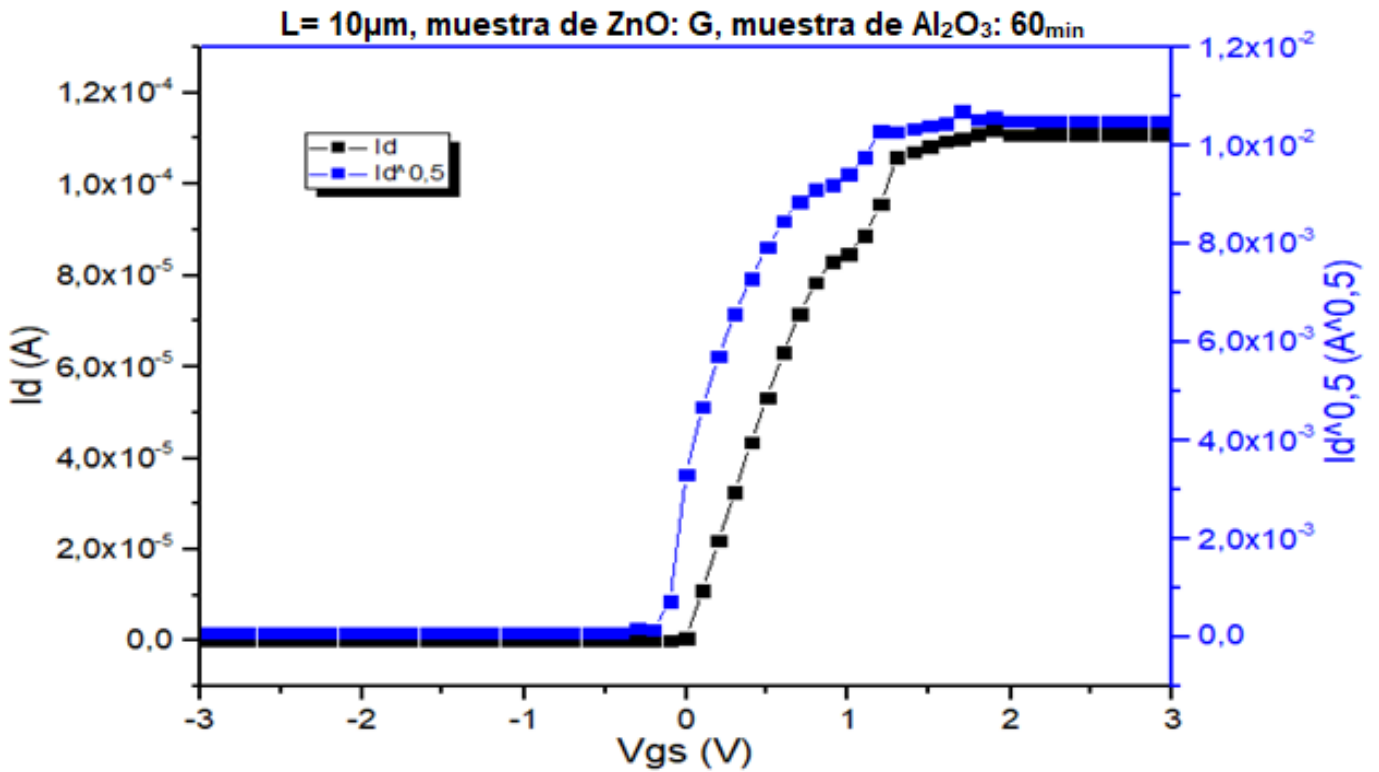


Figura 47. I_d e $I_d^{0,5}$ v/s V_{gs} .

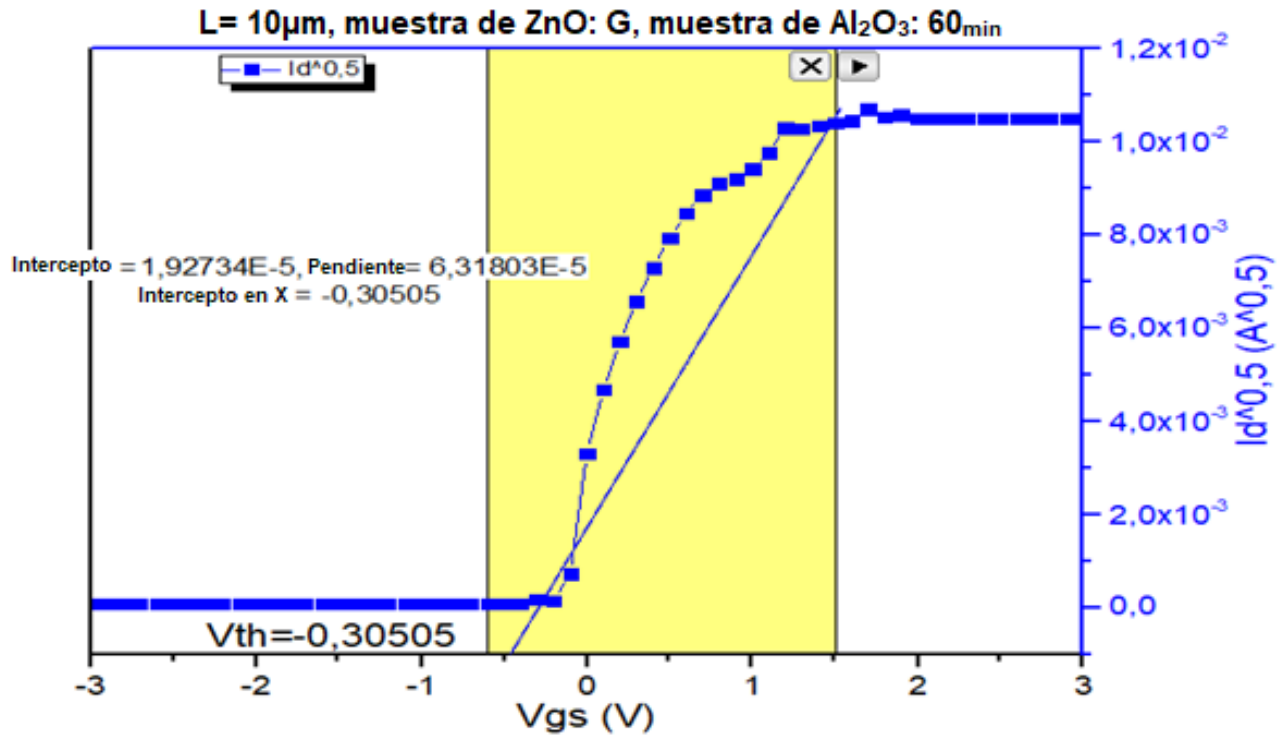


Figura 48. Voltage umbral para transistor con L= 10 μ m, muestra: G de ZnO, y película de óxido de aluminio con 60 minutos de tiempo de depósito.

