



*“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”*

UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISION DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA
Ingeniería en Tecnología Electrónica**

**Efecto de la arquitectura de películas de ZnO vía baño
químico en transistores de efecto de campo**

Tesis que presenta:

ÁLVARO CHAIRA SÁNCHEZ

Para obtener el Título de

Ingeniero en Tecnología Electrónica

Directores de tesis

**DRA. ALICIA VERA MARQUINA
DR. DAINET BERMAN MENDOZA**



Hermosillo, Sonora

Marzo de 2015

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

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Sonora por formar en mí, un profesionista.

Agradezco a la Dra. Alicia Vera Marquina, Dr. Dainet Berman Mendoza y a la Dra. Ana Lilia Leal Cruz que con su apoyo, fue posible el presente trabajo.

A la División de Ciencias Exactas y Naturales a la cual pertenece el Cuerpo Académico de Sistemas Electrónicos, gracias a cada uno de los maestros por la enseñanza el cual me fue brindado durante mi estancia.

Al Dr. Eduardo Verdín López y al Dr. Thomas M. Pifers Droog por permitirme hacer uso de los laboratorios ubicados en el Departamento de Investigación en Física.

Especial agradecimiento al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por prestar de sus servicios para la caracterización de las muestras en Perfilometría.

Al Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales por permitir hacer uso de su equipo en Microscopia Electrónica de Barrido.

Al Centro de Asistencia Metrológica por hacer posible el análisis y estudio de las muestras por medio del equipo de Microscopia Óptica ubicado en el Laboratorio de Asistencia Metrológica.

Agradezco el apoyo recibido mediante la beca obtenida del proyecto de PROMEP "Estudio y caracterización de películas delgadas a base de calcogenuros para el desarrollo de fototransistores de efecto de campo" Clave: UNISON-CA-43 IDCA 1512 del Cuerpo Académico de Sistemas Electrónicos.

A mis compañeros de estudio, el cual les deseo éxito y superación.

DEDICATORIA

A Dios y a la virgen de Guadalupe, a mi familia en especial a mis padres José Álvaro y María Victoria, a mis hermanas Denisse y María Fernanda, a mis sobrinas Alexa y Christian, gracias por su apoyo y cariño. En memoria de Marco Antonio Coronado Cruz.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	12
2	OBJETIVOS Y METAS	15
3	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	17
3.1	Óxido de Zinc.....	17
3.2	Transistores de efecto de campo, estructura y caracterización	18
3.2.1	Descripción del dispositivo.....	19
3.2.2	Características estáticas	20
3.3	Métodos de fabricación de películas delgadas empleadas en transistores de efecto de campo 23	
3.3.1	Depósito por pulverización catódica.....	23
3.3.2	Depósito por Sol-Gel	24
3.3.3	Depósito químico en fase de vapor CVD	25
3.3.4	Depósito por baño químico.....	26
3.3.5	Depósito por evaporación de metales	27
3.4	Técnicas de caracterización.....	28
3.4.1	Microscopia óptica	29
3.4.2	Perfilometría	30
3.4.3	Espectroscopia UV-VIS	30
3.4.4	Comportamiento eléctrico de un Transistor efecto de campo.....	33
4	DESARROLLO EXPERIMENTAL	36
4.1	Procesamiento de películas multicapa de ZnO vía baño químico.....	37
4.2	Tratamiento térmico de películas mono y multicapa de ZnO.....	38
4.3	Caracterización de películas de ZnO	39
4.3.1	Microscopia óptica	39
4.3.2	Perfilometría	40
4.3.3	Espectroscopia UV-VIS	40
4.4	Fabricación de los contactos de los transistores de efecto de campo.....	41
4.5	Caracterización eléctrica de transistores de efecto de campo basado en películas mono y multicapa de ZnO	42
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45

5.1	Caracterización de películas mono y multicapa de ZnO	45
5.1.1	Caracterización superficial de películas mono y multicapa por microscopía óptica y electrónica.....	45
5.1.2	Resultados de Perfilometría.....	51
5.1.3	Caracterización óptica y determinación del ancho de banda prohibida de películas mono y multicapa de ZnO.....	52
5.1.3.1	Transmitancia.....	52
5.1.3.2	Absorbancia.....	53
5.1.3.3	Ancho de banda prohibida.....	54
5.2	Desempeño eléctrico de transistores de efecto de campo basados en películas multicapa	55
6	CONCLUSIONES	61
7	RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	63
8	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
	APÉNDICE A. Preparación de soluciones	71
	APÉNDICE B. Procedimiento para graficar curvas de I-V en Lab View.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Canal tipo n y tipo p para un FET.....	19
Figura 2. Grafica de zonas de funcionamiento de un JFET.....	20
Figura 3. Transistor MOSFET.	21
Figura 4. Grafica de salida del transistor.....	22
Figura 5. Representación esquemática de un sistema de pulverización catódica.....	24
Figura 6. Esquema general del procesamiento Sol-Gel.....	25
Figura 7. Diagrama esquemático del sistema de CVD)	26
Figura 8. Equipo para depósito por baño químico (a) vista de frente, (b) vista lateral.	27
Figura 9. Mecanismo de un equipo de evaporación en vacío.....	28
Figura 10. Composición de un microscopio óptico.	29
Figura 11. Principio de transmitancia.....	31
Figura 12. Diagrama de flujo.	34
Figura 13. Ilustración esquemática del transistor visto de forma transversal.....	36
Figura 14. Diferentes fases para formar un transistor.	36
Figura 15. Arreglo experimental empleado para el procesamiento de películas.	37
Figura 16. Horno empleado para el tratamiento térmico de las películas multicapa de ZnO.	38
Figura 17. Microscopio óptico invertido Carl Zeiss modelo axio	39
Figura 18. Perfilometro KLATencor, modelo P7.....	40
Figura 19. Espectrómetro Perkin Elmer UV/VIS/NIR lambda 19.....	41
Figura 20. Equipo para metalizar.	41
Figura 21. Estación de pruebas modelo PSI 200.	42
Figura 22. Resultados de microscopía óptica.....	46
Figura 23. Imágenes de MEB representativas de la película de ZnO con 4 capas. a) Superficial y b) sección transversal.....	48
Figura 24. Imagen de MEB representativa sección transversal de la película de ZnO con 2 capas.....	48
Figura 25. Imagen de MEB representativa sección transversal de la película de ZnO con 7 capas.....	49
Figura 26. Imagen de MEB representativa sección superficial de la película de ZnO con 2 capas.....	49
Figura 27. Imagen de MEB representativa sección transversal de la película de ZnO con 7 capas.....	50
Figura 28. Curvas de transmitancia.....	52
Figura 29. Curvas de absorbancia.....	53
Figura 30. Calculo del ancho de banda prohibida.....	54
Figura 31. Medición I-V.	56
Figura 32. Medición I-V.	57
Figura 33. Medición I-V.	58
Figura 34. Balanza Traveler ohaus TA301.	72

LISTA DE TABLAS

Tabla I Valores de espesores de las películas mono y multicapa obtenidos por perfilometría.....	51
Tabla II. Resultado ancho de banda prohibida.....	55

ABREVIATURAS

Å	Angstrom es la unidad de longitud empleada principalmente para expresar longitudes de onda, distancias moleculares y atómicas equivalente a la diez mil millonésima parte del metro 10 ⁻¹⁰ m.
E _g	Ancho de banda prohibida
Bar	Bar es la unidad de presión equivalente a un millón de barias, aproximadamente igual a una atmósfera
CBD	Depósito por baño químico
AC	Corriente alterna
I-V	Corriente contra voltaje
DC	Corriente directa
I _d	Corriente de drenaje
CVD	Depósito químico en fase de vapor
BSE	Electrones retrodispersados
SE	Electrones secundarios
EDS	Espectroscopia de energía dispersiva
GPIB	Estándar de conexión de datos digital de corto rango
°C	Grados centígrados
μA	Microamperio
μm	Micrómetro
SEM	Microscopia electrónica de barrido
AFM	Microscopia de fuerza atómica
mL	Mililitros
M	Molaridad
Nm	Nanómetros
CdO	Óxido de cadmio
ZnO	Óxido de zinc
Pa	Pascal se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma

CdSe	Seleniuro de cadmio
CdS	Sulfuro de cadmio
ZnSe	Seleniuro de zinc
ZnS	Sulfuro de zinc
Torr	Torr es la unidad de presión, llamada también milímetro de mercurio, que equivale a 133,3224 pascal.
FET	Transistor de efecto de campo
JFET	Transistor de efecto de campo de unión
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor
TFT	Transistor de película delgada
Vdc	Voltaje corriente directa
Vgs	Voltaje de la compuerta a la fuente
Vds	Voltaje drenaje – fuente
Vth	Voltaje de umbral del transistor

RESUMEN

El estudio de las propiedades físicas, químicas y las aplicaciones de los semiconductores en forma de película delgada representan una de las revoluciones científico-tecnológicas de mayor impacto sobre nuestra sociedad, debido a la gran utilización de estos materiales en dispositivos fotovoltaicos, fotoconductores y fotodetectores. Dependiendo de varios factores tales como la temperatura, el campo eléctrico y el campo magnético un semiconductor se puede comportar como conductor o aislante. El óxido de zinc (ZnO) es uno de los materiales semiconductores más interesantes desde el punto de vista tecnológico para el desarrollo de dispositivos electrónicos, tales como: celdas solares, sensores químicos, transductores piezoeléctricos, electrodos transparentes, foto-catalizadores, dispositivos electroluminiscentes, diodos láser ultravioleta y transistores de efecto de campo. Las películas delgadas de ZnO han sido estudiadas como un material de canal activo en transistores de película delgada porque presentan las características de un material semiconductor tipo n y una excelente estabilidad térmica, además puede tener una buena orientación cristalina en sustratos de diferente composición química. Dada las características de este material y su potencial aplicación como capa activa en transistores de efecto de campo, en éste trabajo se presenta un estudio sistemático que contempla el procesamiento de películas mono y multicapa de ZnO y su aplicación en el desarrollo y fabricación de transistores de efecto de campo. Para ello se utilizó el método de baño químico el cual, por medio de compuestos químicos y controlando la temperatura y tiempo de dicho tratamiento, se formaron las películas multicapa de ZnO haciendo varios depósitos por este método en sustratos de vidrio y en silicio que posteriormente se procesaron y caracterizaron hasta obtener películas con 1, 2, 3, 4 y 5 capas en donde se estudiaron y analizaron las propiedades resultantes. De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible procesar películas mono y multicapa de ZnO por baño químico. Las películas presentan las siguientes características como una adhesión confiable al sustrato de vidrio y al silicio, un ancho de banda prohibida correspondiente al óxido de zinc de un 3.35 eV, muestran una buena transmitancia de hasta el 70% lo que sugiere al material para realizar dispositivos optoelectrónicos, que en conjunto de dichas características las hacen aptas para su aplicación en la fabricación de transistores. Por lo tanto, se emplearon en la

fabricación de transistores y fueron caracterizadas con el propósito de determinar su desempeño y comportamiento eléctrico. Los resultados de la caracterización de los transistores fabricados muestran curvas de I-V característica de este tipo de dispositivos siendo la película con 4 capas de ZnO la que mostro mejores resultados como material activo.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

En el umbral de una nueva era en el área de los materiales y dispositivos electrónicos, los materiales semiconductores con dimensiones nano y micro métricas han atraído una gran atención por sus propiedades dependientes de su tamaño y su amplia gama de aplicaciones.

El óxido de zinc (ZnO) es uno de los semiconductores con mayor interés tecnológico debido a sus numerosas aplicaciones y propiedades.

El ZnO es uno de los materiales semiconductores más interesantes como un material de uso potencial en los dispositivos electrónicos, tales como: celdas solares, sensores químicos, transductores piezoeléctricos, electrodos transparentes, foto-catalizadores, dispositivos electroluminiscentes y diodos láser ultravioleta [1-4]. Las películas delgadas de ZnO han sido estudiadas como un material de canal activo en el desarrollo de transistores de película delgada porque presentan las características de un material semiconductor tipo n y una excelente estabilidad térmica, además puede tener una buena orientación cristalina en substratos de diferente composición química [5,6]. Se han usado numerosos métodos para depositar películas delgadas de ZnO, entre los cuales se encuentra el técnica de depósito por baño químico (CBD) [7]. El CBD es conocido por ser una técnica de depósito sencilla, se deposita el material a baja temperatura y es económica para la producción de depósitos en áreas grandes; es uno de los métodos en fase de líquida útiles para la preparación de semiconductores compuestos a partir de soluciones acuosas de los correspondientes precursores que componen el material semiconductor [8,9], tales como: Sulfuro de cadmio (CdS) [10, 11] seleniuro de cadmio (CdSe) [12, 13], Óxido de cadmio (CdO) [14, 15], sulfuro de zinc (ZnS) [16, 17], Seleniuro de zinc (ZnSe) [18, 19] y Óxido de zinc (ZnO) [20-26].

En los últimos años el ZnO ha atraído gran atención debido a que presentan una combinación única de propiedades, tales como: estabilidad térmica y química, ancho de banda prohibida (E_g) relativamente grande (entre 3.1 y 3.5 eV a temperatura ambiente, siendo el

valor típico reportado de 3.37 eV), alta transparencia en el visible y alta reflectividad en el infrarrojo, alta estabilidad electroquímica y excelentes propiedades electrónicas [28].

La tesis está organizada de la siguiente manera, en el primer capítulo se presenta una breve introducción respecto al interés que surgió de procesar películas de ZnO. En el Capítulo 2 se tratará de los diferentes procesos de fabricación por los cuales pueden ser depositados las películas multicapa de óxido de zinc, entre los cuales están el deposito por baño químico (CBD), depósito químico en fase de vapor (CVD), deposito por pulverización catódica (sputtering) y el deposito por Sol-Gel y se mencionarán temas relacionados a los procesos de caracterización tales como el proceso de espectroscopia, microscopia óptica, perfilometria y medición de I-V (Corriente contra voltaje) mientras que en el Capítulo 3 comprenderá algunas propiedades y características del óxido de zinc, así como también el proceso de crecimiento de la película y los equipos utilizados para llevar a cabo su fabricación. En el Capítulo 4 se explicará el procedimiento experimental, este apartado está compuesto por los resultados obtenidos en los procesos de caracterización de las películas multicapa de óxido de zinc tales como los datos obtenidos en espectroscopia, microscopia óptica, perfilometria y medición de I-V; Por último, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones, comentarios que podemos llevar a cabo a raíz de los resultados obtenidos en este proceso de fabricación de películas multicapa de óxido de zinc.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS Y METAS

2 OBJETIVOS Y METAS

OBJETIVO GENERAL: El objetivo de este trabajo de tesis es realizar un estudio sistemático para evaluar el efecto de la arquitectura de películas multicapa de ZnO vía baño químico en el desempeño de transistores de efecto de campo.

