

UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA**

FABRICACIÓN DE TRANSISTORES FET A BASE DE UNA PELICULA DELGADA DE ÓXIDO DE ZINC

The seal of the University of Sonora is a circular emblem. It features a central shield with a book and a quill pen. Above the shield is an owl, and below it is a banner. The shield is surrounded by a circular border containing the text 'UNIVERSIDAD DE SONORA'.

TESIS

Presentada al Departamento de Investigación en Física como
requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA)

PRESENTA:

TEMÍSTOCLES MENDIVIL REYNOSO

Hermosillo, Sonora, México

Agosto del 2010

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

UNIVERSIDAD DE SONORA

**DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA**

FABRICACIÓN DE TRANSISTORES FET A BASE DE UNA PELICULA DELGADA DE ÓXIDO DE ZINC

TESIS

Presentada al Departamento de Investigación en Física como
requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (FÍSICA)

PRESENTA:

TEMÍSTOCLES MENDIVIL REYNOSO

Director de Tesis

DR.DAINET BERMAN MENDOZA

Codirector de Tesis

DR. RAFAEL RAMÍREZ BON

Hermosillo, Sonora, México

Agosto del 2010

Agradecimientos...

A todas esos amigos y compañeros de años que esperan más de mi delo que yo espero y que siguen estando ahí para recordármelo...

A todos esos nuevos amigos que hice en esta etapa de mi vida, no diré nombres, al que le quede el chaleco que se lo ponga, ellos saben quiénes son, conviven con migo.

A todas esas personas con aires de grandeza con que me tope en este entorno y me hicieron ver como no quiero llegar a ser el día de mañana.

A Lizeth por aparecer el otro lado de la puerta del lab donde me toco ir a trabajar, le deseo lo mejor donde se encuentre.

Al profesor y amigo Jesús castillo por ayudarme a acabar este trabajo, gracias.

A todas esas personas que tuvieron que ver directa o indirectamente con que yo terminara este trabajo, gracias.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Propiedades del ZnO	2
1.3 Objetivo General	4
1.4 Objetivos Particulares	4
1.5 Estructura de la tesis	4

CAPÍTULO 2

TÉCNICAS DE DEPÓSITO Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS	6
2.1 Introducción	6
2.2 Síntesis de películas delgadas	6
2.2.1 Baño químico	7
2.2.2 Deposición química de vapor CVD	8
2.2.3 Pulverización catódica (sputtering)	8
2.3 Sistema sputtering	8
2.3.1 Magnetron sputtering	10
2.4 Depósito de películas de ZnO por sputtering	11
2.5 Características de películas delgadas semiconductoras.	12
2.5.1 Características Ópticas	12
2.5.1.1 Reflexión y Transmisión	12
2.5.1.2 Coeficiente absorción (α)	19
2.6 Características estructurales rayos-X	20
2.7 Características Morfológicas AFM	22

CAPÍTULO 3

TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO (FET)	23
3.1 Introducción	23
3.2 Dieléctrico de compuerta	24
3.3 Clasificación de los FET	24
3.4 MOSFET	25
3.4.1 Capacitor Metal-Óxido-Semiconductor	26
3.5 Esquema estructural de un pseudo MOSFET a base de una capa activa de ZnO	29
3.5.1 Comportamiento del pseudo MOSFET	29
3.6 Caracterización de los dispositivos TFT pseudo MOSFET	31
3.6.1 Región lineal de operación	32
3.6.2 Región de saturación	33
3.7 Proceso de fabricación	37
3.7.1 Oxidación térmica	37
3.7.2 RCA	38
3.8 Esquema de fabricación experimental.	39
3.9 Crecimiento de películas delgadas de ZnO por r.f magnetron sputtering	40
3.9.1 Preparación de los sustratos	40
3.9.2 Crecimiento de películas de ZnO	40
3.10 Metalización de contactos	42
3.11 Propiedades ópticas	43
3.12 Estructura cristalina	43
3.13 Morfología	43
3.14 Propiedades eléctricas	43
CAPÍTULO 4	
RESULTADOS	44
4.1 Caracterización Morfológica	44
4.1.1 Caracterización Morfológica estructural (XRD).	44
4.1.1.1 Calculo de tamaño de grano	45

4.2 Caracterización Morfológica superficial (AFM).	47
4.3 Caracterización Óptica	48
4.3.1 Calculo de la banda de energías prohibida	50
4.3.2 Calculo de los espesores	52
4.4 Caracterización eléctrica del Dispositivo	54
4.5 Resultados del Dispositivo (TFT)	54
CAPÍTULO 5	
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	63

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Propiedades físicas de un cristal de ZnO	4
Tabla 4.1	Crecimientos de grano del material policristalino	46
Tabla 4.2	Valores promedio de rugosidad y agregados de las muestras	48
Tabla 4.3	Resultados de la banda de energías prohibida de las series	51
Tabla 4.4	Valores de índices de refracción y espesores del ZnO calculadas a partir de las franjas de interferencia del espectro Rf	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Estructura hexagonal tipo wurzita de ZnO	3
Figura 2.2	Iones incidentes y Átomos expulsados del material	8
Figura 2.3	Representación esquemática de un sistema de pulverización catódica (Sputtering).	9
Figura 2.4	Sistema sputtering	9
Figura 2.5	Componentes E_p y E_s del haz de luz incidente a una interface entre dos medios	13
Figura 2.6	Ilustración de dos sistemas de materiales de dos y tres medios	14
Figura 2.7	Reflexiones múltiples atenuadas en un sustrato no absorbente	17
Figura 2.8	Reflexiones múltiples atenuadas a través de una película delgada y un sustrato no absorbentes	18
Figura 2.9	Difracción de Rayos-X en un cristal	20
Figura 2.10	Esquema descriptivo de un Microscopio de fuerza atómica	22
Figura 3.1	Esquema de un capacitor MOS	26
Figura 3.2	Función de trabajo de un metal, función de trabajo de un semiconductor y afinidad electrónica	27
Figura 3.3	Perfiles de banda de la estructura de un MOS a) En equilibrio b) En forma de bandas planas	27
Figura 3.4	Diagrama de bandas de energía y diagrama de bloques de carga correspondientes, que describen el estado de un capacitor MOS	28

Figura 3.5	Ilustración esquemática de una estructura TFT	29
Figura 3.6	Esquema experimental de pseudo MOSFET con capa activa de ZnO empleado en este trabajo	31
Figura 3.7	Características de DC para FET	32
Figura 3.8	Determinación del voltaje umbral	34
Figura 3.9	a) Determinación de la conductancia del canal, b) Determinación de la razón de encendido, transconductancia y voltaje S	36
Figura 3.10	Esquema de fabricación	39
Figura 3.11	Porta muestras del sistema de sputtering	41
Figura 3.12	Proceso Litográfico	42
Figura 4.1	a) Patrón de difracción de rayos X de películas depositadas de ZnO, b) Patrón de referencia de difracción de Rayos X para ZnO	45
Figura 4.2	Tamaño de grano vs Tiempo de depósito de capas de ZnO	46
Figura 4.3	Micrografías superficiales por AFM de algunas muestras representativas, a) 100W15, b) 75W15, c) 50W15.	47
Figura 4.4	Espectros de transmisión y de Reflexión de capas de ZnO depositadas en potencias de 100, 75 y 50 Watts y tiempos de 20, 15 y 10 minutos	49
Figura 4.5	Espectros de Absorción de capas de ZnO depositadas en potencias de 100, 75 y 50 Watts y tiempos de 20, 15 y 10 minutos.	50
Figura 4.6	Banda prohibida vs Tiempo de depósito	51
Figura 4.7	Espectros calculados de Reflectancia (Rf) para un sistema aire/ZnO/vidrio	52
Figura 4.8	Espesor de las capas de ZnO vs potencia y vs Tiempo	53
Figura 4.9	Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 50 watts.	55
Figura 4.10	Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 75 watts	56
Figura 4.11	Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 100 watts.	57
Figura 4.12	Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 150 watts y calentamiento de sustrato a 150°C	58
Figura 4.13	Características $\text{Log}(I_D)$ - V_G y $I_D^{1/2}$ - V_G con V_{DS} constante para transistores depositados a 150°C	59
Figura 4.14	Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 150 watts	60
Figura 4.15	Características $\text{Log}(I_D)$ - V_G y $I_D^{1/2}$ - V_G con V_{DS} constante para transistores depositados a temperatura ambiente	61

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Desde hace muchas décadas existe el interés por desarrollar dispositivos electrónicos con características físicas sobresalientes entre las que podemos mencionar propiedades electroópticas, acusto-ópticas, piezoeléctricas y termoeléctricas; para el desarrollo de estos dispositivos se ha experimentado con diversidad de semiconductores elementales como el Silicio (Si) y el Germanio (Ge), así como con materiales compuestos, entre lo que podemos mencionar al GaAs, Carburo de silicio (SiC), Nitruro de galio (GaN) y sus derivados. Estos semiconductores tienen como característica común que son semiconductores de banda prohibida angosta excepto el GaN, sin embargo con el desarrollo de pantallas delgadas, últimamente se trata de desarrollar dispositivos semitransparentes. Es por ello que se han realizado investigaciones en otros materiales como el Óxido de Zinc (ZnO). El ZnO es un semiconductor ópticamente transparente en la región del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético. El principal interés sobre el Óxido de Zinc radica en sus propiedades optoelectrónicas, piezo-electrónicas y piezo-ópticas muy atractivas para el desarrollo de dispositivos con aplicaciones en las áreas de ondas acústicas, comunicaciones por fibras ópticas y optoelectrónica. Debido a su gran banda de energía prohibida (E_g), las películas de ZnO han sido empleadas como capas de ventanas en celdas solares. Otra ventaja del ZnO es su estabilidad química que permite ser depositado por métodos químicos de fabricación. El ZnO también compite con el ITO (Indium Thin Oxide) como conductor transparente debido a su bajo costo y toxicidad. Otras de las aplicaciones de las películas de ZnO son en las áreas de sensores de gas, lubricantes sólidos a alta temperatura en motores de turbina de gas y dispositivos electrocrómicos.

Los Transistores de película Delgada de ZnO (TFT por sus siglas en ingles) han despertado el interés de la comunidad científica debido a sus características especiales entre

las que se incluyen: su amplio banda prohibida, transparencia y su alta movilidad de efecto de campo comparada con la de los TFTs convencionales de Silicio [1]. Recientemente el interés se ha centrado en el desarrollo de transistores con nuevos materiales como canal para resolver problemas relacionados con la baja movilidad de efecto de campo y la opacidad del Silicio. Los materiales que están bajo estudio son los semiconductores transparentes para fabricar Pantallas de Cristal Líquido de Matriz Activa (AMLCD) o pantallas de Leds Orgánicos (OLED Displays), para evitar la restricción de área, ya que se podría desarrollar toda la electrónica transparente sobre la pantalla. La mayoría de esos estudios se han realizado sobre diferentes sustratos, compuertas y aislantes de compuerta para encontrar una estructura óptima para que los TFTs de ZnO cumplan los requerimientos mínimos para las aplicaciones antes mencionadas.

Transistores de ZnO como canal activo sobre sustratos de vidrio muestran buenas características, tales como bajas corrientes de fuga, de $\sim 10^{-11}$ A, razones de corriente de encendido 10^5 y movilidades de saturación de ~ 30 cm²/V s. El rendimiento del ZnO es 20 veces mejor que el de los semiconductores orgánicos, este puede ser fabricado sobre sustratos de plástico flexibles a temperatura ambiente. En este trabajo se realiza la fabricación y caracterización de transistores FET de canal a base de canal de ZnO depositado usando la técnica RF Magnetron Sputtering sobre sustratos de SiO₂/Si.

1.2 Propiedades del ZnO

El Óxido de Zinc es un compuesto inorgánico semiconductor que pertenece a la familia II-VI. Cuenta con una energía de banda prohibida directa de 3.37 eV, esta propiedad lo hace transparente a la luz visible, opera en longitudes de onda entre el azul y el UV. La energía de enlace para este compuesto es de ~ 60 meV, la cual es alta comparada con el GaN, la cual es de ~ 25 meV, esta alta energía de enlace resalta la eficiencia en la emisión de luz. A temperatura ambiente el ZnO presenta una movilidad de ~ 200 cm² V⁻¹ y una alta velocidad de saturación. Una característica del ZnO es que posee la habilidad para personalizar su banda prohibida por sustitución bivalente en las posiciones de los cationes para formar heteroestructuras. Una energía de banda prohibida de ~ 3.0 eV puede obtenerse dopando con Cd²⁺, mientras si dopamos con Mg²⁺ se puede incrementar a ~ 4.0 eV [1, 2, 3].

El ZnO a temperatura ambiente presenta regularmente una estructura tipo wurzita, que tiene una celda unitaria hexagonal, pertenece a un espacio de grupo P63mc, en esta fase enlaces tetragonales son formados por la interconexión de dos subestructuras de Zn^{2+} y O^{2-} , el átomo de Zinc es rodeado por 4 átomos de oxígeno y viceversa, este acomodo es típico de los enlaces covalentes sp^3 . El acoplamiento tetraédrico en este enlace da lugar a una simetría polar a lo largo del eje hexagonal. Debido a la diferencia de las electronegatividades del Zinc y del Oxígeno, con 1.65 y 3.44 respectivamente, se presenta una alta ionicidad en los enlaces entre el Zn y el O. Este compuesto también puede presentar estructuras cubica zincblende y rocksalt [1].