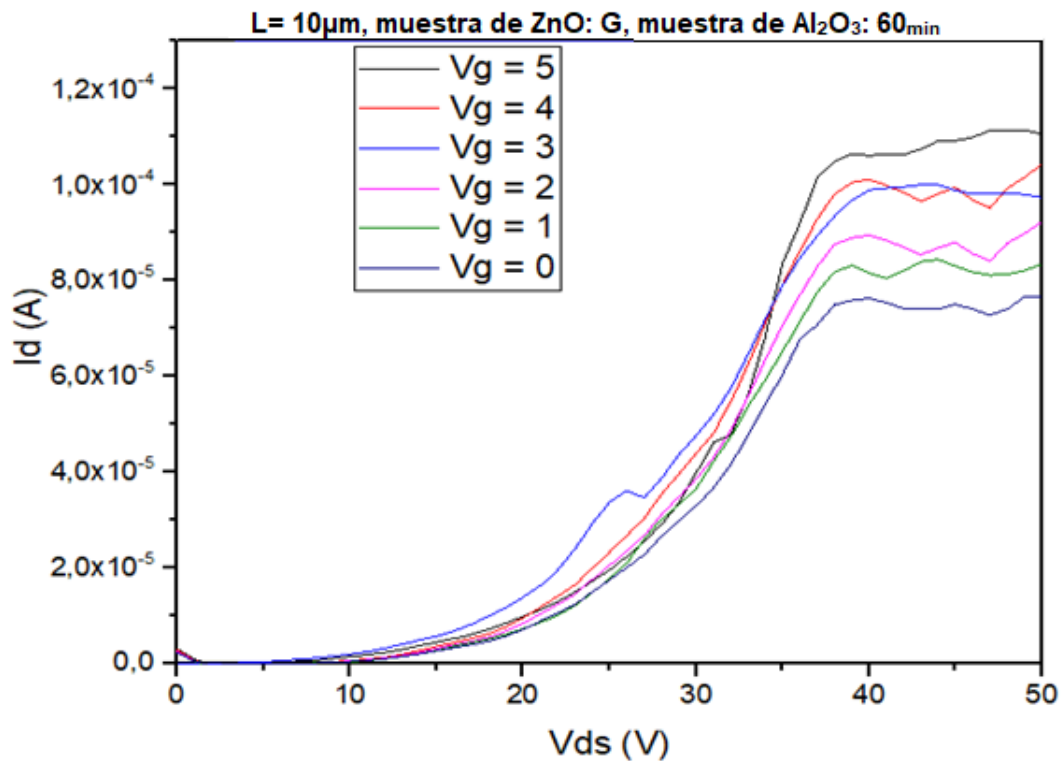


Figura 49. Id v/s Vds.

Transistor 2:

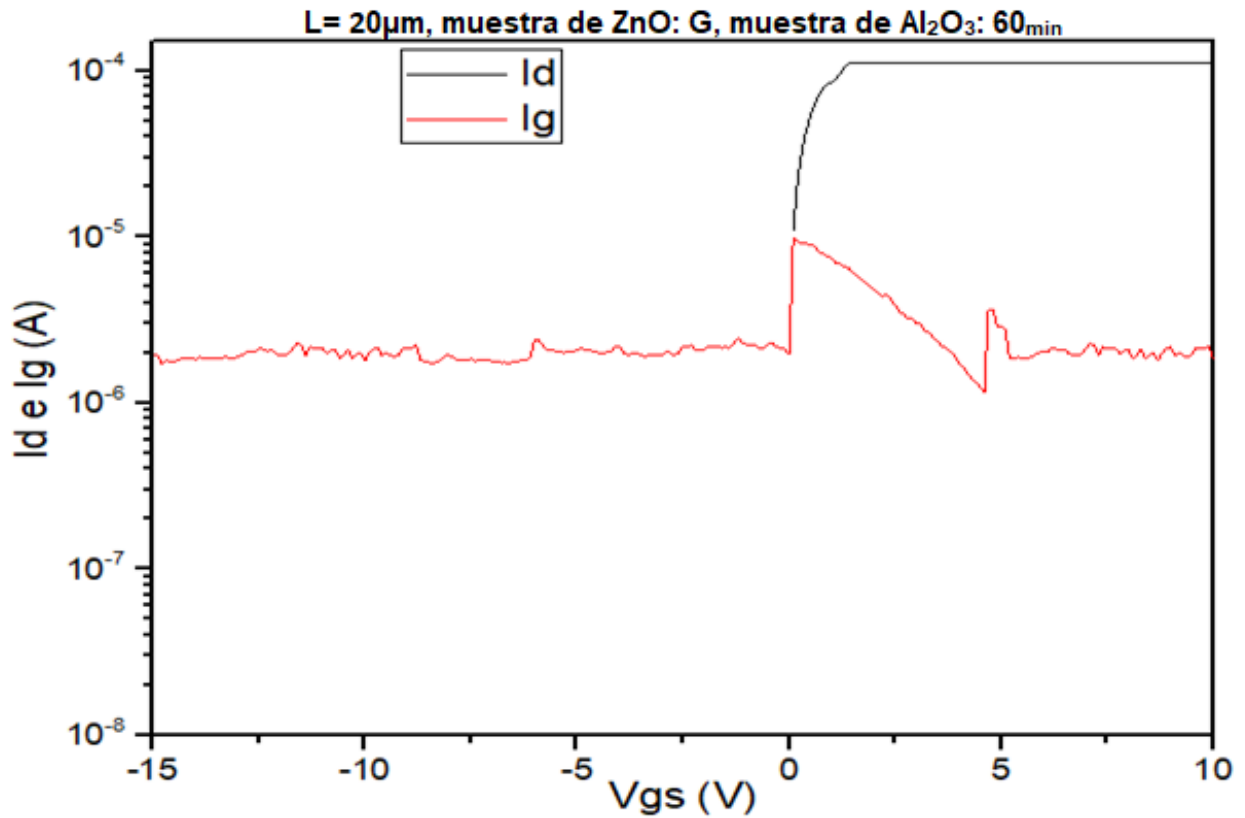


Figura 50. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala logarítmica.

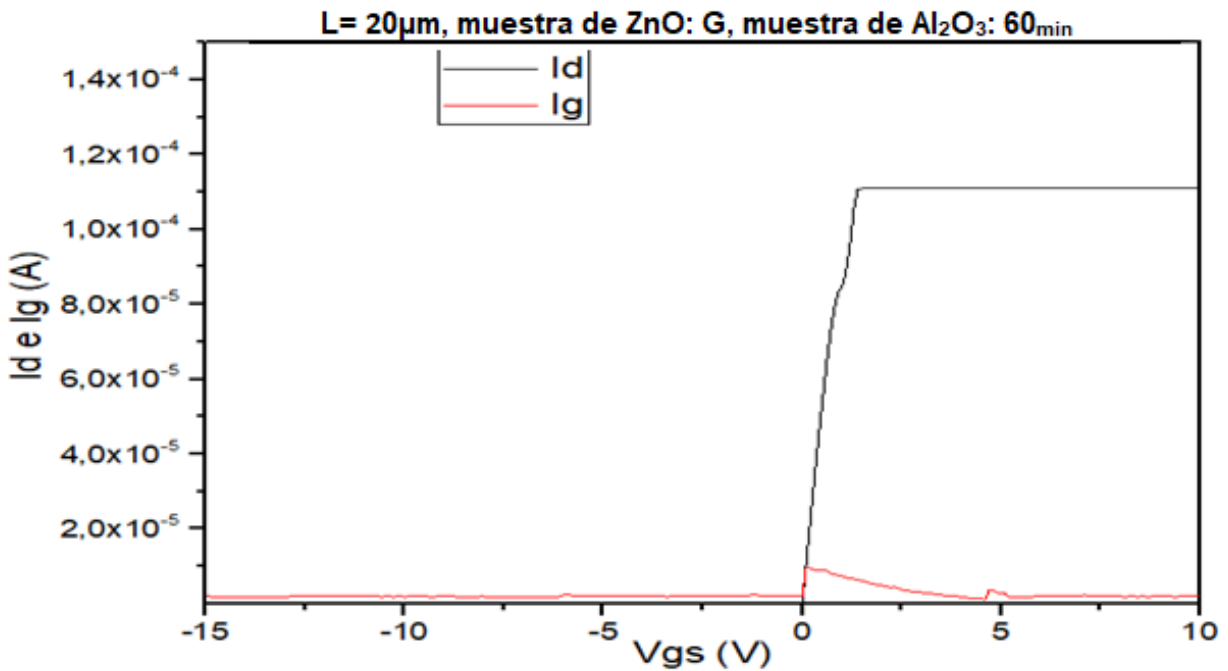


Figura 51. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala lineal.