Objetivos particulares

- Procesar películas multicapa de ZnO empleando el método de baño químico aplicables en la fabricación de transistores de efecto de campo.
- Caracterizar y maximizar el desempeño eléctrico de películas multicapa de ZnO para el desarrollo en transistores de efecto de campo.
- Fabricar transistores de efecto de campo empleando películas multicapa de ZnO como capa activa.

Metas

- Establecer un método y condiciones para el procesamiento de películas multicapa de ZnO empleado el método de baño químico aplicables en la fabricación de transistores de efecto de campo.
- Obtener películas multicapa de ZnO con un desempeño apropiado como capa activa en transistores de efecto de campo.
- Desarrollar y fabricar transistores de efecto de campo basados en películas multicapa de ZnO.

CAPÍTULO III

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

3 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Los materiales semiconductores se utilizan principalmente en circuitos integrados y dispositivos electrónicos en general. Hay muchos tipos de semiconductores por ejemplo el sulfuro de cobre (CuS) es bien conocido debido a sus propiedades ópticas y eléctricas, mientras que las películas de sulfuro de cobre (CuSO₄) son usadas en muchas aplicaciones fotovoltaicas y fototérmicas. Los compuestos de plomo han sido ampliamente investigados para su aplicación en detectores de infrarrojo, diodos láser y convertidores de energía termofotovoltaicos y se pueden modificar utilizando elementos dopantes para mejorar su desempeño eléctrico.

En la búsqueda de nuevos materiales para la fabricación de dispositivos electrónicos se han desarrollado diversos materiales, tales como: los semiconductores amorfos. Un ejemplo de este tipo de materiales es el silicio amorfo, el cual se utiliza en celdas solares debido a sus buenas propiedades fotovoltaicas y a la facilidad de procesarlo en forma de películas delgadas. Una alternativa a este material es el óxido de zinc, debido a sus propiedades eléctricas y ópticas.

3.1 Óxido de Zinc

El óxido de zinc es un compuesto inorgánico de color blanco que tiene como fórmula ZnO. Aparece como un polvo blanco muy poco soluble en agua y muy soluble en ácidos. Usualmente es conocido como Zn blanco. El óxido de zinc es un semiconductor de la familia II-VI, debido a la diferencia de electronegatividades entre el zinc y el oxígeno. En este semiconductor su banda prohibida o brecha de banda (diferencia de energía entre el punto más bajo de la banda de conducción y el más elevado de la banda de valencia) es de 3.35 eV.

Entre sus principales características en el campo de la electrónica se tiene lo siguiente:

- Alta conductividad eléctrica.
- Alta transmisión óptica en el visible y alta reflectancia en el infrarrojo.
- Buena estabilidad térmica y química.

3.2 Transistores de efecto de campo, estructura y caracterización

El transistor FET (transistor de efecto de campo), es uno de los componentes más utilizados en la electrónica moderna, se le puede ver principales en equipos electrónicos, tales como: fuentes conmutadas y convertidores DC-AC [42].

La mayoría de los circuitos integrados digitales, están contruidos en base a transistores FET, lo que los hace más veloces y eficientes, ya que consumen menos corriente y pueden operar con voltajes muy bajos. Algunos de estos circuitos integrados pueden funcionar hasta con menos de 1vdc [42].

Existen diferentes tipos de transistores FET, los cuales son utilizados en diferentes clases de circuitos. Los tipos de transistores FET más comunes, suelen ser los siguientes [42]:

- JFET (Fet de union)
- MOSFET (Fet de metal oxido)

Pero el tipo de FET más común es el MOSFET. El MOSFET puede ser positivo (Fet de canal P) o negativo (Fet de canal N) [42]. El esquema del transistor de efecto de campo tipo p y n se muestran en la Figura 1:

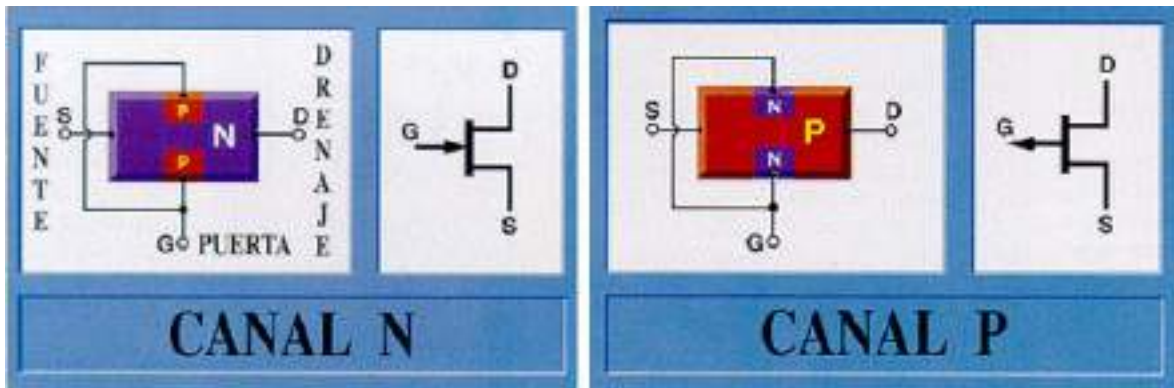


Figura 1. Canal tipo n y tipo p para un FET.

A diferencia con el transistor bipolar, el transistor FET tiene la compuerta aislada de la unión Drenador - Surtidor, lo que hace que el FET tenga una entrada de alta impedancia, casi infinita. Esta característica hace que el FET no consuma corriente desde su compuerta, solo basta con un pequeño voltaje para saturarlo (de 0.5 a 1vdc) [42].

La unión Drenador - Surtidor en el FET esta se parece más a una resistencia que a un diodo. Esta cualidad hace que el FET pueda ser utilizado, como un resistor controlado por voltaje, en algunos circuitos [42].

3.2.1 Descripción del dispositivo

Se tratará en este punto de las variables con las que se controla el dispositivo, para después poder comprender su funcionamiento [43].

Hay varias variables que son significativas en los JFET, quizás la más importante de ellas es V_{gs} , pues con ella se controla cual es la densidad de electrones que se mueven y por tanto de corriente que se mueven por el canal N. Si $V_{gs} = 0$ el canal estaría totalmente abierto, conforme vaya aumentando el dispositivo se comportará como una resistencia hasta que alcance una valor umbral (V_{th}) en cuyo instante el dispositivo quedará en corte [43].

La siguiente variable de importancia es V_{ds} , (la tensión entre la fuente y el drenador). Mientras V_{ds} tenga un valor pequeño hasta que alcance su valor umbral (V_{th}), estará en región óhmica, cuando llegue a su valor umbral o lo supere el dispositivo quedará saturado [43].

3.2.2 Características estáticas

Dado que I_D (corriente de drenador), V_{gs} y V_{ds} son las tres variables que intervienen en el estudio del JFET, si disponemos de las curvas que las interrelacionan, tendremos toda la información necesaria acerca de este dispositivo, en la Figura 2 se muestran las curvas características de un JFET [43].

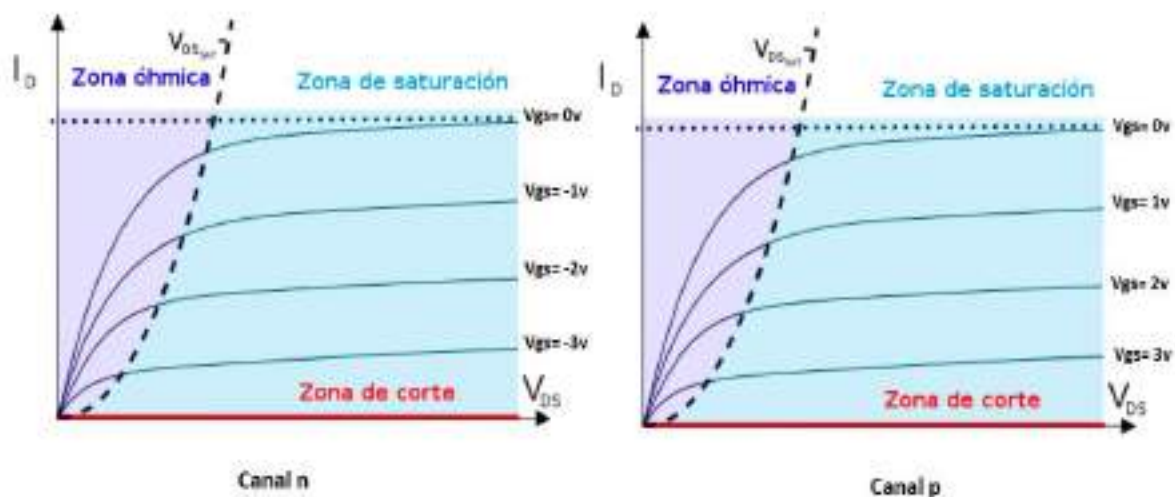


Figura 2. Grafica de zonas de funcionamiento de un JFET.

Ahora bien, los transistores MOSFET son dispositivos semiconductores cuya estructura se conforma de tres elementos: Metal/ Dieléctrico/Semiconductor [39].

Este tipo de dispositivos basan su funcionamiento en la capacidad de poder controlar la concentración y el tipo de portadores en la región semiconductor cercana a la interfaz

dieléctrico/semiconductor, mediante la aplicación de voltaje en la compuerta. La Figura 3 se muestra el corte transversal de un transistor MOSFET canal N [39].

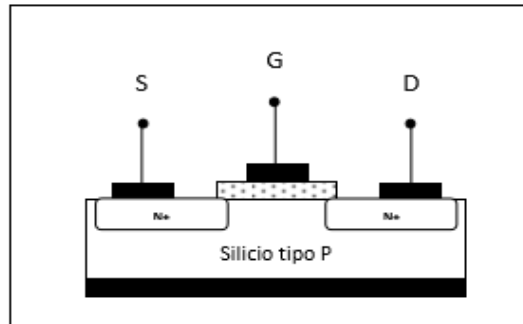


Figura 3. Transistor MOSFET.

Para explicar el principio de funcionamiento del MOSFET, consideraremos que inicialmente el transistor se encuentra apagado. En esta condición no se ha formado el canal, por lo que si se aplica un voltaje entre el drenador y la fuente el transistor no conduce. Para que el MOSFET empiece a funcionar es necesario aplicar un voltaje de compuerta V_g positivo mayor al voltaje de umbral del transistor (V_{th}), el cual representa el voltaje mínimo para inducir el canal de conducción del transistor, y por lo tanto, exista conducción entre la fuente y el drenador. Si aplicamos voltajes de drenador V_{ds} , suficientemente pequeños para no causar ninguna diferencia significativa en el potencial de superficie cerca de la región del drenador, la concentración de electrones a través del canal seguirá siendo la misma. Bajo esta condición, el canal se comporta como un elemento resistivo, por lo que la corriente depende linealmente respecto al voltaje V_{ds} . A esta región se le conoce como región lineal.

En la Figura 4 se observa la característica de salida de un transistor. La región lineal se puede identificar por la dependencia de la corriente del transistor respecto a V_{ds} y se presenta para valores bajos de V_{ds} [39].

En la medida en que V_{ds} se incrementa, la diferencia de potencial entre la región cercana al contacto de drenador y el canal se reduce. Como resultado de esta reducción, la concentración de electrones cerca del drenador decrece. Si la diferencia de potencial entre el óxido y la región cercana al drenador continúa disminuyendo, se puede alcanzar la condición en que el potencial en la región cercana al drenador quede por debajo del valor requerido para mantener el canal, llegando a la oclusión del mismo. Para voltajes V_{ds} mayores, el incremento de la corriente se atenúa hasta que se alcanza la corriente de saturación, en donde I_d depende solamente de V_{gs} . En la Figura 4 se observa la región de saturación para valores de V_{ds} altos [39].

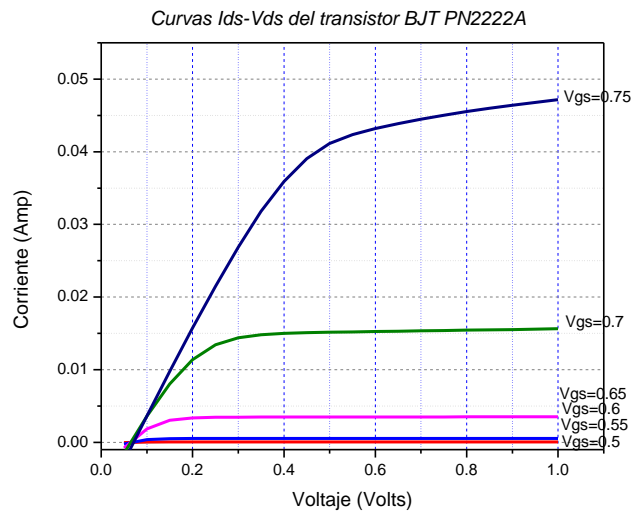


Figura 4. Gráfica de salida del transistor.

En la condición lineal, el valor de la corriente I_d estará definido por la resistencia del canal, esto es, la I_d depende linealmente de V_{ds} [39].

Cuando se cumple que $V_{ds} > (V_{gs} - V_{th})$ el transistor MOSFET trabaja en la región de saturación [13].

3.3 Métodos de fabricación de películas delgadas empleadas en transistores de efecto de campo

Existen diferentes procesos para el crecimiento de películas delgadas semiconductoras y conductoras basados en procesos físicos y químicos. Para el depósito de películas semiconductoras se emplean comúnmente las técnicas de depósito por pulverización catódica, depósito por sol-gel, depósito químico en fase gaseosa y depósito por baño químico. Mientras que las películas conductoras se producen principalmente por técnicas de evaporación. Siendo de interés para el presente trabajo las técnicas de depósito por baño químico y evaporación, para el crecimiento de películas semiconductoras y conductoras, respectivamente. Debido a sus ventajas y la calidad de los materiales que se pueden obtener. En las siguientes secciones se describen algunos procesos de fabricación de películas delgadas semiconductoras.

3.3.1 Depósito por pulverización catódica

Si una superficie es bombardeada con partículas energéticas como iones acelerados, es posible causar expulsión de los átomos de la superficie de un material, este proceso es conocido como pulverización catódica, comúnmente referida como *sputtering*. En este proceso los átomos en expulsión pueden ser condensados en un substrato para formar una película delgada. En la mayoría de los casos, los iones positivos de gases inertes como argón se usan para bombardear la superficie de materiales. Una de las ventajas es que los materiales con alto punto de fusión pueden ser procesados tan fácilmente como los que presentan bajo punto de fusión pueden ser depositados independientemente de su comportamiento eléctrico (conductor y no conductor). Esto se logra empleando fuentes de radio frecuencia (RF) o por corriente directa DC. En la Figura 5 se muestra una representación esquemática del proceso de depósito por pulverización catódica [29].