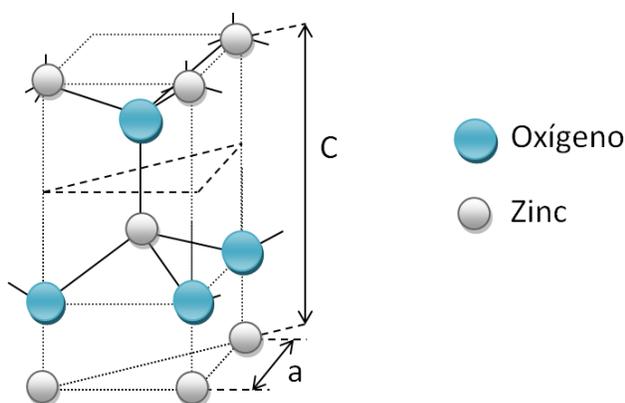


Figura 2.1 Estructura hexagonal tipo wurzita de ZnO.

Los cristales de ZnO son conocidos como un material piezoeléctrico con un gran factor de acoplamiento electromecánico y baja constante dieléctrica, estas propiedades piezoeléctricas se emplean para hacer transductores ultrasónicos en regiones de alta frecuencia. Un resumen de propiedades físicas de un cristal de ZnO se muestra en la tabla 2.1.

Sistema cristalino	Wurzita (6mm)
Espacio de grupo	P63mc
Constantes cristalina	$a = 3.24265\text{Å}$, $c = 5.1948\text{Å}$
Punto de sublimación	$1975 \pm 25^\circ\text{C}$

Dureza	4 Mohs
Constantes dieléctricas	$\epsilon_{11}^S=8.55, \epsilon_{33}^S=10.20 \times 10^{-11}$ F/m
Densidad	5.665×10^3 kg/m ³
Coeficiente de expansión térmica	$\alpha_{11} = 4.0, \alpha_{33} = 2.1 (x10^{-6}/^{\circ}C)$
Transparencia Óptica	0.4-2.5 μ m
Índice de refracción	$n_o=1.9985, n_e=2.0147 (\lambda=6328 \text{ \AA})$

Tabla 2.1 Propiedades físicas de un cristal de ZnO.

1.3 Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de películas de ZnO depositadas por la técnica de r.f. sputtering para el desarrollo y caracterización de Transistores de Efecto de Campo (FET).

1.4 Objetivos Particulares

- Desarrollar películas de ZnO por el método de Sputtering.
- Caracterizar películas de ZnO.
- Fabricar Transistores de Efecto de Campo.
- Caracterizar eléctricamente los FETs.

1.5 Estructura de la tesis

En el segundo capítulo se estudian los Procesos de fabricación y de caracterización de Películas más importantes que existen y sobre todo que se pueden o en un futuro cercano se podrían implementar en la Universidad de Sonora, además se estudian las propiedades del ZnO para ser aplicado como semiconductor de canal en la fabricación del FET. En el tercer capítulo se realiza una revisión de los conceptos más importantes de transistores FET, su clasificación y principales características. Además se presenta el proceso de fabricación usado en el desarrollo del FET a base de ZnO que se realizó en este trabajo. En el cuarto capítulo se presentan los resultados de las películas de ZnO fabricadas por el método de sputtering y los resultados de los transistores fabricados en este trabajo, así como un

análisis de los mismos. En la primera parte se muestran los resultados de las caracterizaciones estructural, morfológico-superficial, y óptica del material fundamental investigado (películas delgadas de ZnO). En la segunda parte se presenta la caracterización eléctrica del mismo material, integrado como un material activo en un dispositivo transistor de películas delgadas (TFT). En el Quinto capítulo se presentan las conclusiones y las perspectivas futuras.

CAPÍTULO 2

TÉCNICAS DE DEPÓSITO Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS

2.1 Introducción

Las películas delgadas son capas de materiales delgados con espesores que van desde algunos cuantos nanómetros hasta algunos cientos de micrómetros, las cuales son creadas por condensación una a una de materia, como átomos o moléculas. La fabricación de películas delgadas es ampliamente conocida como una tecnología tradicional ya establecida, debido a que ha estado presente en nuestras vidas desde hace mucho tiempo en el desarrollo de aplicaciones tales como dispositivos electrónicos, recubrimientos ópticos, celdas solares, foto detectores y circuitos CMOS. Sin embargo, pese a los tiempos transcurridos esta tecnología sigue siendo desarrollada diariamente ya que es una llave en el progreso tecnológico actual [4]. En este capítulo estudiaremos los Procesos de fabricación y de caracterización de películas más importantes que existen y sobre todo que se pueden o en un futuro cercano se podrían implementar en la Universidad de Sonora.

2.2 Síntesis de películas delgadas

Existen películas delgadas que se forman de elementos naturales, mas sin embargo en los últimos años se ha trabajado en el desarrollo de películas delgadas de materiales compuestos de uno o dos elementos. Compuestos de películas delgadas son depositados en sustratos por diferentes técnicas de fabricación, baño químico (CBD), chemical vapor deposition (CVD), evaporación térmica, electron beam evaporation, spin on glass y sputtering son algunas de las técnicas usadas para esta tarea.

Las propiedades básicas de las películas, tales como su composición, su fase cristalina, morfología, orientación, espesor y micro estructura, son controladas por las condiciones de depósito y del método empleado, por ejemplo: la temperatura de crecimiento, la tasa de crecimiento, el sustrato, tiempo de depósito, la química, etc. Todo esto da como resultado, propiedades únicas de un material producto de un proceso de crecimiento, algunos ejemplos de propiedades esperadas como: tamaño de grano, efectos cuánticos, espesor, orientación cristalina, cambios en la resistividad, efectos de tensión, etc, [4].

El avance tecnológico en circuitos integrados puede ser atribuido al avance en las técnicas de procesamiento de películas delgadas, estos avances permiten el desarrollo de muchas aplicaciones en dispositivos electrónicos, incluyendo los transistores de película delgada (TFT), resistores de alta precisión, celdas solares, memorias ópticas o magnéticas, LCD, sensores etc.

Un sistema como un magnetrón sputtering es indispensable para la fabricación de dispositivos semiconductores. La técnica utilizada para el depósito de películas delgadas de ZnO en este trabajo es la de sputtering.

2.2.1 Depósito por baño químico

En esta técnica, se parte de una solución acuosa de sales de los elementos de compuesto que se desea obtener. El sustrato es sumergido en esta solución y a la vez la solución es sometida a calentamiento constante por un tiempo determinado, siendo estos los parámetros de depósito y los que proporcionan las propiedades de la película, juntos con las concentraciones de elementos en la solución. En la superficie del sustrato ocurre una reacción química provocando la formación de la película.

Los compuestos que pueden ser depositados deben ser relativamente insolubles y químicamente estables en la solución y presentar una precipitación simple en una reacción iónica. Los elementos que forman esta solución serian, un compuesto que aporte los iones metálicos, otro que sea la fuente de los iones no metálicos, un agente acomplejante y uno que proporcione OH para regular el pH [5, 6].

2.2.2 Deposición química de vapor CVD

En esta técnica el sustrato y la fuente están separados por un reactor (cámara de vacío) y las especies químicas se transportan mediante un gas portador, de esta forma estas especies reaccionan con el sustrato y producen el depósito deseado.

2.2.3 Pulverización catódica (sputtering)

Si una superficie es bombardeada con partículas energéticas como iones acelerados, es posible causar expulsión de los átomos de la superficie de un material, un proceso conocido como sputtering o pulverización catódica. Estos átomos eyectados pueden ser condensados en un sustrato para formar una película delgada. En la mayoría de los casos, los iones positivos de gases neutrales pesados como argón se usan para bombardear la superficie de materiales. Los materiales de alto punto de fusión pueden ser usados tan fácilmente como unos de bajo punto de fusión, y empleando fuentes de RF o DC la pulverización catódica de ambos materiales puede ser lograda y tanto metales como aislantes pueden ser depositados [4, 7].

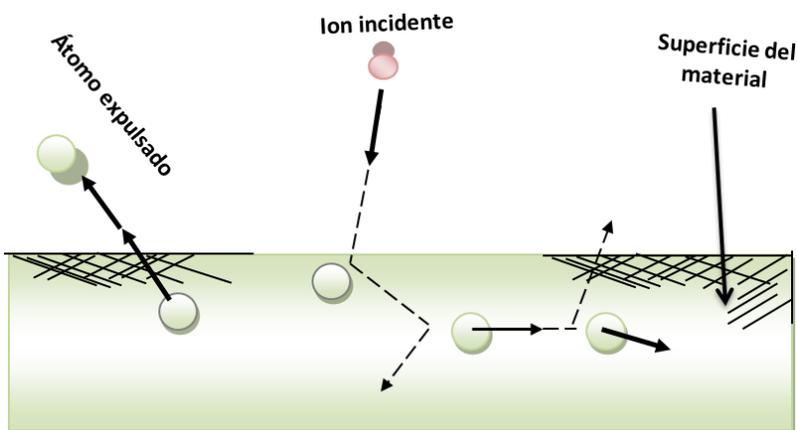


Figura 2.2 Iones incidentes y Átomos expulsados del material.

2.3 Sistema sputtering.

Se fundamenta en tener una cámara de vacío, la cual cuenta en su interior con dos electrodos el ánodo y el cátodo, una descarga eléctrica es establecida entre el ánodo y el cátodo en un ambiente de baja presión controlada por el suministro de un gas residual,

como se muestra en la figura 2.3 y 2.4. Por efecto de la diferencia de potencial los átomos del gas residual se ionizan. Los iones del gas residual chocan contra el cátodo, en el cual es colocado el blanco o una tarjeta de un determinado material que es desintegrado por las moléculas ionizadas. Los átomos expulsados del blanco forman una nube que se deposita en las superficies circundantes. Este fenómeno es llamado sputtering catódico.

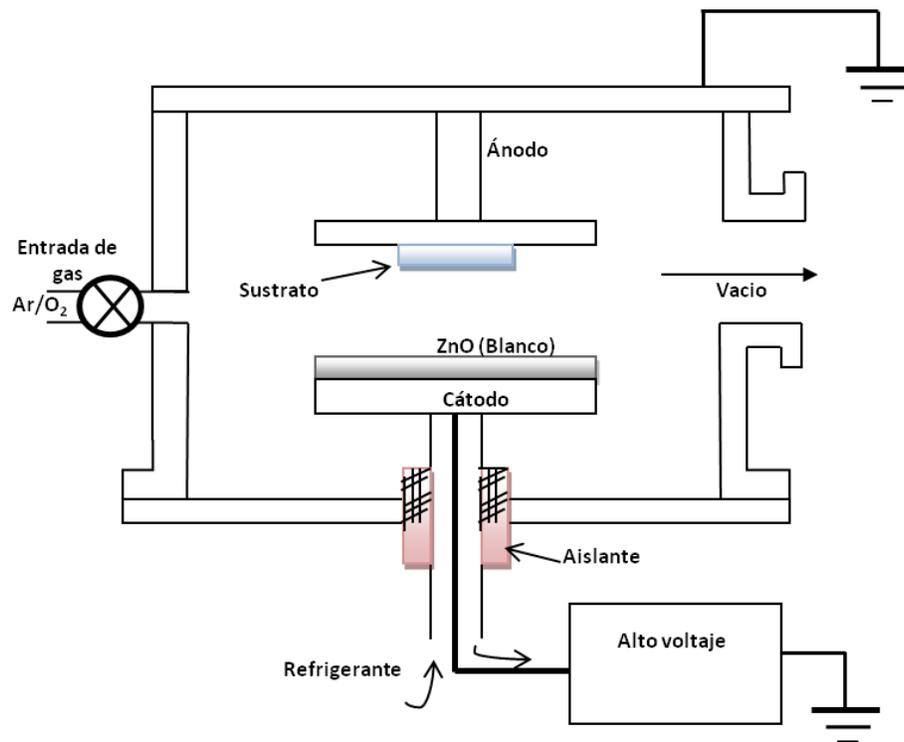


Figura 2.3 Representación esquemática de un sistema de pulverización catódica (Sputtering).

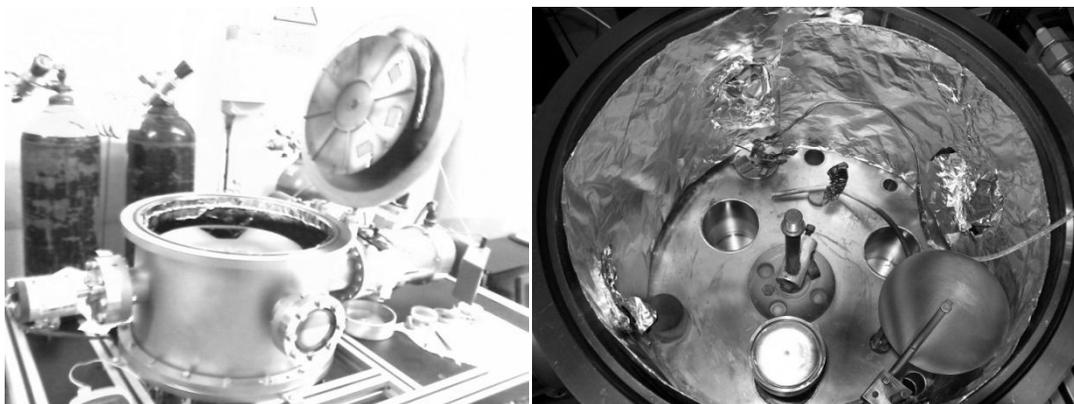


Figura 2.4 Sistema sputtering.

Los átomos del material desintegrado o erosionado dejan la superficie del electrodo ya sea como átomos libres o en combinación química con las moléculas residuales del gas. Una cierta cantidad de los átomos liberados son condensados en superficies rodeando el cátodo mientras el resto es devuelto al cátodo por la colisión con moléculas del gas.