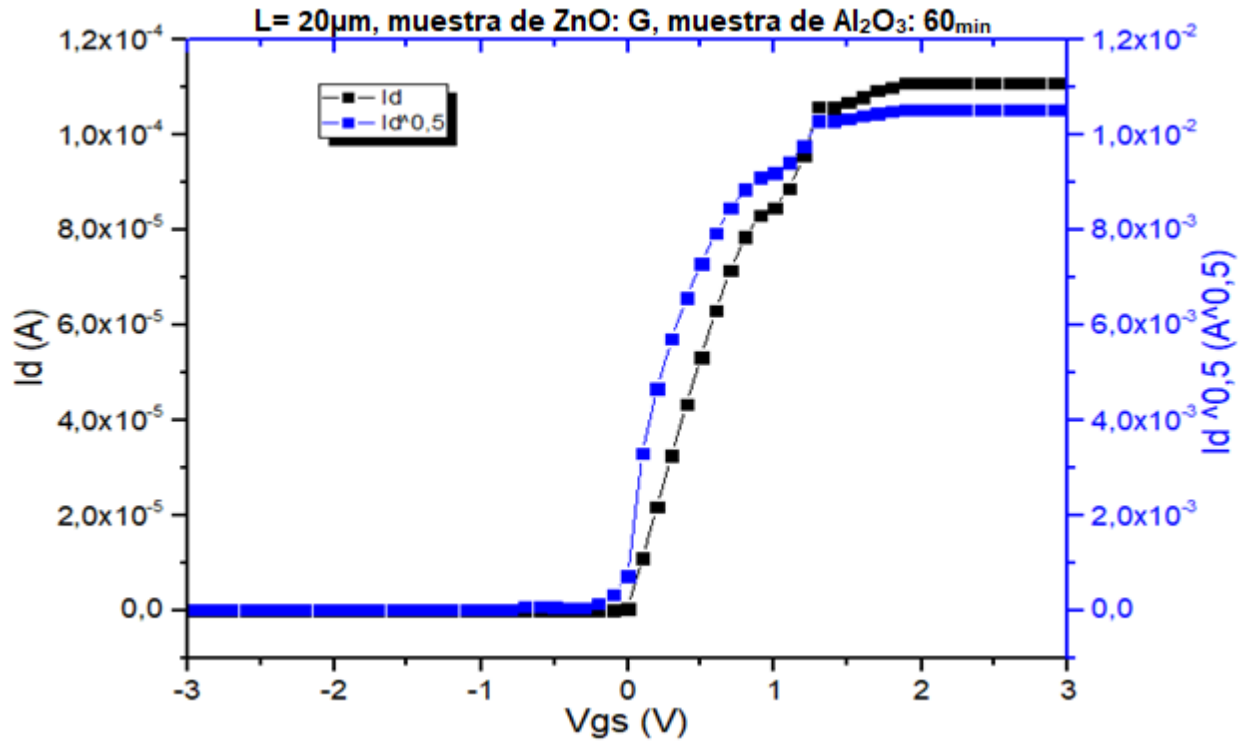


Figura 52. Id e Id ^0.5 v/s Vgs.

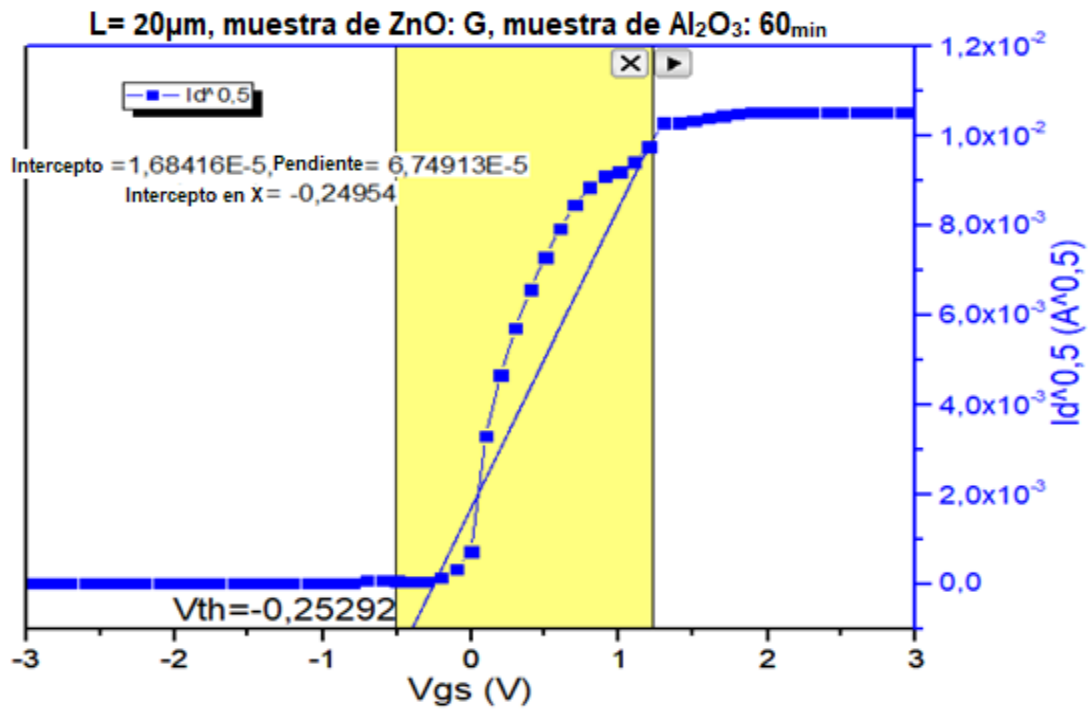


Figura 53. Voltage umbral para transistor con L= 20µm, muestra: G de ZnO, y película de óxido de aluminio con 60 minutos de tiempo de depósito.