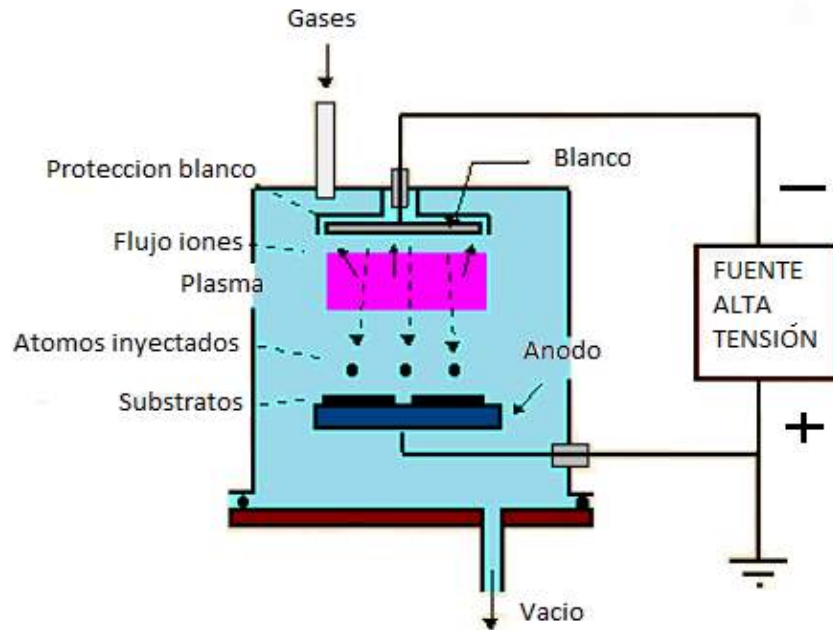


Figura 5. Representación esquemática de un sistema de pulverización catódica.

3.3.2 Depósito por Sol-Gel

En general, el proceso del sol-gel implica la transición de un sistema de un líquido "sol" (suspensión coloidal de partículas sólidas con tamaño suficientemente pequeño para permanecer en suspensión debido al movimiento Browniano) a una fase en forma de "gel" (sólido que consiste de al menos dos fases, en la cual la fase líquida se encuentra atrapada e inmovilizada por la fase solida) [40].

Los materiales usados en la preparación del "sol" son generalmente sales inorgánicas metálicas o compuestos orgánicos conteniendo metales, tales como: los alcóxidos. En un proceso típico de sol-gel. El precursor se sujeta a una serie de reacciones de hidrolisis y polimerización para formar una suspensión coloidal o un "sol"; generalmente el ácido o la base son empleados como catalizadores para formar partículas o racimos sólidos pequeños en un líquido (solvente orgánico o acuoso). Las partículas o los racimos sólidos son tan pequeños (1 a 1,000 nm) que las fuerzas gravitacionales son insignificantes y las interacciones son dominadas por los efectos estéricos y las fuerzas de Van der Waals y coulómbicas. El Sol es

estabilizado por una capa doble eléctrica, o la repulsión estérica, o su combinación. La transformación posterior de éste permite hacer los materiales de cerámica en diversas formas. Las películas finas se pueden producir en un pedazo del sustrato. Cuando el "sol" se coloca en un molde, se formará un "gel mojado". Con el tratamiento térmico, el "gel" se convierte en partículas de sólidos o de cristal densos. Si el líquido en un "gel mojado" se quita bajo condición supercrítica, se obtiene un material de densidad altamente porosa y extremadamente baja llamado "de un aerogel". Los polvos obtenidos son ultra-finos y uniformes. En la Figura 6 se muestra un esquema general del proceso del sol-gel [40].

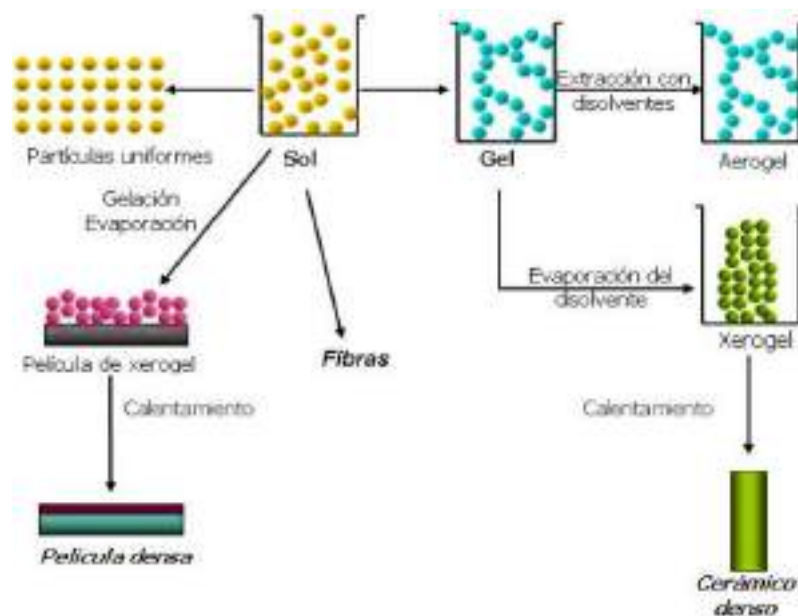


Figura 6. Esquema general del procesamiento Sol-Gel.

3.3.3 Depósito químico en fase de vapor CVD

La técnica de CVD consiste en la reacción de una mezcla de gases en el interior de una cámara de atmosfera y temperatura controlada (reactor) para dar lugar a una reacción química en la superficie para generar al menos, un producto sólido. Los subproductos de la reacción son removidos hacia el exterior de la cámara mediante un sistema de bombeo de alta velocidad.

Dependiendo del proceso y de las condiciones de operación, los compuestos pueden condensar por nucleación homogénea o nucleación heterogénea sobre el sustrato [30].

Las aplicaciones de este método van desde la fabricación de dispositivos microelectrónicos hasta el depósito de recubrimientos protectores [30]. En la Figura 7 se muestra un diagrama esquemático de un sistema de depósito en fase vapor (CVD).

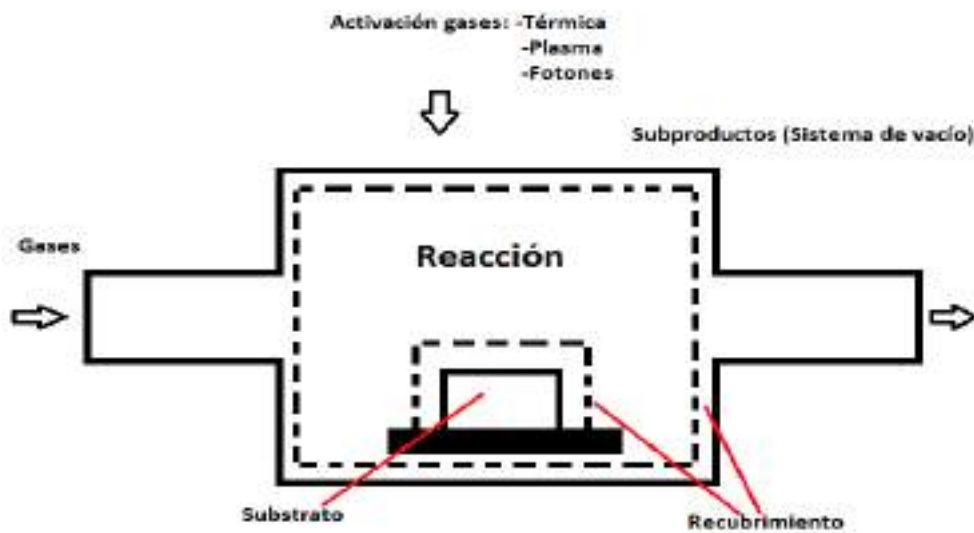


Figura 7. Diagrama esquemático del sistema de CVD)

3.3.4 Depósito por baño químico

En esta técnica, se parte de una solución acuosa de sales conteniendo los precursores de los elementos que conforman el compuesto que se desea obtener. El sustrato es sumergido en la solución, la cual se somete a calentamiento a temperatura constante por un tiempo determinado. Las propiedades resultantes de la película dependen fuertemente de los parámetros de depósito y la composición química de concentraciones de reactantes presentes en la solución. La formación de la película ocurre mediante la precipitación de compuesto formado (nucleación homogénea) o nucleación heterogénea sobre el sustrato [29].

Los compuestos para ser depositados por esta técnica deben ser relativamente insolubles y químicamente estables en solución y presentar una precipitación simple mediante una reacción iónica. Los reactantes o precursores que forman esta solución generalmente son compuestos que aporte los iones metálicos, una fuente de los iones no metálicos, un agente acomplejante y un amortiguador (buffer) de pH [29]. En la Figura 8 un diagrama del sistema experimental empleado en los procesos de baño químico, el cual consta depósito de agua (baño) con un controlador de temperatura, un termómetro y el depósito que contiene la solución y los sustratos.

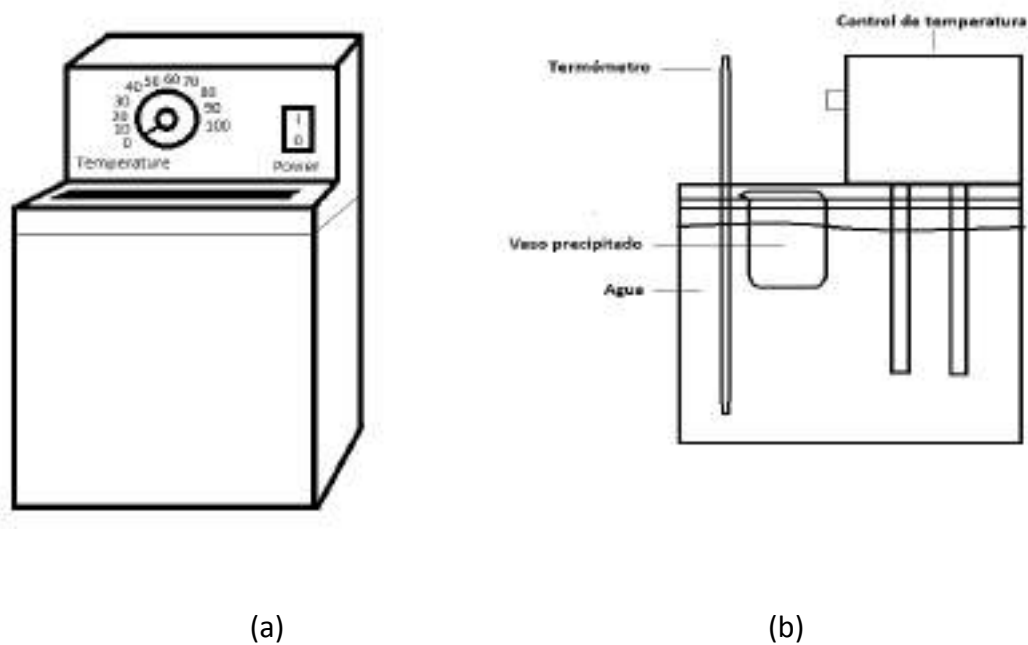


Figura 8. Equipo para depósito por baño químico (a) vista de frente, (b) vista lateral.

3.3.5 Depósito por evaporación de metales

La técnica consiste en llevar la presión dentro de la cámara de vacío a valores inferiores a 10^{-5} torr y calentar el material que se desea evaporar para producir un flujo de vapor que se deposite en la superficie del sustrato a tratar. El material a ser vaporizado es por lo general

calentado hasta el punto en que su presión de vapor es lo suficientemente elevada utilizando un calentador eléctrico resistivo. [50].

Las condiciones de funcionamiento, están marcadas por los siguientes factores [51]:

- Presión en la cámara
- Corriente del filamento (temperatura)
- Velocidad de evaporación (volatilidad del material)
- Distancia y posición a la muestra

En la Figura 9 es mostrado el mecanismo de un equipo de evaporación en vacío.

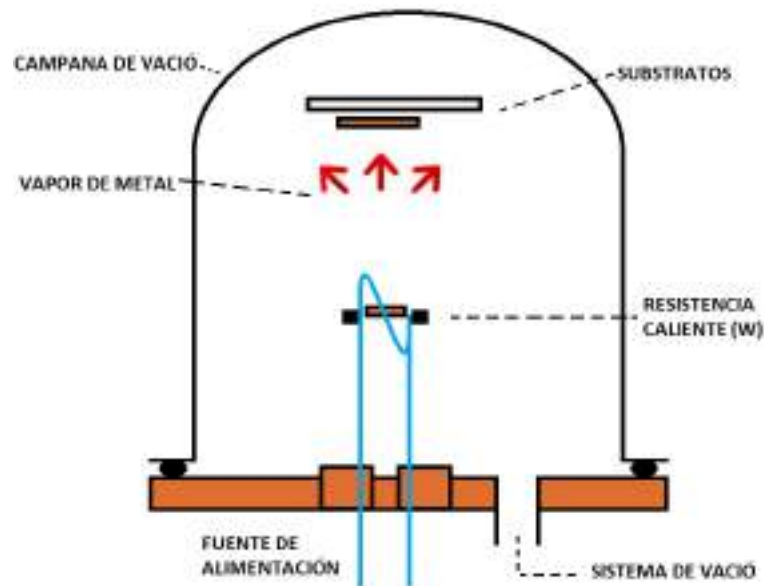


Figura 9. Mecanismo de un equipo de evaporación en vacío

3.4 Técnicas de caracterización

La caracterización de las películas de ZnO es una parte importante para el estudio de éstas y la implementación de las mismas en cualquier dispositivo electrónico. Esta sección mencionarán las técnicas utilizadas para la caracterización de las películas de ZnO, tales como: microscopia óptica para observar las características superficiales, perfilometría para determinar espesores y espectroscopia UV-vis para evaluar el comportamiento óptico de las películas. Finalmente,

se empleó un sistema de medición de corriente contra voltaje (I-V) para la caracterización eléctrica.

3.4.1 Microscopia óptica

Los microscopios ópticos se basan en la ampliación de la imagen mediante el uso de lentes convergentes. La sonda en estos microscopios es la radiación visible que ilumina la muestra que se requiere estudiar y poseen una óptica doble (objetivo y ocular) [47].

Con el microscopio óptico se puede magnificar hasta 2000 veces el tamaño de un objeto. Este límite está dado por la naturaleza ondulatoria de la luz visible, ya que la física nos dice que en ningún instrumento se pueden resolver detalles más pequeños que la longitud de onda de la radiación con la que se está observando. En el caso de la luz visible, la longitud de onda más pequeña que puede detectar el ojo es de 0.2 micrones [48]. En la Figura 10 se puede visualizar las partes que conforman un microscopio óptico.