Una vez expulsados los átomos del blanco viajan hasta que alcanzan una superficie cercana más notable, o el sustrato. La capa depositada es formada o crece en la estructura del sustrato, ésta es influenciada por algunos parámetros como la tasa de depósito, temperatura del sustrato, presión y composición del gas y composición del blanco.

El argón es un gas inerte, el cual es escogido para actuar como el medio sputtering más común, porque es un gas raro, pesado y sobre todo es abundante. También tiene una bajo potencial de ionización. La naturaleza inerte de argón inhibe compuestos a formarse en la superficie del blanco.

Si el blanco es conductivo, una fuente de corriente directa puede ser usada (DC sputtering) mientras que RF sputtering (fuente de RF) es preferido al usar un blanco de poca conducción. Esto implica que si el blanco es un aislante en el sistema de sputtering, el proceso de neutralización da como resultado una carga positiva en la superficie del blanco. Este carga puede aumentar al punto que los iones (\pm) que bombardea son repelidos y el proceso que sputtering se detendrá. Para hacer el proceso continuar la polaridad del blanco debe ser puesto al revés para atraer bastantes electrones de la descarga para eliminar la superficie cargada.

2.3.1 Magnetron sputtering

Varios sistemas de sputtering son propuestos para el depósito películas delgadas como: dc diode, rf diode, magnetron y ion-beam sputtering. Para aumentar tasas de depósito del sistema de sputtering, se buscaron configuraciones con bobinas magnéticas, se emplearon situándolas algunas veces alrededor de la cámara para presionar el plasma durante la deposición. Se encontraron resultados significativos en la reducción de la presión y un aumento en las tasas de depósito. Esto implicó el darse cuenta de qué tan importante era el papel de que un campo magnético estuviese presente adentro del sistema concentrando el plasma.

El funcionamiento del magnetrón sputtering se basa en que los electrones sometidos a un campo eléctrico y magnético superpuesto en el cátodo, describen órbitas circulares. En este sistema se emplea un dispositivo con unos imanes que combinados con el campo eléctrico interior presente en los dos electrodos, provocan que los electrones realicen trayectorias helicoidales, produciendo trayectorias más largas que no existiesen sin el campo magnético. Esta nueva distancia de los electrones provoca un aumento en los choques con los átomos del gas residual, permitiendo la posibilidad de disminuir la presión de trabajo en rangos como 10^{-5} torr o más comúnmente a 10^{-2} torr, otra consecuencia de usar magnetrón sería el incremento de la densidad del plasma provocando el aumento de la densidad de corriente en el blanco e incrementándolas proporciones de depósito [7].

2.4 Deposito de películas de ZnO por sputtering

La deposición por sputtering es uno de los métodos más populares para hacer películas de Oxido de Zinc y posee un alto potencial para la deposición de este compuesto. Las propiedades físicas y químicas del ZnO necesitan ser controladas durante la irradiación del sistema sputtering. El crecimiento de las películas de ZnO es influenciado por esta irradiación de partículas energéticas presentes en el plasma. Manteniendo bajo control las propiedades de depósito, entenderemos la influencia de los parámetros en la estructura de las películas de ZnO y la relación entre estas propiedades y los parámetros de sputtering.

En base a la literatura y trabajos experimentales ya documentados, podemos darnos una idea de la relación entre las condiciones de depósito y las propiedades atribuidas a las película, por ejemplo un factor que influye en la fase cristalina de la película se le atribuye a la tasa de depósito, potencia de la fuente, ya sea RF o DC, el espaciamiento entre el cátodo y el ánodo entre otros por otro lado la temperatura de depósito, la presión de trabajo, el tipo de sustrato en el que se deposita está relacionado con la micro estructura, superficie e interface de la película delgada, y defectos en la película tienen una relación con la posición, polarización del sustrato así como también la geometría del sistema.

Para el depósito por sputtering en nuestro caso emplearemos un blanco cerámico de ZnO, este blanco es para RF sputtering y es preparado con un polvo de ZnO con una pureza mayor al 99%, este es sinterizado a una temperatura entre 800 y 850°C durante una

hora. Después este polvo sinterizado es comprimido en alrededor de 100Kg/cm² en un molde que le dará forma al blanco, después de esto es de nuevo sinterizado a 930°C por dos horas [4].

2.5 Características de películas delgadas semiconductoras.

La medida de las propiedades de las películas delgadas es indispensable para el estudio de las películas delgadas de materiales y dispositivos. La composición química, estructura cristalina, estructura óptica, eléctrica y propiedades mecánicas deben ser consideradas en la evaluación y estudio de las películas delgadas, esta caracterización permite ver la correlación entre las condiciones de crecimiento y las propiedades resultantes del método de fabricación [4].

2.5.1 Características Ópticas

En este estudio nos limitaremos a analizar propiedades ópticas lineales y reales, entre las que destacaran la reflexión, la transmisión y absorción, misma que se encuentran en correlación con propiedades eléctricas y físicas de los materiales involucrados.

2.5.1.1 Reflexión y Transmisión

La luz es una onda electromagnética que cuenta con componentes de propagación del campo de origen eléctrico y magnético, esta luz se propaga como fluctuaciones producto de estas componentes a su dirección de polarización. El campo eléctrico total de una componente paralela al eje normal del plano de incidencia es E_p y la componente perpendicular al plano de incidencia es E_s . Cuando una onda experimenta un cambio en las propiedades del medio en que se propaga los coeficientes de Fresnel nos permiten medir la relación entre el campo eléctrico transmitido y el reflejado [8], ver fig. 2.5.

Los coeficientes de reflexión y transmisión:

$$r_P = \frac{E_p(\text{reflejado})}{E_p(\text{incidente})} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} ; t_P = \frac{E_p(\text{transmitido})}{E_p(\text{incidente})} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad 2.1$$

$$r_s = \frac{E_s(\text{reflejado})}{E_s(\text{incidente})} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}; \quad t_s = \frac{E_s(\text{transmitido})}{E_s(\text{incidente})} = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad 2.2$$

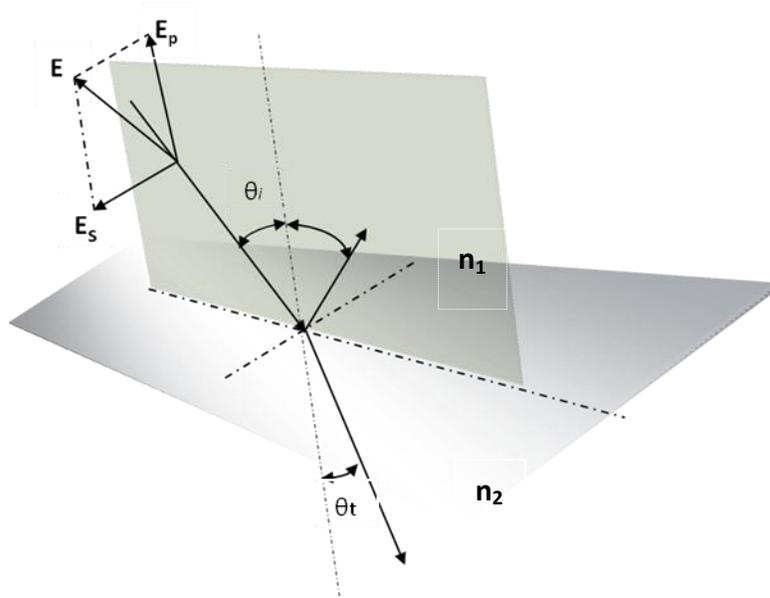


Figura 2.5 Componentes E_p y E_s del haz de luz incidente a una interface entre dos medios.

Donde $\theta_i = \theta_1$, $\theta_t = \theta_2$, son el Angulo incidente y el transmitido, respectivamente, n_1 y n_2 son los respectivos índices de refracción los cuales pudieran ser complejos $n_1 = N_1 + ik_1$, $n_2 = N_2 + ik_2$; k_1 y k_2 a su vez están relacionados con los coeficientes de absorción α_1 y α_2 de los medios ($\alpha = 4\pi k/\lambda$). Los coeficientes dependen de la polarización paralela y perpendicular al plano de incidencia [9]. La reflexión (R) y la transmisión (T) son definidas como las componentes de los promedios temporales de los vectores de Poynting que son perpendiculares a la frontera con respecto a la componente normal del vector de Poynting incidente y son definidas para los dos tipos de polarización respecto a los coeficientes de Fresnel:

$$R_p = |r_p|^2 ; \quad R_s = |r_s|^2 \quad 2.3$$

$$T_p = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} t_p^2; \quad T_s = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} t_s^2 \quad 2.4$$

Considerando la reflexión de un haz en una interface entre dos medios semiinfinitos isotrópicos, medio 1 y medio 2 como se muestra en la fig. 2.6. Los coeficientes de reflexión y transmisión en sus polarizaciones s y p, son correspondientes a las ecuaciones 2.1 y 2.2.

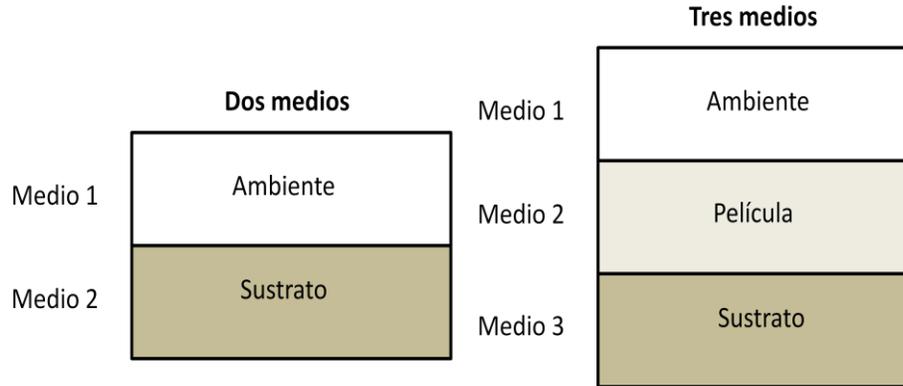


Figura 2.6 Ilustración de dos sistemas de materiales de dos y tres medios.

Considerando el caso de incidencia normal y $\alpha=0$, bajo estas condiciones las componentes paralela y perpendicular del campo son indistinguibles, así en las expresiones de 2.1 a 2.4 se tendría:

$$R = |r|^2 ; T = |t|^2 \quad 2.5$$

Si el medio uno es el aire con índice de refracción $n=1$ y el medio dos con n_s se obtiene, para el caso de la reflectancia;

$$R_{as} = \left(\frac{n_s - 1}{n_s + 1} \right)^2 \quad 2.6$$

De la ecuación anterior 2.6 se puede calcular el índice de refracción del sustrato de la siguiente manera:

$$n_s = \frac{1 + \sqrt{R_{as}}}{1 - \sqrt{R_{as}}} \quad 2.7$$

Considerando ahora la reflectancia para el caso de tres medios, aire, película y sustrato semiinfinito (se asume que no hay interferencias en el sustrato), ver fig. 2.6 se tendría una reflectancia total:

$$R_{123} = \left| \frac{r_{12} + r_{23} e^{2i\beta_2}}{1 + r_{12} r_{23} e^{2i\beta_2}} \right|^2 \quad 2.8$$

Donde 1,2 y 3 corresponde a los tres medios respectivamente y el corrimiento de fase β_2 es un parámetro de la película que depende de su espesor ($d=h$), de la longitud de onda (λ), índice de refracción (n_2) y del Angulo de transmisión (θ_i) definido como sigue:

$$\beta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} (n_2 d_2 \cos \theta_2) \quad 2.9$$

Desarrollando la ecuación 2.8 y contemplando las contribuciones de dos interfaces (r_{12}, r_{23}), tenemos:

$$R_{123} = \frac{r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta}{1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta} \quad 2.10$$

Una característica fundamental de los espectros experimentales tanto de reflectancia como de transmitancia de una película delgada, es la presencia de máximos y mínimos de interferencia, el parámetro $\cos 2\beta$ es debido a las interferencias en la película (medio 2) [10, 8, 11]. Las expresiones 2.9 y 2.10 nos permiten suponer la relación existente entre la reflectancia y el espesor. La condición de máximos y mínimos relativos nos presuponen una relación para evaluar el espesor de la película. Si suponemos que las interferencias son coherentes podemos demostrar [9]:

$$2nd = (m + 1/2)\lambda_{max/min} \quad 2.11$$

$$2nd = m\lambda_{min/max}, \quad m=1/2, 3/2, 5/2, \dots \quad 2.12$$

$$\Rightarrow m\lambda_{min} = (m + 1/2)\lambda_{max}$$

$$\Rightarrow m = \frac{\lambda_{max}}{2(\lambda_{min} - \lambda_{max})}$$

y sustituyendo en 2.12, se obtiene

$$d = \frac{\lambda_{max}\lambda_{min}}{4n(\lambda_{min} - \lambda_{max})} \quad 2.13a$$

O bien

$$\frac{1}{d} = 4n \left(\frac{1}{\lambda_{min}} - \frac{1}{\lambda_{max}} \right) \quad 2.13b$$

De la expresión 2.10 podemos calcular $\frac{dR}{d\beta} = 0$ obteniendo:

$$\frac{dR}{d\beta} = \frac{(-4r_{12}r_{23} \sen 2\beta)(1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta)}{(1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta)^2} + \frac{4r_{12}r_{23} \sen 2\beta (r_{12}^2 + r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta)}{(1 + r_{12}^2 r_{23}^2 + 2r_{12}r_{23} \cos 2\beta)^2} = 0$$

$$\Rightarrow (1 + r_{12}^2 r_{23}^2 - r_{12}^2 - r_{23}^2)(4r_{12}r_{23} \sen 2\beta) = 0$$

$$\Rightarrow \sen 2\beta = 0$$

$$\Rightarrow 2\beta = M\pi$$

$$2 \left[\frac{2\pi}{\lambda} (n_2 d_2) \cos \theta_2 \right] = M\pi, \quad M=0, 1, 2, 3, \dots$$

Analizando la ecuación 2.10 y su segunda derivada se obtienen las expresiones 2.11 y 2.12. Tomando en cuenta que el material es transparente ($\alpha=0$), los puntos críticos para R_{123} ocurren cuando $\cos 2\beta = \pm 1$ y en el caso de incidencia normal estos valores serian:

$$R_+ = \left(\frac{n_1 - n_3}{n_1 + n_3} \right)^2 \quad 2.14$$

$$R_- = \left(\frac{n_1 n_3 - n_2^2}{n_1 n_3 + n_2^2} \right)^2 \quad 2.15$$

El máximo de reflectancia R_{max} ocurre en $r_{12}r_{23} \cos 2\beta = |r_{12}r_{23}|$ esto implica que n_2 tiene un valor entre n_1 y n_3 , $R_{max} = R_+$, $R_{min} = R_-$. Un mínimo para R_{min} cuando

$r_{12}r_{23} \cos 2\beta = -|r_{12}r_{23}|$, n_2 no tiene un valor entre n_1 y n_3 , $R_{\max} = R_-$, $R_{\min} = R_+$. El índice de refracción n_2 , de la película puede ser determinado de las anteriores ecuaciones 2.14 y 1.15 [8, 10].