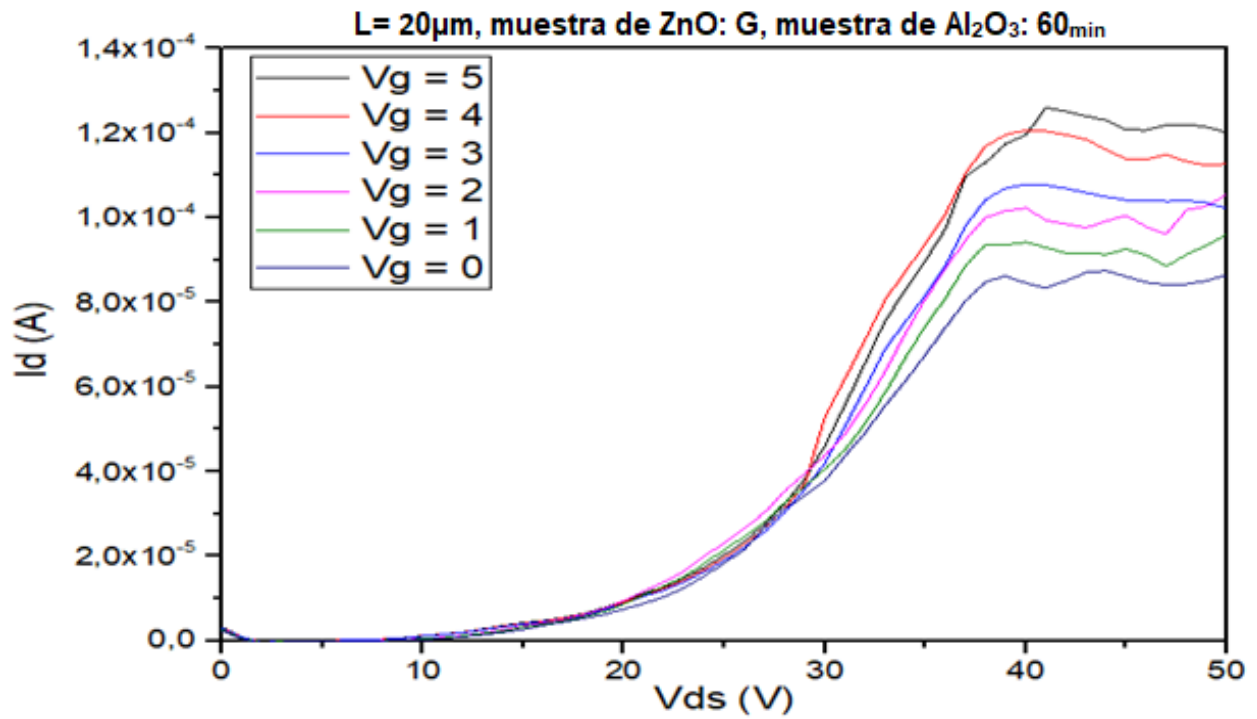


Figura 54. I_d v/s V_{ds} .

Transistor 3:

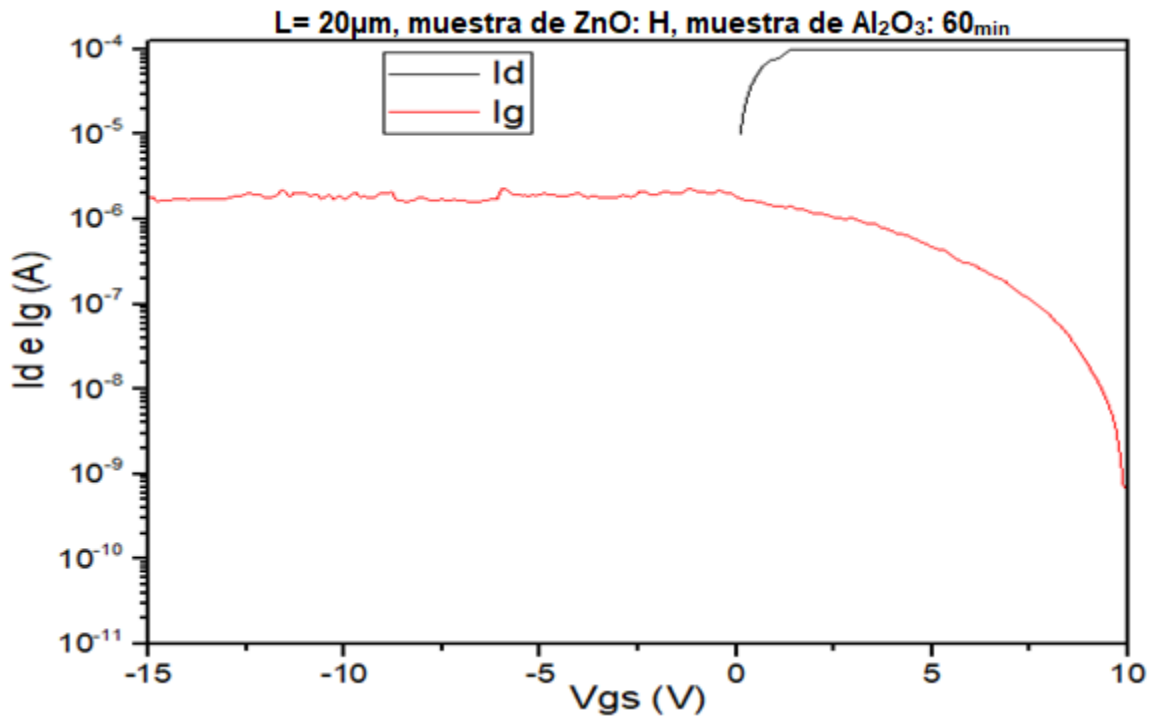


Figura 55. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala logarítmica.

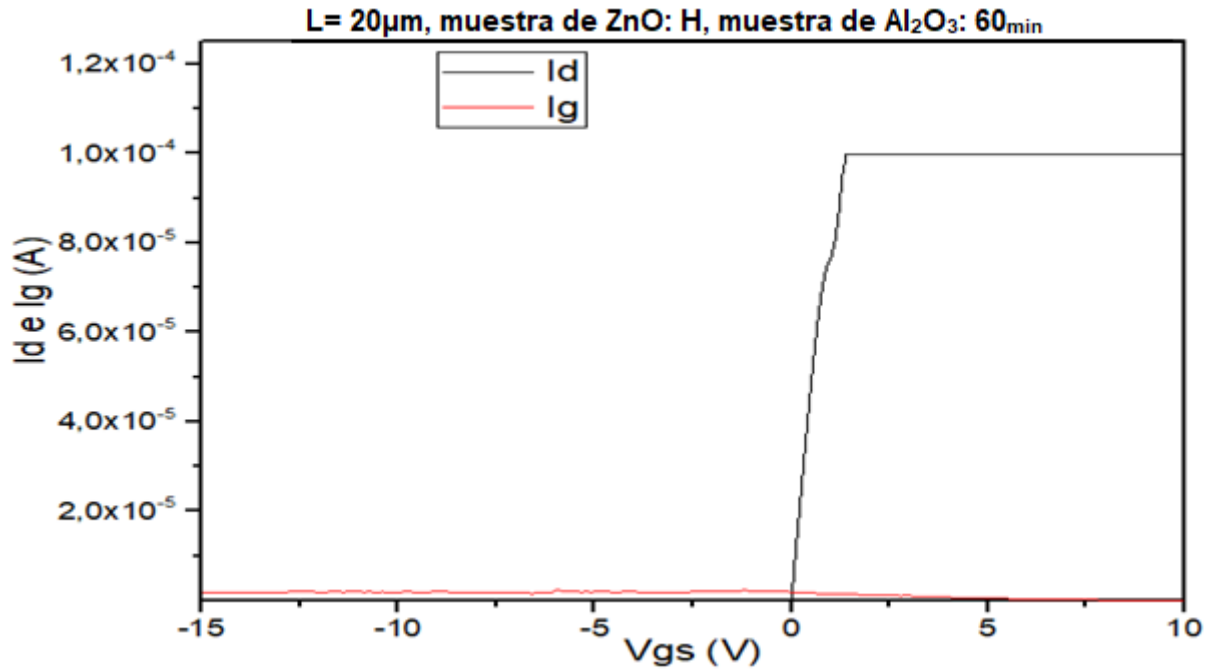


Figura 56. Corrientes I_d e I_g en función de V_{gs} a escala lineal.