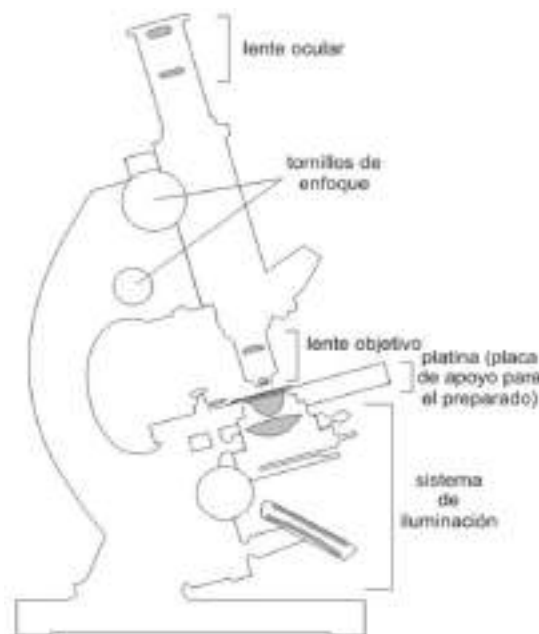


Figura 10. Composición de un microscopio óptico.

3.4.2 Perfilometría

Las técnicas de perfilometría mecánica o de contacto permite el análisis superficial 2D, basada en un estilete. Dependiendo del equipo utilizado, es posible medir espesores de películas por debajo de 100 Å. Además se puede usar para determinar la topografía y rugosidad de las muestras en rangos manométricos [37].

La técnica consiste en la medida del desplazamiento vertical que se produce en el estilete mientras se realiza un barrido lineal manteniendo constante la fuerza que éste realiza sobre la superficie de la muestra. La realización de barridos sucesivos y paralelos permite componer los resultados para obtener un mapa tridimensional con resolución nanométrica en el eje vertical. Existen numerosos estiletos diferentes para las distintas aplicaciones, con radios que van desde 50nm a 25µm, y de alta relación de aspecto para la caracterización de zanjas profundas y estrechas [37].

3.4.3 Espectroscopia UV-VIS

Un espectrofotómetro es un instrumento usado en el análisis químico que sirve para medir, en función de la longitud de onda, la relación entre valores de una misma magnitud fotométrica relativos a dos haces de radiaciones y la concentración o reacciones químicas que pueden ocurrir en una muestra [31]. Hay varios tipos de espectrofotómetros, puede ser de absorción atómica, de absorción molecular (que comúnmente se conoce como espectrofotómetro UV-VIS), y no debe ser confundido con un espectrómetro de masa [31].

El equipo utilizado en esta investigación fue el espectrómetro UV/VIS/NIR de la marca comercial Perkin Elmer modelo lambda 19 con un rango espectral de 185-3200nm.

La espectrofotometría de absorción molecular en el rango ultravioleta-visible, comúnmente llamada espectrofotometría UV-VIS, está basada en la medición de absorción de radiación ultravioleta o visible por determinadas moléculas. La radiación correspondiente a

estas regiones del espectro electromagnético provoca transiciones electrónicas a longitudes de ondas características de la estructura molecular de un compuesto [32].

Cuando la radiación pasa desde el vacío a la superficie de una porción de materia, el vector eléctrico de la radiación interacciona con los átomos y moléculas del medio. La naturaleza de esta interacción depende de las propiedades de la materia y puede dar lugar a la transmisión, la absorción o la dispersión de la radiación [32].

La transmisión se refiere a la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda (Figura 11). Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo translúcido, una parte de esa luz es absorbida por el mismo, y otra fracción de ese haz de luz atraviesa el cuerpo, según su transmitancia [33].

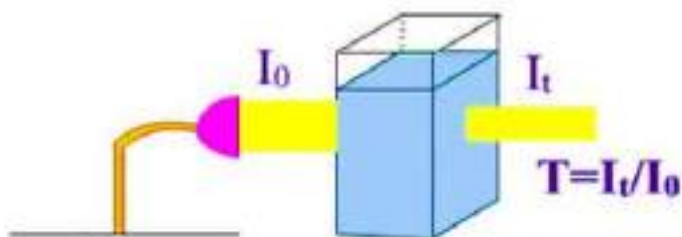


Figura 11. Principio de transmitancia.

Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo translúcido, una parte de esta luz es absorbida por el cuerpo (absorbancia), y el haz de luz restante atraviesa dicho cuerpo (transmitancia). A mayor cantidad de luz absorbida, mayor será la absorbancia del cuerpo, y menor cantidad de luz será transmitida por dicho cuerpo. Como se muestra en la Tabla I, la absorbancia y la transmitancia son dos aspectos del mismo fenómeno [33]. La expresión matemática para los parámetros de transmisión son:

$$T = I_t / I_0$$

$$\%T = \left(\frac{I_t}{I_0}\right) \times 100$$

Mientras que la absorción está dada por:

$$A = -\log(T)$$

Donde I_t es la intensidad de la luz que pasa por la muestra (luz transmitida) y I_0 es la intensidad de la luz incidente [33].

Por otra parte, el coeficiente absorción (α) se define de la siguiente manera.

La intensidad luminosa (I) que atraviesa un material es proporcional a la intensidad luminosa que incide (I_0) sobre el material, atenuada por el coeficiente de absorción del mismo material y en proporción al espesor por el cual se transmite [28]:

$$I = I_0 e^{-\alpha d}$$

Esta expresión es conocida como la ley de Beer-Lambert. Considerando que

$$\frac{I}{I_0} = T$$

Se obtiene la siguiente expresión:

$$T = e^{-A}$$

Donde T y A son la transmitancia y la absorbancia ópticas respectivamente. No obstante de la ley de Kirchoff de radiación:

$$A = 1 - R - T$$

Donde R es la reflectancia.

En los materiales semiconductores, con la absorción de la radiación se produce la transición de electrones desde la banda de valencia a la banda de conducción. El ancho de banda está relacionado con el borde de la absorción con la transmitancia y el espesor de la capa. [49].

Con el ancho de banda prohibida se puede determinar propiedades ópticas así como sus posibles aplicaciones. [50]. El ancho de banda prohibida puede ser determinado usando la relación de Tauc [44] dada por:

$$(\alpha h\nu)^2 = A(h\nu - E_g)$$

Donde A es una constante, α es el coeficiente de absorción, y $h\nu$ es la energía del fotón. La intersección con el eje x de la gráfica de $(\alpha h\nu)^2$ versus $h\nu$ corresponde al gap óptico E_g . El coeficiente de absorción α fue calculado por la relación:

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{1}{T}\right)$$

Donde t es el espesor de la película y T es la transmitancia [45, 46]. En la Figura 24 se muestra la gráfica de $(\alpha h\nu)^2$ respecto a la energía ($h\nu$), y se busca el valor la energía donde la recta que se ajusta a la primera pendiente de la gráfica corta al eje horizontal.

3.4.4 Comportamiento eléctrico de un Transistor efecto de campo

Una forma de visualizar cómo operan los dispositivos electrónicos activos es a través de gráficas de voltaje contra corriente [38]. Dichas gráficas y valores se obtienen a partir de una medición de corriente contra voltaje, para ello, se ocupa un equipo de medición I-V, la cual es

una herramienta muy útil para analizar dispositivos electrónicos y determinar sus características y rangos de operación.

El sistema de medición I-V cuenta con una tarjeta GPIB (estándar de conexión) que permite la comunicación de un ordenador con instrumentos electrónicos de medida. En la Figura 12 se muestra el diagrama de flujo del módulo de caracterización de un transistor [39].

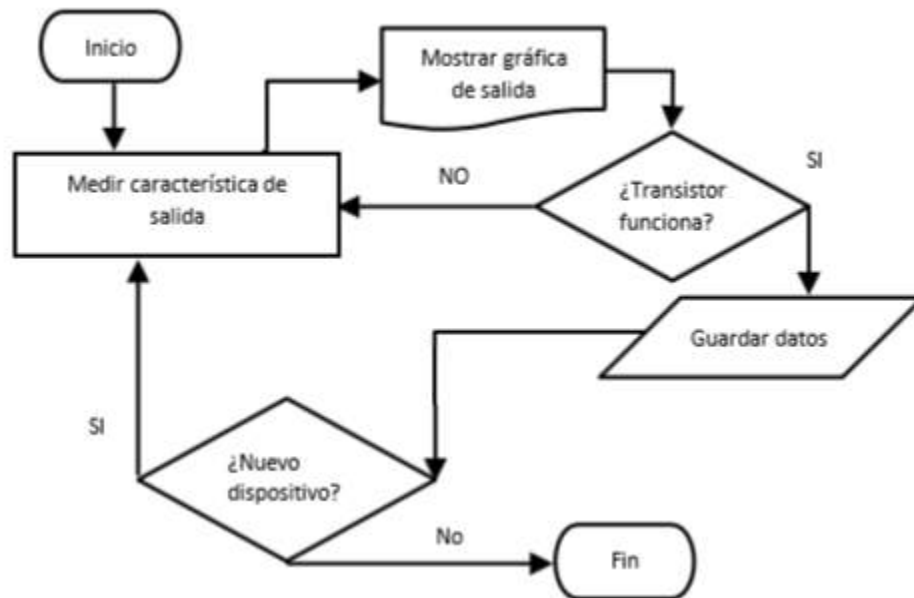


Figura 12. Diagrama de flujo.

CAPÍTULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este capítulo se describe la metodología empleados para el crecimiento de las películas mono y multicapa de ZnO, el proceso de recocido de las mismas, la fabricación de los transistores y la caracterización de películas y transistores. El transistor se forma depositando dos electrodos de aluminio sobre la película de ZnO (capa activa). En la Figura 13, se observa el esquema utilizado en el transistor, este esquema permite hacer una prueba estructural sin el desarrollo de la fabricación rigurosa de diseño, en este caso caracterización del óxido de zinc.

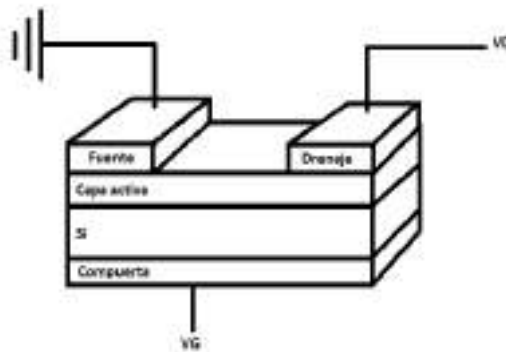


Figura 13. Ilustración esquemática del transistor visto de forma transversal.

El proceso de fabricación del transistor inicia con preparación y limpieza de substratos de silicio (14a), seguido de la formación de un depósito de ZnO (Figura 14b) y la fabricación de los contactos (Figura 14c). Una vez obtenida la estructura del transistor se caracteriza con el propósito de evaluar su desempeño eléctrico (Figura 14d).

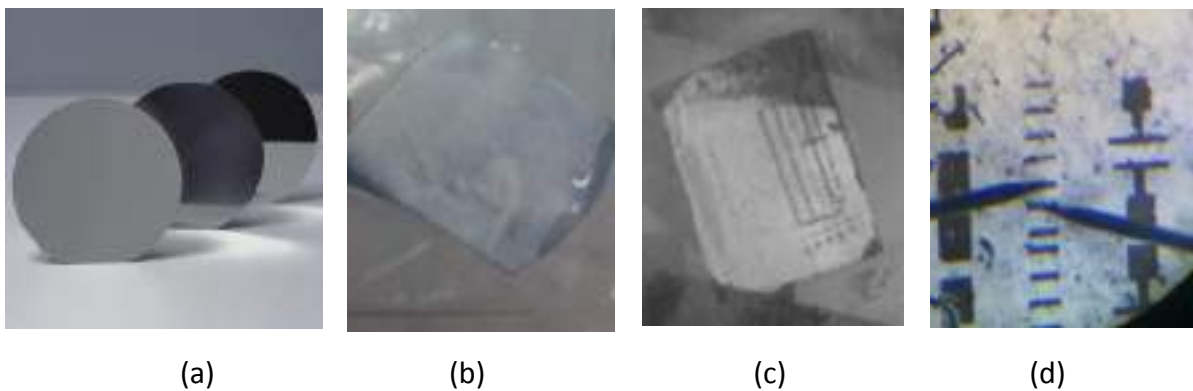


Figura 14. Diferentes fases para formar un transistor.

4.1 Procesamiento de películas multicapa de ZnO vía baño químico

El arreglo experimental empleado para el procesamiento de películas mono y multicapa de ZnO se muestra en la Figura 15. El baño térmico es *PolyScience temperature controller* modelo 80A0DG1B con capacidad máxima de 6 litros y un rango de temperatura: 0° a 100° C.

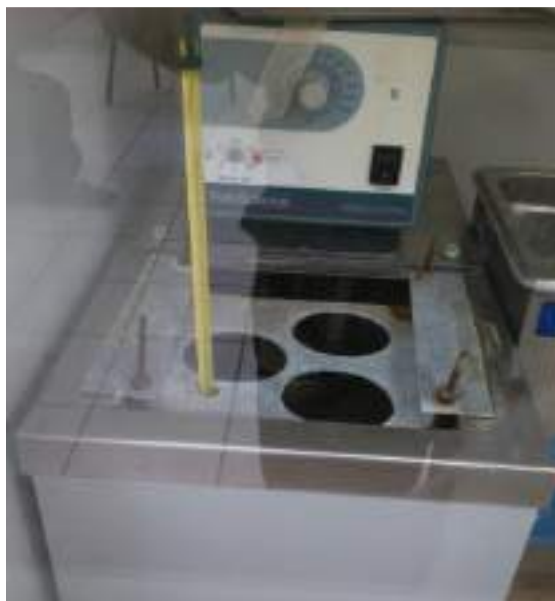


Figura 15. Arreglo experimental empleado para el procesamiento de películas.

El procesamiento de las películas mono y multicapa se inician con preparación del buffer (pH 11) de Cloruro de amonio (NH_4Cl)/Hidróxido de amonio (NH_4OH) y las soluciones de acetato de zinc ($\text{Zn}(\text{O}_2\text{CCH}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_2$) 0.2 M, trietanolamina ($\text{C}_6\text{H}_{15}\text{NO}_3$) 1 M e hidróxido de bario ($\text{Ba}(\text{OH})_2$) 0.1 M, empleado como diluyente agua desionizada.