Contando con un sistema de medición que mediante una haz incidente en una muestra nos permita obtener el espectro de intensidades de los haces transmitidos y reflejados, se puede obtener una buena aproximación que relacione estas intensidades medidas con el planteamiento teórico de la reflectancia y transmitancia de estos sistemas bajo ciertas consideraciones.

Planteando un análisis de las contribuciones en las interfaces de los medios, tenemos que al tener un haz de luz que incide sobre un medio transparente (muestra, película de ZnO etc.), la radiación es transmitida a través de la película de material, por cada película existirán dos superficies en la interfaz, que originan pérdidas por reflexión. En el caso de tener un material que está rodeado por aire, la disminución de la radiación del haz incidente en la segunda interface es igual que la primera. Para calcular las contribuciones significativas a la reflectancia para dos sistemas de interés en nuestro trabajo, uno que consta de aire-sustrato: aire/sustrato/aire y el otro aire-película-sustrato: aire/película/sustrato-semiinfino, consideraremos los siguientes diagramas, construidos en la figura fig. 2.7 y 2.8.

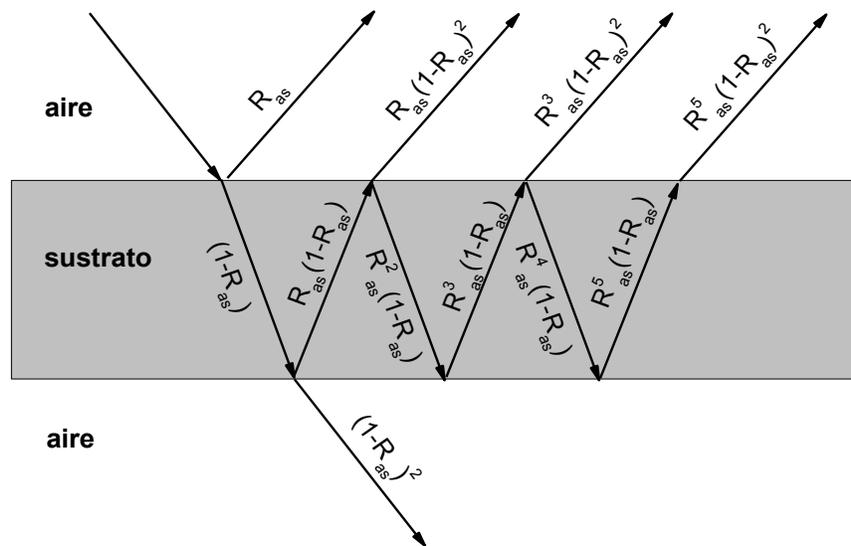


Figura 2.7 Reflexiones múltiples atenuadas en un sustrato no absorbente.

Analizando el primer sistema (sustrato de vidrio rodeado de aire), y teniendo en cuenta que la condición $\alpha=0$, tenemos un haz que al pasar por la primera interface es fraccionado en proporción $(1-R_{as})$, esta fracción llega a la segunda interface donde solo atraviesa la fracción $(1-R_{as})^2$ y $R_{as}(1-R_{as})$ se refleja hacia la primera y así sucesivamente como es indicado en la fig. 2.7. La reflectancia que será la suma de las contribuciones de las dos interfaces será:

$$R_s = R_{as} + [R_{as}(1 - R_{as})^2(1 + R_{as}^2 + R_{as}^4 + R_{as}^6 + \dots)]$$

$$R_s = R_{as} + \left[\frac{R_{as}(1 - R_{as})}{1 + R_{as}} \right]$$

$$R_s = \frac{2R_{as}}{1+R_{as}} \quad 2.16$$

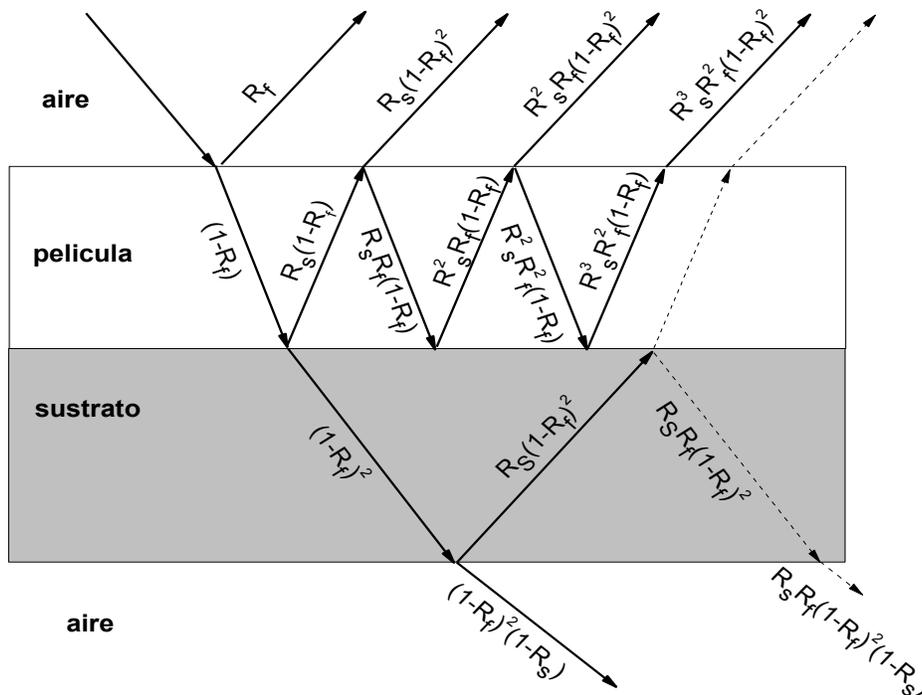


Figura 2.8 Reflexiones múltiples atenuadas a través de una película delgada y un sustrato no absorbentes.

En el segundo sistema (aire/película/sustrato-semiinfinito) y bajo la misma situación de $\alpha=0$, de forma similar que en el caso anterior tenemos la radiación que incide en la segunda interface es $(1-R_f)$ al ser fraccionada por la primera, como en el primer sistema la radiación que pasa por la segunda interface será $(1-R_f)^2$, pero en este caso la proporción reflejada serán productos de la interface película sustrato $R_s (1-R_f)$ y así sucesivamente como se muestra en la fig.2.8. La reflectancia producto de las contribuciones provenientes solo de las primeras dos interfaces es [11]:

$$R_{Total} = R_f + \left[R_{as}(1 - R_f)^2 (1 + R_{as}R_f + R_{as}^2R_f^2 + \dots) \right]$$

$$R_{Total} = R_f + \left[\frac{R_{as}(1-R_f)^2}{1-R_{as}R_f} \right] \quad 2.17$$

2.5.1.2 Coeficiente absorción (α)

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 (d):

$$I = I_0 e^{-\alpha d} \quad 2.18$$

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

Considerando que $\frac{I}{I_0} \equiv T$

$$\Rightarrow T = e^{-A} \quad 2.19$$

Donde T y A son la transmitancia y la absorbancia ópticas respectivamente. No obstante de la ley de Kirchhoff de radiación [8]:

$$A = 1 - R - T \quad 2.20$$

Donde R es la reflectancia.

2.6 Características estructurales rayos-X

Los patrones de difracción de rayos X (DRX) contienen información sobre la composición y faces cristalográficas del material, tamaño de grano, tensión de red, fronteras de grano, entre otras. Esta técnica nos permite un estudio morfológico estructural de muestras policristalinas y monocristalinas basado en un experimento de difracción, en el que un haz de rayos X incide sobre un sólido cristalino obteniéndose un conjunto de haces difractados producto de las interacciones, esto nos proporciona un patrón de difracción. Este patrón de difracción está relacionado con la distribución de los átomos y su estructura cristalina (celda cristalina, familia de planos cristalinos). La estructura cristalina es encontrada haciendo una comparación de las posiciones de los picos de las bandas del patrón de difracción y sus intensidades con alguna referencia.

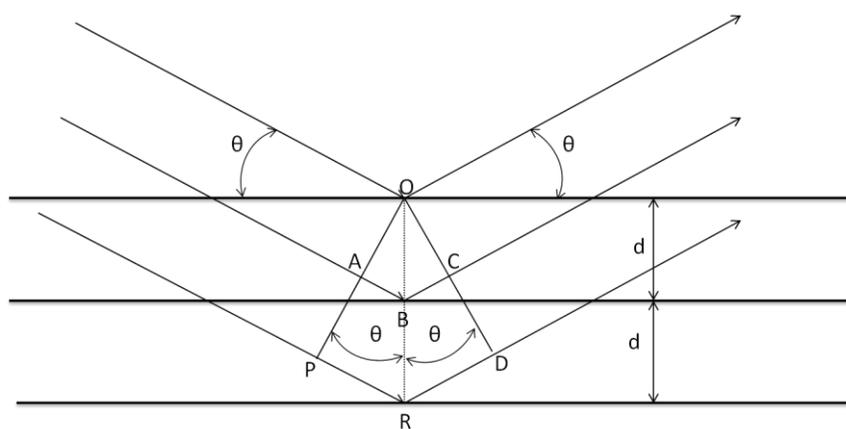


Figura 2.9 Difracción de Rayos-X en un cristal.

Cuando los rayos X alcanzan la superficie de un cristal a un ángulo θ (ángulo incidente), una parte de estos son dispersados por la primera interface de átomos, la porción que no es dispersada penetra en la segunda capa de átomos del material, donde ocurrirá lo mismo y así sucesivamente en cada capa de átomos del material, ver figura 2.9. Por lo tanto cuando un haz llega a un cristal, este será dispersado en todas direcciones dentro de él y por distribución regular de átomos habrá una interferencia constructiva o destructiva de estas ondas dispersadas. Bragg propuso que los átomos en un cristal forman familias de planos paralelos, teniendo cada una separación d . Una condición necesaria para el fenómeno de

interferencia es que la longitud de onda del rayo incidente, sea aproximadamente igual a la separación entre los planos cristalinos ($\lambda < 2d$), estas condiciones son mostradas en la figura 2.9.

Entonces, la interferencia constructiva solo tendrá lugar cuando la diferencia de camino entre los rayos incidentes y el dispersado difiera exactamente un número entero, n , de longitudes de onda λ . De la figura obtenemos tenemos:

$$\begin{aligned}
 AB + BC &= n\lambda \\
 AB = BC &= d \sin \theta \\
 \Rightarrow \quad 2d \sin \theta &= n\lambda \qquad \qquad \qquad 2.21
 \end{aligned}$$

La ecuación anterior es conocida como la Ley de Bragg, nos permite calcular las distancias entre las familias de planos atómicos, d , que conforman la red cuando se conoce de antemano el ángulo de incidencia y la longitud de onda. Los ángulos de incidencia que no cumplan con la ecuación anterior tendrán una interferencia destructiva. Para una estructura hexagonal la distancia entre planos en función de los índices de Miller y el parámetro de red serán dadas por [12]:

$$d = \frac{ac}{\left(\frac{4}{3}(h^2 + hk + k^2)c^2 + l^2a^2\right)^{1/2}} \qquad \qquad \qquad 2.22$$

Donde a es el parámetro de red y h, k, l son los índices de Miller del plano cristalográfico que está difractado. Al ser combinada con la ecuación 2.21, resulta:

$$(\sin \theta)^2 = \frac{\lambda^2}{3a^2}(h^2 + hk + k^2) + \frac{\lambda^2}{4c^2}l^2 \qquad \qquad \qquad 2.23$$

2.7 Características Morfológicas AFM

Uno de los microscopios de más alta resolución para el estudio de la forma superficial de un material es la microscopía de fuerza atómica (AFM), la cual consiste en suspender una punta o sistema cantiléver en la proximidad de la superficie para hacerla operar por contacto o por oscilación (tapping). En la parte anterior o opuesta al punta incide un haz laser, el cual es reflejado especularmente hacia un detector el cual asigna niveles cromáticos correspondientes a profundidades y levantamientos en la superficie. Este análisis de superficie se complementa mediante un escaneo que puede ser realizado mediante un material piezoeléctrico colocado ya sea en la base que porta la muestra o en el soporte del cantiléver y el láser. En la figura 2.10, se muestra un esquema descriptivo de la anterior explicación:

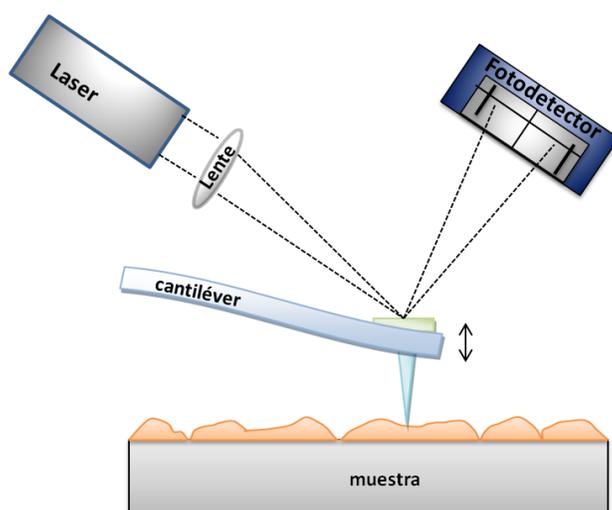


Figura 2.10 Esquema descriptivo de un Microscopio de fuerza atómica.