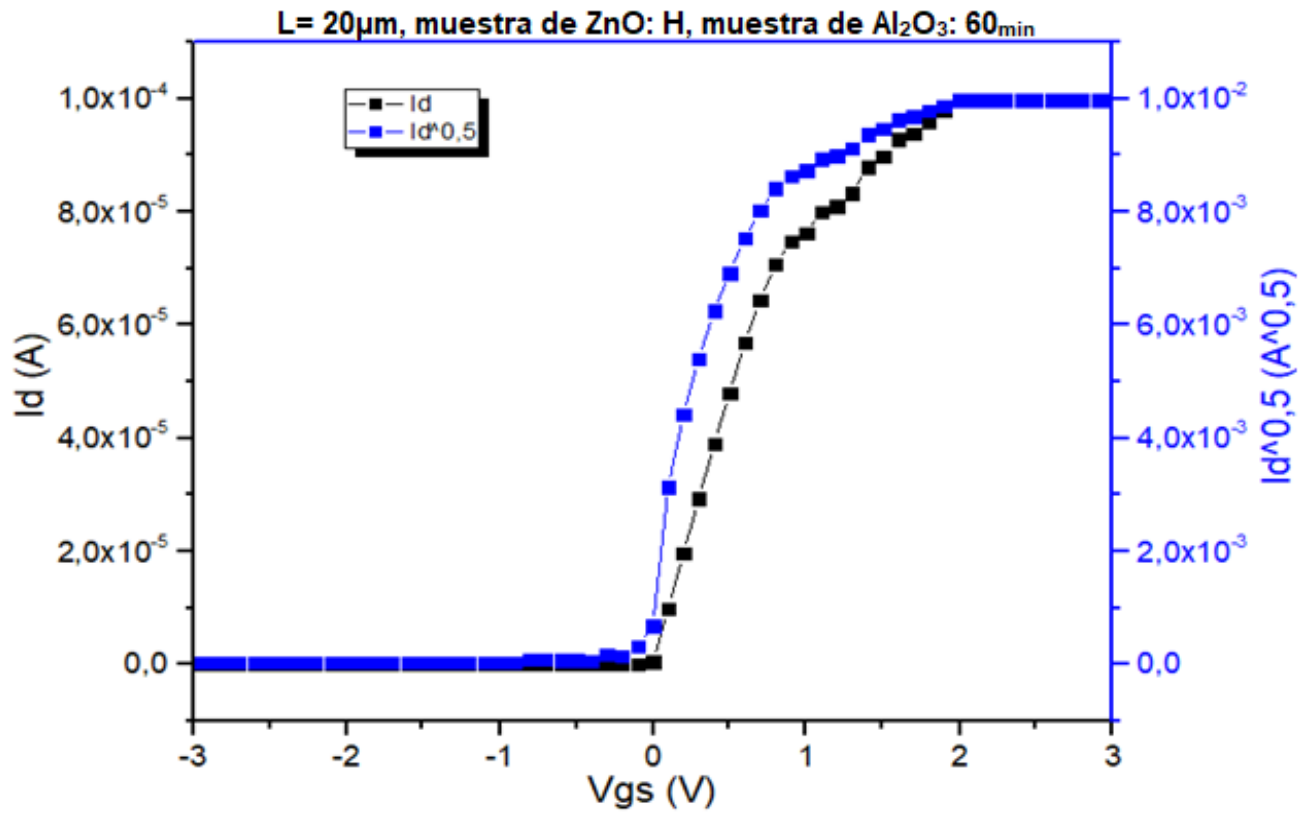


Figura 57. I_d e $I_d^{0.5}$ v/s V_{gs} .

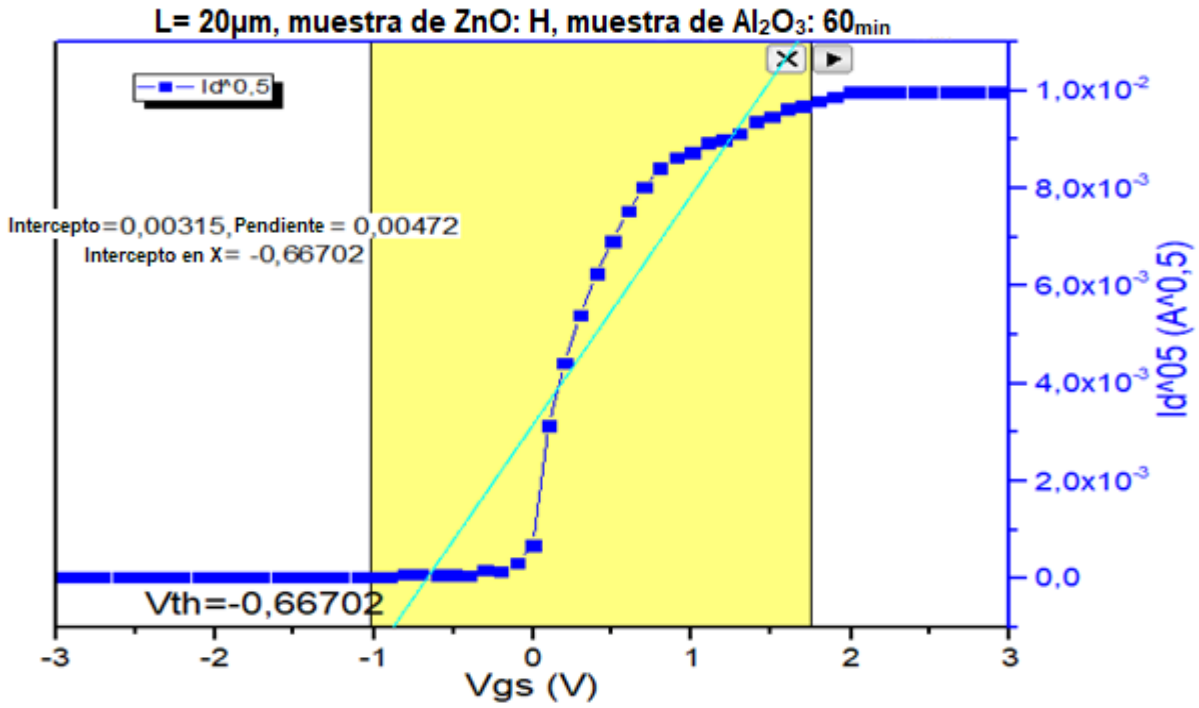


Figura 58. Voltage umbral para transistor con L= 20 μ m, muestra: H de ZnO, y película de óxido de aluminio con 60 minutos de tiempo de depósito.