Para el procesamiento de películas de ZnO, se emplea un matraz volumétrico de 100 mL y se colocan en este orden: 4 mL de solución de acetato de zinc 0.2 M, 5 mL de trietanolamina 1 M y 2 mL de hidróxido de bario 0.1 M. Luego, se afora con agua desionizada y se homogeneiza la solución. Posteriormente, se pone la solución en un vaso de precipitado y es colocada la muestra en la cual se quiere crecer la película ya sea un sustrato de vidrio o

silicio para colocarlo en un baño con temperatura controlada (70°C) por 90 minutos para depositar el ZnO.

Una vez depositado el material, el substrato recubierto con ZnO se remueve del baño químico para someterlo a tratamiento térmico. La formación de películas multicapa consiste en depósitos por baño químico y tratamientos térmicos sucesivos hasta obtener películas con 2, 3, 4 y 5 capas. En la siguiente sección se describe el procedimiento empleado para el tratamiento térmico de películas procesadas.

4.2 Tratamiento térmico de películas mono y multicapa de ZnO

El tratamiento térmico de las películas de ZnO consiste en un proceso de recocido a 300°C por 10 minutos en aire empleando un horno de la marca *Thermo Scientific*, modelo FB1410M. En la Figura 16 se muestra el horno utilizado para el tratamiento térmico de las películas mono y multicapa de ZnO. El horno utilizado tiene capacidad de 2.1 L y un rango de temperatura de 0° a 1000 °C.



Figura 16. Horno empleado para el tratamiento térmico de las películas multicapa de ZnO.

Antes del tratamiento térmico se enciende el horno con el propósito de alcanzar una temperatura uniforme de 300°C dentro de la cámara, posteriormente se coloca la muestra dentro del horno empleando como soporte una capsula de porcelana donde se mantiene a la

temperatura establecida durante 10 minutos. La manipulación de las muestras se realizó con pinzas de teflón. Para el desarrollo del tratamiento térmico se deberá considerar lo siguiente: a) tiempo mayores a 10 minutos provocan un sobrecalentamiento del acetato de zinc residual y cambia el color de las películas a un tono amarillento, b) las muestras se deben colocar en forma vertical con el depósito debe quedar dentro de la capsula de porcelana, anterior es con la finalidad de evitar marcas en el vidrio y la película de óxido de zinc, y c) no se recomienda colocar más de 2 sustrato de vidrio o en silicio en el interior de la capsula por lograr mejores resultados y temperatura más uniformes durante el tratamiento. Una vez obtenidas las películas mono y multicapa, se retiran del horno y se preparan para llevar a cabo el proceso de metalización.

4.3 Caracterización de películas de ZnO

4.3.1 Microscopia óptica

Por medio de un microscopio óptico se pudo hacer un análisis superficial de las películas monocapa y multicapa de ZnO formadas previamente en sustratos de vidrio. El cual consistió colocar el sustrato de vidrio en la platina, haciendo ajustes en el objetivo y ocular, que con la ayuda de una cámara digital se pudo la adquisición imágenes y posteriormente el análisis de las mismas. En la siguiente Figura 17 se muestra el microscopio óptico invertido Carl Zeiss modelo axio utilizado para el análisis superficial de las películas monocapa y multicapa de ZnO.



Figura 17. Microscopio óptico invertido Carl Zeiss modelo axio

4.3.2 Perfilometría

Las muestras se analizaron mediante perfilometría para determinar las características superficiales y el espesor de los depósitos de ZnO. En la Figura 18 se muestra el perfilómetro utilizado para la caracterización de las películas mono y multicapa de ZnO del presente trabajo. El perfilómetro es de la marca comercial KLA Tencor, modelo P7 y presenta características siguientes: a) Rango de medición de 0 a 11000 micras, b) Imágenes en 3D de diferentes superficies y c) permite la caracterización de materiales para rugosidad superficial y ondulación.

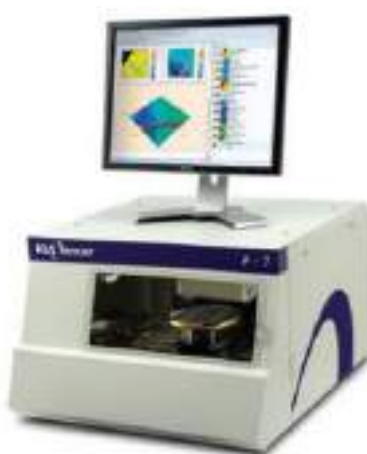


Figura 18. Perfilómetro KLA Tencor, modelo P7.

4.3.3 Espectroscopia UV-VIS

El equipo utilizado en la presente tesis fue el espectrómetro Perkin Elmer UV/VIS/NIR lambda 19 (ver Figura 19) con un rango espectral de 185-3200 nm, el cual permitió realizar mediciones de transmitancia y absorbancia a las muestras monocapa y multicapa de ZnO en vidrio. Para la obtención de transmitancia las muestras fueron analizadas en un rango de 310 a 800 nm.



Figura 19. Espectrómetro Perkin Elmer UV/VIS/NIR lambda 19

4.4 Fabricación de los contactos de los transistores de efecto de campo

El proceso de metalización permite formar películas delgadas y recubrimientos metálicos (aluminio), las cuales actúan como contactos en transistores de efecto de campo. El equipo utilizado para metalizar la muestra de silicio se presenta en la Figura 20, corresponde al modelo JEE-4X y se caracteriza por tener un límite de presión de 3×10^{-5} Pa (Un Pascal se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma).



Figura 20. Equipo para metalizar.

El proceso de metalizado inicia con la preparación de la muestra conteniendo el depósito de ZnO y sobre esta se coloca una mascarilla mecánica el patrón geométrico requerido para hacer transistores. Luego, el arreglo substrato-depósito de ZnO-mascarilla y el blanco de aluminio se coloca en el interior de la cámara. Posteriormente, se cierra la cámara para hacer vacío y se inicia el proceso de metalizado. Las condiciones de metalización fueron: 6.2×10^{-2} bar de presión y 35 A de corriente. Una vez que los contactos se han fabricado, se procede con la caracterización las estructuras correspondientes a los transistores de efecto de campo.

4.5 Caracterización eléctrica de transistores de efecto de campo basado en películas mono y multicapa de ZnO

Para esta caracterización se llevaron a cabo mediciones corriente (I) contra voltaje (V) en las estructuras correspondientes a los transistores de efecto de campo para determinar su desempeño. Para las mediciones de corriente-voltaje se empleó una estación de pruebas modelo *Probing Solution* PSI 200 y una fuente Keithley modelo 2400. El manejo y el análisis de los datos obtenido se realizaron mediante software empleado los programas *LabVIEW* y *OriginPro*. En la Figura 21 se muestra la estación de pruebas empleada para la caracterización eléctrica.

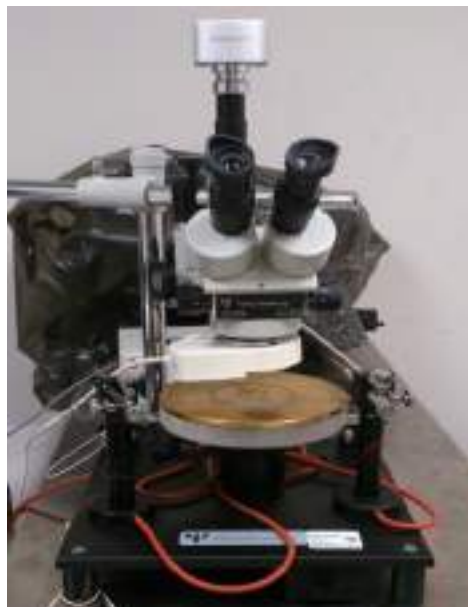


Figura 21. Estación de pruebas modelo PSI 200.

Los resultados obtenidos del programa se pueden visualizar en pantalla o guardados en un archivo electrónico para posteriormente ser graficados en *OriginPro 8.5*. Los detalles para el análisis y el procesamiento de datos en los programas *LabVIEW* y *Origin* se describe en el apéndice A.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Caracterización de películas mono y multicapa de ZnO

5.1.1 Caracterización superficial de películas mono y multicapa por microscopía óptica y electrónica.

La inspección visual de las películas de ZnO procesadas permite establecer las siguientes características físicas.

- Color: tiene un aspecto blanquizco y homogéneo.
- Adhesión y estabilidad: presenta adhesión apropiada entre el depósito de ZnO y el sustrato, el cual permite manipular las películas resultantes sin que se presenten desprendimientos.

Los resultados de la inspección de las películas monocapa y multicapa de ZnO mediante la técnica de microscopía óptica se presentan en la Figura 22.

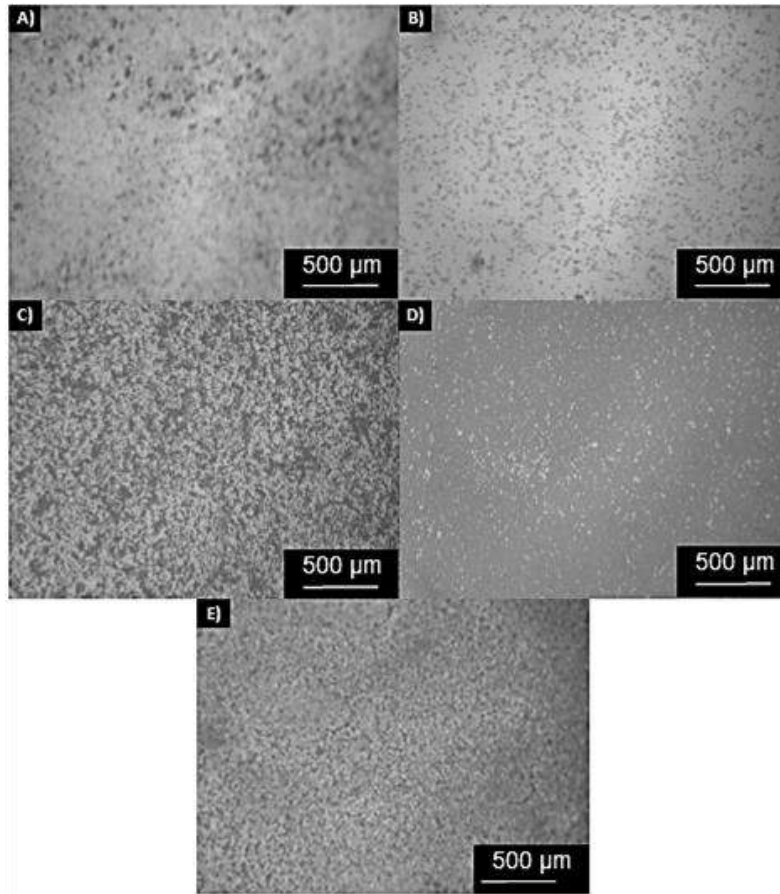


Figura 22. Resultados de microscopia óptica.

A continuación se describen las características superficiales de las películas mono y multicapa de acuerdo al análisis de imágenes de microscopia óptica.

- a) La Figura 22a es una imagen representativa de la superficie de las películas de ZnO de una capa. De acuerdo a estos resultados, las películas de ZnO monocapa no son uniformes y presentan niveles de porosidad considerable y pocos puntos de contacto entre las partículas que componen el material de ZnO depositado y tratado térmicamente, características que se asocian a una pobre densificación.
- b) La Figura 22b corresponde a la muestra representativa de las películas de ZnO con dos capas. De análisis de imágenes de microscopia óptica de estas muestras se puede establecer que las películas de ZnO de dos capas no son uniforme y exhibe

regiones compactas con una densificación aceptable, pero, se presenta como una película discontinua.

- c) La Figura 22c es de una muestra representativa de las películas de ZnO de tres capas. La cual se caracteriza por ser una película no es uniforme, no es compacta y presenta en su estructura alta porosidad y las partículas que las componen no están totalmente unidas, teniendo como consecuencia una densificación pobre del material resultante.
- d) La Figura 22d es una imagen representativa de las películas de ZnO de cuatro capas. Estas películas presentan una superficie uniforme, compacta, porosidad pobre o nula y las partículas que las componen se observan unidas. Los hallazgos observados en el análisis de las imágenes de microscopía óptica se pueden asociar a una densificación aceptable en las películas de cuatro capas.
- e) Por último, la Figura 22e es una imagen de una muestra representativa de las películas de ZnO de cinco capas, misma que se presenta como depósitos no uniformes y poco compactos. Su estructura muestra alta porosidad y las partículas que la componen presentan pocos puntos de unión que indican una densificación pobre. Además, se ven indicios de fractura en la película atribuible a los esfuerzos residuales y cambios volumétricos generados por el tratamiento térmico.

Con el propósito de conocer a detalle las características superficiales, microestructurales y espesor de las películas de ZnO con 4 capas, se realizaron observaciones adicionales en el microscopio electrónico de barrido. La Figura 23 corresponde a imágenes representativas de la superficie (a) y de un corte transversal (b) de las películas de ZnO con 4 capas.

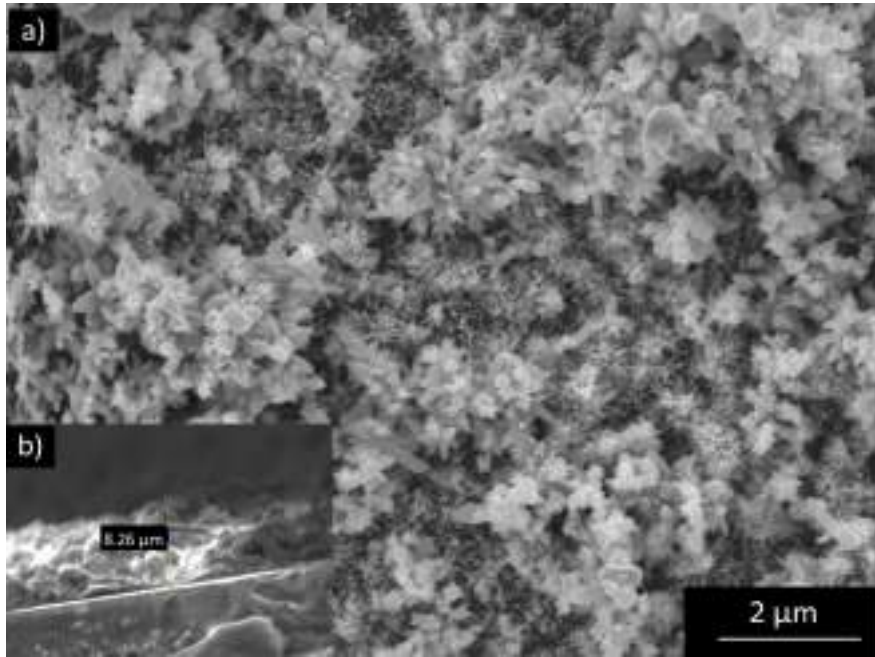


Figura 23. Imágenes de MEB representativas de la película de ZnO con 4 capas. a) Superficial y b) sección transversal.