Con los datos obtenidos por este tipo de instrumento es posible obtener medidas de rugosidad, evaluar si hay formación de agregados, micro-dureza y en algunos casos es posible hasta observar contornos cristalinos a escala manométrica.

CAPÍTULO 3

3. TRANSISTORES DE EFECTO DE CAMPO (FET)

3.1 Introducción

La búsqueda de un método para controlar la corriente que puede circular en el interior de un sólido la extendió Lilienfeld por una idea relativa a un triodo de estado sólido. El concepto básico del dispositivo y el de los transistores modernos de efecto de campo consiste en inducir cambios en la carga libre de un conductor, modificando el potencial de otro conductor cercano. La carga modulada inducida puede dar como resultado una corriente modulada en el primer semiconductor. Es preciso satisfacer dos condiciones para que el dispositivo de efecto de campo pueda proporcionar una amplificación: la primera es, la cantidad de carga que puede inducirse en el canal conductor debe ser una fracción grande de la carga libre normalmente presente en el canal y la segunda, la carga inducida debe ser móvil. La primera de estas condiciones impide que el triodo de efecto de campo consista, simplemente, en un par de placas metálicas. En lugar de ello, es necesario utilizar materiales con una menor densidad de cargas libres, es decir, semiconductores [13].

La velocidad y las dimensiones del dispositivo son controladas por geometrías definidas litográficamente. Una consideración importante en la fabricación de estos dispositivos es el proceso de aislamiento de la compuerta con respecto al flujo de corriente del canal. Este aislamiento conduce a dispositivos diferentes según sea la forma en que se efectuó. En este capítulo se realiza una revisión de los conceptos más importantes de transistores FET, su clasificación y principales características. Además se presenta el proceso de fabricación usado en el desarrollo del FET a base de ZnO que se realizó en este trabajo.

3.2 Dieléctrico de compuerta

El silicio es un semiconductor, su conductividad puede ser variada introduciendo impurezas, por consecuencia se forman materiales tipo n y tipo p, cuando estos materiales son unidos, estas regiones o unión puede adquirir nuevas propiedades. Dándole un orden a estas uniones en ciertas estructuras físicas y combinando estas con otras se pueden construir dispositivos semiconductores. Por mencionar algunas ventajas del SiO₂ tenemos:

Primera, referente a la protección de la superficie física y los dispositivos subyacentes, estas capas son muy densas (poco poroso) y muy duros actuando como una barrera de contaminación impidiendo físicamente que la suciedad del ambiente alcance la superficie sensitiva de la oblea, así como la dureza de la película protege la superficie de la oblea de raspones y abusos en los procesos de fabricación. Segunda, protección de la química de la naturaleza, a pesar de la limpieza del ambiente a la que es procesada, algunos contaminantes (iónicos móviles) eléctricamente en ejecución terminan dentro o en la superficie de la oblea. Tercera, se requiere sólo una película de dióxido de silicio relativamente delgada para evitar que las impurezas alcancen la superficie del silicio. Cuarta, su coeficiente de expansión térmica es cercano al del silicio. El dióxido de silicio se expande y se contrae en la misma proporción que el silicio, lo cual quiere decir que la oblea no distorsionará durante el calentamiento y enfriamiento.

De todas las ventajas del silicio para la formación de dispositivos semiconductores, la facilidad de crecer una película delgada de dióxido de silicio es quizá lo más útil. Cada vez que una superficie de silicio está al descubierto en presencia de oxígeno o a elevadas temperaturas, en la superficie se crece dióxido de silicio, este proceso es llamado Oxidación Térmica. Aunque el silicio es un material semiconductor, el dióxido de silicio es un material dieléctrico. Esta combinación da lugar a una interface más comúnmente usada en dispositivos de silicio para inducir carga cuando se combinan con otra capa semiconductor [14].

3.3 Clasificación de los FET

El FET se puede clasificar en tres familias, según como el capacitor de la compuerta sea formado. IGFET (FET de compuerta aislada) el aislamiento de la compuerta se consigue

mediante un aislante entre la compuerta y el canal activo, JFET (FET de unión) se utilizan uniones p-n en polarización inversa para aislar la compuerta, y los MESFET (metal-semiconductor FET) la compuerta forma una barrera Schottky con el semiconductor.

A su vez podemos dividir los IGFET en MOSFET/MISFET (metal-aislante-semiconductor FET) y HFET (heterounión FET). En un MOSFET se crece una capa de oxido a diferencia del MISFET en el que el aislante es un dieléctrico depositado [15].

En los transistores como el JFET, MESFET Y HFET los electrones libres en el canal del dispositivo son proporcionados por adulteración del canal. Otra manera para crear portadores libres en un canal es por el proceso de inversión. Para lograrlo se deber de conseguir un excelente aislamiento entre la compuerta y el canal mediante un material con banda de separación grande, de otro modo habría una gran corriente entre la compuerta y el canal abatiendo así el papel de la compuerta [27]. Solamente para el Si han sido capaces los científicos de hallar un aislante adecuado de este tipo. Este aislante es el SiO_2 que es producido con una interfaz de muy alta calidad con Si.

Nos enfocaremos en las características de los MOSFET por ser la estructura más ampliamente usada, que se encuentra en cada circuito digital, así como las facilidades que nos brinda la interface SiO_2/Si y por ser la estructura empleada en el dispositivo construido.

3.4 MOSFET

Los FET como los MOSFET son dispositivos unipolares que involucran ya sea electrones o huecos en el proceso de conducción. Este dispositivo consiste en un canal activo a través del cual los portadores mayoritarios fluyen desde el contacto fuente hasta el contacto drenaje. La función básica del transistor es controlar el flujo de corriente por medio de una restricción o apertura del canal de conducción, entre los dos electrodos mencionados antes fuente y drenaje, esta anchura del canal es modulada mediante un potencial aplicado a la compuerta, esto implica entonces la modulación de la corriente que fluye por el mismo [16].

Hay dos tipos de MOSFET, incrementales (enhancement-type) y decrementales (Depletion-type). Los MOSFET de tipo decremental están normalmente encendidos (el canal es esencialmente conductivo) el máximo de corriente fluye del drenaje a la fuente cuando no hay diferencia en el voltaje que se aplica entre las terminales compuerta y la fuente ($V_{GS}=V_G-V_S=0V$). Sin embargo si un voltaje es aplicado en su compuerta, el canal drenaje-fuente se vuelve más resistivo. Los MOSFET de tipo incremental están normalmente apagados (tienen normalmente un canal resistivo, ahí pocos portadores de carga dentro de este) el mínimo de corriente fluye de el drenaje a la fuente cuando $V_{GS}=0V$. Sin embargo si un voltaje es aplicado a su compuerta, el canal drenaje- fuente se hace menos resistivo. Existen dos formas, canal-n y canal-p para ambos tipos de MOSFET, incremental y decremental donde los portadores de carga como los electrones (canal-n) o los huecos (canal-p) están presentes dentro de los canales. Ambos tipos de MOSFET, emplean el campo eléctrico producido por un voltaje en la compuerta y este altera el flujo de los portadores de carga a través del semiconductor, canal drenaje-fuente.

3.4.1 Capacitor Metal-Oxido-Semiconductor

El capacitor MOS constituye la parte fundamental de la estructura de los dispositivos MOSFET, cuyo arreglo y diagrama de bandas en condiciones de polarización estática se muestran en las figura 3.1 y 3.2. Una capa de oxido (SiO_2) es crecida en la parte superior de un semiconductor tipo-n y sobre esta es localizado un metal, una segunda capa metálica proporciona un contacto eléctrico en la parte inferior del semiconductor. El propósito de esta capa de SiO_2 es proporcionar un aislamiento entre el metal y el semiconductor [21].

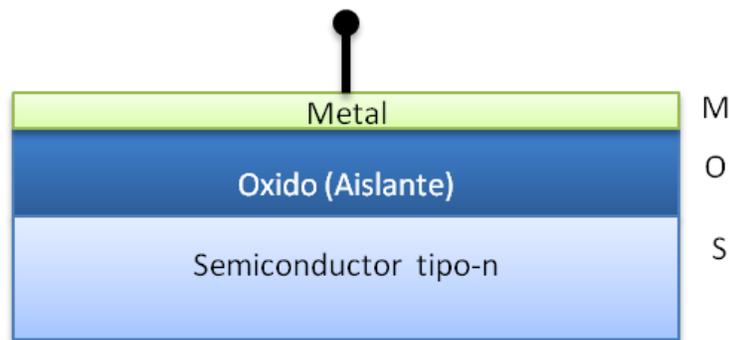


Figura 3.1 Esquema de un capacitor MOS

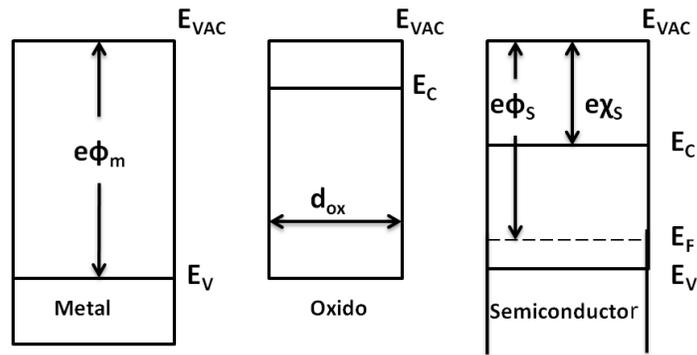


Figura 3.2 Función de trabajo de un metal, función de trabajo de un semiconductor y afinidad electrónica.

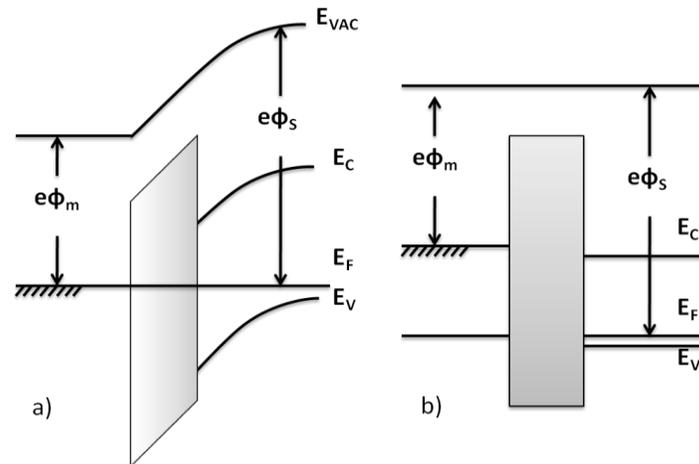


Figura 3.3 Perfiles de banda de la estructura de un MOS a) En equilibrio b) En forma de bandas planas.

Tomando como referencia el perfil de bandas planas del capacitor MOS, existen 3 estados importantes de polarización en el capacitor MOS, estos son la acumulación, agotamiento e inversión, como son mostrados en las figuras [21, 22].

Acumulación: Suponiendo un semiconductor tipo-n y aplicando una polarización positiva ($V_G > 0$), esta condición disminuye E_F en el metal con respecto a la E_F en el semiconductor, produciendo una pendiente positiva en los perfiles de bandas, las bandas de conducción son dobladas haciendo más estrecho el nivel de Fermi, causando una acumulación de electrones dentro del semiconductor, la cual es mayor cerca de la interface oxido-semiconductor que en el semiconductor completo.

Agotamiento: aplicando una pequeña polarización negativa ($V_G < 0$) a la compuerta, se provocara un incremento en E_F en el metal respecto E_F del semiconductor, produciendo una pendiente negativa de las bandas de energía. La concentración de electrones disminuye, por lo que se produce una ausencia de electrones libres cerca de la interface oxido-semiconductor.

Inversión: Al aplicar a la compuerta una polarización más negativa, se deforman aun mas las bandas de energía, haciendo más negativa la pendiente en el perfil de bandas, la concentración de huecos aumenta, en otras palabras esta polarización de compuerta empuja los bordes de la banda a un punto más bajo del nivel de fermi, y crea de este modo portadores libres. Los tres estados de polarización se muestran en la figura 3.4.