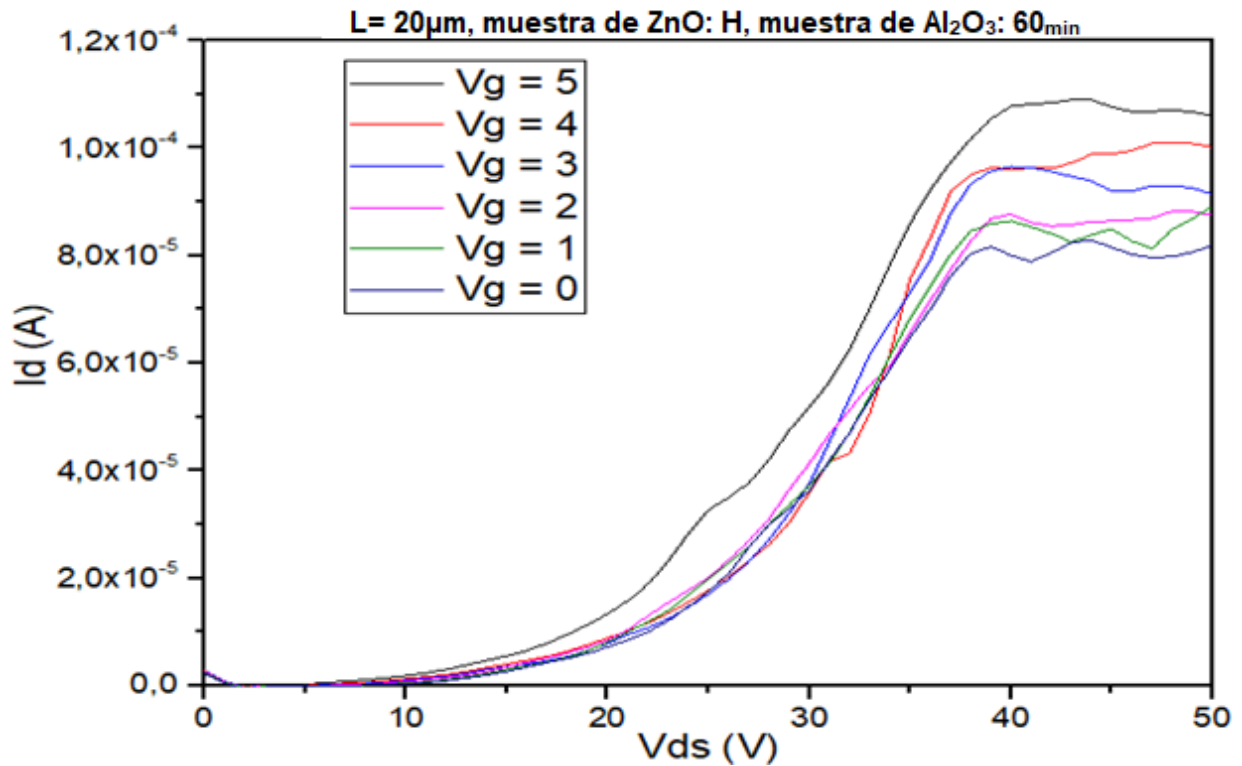


Figura 59. Id v/s Vds.

Como se puede apreciar en las figuras: 45, 50 y 55, los valores de corriente de compuerta son cerca de dos órdenes inferior a la corriente de drenaje después de que se activa el transistor, esto indica que la película dieléctrica está cumpliendo su función y que los transistores no se encuentran en corte. Además, se puede apreciar que durante la transición entre no conducción y conducción del transistor ocurre una pequeña variación en la corriente de compuerta. Es evidente que para el caso del transistor con una longitud de canal de $10\mu\text{m}$ la corriente de compuerta se eleva más que en los otros casos esto puede ser por proximidad de los contactos donde se están realizando las mediciones.

Para los casos de los transistores de $20\mu\text{m}$ de longitud de canal se evidencia que en el caso del transistor con 4 capas de ZnO ocurre una mayor variación durante el momento de transición entre no conducción y conducción del transistor, esto se le atribuye a que el transistor con 6 capas de ZnO presenta mayor distancia entre los contactos y la compuerta.

Para determinar los voltajes de activación de cada uno de los transistores se graficó la corriente de drenaje (I_d) y la raíz cuadrada de esta corriente ($I_d^{0.5}$) en función de la tensión compuerta - fuente. Posteriormente se determinó la intercepción con el eje de las ordenadas de la recta tangente a la curva ($I_d^{0.5}$), determinándose así el voltaje de activación (V_{th}) para cada uno de los transistores presentados en la tabla 10.

La Figura 47 muestra las curvas de transferencia para el transistor 1, mientras en la figura 48 podemos observar el intercepto de la pendiente de la raíz cuadrada de la curva de transferencia con el voltaje de compuerta lo que nos permite determinar el valor de tensión de activación para el transistor 1, $V_{th1} = -0.30505 \text{ V}$.

La Figura 52 presenta las curvas de transferencia para el transistor 2 y la 53 el intercepto de la pendiente de la raíz cuadrada de curva de transferencia del transistor 2 con el eje que representa la tensión compuerta fuente obteniéndose el valor $V_{th2} = -0.25292 \text{ V}$

Para el caso del transistor 3 la curva de transferencia y el intercepto de la raíz cuadrada de esta con la tensión compuerta-fuente se observan en las figuras 57 y 58 respectivamente. El valor de tensión de activación para el transistor tres es $V_{th3} = -0.66702 \text{ V}$.

Las curvas características de los transistores (corriente de drenaje v/s tensión drenaje – fuente) presentan resultados no muy distantes, aunque se evidencia que son elevados los valores de V_{ds} necesarios para que se observen en estos dispositivos, mientras las corrientes están entorno a las décimas de mA en los mejores casos. Las figuras 49, 54 y 59 muestran las curvas características obtenidas para los transistores 1, 2 y 3 respectivamente.

Es importante señalar que se realizaron mediciones para transistores de largo de canal de 40 y 80 μm con las otras características iguales a las presentadas en la tabla 10. Dichas mediciones arrojaron que estos dispositivos se ponían en corte en múltiples mediciones. Por lo que solo son presentados como resultados satisfactorios las mediciones en transistores de 10 y 20 μm de largo de canal.

Capítulo 5: Conclusiones

Conclusiones

Se fabricó un transistor de película delgada (TFT) semi transparente con estructura Botton-gate top-contact. El sustrato y el contacto de compuerta se adquirieron comercialmente (FTO sobre vidrio). Se sintetizó óxido de aluminio (Al_2O_3) por la técnica de baño químico y se empleó como dieléctrico de compuerta. Las películas obtenidas se caracterizaron morfológica, estructural y eléctricamente. Se sintetizó óxido de zinc ZnO empleando la técnica de sol-gel obteniéndose películas delgadas con adecuadas características para emplearlas como capa activa en TFTs. Los contactos superiores de oro (Au), se obtuvieron utilizando la técnica de sputtering y una mascarilla con los patrones geométricos deseados. Se simularon diferentes transistores con el software COMSOL MULTIPHYSICS y se comprobó el funcionamiento del dispositivo. Las películas y los dispositivos que arrojaron mejores características fueron seleccionados para su fabricación. Se realizaron mediciones eléctricas de los dispositivos fabricados con el equipo marca Keithley modelo 4200A-SCS. Las mediciones demuestran que las corrientes de drenaje, aunque no son muy elevadas en cada uno de los transistores medidos son superiores a las corrientes de compuerta en casi tres órdenes de magnitud, en los mejores casos, lo que demuestra que nuestros transistores no se encuentran en corte. Las curvas transferenciales y características obtenidas concuerdan con lo esperado.