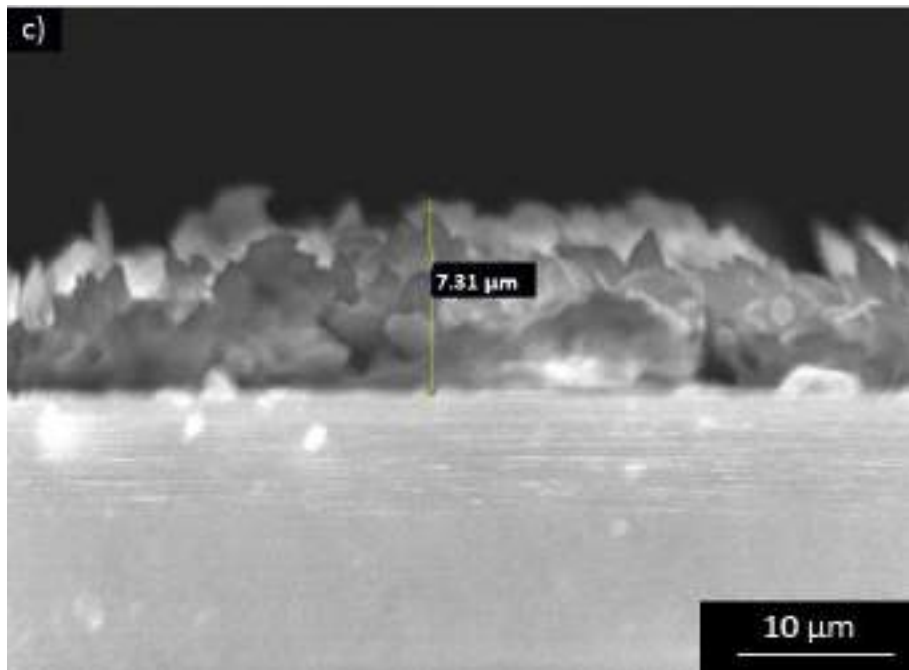


Figura 24. Imagen de MEB representativa sección transversal de la película de ZnO con 2 capas.

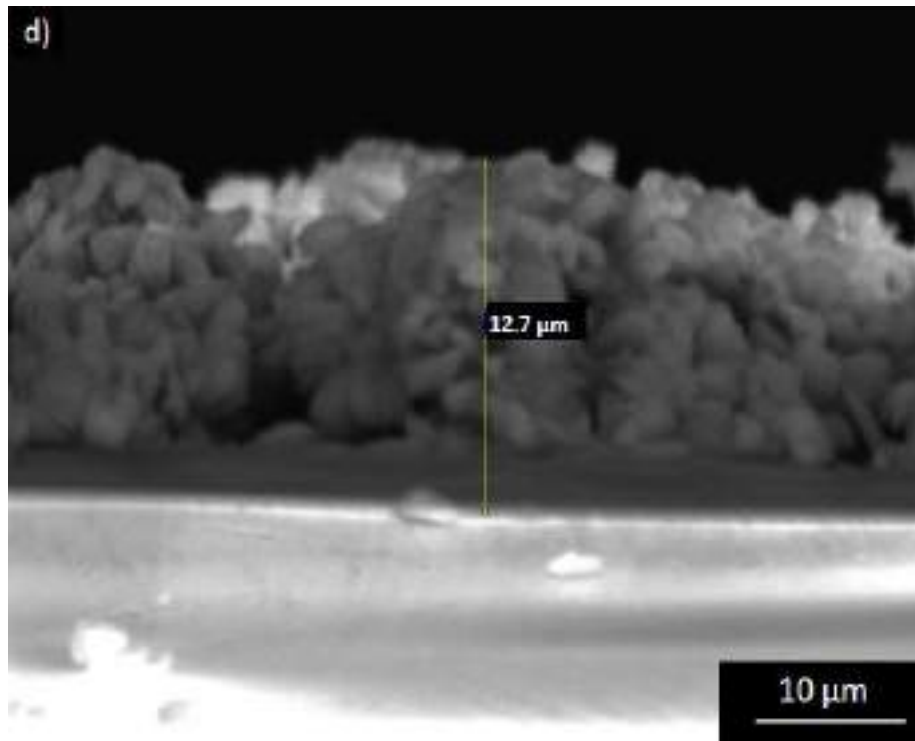


Figura 25. Imagen de MEB representativa sección transversal de la película de ZnO con 7 capas.

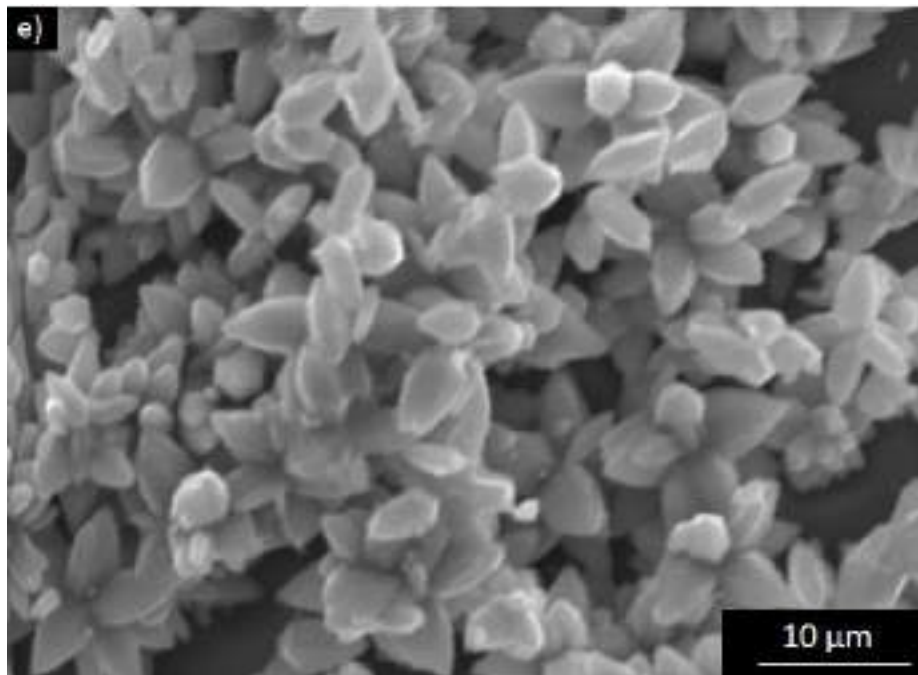


Figura 26. Imagen de MEB representativa sección superficial de la película de ZnO con 2 capas.

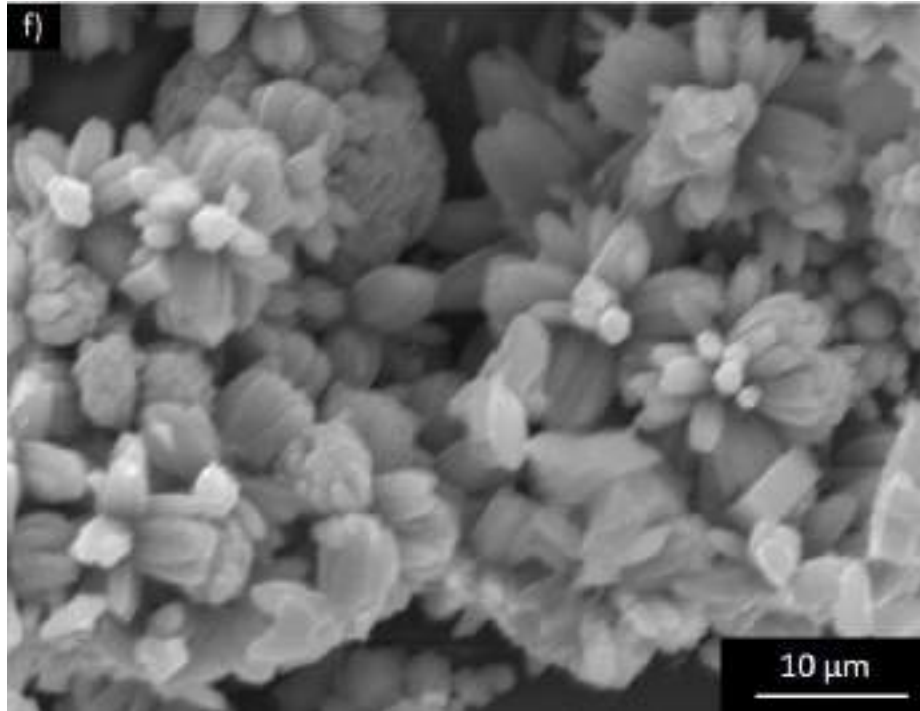


Figura 27. Imagen de MEB representativa sección transversal de la película de ZnO con 7 capas.

El estudio superficial detallado a altas magnificaciones (2000x) de la película de ZnO con 4 capas mediante la técnica de MEB permite observar detalles de las características morfológicas del depósito a nivel superficial. De acuerdo a este estudio, el material depositado corresponde a una mezcla de estructuras tipo erizos de mar y estrellas conformadas por agujas finas y partículas en forma de reforzamientos cortos discontinuos (*whiskers*), respectivamente. Por otra parte, el análisis de la sección transversal de las muestras observadas mediante MEB revela que el depósito tiene un espesor aproximado de 8.26 μm para la película con 4 capas, 7.31 μm para la película con 2 capas y 12.7 μm para la película con 7 capas. También, se confirma que el depósito es compacto y uniforme. Sólo la superficie es rugosa, características atribuibles a las características morfológicas del ZnO. Lo cual, es deseable en el desarrollo de dispositivos, ya que favorecen la adherencia entre el material activo (ZnO) y el contacto (depósito metálico de aluminio), así como, una mayor interacción entre ambos que puede influir en un mejor desempeño al ser aplicado en el desarrollo de dispositivos.

De acuerdo a los resultados anteriores, es posible establecer que las películas de 4 capas presentan mejores propiedades superficiales y microestructurales para ser empleadas como capa activa del transistor de efecto de campo propuesto. Debido a que son las que cumplen con las características superficiales requeridas para esta aplicación, tales como: densificación apropiada, uniformidad alta, porosidad mínima o nula y que corresponda a un depósito sin discontinuidades.

Sin embargo, para hacer una selección adecuada de las películas de ZnO como materiales activos para transistores de efecto de campo es necesario considerar otros parámetros, como: el espesor de las películas y el comportamiento óptico y ancho de banda prohibida.

5.1.2 Resultados de Perfilometría

En la Tabla I se muestran los resultados de espesores de película obtenidos por perfilometría de las películas mono y multicapa de ZnO.

Tabla I Valores de espesores de las películas mono y multicapa obtenidos por perfilometría.

Capas	Espesor (μm)
1	3.041
2	5.015
3	7.099
4	7.534
5	9.143

Como se esperaba, los valores de los espesores variaron considerablemente debido al número de capas depositadas por baño químico en las películas. Se observa que el espesor entre las películas mono y multicapa de ZnO incrementa conforme aumenta el número de depósitos o capas, siendo el valor del aumento de espesor de alrededor de 2 μm .

5.1.3 Caracterización óptica y determinación del ancho de banda prohibida de películas mono y multicapa de ZnO.

Los resultados de la caracterización óptica y de ancho de banda prohibida de las películas mono y multicapa se muestran en las siguientes secciones.

5.1.3.1 Transmitancia

Los resultados de transmitancia de las películas mono y multicapa de óxido de zinc en el rango de 300 a 800 nm mediante espectroscopia UV-vis se muestran en la Figura 28.

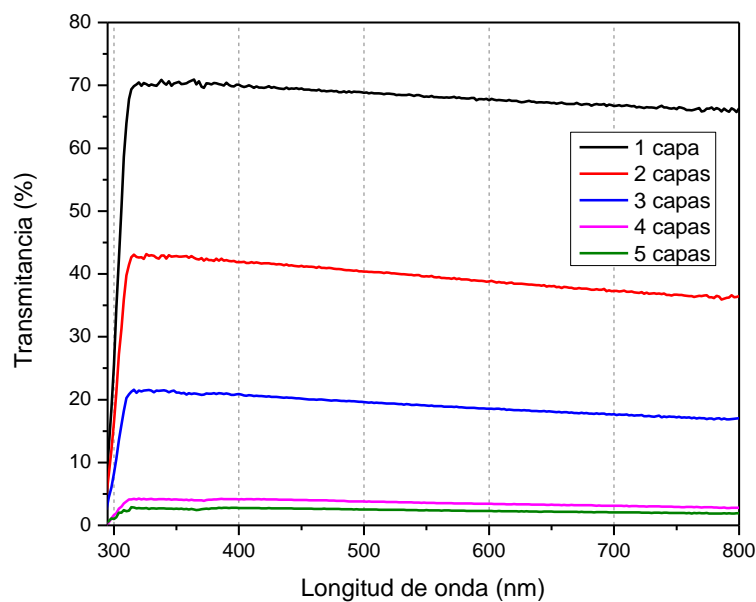


Figura 28. Curvas de transmitancia.

Considerando los resultados anteriores se puede establecer que las películas mono y multicapa presentan valores de transmitancia en el rango de 2 a 70% para valores de longitudes de onda de 310 a 800 nm. Además, las curvas de transmitancia muestran un comportamiento es inversamente proporcional al espesor de la película.

El incremento en los valores de transmitancia en función del número de capas y/o espesor es más marcado cuando se comparan los depósitos de 1 ($\approx 2\%$) y 2 ($\approx 5\%$) capas con los de 3 ($\approx 20\%$), 4 ($\approx 40\%$) y 5 ($\approx 70\%$) capas y muestra una tendencia polinómica de segundo orden. De acuerdo a estos resultados, a mayor número de capas menor será la cantidad de luz que atraviesa al material, por lo tanto el material tiene una apariencia más opaca.

5.1.3.2 Absorbancia

Los resultados de absorbancia se muestran en la Figura 29.

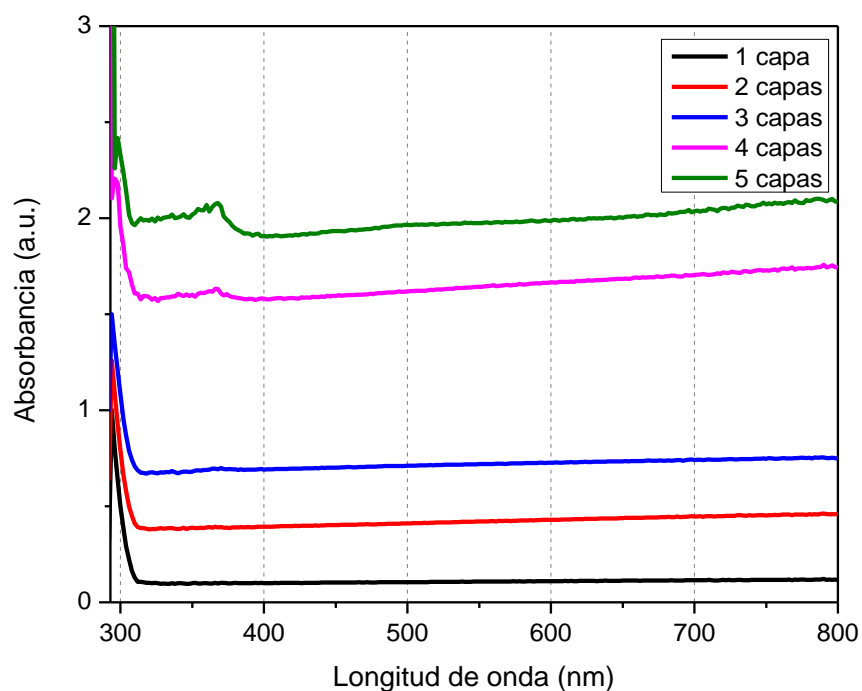


Figura 29. Curvas de absorbancia.