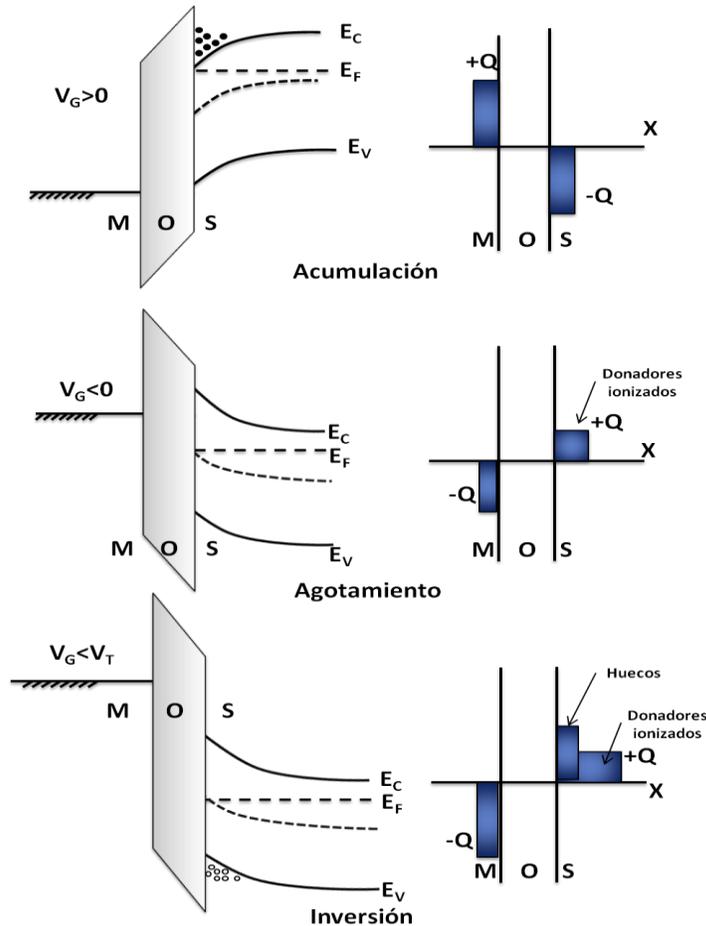


Figura 3.4 Diagrama de bandas de energía y diagrama de bloques de carga correspondientes, que describen el estado de un capacitor MOS.

3.5 Esquema estructural de un pseudo MOSFET a base de una capa activa de ZnO

En la figura 3.5 se ilustra una estructura para un TFT que puede ser clasificado como un pseudo MOSFET. Este esquema nos permite hacer una prueba estructural para la caracterización de la capa activa sin el desarrollo de una fabricación rigurosa de diseño, en nuestro caso caracterización del ZnO. La estructura que emplearemos en nuestro experimento se muestra en la figura 3.6.

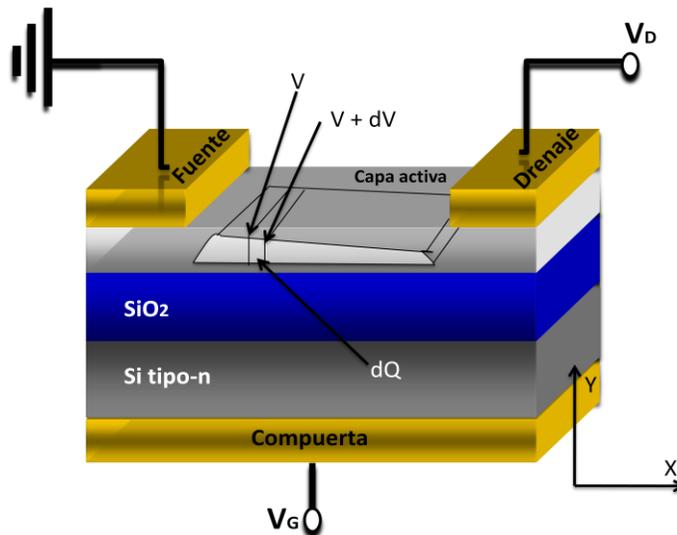


Figura 3.5 Ilustración esquemática de una estructura TFT.

En este tipo de configuración la capa activa es considerada como el cuerpo del transistor, la cual es separada por un oxido (SiO_2) del sustrato de Si, este oxido inmerso en la estructura es denominado caja. El oxido, el sustrato de silicio y un electrodo colocado en la parte posterior del sustrato tienen el papel de una compuerta compuesta. La polarización de la compuerta mediante el electrodo, ya sea negativa o positiva según sea el caso, puede activar la acumulación, el agotamiento y la inversión provocando así la conducción de portadores y permitiéndonos hacer la caracterización requerida [17, 18].

3.5.1 Comportamiento del pseudo MOSFET

Considerando un condensador plano paralelo, donde sus platos serán un metal y un semiconductor tipo p o tipo n. Cuando ningún potencial es aplicado a los platos, los portadores libres son homogéneamente distribuidos dentro del sustrato entero del

semiconductor. A causa de su baja densidad, la conductancia de la capa es muy pequeña y la corriente entre los electrodos fuente y drenaje es muy baja.

Para un canal-n de tipo incremental, un voltaje positivo compuerta fuente ($V_G > V_S$) disminuye la resistencia del canal drenaje-fuente, un exceso de electrones es atraído a la superficie del semiconductor tipo n y estos serán concentrados en la capa delgada del semiconductor (acumulación). La densidad de portadores de carga en la capa delgada será incrementada, permitiendo un aumento de conductividad en el canal de conducción. Opuestamente al aplicar una polarización negativa en la compuerta, ocurre una reducción (agotamiento) significativa de los portadores de carga en el semiconductor, al volverse más negativo este voltaje en la compuerta ocasiona que la zona de agotamiento se extienda sobre el espesor entero de la capa del semiconductor [19].

En el caso de un semiconductor tipo p incremental, cuando se polariza la compuerta negativamente, una acumulación de huecos es atraída a la superficie del semiconductor tipo p y serán concentrados dentro de un estrato delgado (canal). La densidad de portadores de carga en el canal será incrementada (acumulación), permitiendo una mayor conductividad en el canal de conducción. Por otra parte, al aplicar una polarización positiva en la compuerta, ocurre una reducción (agotamiento) drástica de los portadores de carga en el semiconductor, esto bajo un voltaje positivo de compuerta lo suficientemente alto, puede provocar que esta zona de agotamiento sea extendida sobre el espesor entero de la capa del semiconductor.

Para un canal-n de tipo decremental, un voltaje compuerta-fuente negativo ($V_G < V_S$) incrementa la resistividad del canal drenaje- fuente, el resultado es que el campo eléctrico provoca el crecimiento de la zona de agotamiento resultando en el ahorcamiento del flujo de electrones a través del canal.

En un canal-p de tipo decremental, un voltaje positivo compuerta fuente ($V_G > V_S$) incrementa la resistencia del canal. Este ahorca el flujo de huecos a través del canal.

Así, el voltaje externo aplicado a la compuerta permite la acumulación de portadores de carga en la interface semiconductor –aislante o el agotamiento (reducción) de esta interface, ocasionando una modulación de la densidad de portadores de carga en el

canal de conducción. Esta modulación de la densidad de portadores en el canal de conducción es leída por otros dos electrodos, la fuente y el drenaje. Un transistor de efecto de campo FET es un dispositivo de tres electrodos unipolar, que permite monitorear, a través de una polarización de compuerta la conducción de un canal en la interface del semiconductor-aislante. En la figura 3.6 se muestra la estructura propuesta para el transistor que se desarrollo en este trabajo.

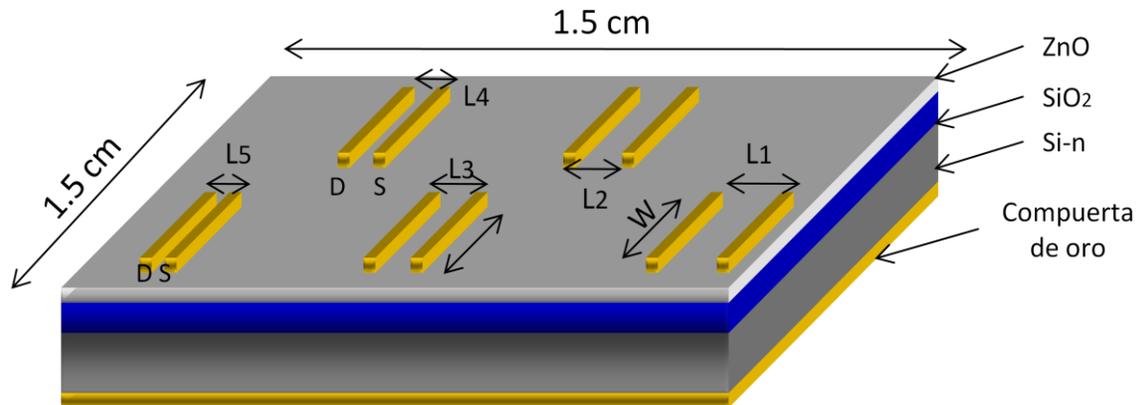


Figura 3.6 Esquema experimental de pseudo MOSFET con capa activa de ZnO empleado en este trabajo.

3.6 Caracterización de los dispositivos TFT pseudo MOSFET

En lo que respecta a la caracterización del material en este tipo de dispositivos, un modelo simple de comportamiento de la corriente del canal del MOSFET es empleado, denominado aproximación gradual del canal. Existe un campo eléctrico presente en la interface semiconductor/SiO₂, este campo que afecta al canal, es debido al voltaje aplicado en la terminal de la compuerta, el cual es obtenido al resolver la ecuación de Poisson's en dos dimensiones. Para obtener la solución analítica de la corriente de I_D con respecto a su razón de cambio, se asume que la componente vertical del campo eléctrico, producto de una polarización de compuerta, es mucho más grande que la razón de cambio de la componente horizontal debido al voltaje V_{DS} . Esta aproximación nos reduce el problema de obtener I_D a una dimensión y contar con dos ecuaciones, una que nos relaciona la carga presente en el canal debida a un V_G y otra que describa el movimiento de esta carga por un voltaje V_{DS} [19, 17].

Los MOSFET cuentan con tres zonas de operación como se muestra en la fig. 3.7, una región de corte, en el cual se encuentra apagado, una región lineal y una región de saturación.

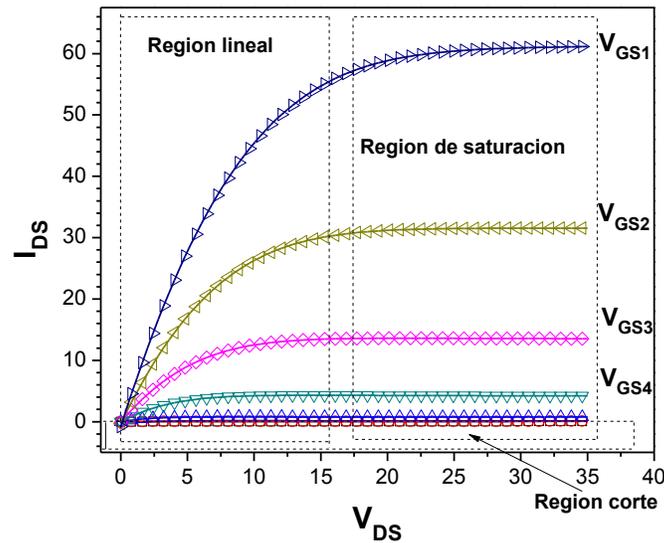


Figura 3.7 Características de DC para FET.

3.6.1 Región lineal de operación

Para la región donde la corriente de I_D incrementa linealmente con respecto a la variación del V_{DS} , es denominada región lineal u óhmica ($V_D \ll V_G$). La carga móvil presente en el canal Q_I es producto de un potencial en la compuerta V_G , cuando este es más grande que el voltaje umbral (V_{TH}) y es relacionado por:

$$Q_I = -C_{SiNy}(V_G - V_{TH}) \quad 3.1$$

Donde C_{SiNy} es la capacitancia por unidad de área de la compuerta compuesta SiO_2/Si . En la ecuación anterior se asume que el potencial del canal (V) debe ser cero, sin embargo la carga inducida depende de la componente en X, al considerar esto la eq. 3.1 nos queda:

$$Q_I = -C_{SiNy}(V_G - V_{TH} - V) \quad 3.2$$

Podemos relacionar la corriente en el canal I_{DS} con el campo eléctrico E_x y la concentración por unidad de área de portadores mayoritarios en el canal con:

$$I_D = W\mu_n Q_I E_x \quad 3.3$$

Donde W es el ancho del canal, μ_n es la movilidad de los electrones, y E_x es el campo eléctrico en la dirección X . La ecuación 3.3 es una forma simplificada de la fórmula para la densidad de corriente donde el término de difusión ha sido despreciado:

$$J_n = \frac{I_n}{A} = q \left(\mu_n n E + D_n \frac{dn}{dy} \right) \quad 3.4$$

Si sustituimos $E_x = -\frac{dV}{dx}$ y 3.2 en 3.3 obtenemos

$$I_D dx = W\mu_n C_{SiNy} (V_G - V_{TH} - V) dV \quad 3.5$$

Si integramos los incrementos de corriente de $x=0$ a L , en otras palabras, de $V=0$ a V_D , tendremos una expresión para la corriente del drenaje:

$$I_D = C_{SiNy} \mu_n \frac{W}{L} \left[(V_G - V_{TH}) V_D - \frac{1}{2} V_D^2 \right] \quad 3.6$$

En la región lineal de operación ($V_D \ll V_G$) el comportamiento de la corriente del drenaje es descrita por:

$$I_D = C_{SiNy} \mu_n \frac{W}{L} (V_G - V_{TH}) V_D \quad 3.7$$

3.6.2 Región de saturación

En la región de saturación, la corriente I_D (corriente del drenaje) se mantiene constante a incrementos del V_D (Voltaje de drenaje), la densidad de portadores inducida por el campo de la compuerta en 3.7 desaparece en proporción al incremento del potencial. Cuando $V_D = V_G - V_{TH}$, en este caso el canal de electrones es ahorcado, se hace más angosto, y la corriente I_D se satura [19]. Para cierta condición de $V_D > V_G - V_{TH}$, la ecuación 3.6 no es válida. La corriente en la región de saturación puede ser obtenida por sustitución de $V_D = V_G - V_{TH}$ en la ecuación 3.6:

$$I_D = \frac{C_{SiO_2} \mu W}{2L} (V_G - V_{TH})^2 \quad 3.8$$

La movilidad de efecto de campo en la región de saturación es obtenida de la ecuación 3.8. Despejando $I_D^{1/2}$ produce:

$$I_D^{1/2} = \sqrt{\frac{C_{SiO_2} \mu W}{2L}} (V_G - V_T) \quad 3.9$$

Haciendo $I_D^{1/2} \equiv y$ y $V_G \equiv x$.