La caracterización eléctrica permite concluir que el Al_2O_3 sintetizado por la técnica de baño químico puede ser empleado como dieléctrico de compuerta en transistores de películas delgadas. También puede concluirse que el recocido de las películas de Al_2O_3 y ZnO mejora notablemente las características de las películas fabricadas.

Los transistores obtenidos pueden ser optimizados si se realizan algunas modificaciones como puede ser la determinación de contactos de compuertas individuales y se modifican los parámetros de su geometría como son el largo y el ancho del canal.

Trabajo Futuro

1. Obtener los resultados de Perfilometría, SEM y efecto Hall para cada una de las películas fabricadas.
2. Fabricar dispositivos con patrones geométricos diferentes a los predeterminados por las mascarillas presentes en el Nano-Fab, variar las dimensiones de longitud y ancho del canal.
3. Obtener los resultados de SEM cross-section del dispositivo para obtener los valores de grosor de cada una de las películas.
4. Fabricar dispositivos completamente transparentes, con contactos superiores de FTO.
5. Fabricar dispositivos con la capa de dieléctrico de compuerta sintetizados por otros métodos como son: ALD, sputtering, entre otros y comparar los resultados con los obtenidos en este trabajo.
6. Contaminar el óxido de zinc con manganeso y comparar los resultados de esos transistores con los obtenidos en este trabajo.

Bibliografía

- [1] N. Fernanda and S. González, "Síntesis de películas delgadas y nanohilos de ZnO para la fabricación de un fotodiodo Tesis.," 2015.
- [2] P. A. Rodnyi and I. V. Khodyuk, "Optical and luminescence properties of zinc oxide (Review)," *Opt. Spectrosc. (English Transl. Opt. i Spektrosk.*, vol. 111, no. 5, pp. 776–785, 2011.
- [3] A. Manuscript, "Materials Chemistry A," 2019.
- [4] A. Zekry, "The bipolar transistors, theory and basic applications," no. June, 2014.
- [5] E. Auger, "Interacción de los electrones con la materia," *Serv. técnicos Investig. Univ. Alicante.*, pp. 1–11, 2012.
- [6] M. Tosa, "Surface Profilometer," pp. 679–682, 2018.
- [7] T. Espectroscopía and F. De, "Espectroscopía Fotoelectrónica de rayos X (XPS)."
- [8] E. Fortunato, P. Barquinha, and R. Martins, "Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors : A Review of Recent Advances," 2012.
- [9] D. Dosev, "Fabrication , Characterisation and Modelling of Nanocrystalline Silicon Thin-Film Transistors Obtained by Hot-Wire Chemical Vapour Deposition," pp. 1–3, 2003.
- [10] G. Suárez-campos, D. Cabrera-german, A. O. Castelo-gonzález, and C. Avila-avendano, "Applied Surface Science Characterization of aluminum oxide thin films obtained by chemical solution deposition and annealing for metal – insulator – metal dielectric capacitor applications," vol. 513, no. November 2019, 2020.
- [11] G. Suarez, "No Title."
- [12] G. Information, "Analysis Results MUESTRA A," pp. 1–21, 2020.
- [13] G. Information, "Analysis Results MUESTRA C," pp. 1–21, 2020.
- [14] G. Information, "Analysis Results MUESTRA B," pp. 1–21, 2020.
- [15] G. Information, "Analysis Results MUESTRA D," pp. 1–21, 2020.
- [16] G. Information, "Analysis Results MUESTRA E," 2019.
- [17] G. Information, "Analysis Results," 2019.
- [18] A. Sharma, "Performance Evaluation of Thin Film Transistors : History , Technology Development and Comparison.," no. February 2014, 2017.
- [19] D. Wikipedia, "Contenido 1," no. 1930, pp. 1–7, 2011.
- [20] Y. Yamamoto, "Technological Innovation of Thin-Film Transistors : Technology Development , History , and Future," 2012.
- [21] F. Najmabadi, "Bipolar Junction Transistor (BJT) A BJT consists of three regions NPN transistor," 2012.
- [22] "3. Evolución de la metodología de diseño y la tecnología."
- [23] J. M. Albella and J. M. Martínez--Duart, "8 Transistores de Efecto Campo.pdf," *Fundamentos de electrónica física y microelectrónica.* pp. 225–256, 1996.
- [24] E. T. Fortunato *et al.*, "Recent advances in ZnO transparent thin film transistors," vol. 487, pp. 205–211, 2005.
- [25] S. Kang, R. Nandi, J. Sim, J. Jo, U. Chatterjee, and C. Lee, "Characteristics of an oxide / metal / oxide transparent conducting electrode fabricated with an intermediate Cu – Mo metal composite layer for application in efficient CIGS solar cell," *RSC Adv.*, vol. 7, pp. 48113–48119, 2017.
- [26] "Películas delgadas de óxidos conductores transparentes formados de (CdO) x (

- ZnO) 1-x,” vol. 129, p. 2010, 2010.
- [27] I. Garnica and P. S. A. D, “Caracterización de películas delgadas de SnO₂ obtenidas sobre vidrio por aspersion pirolítica intermitente para celdas solares tipo Grätzel,” vol. 26, no. 2, pp. 36–41, 2013.
- [28] J. Robertson, “PHYSICAL JOURNAL High dielectric constant oxides,” vol. 291, pp. 265–291, 2004.
- [29] LUIS ALBERTO LÓPEZ PAVÓN TESIS, “SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOPARTÍCULAS Y PELÍCULAS DELGADAS POR MÉTODOS FÍSICOS A PARTIR DE ALEACIONES CON EFECTO DE MEMORIA DE FORMA,” 2011.
- [30] T. Brinkmann, G. G. Santonja, F. Schorcht, and S. Roudier, *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Chlor-alkali*. 2014.
- [31] C. V. Deposition and M. B. Epitaxy, “• Heating a source material under vacuum until it,” no. Cvd.
- [32] G. He, X. Wang, M. Oshima, and Y. Shimogaki, “Metalorganic Chemical Vapor Deposition of Al₂O₃ Thin Films from Dimethylaluminumhydride and O₂,” no. March, 2010.
- [33] M. Y. Seo, E. N. Cho, C. E. Kim, P. Moon, and I. Yun, “Characterization of Al₂O₃ Films grown by Electron Beam Evaporator on Si Substrates,” pp. 3–4.
- [34] “Chapter-4 Alumina Films by Electron Beam Evaporation Technique 4.1,” pp. 83–101.
- [35] “Main properties of Al₂O₃ thin films deposited by magnetron sputtering of an Al₂O₃ ceramic target at different radio-frequency power and argon pressure and their passivation effect on.”
- [36] G. Zeng, X. Hao, S. Ren, L. Feng, and Q. Wang, “Application of ALD-Al₂O₃ in CdS/CdTe Thin-Film Solar Cells,” pp. 1–10, 2019.
- [37] “No Title,” pp. 1–71.
- [38] C. B. Cem. Sevik, “Theoretical study of the insulating oxides and nitrides : SiO₂, GeO₂, Al₂O₃, Si₃N₄, and Ge₃N₄,” pp. 6555–6565, 2007.
- [39] F. S. David. Winarski, “Synthesis of Conductive Sol-Gel ZnO Films and Development of ZnO Printed Electronics,” *Open Access books*.
- [40] T. S. Jeff. Y, “The World of Compound Semiconductors,” pp. 1–191, 2004.
- [41] T. Zaera, *El óxido de zinc: crecimiento cristalino mediante transporte en fase gaseosa y caracterización de propiedades físicas*. 2004.
- [42] J. I. Ramirez, S. Member, and T. N. Jackson, “Trilayer ZnO Thin-Film Transistors With in Situ Al₂O₃,” vol. 34, no. 11, pp. 1400–1402, 2013.
- [43] “CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN 1.1. Propiedades de ZnO,” 2005.
- [44] R. Arizpe, “Nano-hilos de ZnO,” pp. 1–101, 2017.
- [45] S. Gabriel, R. Nelly, G. Salomé, G. Víctor, and D. Alexis, “Síntesis de Nanopartículas de ZnO por el Método de Pechini ZnO Nanoparticles Synthesis by Pechini Method,” vol. 38, no. 1, 2016.
- [46] S. E. E. Profile, “Cerámica y Vidrio,” no. May, 2014.
- [47] X. Zhu, “Aplicaciones de Metales Nanoestructurados,” 2017.
- [48] A. H. Hammad, M. S. Abdel-wahab, and S. Vattamkandathil, “Physica B : Condensed Matter Structural and optical properties of ZnO thin films prepared by RF sputtering at different thicknesses,” *Phys. B Phys. Condens. Matter*, vol. 540, no. April, pp. 1–8, 2018.