De acuerdo a los resultados anteriores, se puede establecer que los valores promedio de absorbancia son 0.1, 0.4, 0.7, 1.6 y 1.9 u. a. para películas de 1, 2, 3, 4 y 5 capas, respectivamente. Por lo tanto, cuanto mayor sea el número de capas que conformen la

película, mayor será la cantidad de luz absorbida y menor la cantidad de luz transmitida por dicho muestra.

5.1.3.3 Ancho de banda prohibida

En la Figura 30 se presentan las gráficas de Tauc correspondientes a las películas mono y multicapa de ZnO.

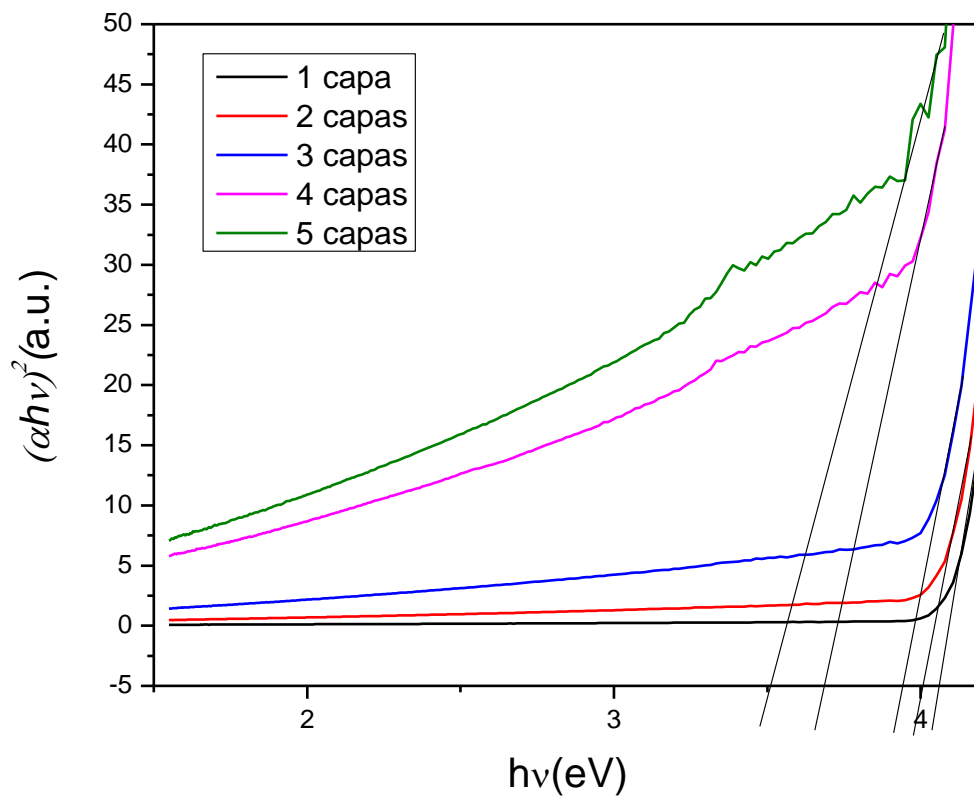


Figura 30. Cálculo del ancho de banda prohibida.

En la Tabla II se muestran los valores del ancho de banda prohibida obtenidos de la a partir de las gráficas de Tauc para las películas mono y multicapa de ZnO.

Tabla II. Resultado ancho de banda prohibida.

Número de capas	Ancho de banda prohibida (eV)
1	4.06
2	4.00
3	3.94
4	3.68
5	3.50

Los valores de ancho de banda prohibida para las muestras de analizadas se encuentran en el rango de 4.06 a 3.50 eV. Siendo el valor de ancho banda prohibida óptico de 4.06 eV para películas de una capa, de 3.68 eV para 4 capas y 3.50 eV para 5 capas. Los valores anteriores se consideran los valores aceptables para este material, ya que el óxido de zinc comúnmente presenta un ancho de banda prohibida de 3.35 eV. Por otra parte, es posible establecer que el número de capas y/o espesor tiene un efecto sobre el valor de ancho de banda prohiba y se observa que al aumentar el número de capas se presenta una disminución en el valor del ancho de banda prohibida.

De acuerdo a los resultados de la superficial, los espesores, la transmitancia, absorbancia y ancho de banda prohibida de las películas mono y multicapa, se seleccionaron las películas con 4 capas para fabricar los transistores de efecto de campo y evaluar su desempeño eléctrico.

5.2 Desempeño eléctrico de transistores de efecto de campo basados en películas multicapa

Los resultados del desempeño eléctrico de los transistores de efecto de campo basados en películas de ZnO se presentan en forma gráfica y corresponden a curvas de corriente contra voltaje en ausencia y presencia de luz.

La Figura 31 muestra las curvas de corriente contra voltaje en ausencia de luz del transistor basado en películas de ZnO de 4 capas con un canal de 20 μm . Bajo estas condiciones se generó una corriente (I_{ds}) de 15 μA con un voltaje de compuerta a 20 volts.

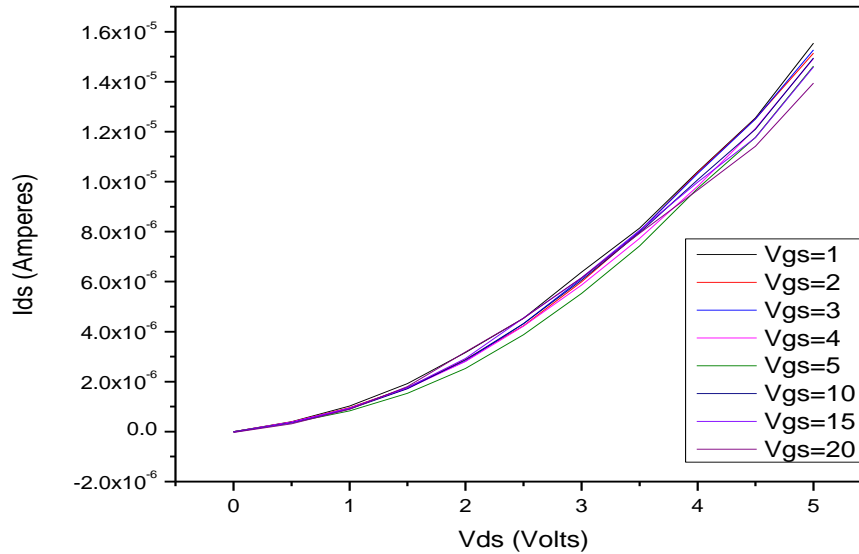


Figura 31. Medición I-V.

En la Figura 32 se muestra el transistor el cual tiene 4 capas de películas de ZnO con un canal de 40 μm en presencia de luz, en este caso se generó una corriente (I_{ds}) de 200 μA con un voltaje de compuerta a 20 volts.

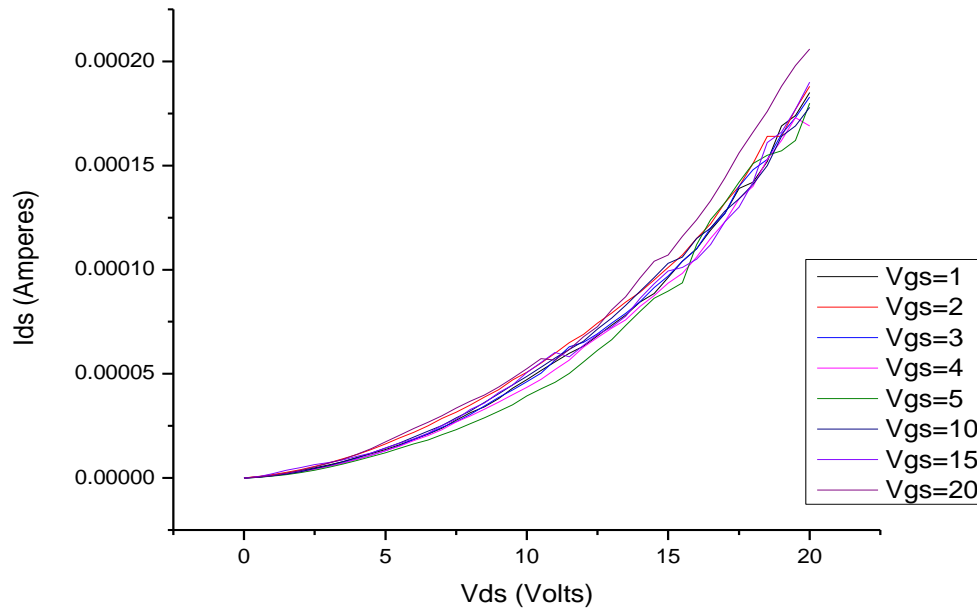


Figura 32. Medición I-V.

La Figura 33 muestra el desempeño eléctrico del transistor de efecto de campo con un canal de 80 μm basado en películas de ZnO de 4 capas. Este transistor tiene la característica de alcanzar la región de saturación aplicando un voltaje drenaje-fuente (V_{ds}) de 4 volts. Bajo estas condiciones, el transistor fabricado genera una corriente de drenaje-fuente (I_{ds}) de 31.5 μA con un voltaje de compuerta de 1 volts.

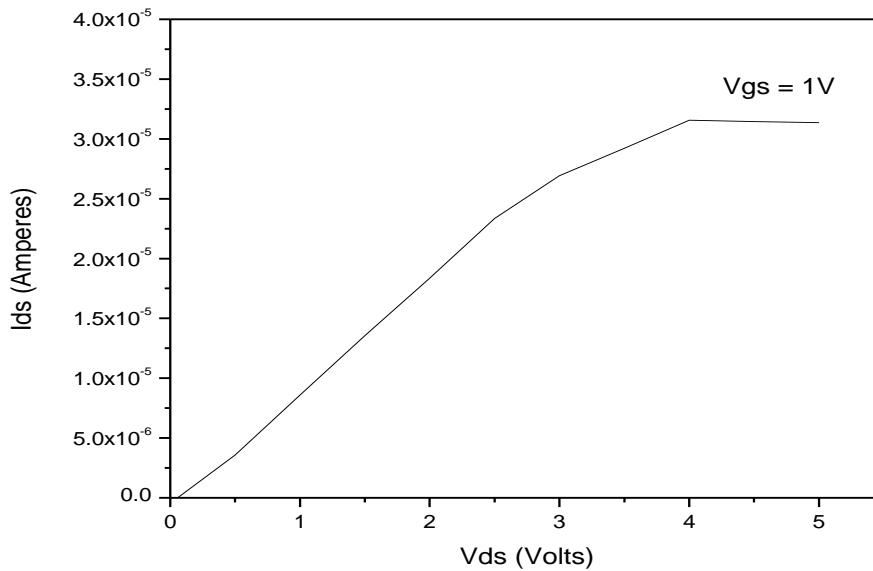


Figura 33. Medición I-V.

En las Figuras 31 y 32, se puede apreciar que el comportamiento de las curvas del transistor es aceptable, pero no del todo ideal. Esto se debe que al subir el voltaje del drenaje a la fuente, lo esperado sería que la corriente del drenaje a la fuente empezara a aumentar de manera lineal y no de manera logarítmica como lo fue en este caso.

Dando un aumento en V_{ds} (voltaje drenaje-fuente), el canal del transistor empieza a estrecharse próximo a la fuente, por lo que el aumento de la corriente I_{ds} (drenaje a fuente) empieza a decrecer, hasta llegar a ser muy reducido, por lo que solo se aproxima, sin llegar a ser una corriente I_{ds} (drenaje a fuente) constante. Esto quiere decir que, nuestro dispositivo no llega a la corriente de saturación I_d (sat).

En el caso particular de la Figura 33 se pudo llegar a la región de saturación, el cual la corriente I_{ds} (drenaje a fuente) llegó a ser constante.

Finalmente, se puede establecer que el efecto de la arquitectura de las películas mono y multicapa de ZnO influyen fuertemente en el desempeño de transistores de efecto de campo. Lográndose mejores resultados con películas de ZnO de 4 capas como material activo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

6 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos del presente estudio se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se estableció un procedimiento y condiciones apropiadas para el depósito de películas multicapa de ZnO empleado el método de baño químico.
- Se fabricaron películas monocapa y multicapa de ZnO, las cuales presentan características óptica y eléctrica apropiadas para su aplicación en transistores de efecto de campo como capa activa.
- Se desarrollaron y fabricaron transistores de efecto de campo con un desempeño aceptable basados en películas de ZnO de cuatro capas.

CAPÍTULO VII

**RECOMENDACIONES
PARA TRABAJOS FUTUROS**

7 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda realizar un estudio detallado que permita optimizar el desempeño de transistores de efecto de campo basados en películas de ZnO multicapa. Lo anterior, se puede lograr mediante la variación de las características microestructurales y superficiales de las películas que actúan como material activo (ZnO). Así mismo, se considera importante realizar modificaciones en la configuración de la estructura del transistor empleando diferentes materiales para contacto (oro, plata y platino) y variaciones en los espesores de los contactos de acuerdo al espesor del material activo empleado.