Esto sugiere que $y = mx + b$ con m y b constantes, es decir, que debe haber un comportamiento lineal entre $I_D^{1/2}$ y V_G . Experimentalmente se obtiene:

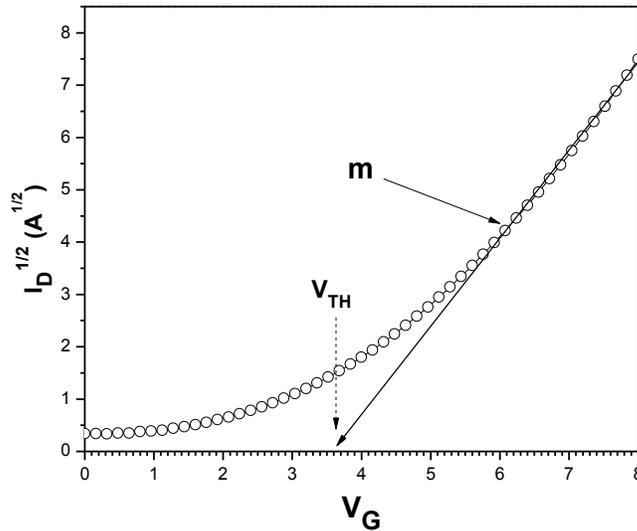


Figura 3.8 Determinación del voltaje umbral.

En la región de comportamiento lineal, las unidades de m ([m]) estarán relacionadas dimensionalmente con las unidades de I_D ($[I_D]$) y las unidades del voltaje de compuerta ($[V_G]$) de la siguiente manera:

$$[m] = \frac{[I_D]^{1/2}}{[V_G]} = \frac{\left(\frac{C}{s}\right)^{1/2}}{V} \quad 3.10$$

Así que:

$$[m]^2 = \frac{C}{V_s^2} = \frac{F}{V_s} \quad 3.11$$

Por comparación de la ecuación (Ecuación 3.8) y la evaluación de m a partir de datos medidos experimentalmente se tiene:

$$\sqrt{\frac{C_{SiO_2} \mu W}{2L}} = m$$

$$\mu = m^2 \left(\frac{2}{WC_{SiO_2}} \right) L \quad 3.12$$

La capacitancia del SiO₂ considera un espesor $d_{SiO_2} = 100nm$ y $\epsilon_{SiO_2} = 3.9 \epsilon_0$ [23]

$$C_{SiO_2} = \frac{\epsilon_{SiO_2}}{d_{SiO_2}} = \frac{3.9 \epsilon_0}{100nm} = \frac{(3.9) \left(8.854 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \right)}{100 \times 10^{-9} m} = \frac{34.53 \times 10^{-14} \left(\frac{F}{cm} \right)}{1 \times 10^{-5} cm}$$

$$C_{SiO_2} = 3.453 \times 10^{-8} \frac{F}{cm^2}$$

En nuestros sistemas TFT el ancho del canal siempre fue el mismo, $W=450nm$ así que evaluando $\left(\frac{2}{WC_{SiO_2}} \right) = 128712.55269 \frac{cm^2}{F(nm)}$

$$\mu = \left(1.2871255269 \frac{cm^2}{F(nm)} \right) m^2 L$$

Otras características importantes que identifican a estos dispositivos son, las razones o pendientes de monotonía en las curvas $\log(I_D)$ vs V_G , I_D vs V_D e I_D vs V_G , ver figuras 3.9 a) y 3.9 b).

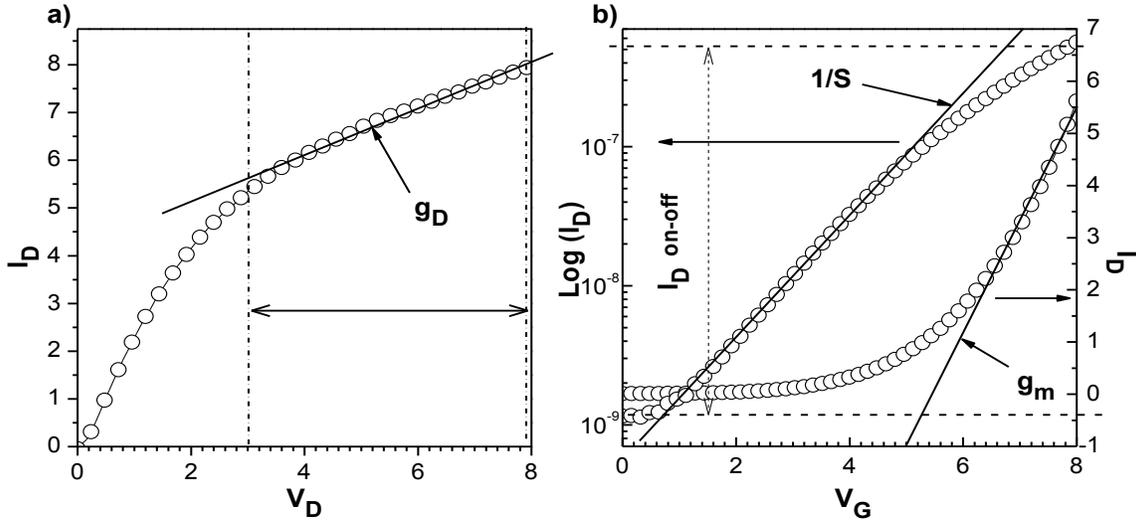


Figura 3.9 a) Determinación de la conductancia del canal, b) Determinación de la razón de encendido, transconductancia y voltaje S.

Estos valores bajo la consideración de despreciar efectos difusivos definen como, figura 3.9 a), la conductancia de canal o de salida (g_D) y la transconductancia mutua (g_m) mediante las expresiones:

$$g_D \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right|_{V_G = \text{const.}} \quad 3.13$$

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D = \text{const.}} = \frac{1}{R_{DS}} \quad 3.14$$

Utilizando la ecuación 3.7 se obtiene que:

$$g_D \equiv \frac{\partial I_D}{\partial V_D} = C_{SiNy} \mu_n \frac{W}{L} (V_G - V_{TH}) \quad 3.15$$

$$g_m \equiv \frac{\partial I_D}{\partial V_G} = C_{SiNy} \mu_n \frac{W}{L} V_D \quad 3.16$$

Donde comúnmente el factor $\left(C_{SiNy} \mu_n \frac{W}{L} \right)$ es denominado parámetro de transconductancia o de construcción (β).

El voltaje de compuerta S , y la razón de encendido I_D^{on-off} son estimados mediante la curva característica de DC $\log I_D$ vs V_G , ver fig. 3.9 b) [17][20].

S es definido como la proporción del voltaje requerido para el incremento corriente I_D por un factor de 10, está definida como:

$$S = \frac{dV_G}{d(\log I_D)} \quad 3.17$$

La razón de encendido de la I_D proporciona una medida útil del desempeño del dispositivo y es definida como:

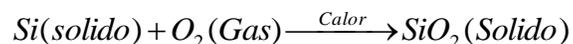
$$I_D^{on-off} = \frac{I_D^{on}}{I_D^{off}} \quad 3.18$$

3.7 Proceso de fabricación

Como fue mencionado antes, el SiO_2 al ser empleado como dieléctrico en el desarrollo de circuitos eléctricos o dispositivos nos permite emplearlo para evitar cortos de un contacto metálico con otro metal subyacente, así como para manipular el espesor de este para impedir fenómenos de inducción, o controlar los fenómenos de inducción de cierta forma. La inducción puede ocurrir cuando la capa de óxido que separa a un metal y un semiconductor es lo suficientemente delgado para permitirle a una carga eléctrica presente en una capa de metal provocar una acumulación de carga o agotamiento en la superficie de la otra capa adyacente del oxido.

3.7.1 Oxidación térmica

La Oxidación térmica es una reacción química que puede llevarse a cabo a temperatura ambiente, una alta temperatura nos permite lograr óxidos de calidad en tiempos más cortos para la implementación en circuitos y semiconductores, las temperaturas de oxidación oscilan entre 900 y 1200°C.



Reacción del Silicio y el Oxígeno para formar Dióxido de Silicio

Por mencionar un ejemplo de este mecanismo, consideraremos el caso en el cual colocamos una oblea previamente limpia en una cámara a alta temperatura e introducimos oxígeno, los átomos de este se combinan fácilmente con el silicio. El crecimiento del óxido primeramente pasa por una etapa lineal de crecimiento en el cual este crece en igual cantidad por cada unidad de tiempo hasta alcanzar un límite aproximadamente de 1000\AA .

Después de este crecimiento lineal, la capa inicialmente crecida de óxido separa el oxígeno de los átomos de silicio en la superficie de la oblea. Para que el oxígeno siga creciendo los átomos del oxígeno debe difundirse a través de la capa de óxido y alcanzar la superficie del silicio para que el proceso de crecimiento se siga dando. Entre más gruesa sea la capa de SiO_2 , la difusión del oxígeno debe ser más profunda, ahí se presenta una desaceleración en la tasa de crecimiento y da lugar a una etapa de crecimiento del SiO_2 parabólica en la cual la tasa de crecimiento está limitada por la difusión del oxígeno a través del óxido crecido [14].

Así el crecimiento del óxido experimenta dos etapas: el estado lineal y parabólico. El cambio de lineal a parabólico depende de la temperatura, del óxido previamente crecido, entre otros factores. En general los óxidos de menos de 1000\AA ($0.1\text{ }\mu\text{m}$) son controlados por el mecanismo lineal y este es el rango empleado en las compuertas para MOS [14].

3.7.2 RCA

Cuando uno se refiere a limpieza por RCA quiere decir que el agua oxigenada es usada junto con una base o un ácido. El RCA es un proceso de dos pasos para remover residuos orgánicos e inorgánicos de una oblea de silicio. El primer paso SC-1 consiste en una solución de agua, agua oxigenada e hidróxido de amonio, las soluciones varían en composiciones de 5:1:1 a 7:2:1 y son calentadas en un rango de 75 a 85°C , este primer paso de RCA (SC-1) remueve residuos orgánicos y crea la condición para remover iones metálicos de la superficie, durante este proceso se forma una pequeña capa de dióxido de silicio. En el SC-2 se emplea una solución de agua, agua oxigenada, y ácido clorhídrico en proporciones entre 6:1:1 y 8:1:1 a temperaturas entre los 75 y 85°C . SC-2 remueve los iones metálicos, hidróxidos y residuos metálicos complicados [14].

Dependiendo de la aplicación, el orden de los pasos y los tiempos SC-1 y SC-2 pueden ser invertida, por ejemplo cuando se quiere una superficie libre de oxido el HF es usado antes, entre y después de la limpieza RCA.

3.8 Esquema de fabricación experimental.

En la figura 3.10 se presenta la secuencia de fabricación de transistores FET fabricados en este trabajo. Como primer paso una limpieza por RCA para la oblea de silicio es realizada, como segundo paso se crece una capa de SiO₂ de 100 nm por oxidación térmica, como método para la inducción de carga en el semiconductor, este será depositado sobre la capa aislante. En la tercera etapa, el semiconductor es depositado mediante la técnica de r.f sputering, una manipulación de parámetros del sistema como la presión, tiempo y potencia de depósito es aplicada.

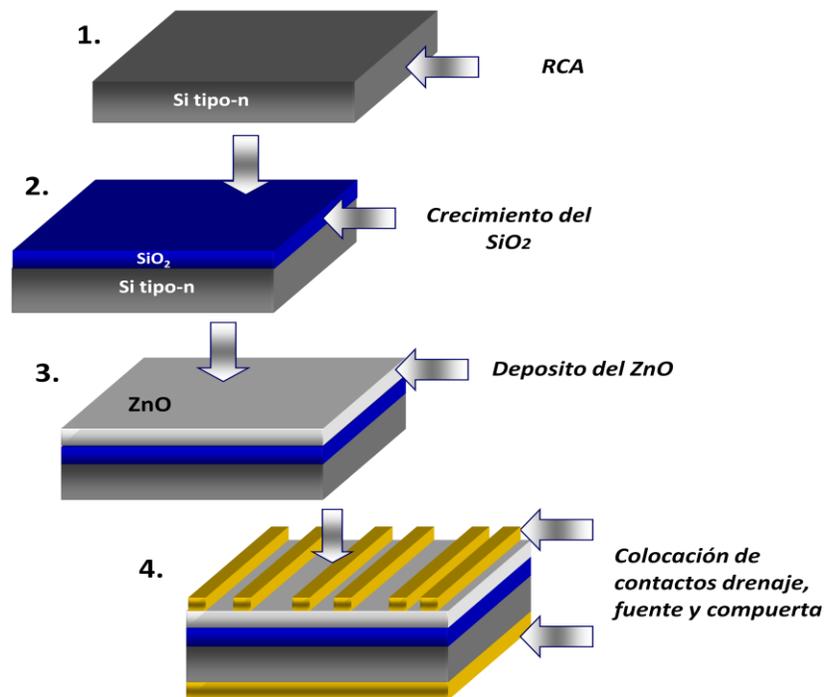


Figura 3.10 Esquema de fabricación.