- [49] J. D. Albrecht, P. P. Ruden, S. Limpijumnong, W. R. L. Lambrecht, and K. F. Brennan, "High field electron transport properties of bulk ZnO High field electron transport properties of bulk ZnO," vol. 6864, no. 1999, 2011.
- [50] D. D. E. Física, "" Síntesis De Nanopartículas de Silicio Para," 2019.
- [51] G. S. V. Domingo, "PREPARACION Y ESTUDIO DE ÓXIDOS METÁLICOS OBTENIDOS POR EL PROCEDIMIENTO SOL-GEL PARA APLICACIONES FOTOVOLTAICAS," 2002.
- [52] H. Fjellvåg and A. O. Sjøstad, "Inorganic Materials Synthesis," *Spring*, 2016.
- [53] S. Orsi, "Transistors," pp. 1–9, 2009.
- [54] M. En and C. En, "Modelado y Caracterización de MOSFETs Nanométricos Utilizando Técnicas de Circuito Equivalente," 2009.
- [55] A. V. Klekachev, A. Nourbakhsh, I. Asselberghs, A. L. Stesmans, M. M. Heyns, and S. De Gendt, "Graphene Transistors and Photodetectors," no. c, pp. 63–68, 2013.
- [56] F. Semiconductor, "Field Effect Transistors in Theory and Practice," pp. 1–11, 1993.
- [57] Annalisa Bonfiglio *et al.*, "Organic Field Effect Transistors for Textile Applications," no. October, 2005.
- [58] A. D. E. G. P. C. M. M. Heyns, *Advanced Gate Stacks for High-Mobility Semiconductors*. 2007.
- [59] M. D. Physics, *MOSFET Device Physics and Operation 1.1*. 2003.
- [60] F. Transistors, "Field-Effect Transistors 2.1."
- [61] K. Shin, "Fabrication and Analysis of Bottom Gate Nanocrystalline Silicon Thin Film Transistors," 2008.
- [62] S. Zhang, "Study of fluorine-doped tin oxide (FTO) thin films for photovoltaics applications," 2018.
- [63] L. Filipovic *et al.*, "Modeling Spray Pyrolysis Deposition," no. July, 2013.
- [64] Z. Y. Banyamin, P. J. Kelly, G. West, and J. Boardman, "Electrical and Optical Properties of Fluorine Doped Tin Oxide Thin Films Prepared by Magnetron Sputtering," pp. 732–746, 2014.
- [65] R. R. Chacón, "LA ALÚMINA COMO MATERIAL AISLANTE EN LA FUSIÓN TERMONUCLEAR. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE CARBONO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS," 2007.
- [66] M. D. Groner, J. W. Elam, and S. M. George, "deposition on silicon and various metal substrates Electrical characterization of thin Al₂O₃ films grown by atomic layer deposition on silicon and various metal substrates," vol. 6090, no. May 2018, 2002.
- [67] M. Syed, C. Glaser, and M. Syed, "Surface Morphology of Gold Thin Films using RF Magnetron Sputtering Surface Morphology of Gold Thin Films using RF Magnetron Sputtering," no. April, 2017.
- [68] J. Siegel, O. Lyutakov, V. Rybka, and Š. Václav, "Properties of gold nanostructures sputtered on glass," pp. 1–9, 2011.
- [69] A. P. I. Popoola, O. S. I. Fayomi, V. S. Aigbodion, and M. Abdulwahab, "Surface modification , strengthening effect and electrochemical on mild steel," pp. 1419–1427, 2016.
- [70] J. O. Tolosa and C. A. Ortiz, "CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS

- MEDIANTE EL DIFRACTOMETRO X ' Pert-PRO PANalytical.," no. 48, pp. 38–51, 2014.
- [71] "Método de difracción con rayos X (DRX).," vol. 1951, 1981, pp. 783–796.
- [72] M. Cohen, *Elements of DIFFRACTION*. .
- [73] Jeol Ltd, "SEM Scanning Electron Microscope A To Z Basic Knowledge For Using The SEM," *Jeol Ltd*, pp. 1–32, 2009.
- [74] T. Qureishy and M. Nanophysics, "Electron microscopy and focused ion beam systems," 2015.
- [75] "THIN FILM CHARACTERIZATION TECHNIQUES," pp. 76–107.
- [76] R. N. Porter, W. O. George, C. H. J. Wells, A. Press, V. Nostrand, and E. Spectra, "VII . Electron spectroscopy," pp. 1–26, 1987.
- [77] R. and J. P. W. John G. Dillard, "Electron Spectroscopy for Chemical Analysis (ESCA) Study of Atmospheric Particles LOAN," no. June 1979, 2020.
- [78] "X - ray photoelectron."
- [79] M. Zhu, "Total Structure Determination of Au 21 (S-Adm) 15 and Geometrical/ Electronic Structure Evolution of Thiolated Gold Nanoclusters," vol. 21, pp. 2–5, 2016.
- [80] M. C. E. D. B. Castro, "SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE NANOALAMBRES CON COMPOSICIONES Y PROPIEDADES MICROESTRUCTURALES Y MAGNÉTICAS DISEÑADAS," UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, 2014.
- [81] K. Rokosz, T. Hryniewicz, D. Matýsek, S. Raaen, and J. Valíř, "SEM , EDS and XPS Analysis of the Coatings Obtained on Titanium after Plasma Electrolytic Oxidation in Electrolytes Containing Copper Nitrate," pp. 9–16, 2016.
- [82] D. K. Schroder, *SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION*, vol. 44, no. 4. 2006.
- [83] K. Adaikalam and Y. Chae, "Chemical bath deposition and characterization of nanocrystalline ZnO thin films," no. March, 2010.