CAPÍTULO VIII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J.C. Johnson, H. Yan, R. D. Schaller, L. H. Haber, R. J. Saykally and P. Yang, *J. Phys. Chem.*, 105, 11387 (2001).
2. P. Duran, F. Capel, J. Tartaj and C. Moure, *Adv. Mater.*, 14, 137 (2002).
3. Dae-Kue Hwang, Min-Suk OH, Jae- Hong Lim and Seong-Ju Park, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 40, R387 (2007).
4. N. Izyumskaya, V. Avrutin, U. Ozgur, Y. I. Alivov and H. Morkoc, *Physica Status Solidi (b)*, 244, 1439 (2007).
5. S. Masuda, K. Kitamura, Y. Okumura, S. Miyatake, H. Tabata and T. Kawai, *J. Appl. Phys.*, 93, 3 2003).
6. K. Ramamoorthy, M. Arivanandhan, K. Sankarnarayanan and C. Sanjeevaraja, *Materials Chemistry and Physics*, 85, 257 (2004).
7. T. Saeed and P. O. Brien, *Thin Solid Films*, 271, 35 (1995).
8. A. Drici, G. Djeteli, G. Tchangbedji, H. Derouiche, K. Jondo, K. Napo, J. C. Bernede, S. Ouro- jobo and M. Gbagba, *Phys. Stat. Sol. (a)* 201, 1528 (2004).
9. J. Ouerfelli, M. Regragui, M. Morsli, G. Djeteli, K. Jondo, C. Amory, G. Tchangbedji, K. Napo and J. C. Bernede, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 39,1954 (2006).
10. H. Khallaf, I. Oladeji and L. Chow, *Thin Solid Films* 516, 5967 (2008).
11. H. Khallaf, I. Oladeji, G. Chai and L. Chow, *Thin Solid Films* 516, 7306 (2008).

12. M. Simurda, P. Nemeč, P. Formanek, I. Nemeč, Y. Nemcova and P. Maly, *Thin Solid Films* 511, 71 (2006).
13. S. Erat, H. Metin and M. Ari, *Mater. Chem. Phys.* 111, 114 (2008).
14. T. Gujar, V. Shinde, W. Kim, K. Jung, C. Lokhande and O. Joo, *Appl. Surf. Sci.* 254, 3813 (2008).
15. M. Ortega, G. Santana and A. Morales- Acevedo, *Solid-State Electron.* 44, 1765 (2000).
16. A. Pudov, J. Sites and T. Nakada, *Japan. J. Appl. Phys.* 41, L672 (2002).
17. J. Cheng, D. Fan, H. Wang, B. Liu, Y. Zhang and H. Yan, *Semicond. Sci. Technol.* 18, 676 (2003).
18. A. Chaparro, C. Maffiotte, M. Gutierrez, J. Herrero, J. Klaer, K. Siemer and D. Braunig, *Thin Solid Films* 387, 104 (2001).
19. C. Lokhande, P. Patil, A. Ennaoui and H. Tributsch, *Appl. Surf. Sci.* 123, 294 (1998).
20. P. O'Brien, T. Saeed and J. Knowles, *J. Mater. Chem.* 6, 1135 (1996).
21. M. Ortega-Lopez and A. Morales- Acevedo, *Proc. 26th Photovoltaic Specialists Conf.* (Anaheim, A, USA) p555 (1997).
22. M. Ortega-Lopez, A. Avila-Garcia, M. Albor-Aguilera and V. Resendiz, *Mater. Res. Bull.* 38, 1241(2003).

23. A. Ennaoui, M. Weber, R. Scheer and H. Lewerenz, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 54, 277 (1998).
24. R. Mikami, H. Miyazaki, T. Abe, A. Yamada and M. Konagai, 3rd World Conf. On Photovoltaic Energy Conversion (Osaka, Japan) p519 (2003).
25. K. Govender, D. Boyle, P. Kenway and P. O'Brien, J. Mater. Chem. 14, 2575 (2004).
26. A. Peiro, C. Domingo, J. Peral, X. Domenech, E. Vigil, M. Hernandez-Fenollosa, M. Mollar, B. Mari and J. Ayllon, Thin Solid Films 483,79 (2005).
27. M. Cristina Vicente Manzano, El óxido de Zinc, Universidad Complutense Madrid, 2013
28. Dwight R. Acosta, Carlos R. Magaña y Catalina Beltrán, Efectos de la temperatura en las propiedades de películas delgadas de ZnO electrodepositado, Instituto de Física Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
29. Temístocles Mendivil Reynoso, Fabricación de transistores FET a base de una película delgada de óxido de zinc, Universidad de Sonora, 2011
30. Helen María Reverón Poján, Depósito Química de Vapor (CVD), Universidad Simon Bolivar, 2010
31. Fundación Wikimedia, Espectrofotómetro, 2014
32. Hewlett Packard, The Diode-Array Advantage in UV-VIS Spectroscopy. Publication N°12 - 5594-8912, 1988.
33. Mónica González, Transmitancia y Absorbancia, Iguia2000, 2010

34. Dr. Freddy Alberto Pereira Guanuche, Universidad Técnica de Machala, facultad de ciencias químicas y de la salud carrera de bioquímica y farmacia, Espectrofotometría, 2014
35. Fernando Contreras Castro, Prezi, Microscopio de Fuerza Atómica, 2014
36. Nayeli Pineda Aguilar, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C., 2015
37. Testalr instruments for solutions, Perfilometría Mecánica, 2013
38. Instituto Nacional de Tecnologías educativas y de formación del profesorado, Transistor, 2015
39. Rodolfo Zola García Lozano, Diseño e implementación del módulo de medición de transistores MOSFET, Centro universitario UAEM Ecatepec, Ecatepec, Edo. De Méx., México, 2011
40. Helen María Reverón Poján, Técnica Sol-Gel, Universidad Simon Bolivar, 2010
41. American Water Solution (AWC), Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS), 2008
42. Sharatronica, Mosfets, 2014
43. Escuela Politécnica Superior de Albacete, FET de unión (JFET), 2015
44. J. Tauc, Amorphous and Liquid Semiconductor (Plenum Press, New York, 1976).
45. A. S. Obaid, M. A. A. S. Obaid, M. A. Mahdi, Z. Hassan, and M. Bououdina, Characterization of nanocrystalline PbS thin films prepared using microwave-assisted

chemical bath deposition,” *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15, 564–571 (2012).

46. J. I. Pankove, *Optical processes in semiconductors* (Dover publications, Inc., New York, 1971), 1st ed.

47. J.A. Martin Gago, *La microscopia para el estudio de materiales y películas delgadas*.

48. Escuela del nodo, *Películas delgadas y Nano estructuras, Microscopia electrónica*.

49. Raquel Portela Rodríguez, *Eliminación fotocatalítica de H₂S en el aire mediante TiO₂ soportado sobre sustratos transparentes en el UV-A*, Universidad Santiago de Compostela, 2008.

50. Fundación Wikimedia, *Evaporación a vacío*, 2014.

51. Centro de Astrobiología, *MILKA good engineering takes time* Evaporador térmico.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Preparación de soluciones

Molaridad (M) = moles del compuesto/L de solución

= (gramos del compuesto/ peso molecular del compuesto)/L de solución

=gramos del compuesto/[(peso molecular del compuesto)x(L de solución)]

Por lo tanto:

Gramos del compuesto = (molaridad)(peso molecular)x(L de solución)

Cálculos para preparar una 100 mL de solución de acetato de zinc 0.2 M:

(219.5 g/mol)(0.2M)(0.1 lts)= Se utiliza 4.39 gramos de acetato de zinc para 0.1 litros

Para la trietanolamina se realizó el siguiente cálculo:

(149.188 g/mol)(1 M)(0.1 lts)= Se utiliza 14.9 gramos de trietanolamina para 0.1 litros

Para el buffer ph11 se usan 2 compuestos, el cloruro de amonio e hidróxido de amonio de la siguiente forma:

El cloruro de amonio se prepara a 100 ml, entonces, su peso molecular es de 53.49 g/mol, procedemos a preparar la solución:

(53.49 g/mol)(1 M)(0.1 lts)= Se utilizan 5.34 gramos de cloruro de amonio para 0.1 litros.

En el caso del hidróxido de amonio se ocupan 100 ml puro, estos 100 ml se mezclaran junto con los 100 ml previamente preparados del cloruro de amonio dando como resultado 200 ml de buffer ph11.

Para el hidróxido de bario se realizó el siguiente cálculo:

(315.48 g/mol)(0.1 M)(0.1 lts) = Se utilizan 3.15 gramos de hidróxido de bario para 0.1 litros

Una vez realizadas las mediciones adecuadas y el pesaje sobre los materiales que se emplearán, se procede a fabricar la película de ZnO.

Para el pesaje se ocupó la balanza: Traveler ohaus TA301 como la mostrada en la Figura 34.

Entre sus características están:

- Capacidad/ Alcance máximo: 300 g.
- Unidades de pesaje: g, N.
- Temperatura de operación: 10° a 40° C.
- Dimensiones del platillo (cm): 12 diam



Figura 34. Balanza Traveler ohaus TA301.

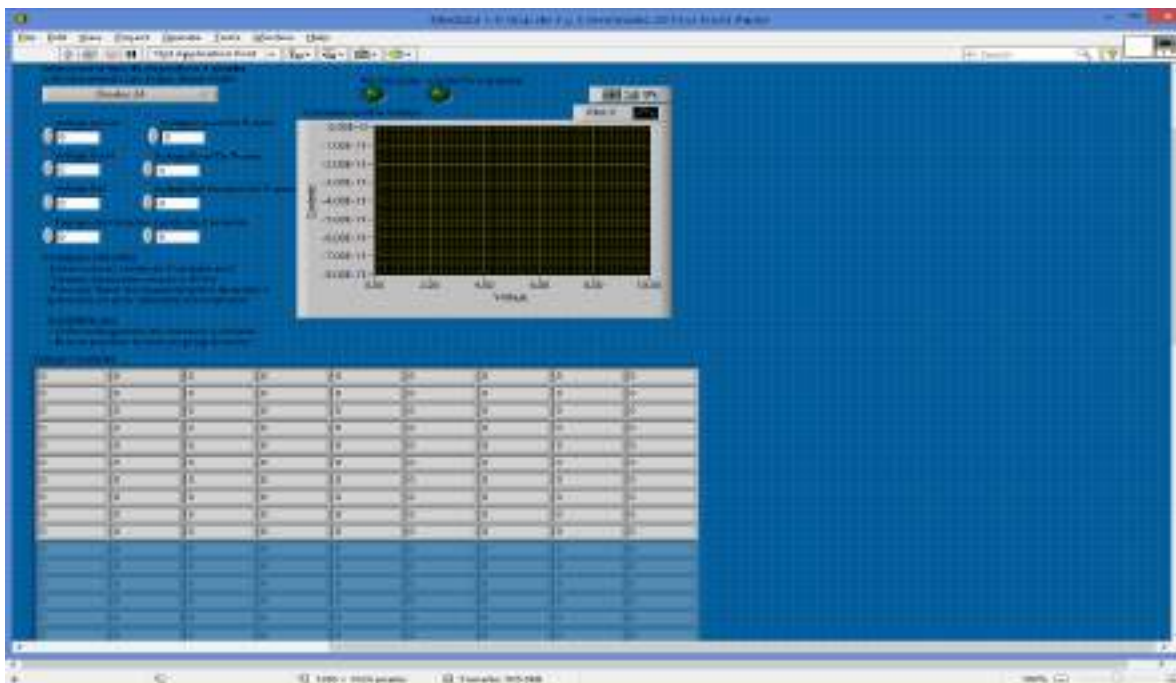
APÉNDICE B. Procedimiento para graficar curvas de I-V en Lab View

Para el procesamiento de datos y construcción de graficas de I-V en el programa *LabVIEW*, se realizará lo siguiente:

Dando inicio al programa *LabVIEW* aparecerá la siguiente ventana



Hacer clic en la opción Launch LabVIEW y se abrirá la siguiente ventana

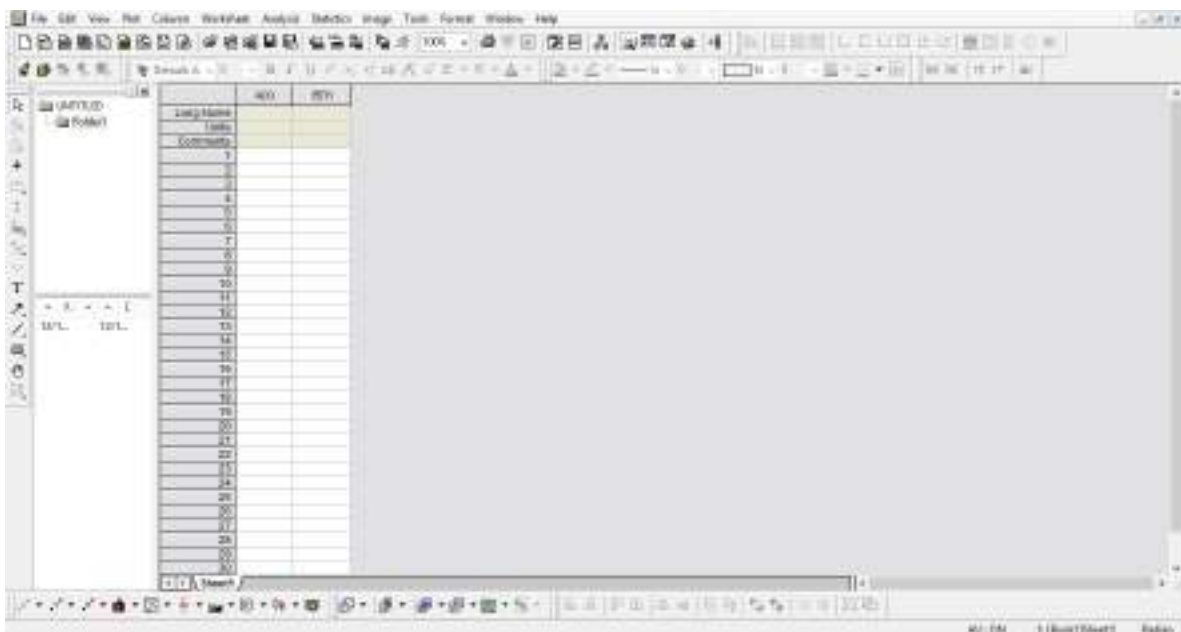


En el encabezado donde se es mostrada (El tipo de dispositivo a prueba y el instrumento con el que se desea medir) la opción a elegir en la casilla es Diodos24, como se ocupa realizar mediciones de corriente contra voltaje al seleccionar este tipo configuración permite realizar dicha función utilizando el equipo keithley 2400 como fuente-medidor en el cual se puede caracterizar dispositivos que presenten consumo de corriente medio.

Seleccionado Diodos24 se llenaran las correspondientes casillas, una vez hecho esto, para dar inicio vamos a la opción run y listo, se procede a guardar el documento.

Para el programa *Origin*, se realizará lo siguiente:

Cuando inicie el programa aparecerá la siguiente ventana



Dependiendo de los datos, se añade un determinado número de columnas, para ellos vamos a la opción de **column, add new columns** y se procede escribir el número de columnas que se utilizarán.

Posteriormente se coloca el nombre de las columnas, las unidades y se empieza a realizar los cálculos correspondientes si son requeridos.

Para asignar el eje correspondiente, con el clic derecho se selecciona la columna que nos interesa, nos vamos a la opción **set as** y seleccionar el eje deseado.