En la cuarta etapa de fabricación se realiza la metalización de contactos. El drenaje y la fuente son elaborados mediante un proceso de litografía, donde se crean patrones mediante el empleo de una resina, la cual es revelada para la creación de moldes, posteriormente un depósito de oro es hecho por la técnica de evaporación de haz de electrones. Además la

muestra es inmersa en acetona dentro de un baño ultrasónico para su definición final en la parte superior, proceso conocido como lift-off. Por último un electrodo denominado compuerta es depositado en la parte posterior de la muestra por evaporación de haz de electrones.

3.9 Crecimiento de películas delgadas de ZnO por r.f magnetron sputtering

3.9.1 Preparación de los sustratos

Las películas de ZnO fueron depositadas en un sustrato de Silicio tipo-n recubierto con una película de Dióxido de Silicio (SiO_2) de 100 nm mediante oxidación térmica. También se realizaron depósitos de películas de ZnO bajo las mismas condiciones que en sustratos de SiO_2/Si sobre vidrio Corning para caracterizarlas ópticamente. Los sustratos fueron cortados en cuadros de 1.5 x 1.5 cm para facilitar su caracterización.

Los sustratos son sometidos a un proceso de limpieza para eliminar impurezas o grasa, los sustratos de SiO_2/Si se enjuagan con agua desionizada y se colocan en el baño ultrasónico con acetona, alcohol, por 15 minutos respectivamente para posteriormente ser secados a presión con nitrógeno.

Los sustratos de vidrio se lavan con agua y jabón, se enjugan con agua y se dejan secar en posición vertical protegiéndolos del polvo.

3.9.2 Crecimiento de películas de ZnO

Para el crecimiento de las películas delgadas de ZnO se empleó la técnica de R.F. sputtering ya que este es un compuesto semiconductor. Se empleó gas argón como medio ionizado para erosionar el blanco sinterizado de ZnO, este es un blanco comercial sin dopar con un diámetro de 2" con 99.9% de pureza.

La cámara de vacío empleada nos permite introducir 8 sustratos, los cuales son colocados en un plato tipo carrusel (ver fig. 3.11) que podemos ir girando según el sustrato donde se desea el depósito de la película. En el lado opuesto se encuentra otro plato que sirve para la protección de los demás sustratos, este tiene la función de una ventana entre el magnetron y el sustrato en el que se desea depositar la película. Entre estos dos

platos existe un obturador que permite iniciar el depósito de la película, al haber estabilizado el plasma en la cámara.

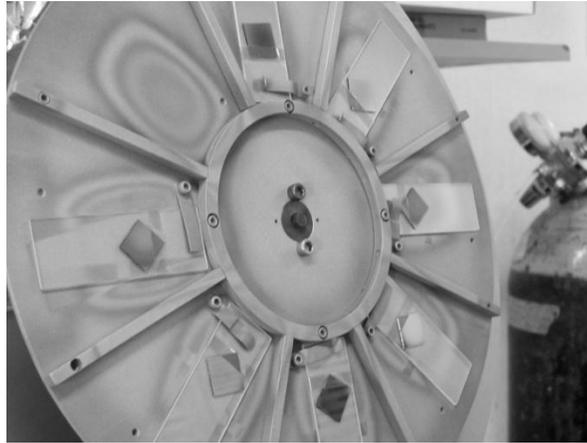


Figura 3.11 Porta muestras del sistema de sputtering.

Antes de comenzar la deposición, la cámara fue llevada a alcanzar una presión base de $5 \times 10^{-6} \text{ torr}$ para lograr tener un mejor control en las condiciones de limpieza, evitando la incorporación de impurezas en el sustrato o provocando estas pérdidas de energía por choques en las trayectorias de los iones en la cámara de sputtering.

La presión de trabajo para la deposición de la película fue establecida mediante el control del flujo de entrada del argón y fue mantenida entre 50 mTorr y 70mTorr con un flujo de argón entre 10 sccm y 45 sccm. Un pre-sputtering fue hecho por 5 minutos a 150 watts, para limpiar la superficie del blanco.

Se depositaron películas de ZnO variando algunos parámetros del sistema en nuestro caso no enfocamos en el análisis basado en la variación de la potencia de la fuente de R.F y tiempo de depósito. Se realizaron 4 series de potencias de R.F a 50, 75, 100 y 150 watt, también se realizó una quinta serie a 150Watts con calentamiento del sustrato. En cada serie de potencias se variaron los tiempos de depósito por ejemplo: depósitos de 50 Watts a 10 minutos, 15 minutos, y 20 minutos, de esta misma forma se procedió con todas las series de potencias.

3.10 Metalización de contactos

Una vez depositada la película de ZnO se procede mediante litografía a la aplicación de una capa de fotoresina por el método de centrifugado (spinning) a una velocidad de 3000 rpm, durante 60 segundos para posteriormente aplicarle un tratamiento térmico durante 10 minutos a 65°C, enseguida se procede a definir los patrones de los contactos, alineando una máscara y exponiéndola a radiación ultravioleta durante unos segundos. Después se revela para remover la fotoresina expuesta, dejando un patrón de acceso para la metalización de los electrodos (oro), que se realiza mediante evaporación con haz de electrones. Por último la muestra es inmersa en acetona dentro un baño ultrasónico por dos minutos, para remover el fotoresina remanente que desprenderá este con la capa de oro que lo cubre. La metalización de la compuerta se realiza depositando Au directamente a la parte posterior del Si mediante evaporación con haz de electrones, ver fig. 3.12.

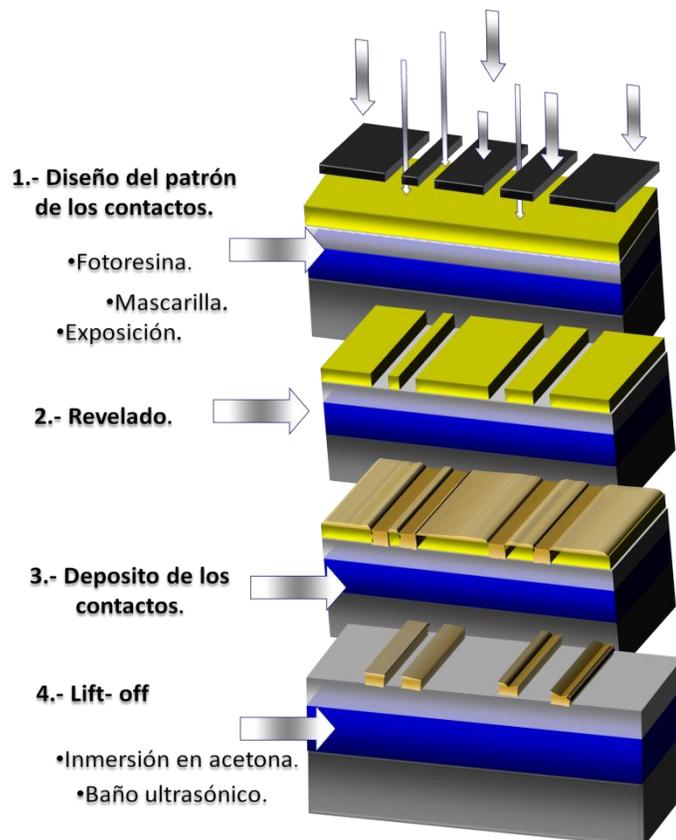


Figura 3.12 Proceso Litográfico.

3.11 Propiedades ópticas

Un Espectrofotómetro de Reflexión y Transmisión Film Tec™ 3000 (SCI, Inc.) se utiliza para los porcentajes de reflexión y transmisión en el intervalo de 240 a 840 nm. Se hace incidir un haz de luz de manera normal en la muestra, y el sistema de medición determina las intensidades de los haces transmitido y reflejado relativas a la intensidad de la luz incidente. Inicialmente se calibra con el material del sustrato de modo que las medidas sean las del material depositado sobre el sustrato. Con esto el espectrofotómetro capta la transmisión y la reflexión de la película cuando ésta se somete a la radiación de luz de diferentes longitudes de onda. El equipo nos ofrece una gráfica de transmitancia (T) y reflectancia (R) contra la longitud de onda, con la que podemos analizar a qué longitudes de onda transmite o refleja nuestra película de ZnO, así como podemos calcular la absorbancia (A) y calcular la banda prohibida del material. Procesando esta información también es posible calcular los espesores de las películas depositadas así como hacer estimaciones del índice de refracción.

3.12 Estructura cristalina

La estructura cristalina de las películas de óxido de Zinc se determinó por difracción de rayos X, utilizando un Difractómetro marca Bruker modelo ZXS D8 Discover con una radiación $\text{CuK}\alpha$ (1.5406 Armstrong), ángulo de barrido de 20 a 70 grados.

3.13 Morfología

Con un microscopio de fuerza atómica (AFM) Dimension 3100 version 4.43B (Digital Instruments Veeco Metrlogy System), se determinó la morfología de las películas de Oxido de Zinc, así como la rugosidad de estas y el tamaño promedio de los agregados.

3.14 Propiedades eléctricas

La caracterización de medidas de curvas corriente voltaje de DC es obtenida con un analizador de parámetros semiconductores Keithley 4200 con una estación de prueba de 4 puntas. Las mediciones se realizaron en ausencia de luz.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en este trabajo de investigación de tesis, en la primera parte se muestran los resultados de las caracterizaciones estructural, morfológico-superficial, y óptica del material fundamental investigado (películas delgadas de ZnO). En la segunda parte se presenta la caracterización eléctrica del mismo material, integrado como un material activo en un dispositivo transistor de películas delgadas (TFT).

4.1 Caracterización Morfológica

4.1.1 Caracterización Morfológica estructural (XRD).

En la fig.4.1, se muestran los resultados de la caracterización de rayos X (DRX) de las muestras de ZnO elaboradas con potencias de 100, 75 y 50 Watts, durante tiempos de 10, 15 y 20 minutos. Se observa que las muestras de ZnO son policristalinas con una orientación preferencial (002). Como era de esperarse las intensidades de los patrones de difracción de rayos X aumentan en proporción con la potencia empleada, así mismo en proporción al tiempo de depósito. Por otro lado las mediciones realizadas en un mismo equipo para las distintas muestras nos permiten observar muy notoriamente un efecto de tensión en los dos juegos de muestras depositadas a potencias menores (50 y 75 Watts), mientras que el grupo de 3 muestras crecidas a 100 Watts corresponde de manera precisa con el patrón de referencia para ZnO en bulto.

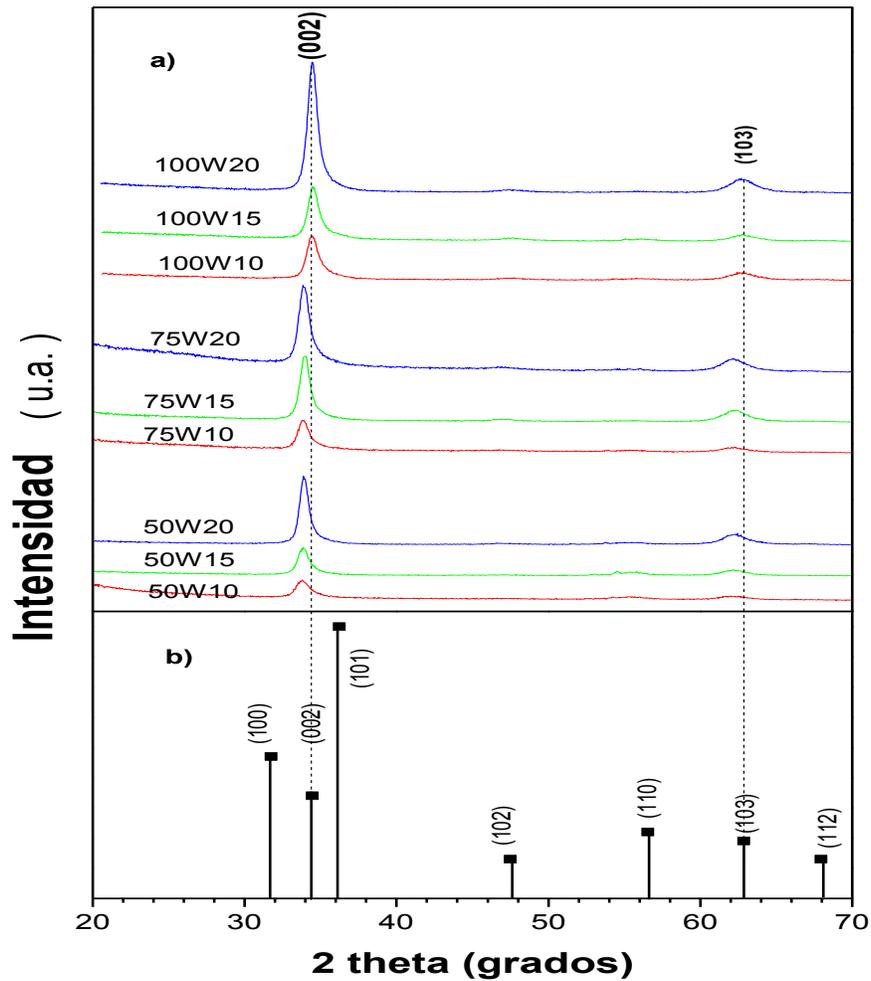


Figura 4.1 a) Patrón de difracción de rayos X de películas depositadas de ZnO, b) Patrón de referencia de difracción de Rayos X para ZnO

4.1.1.1 Calculo de tamaño de grano

También de estos patrones de DRX se calculó el tamaño de grano que justifica la naturaleza policristalina de las capas de ZnO, la realización de estos cálculos se hizo empleando la ecuación de Debye-Scherrer, la cual establece que el tamaño de grano es inversamente proporcional al ancho medio del pico máximo de difracción y al coseno del ángulo del pico máximo, conforme a:

$$\tau = \frac{K\lambda}{B\cos(\theta_B)} \quad 4.1$$

Donde consideraremos un factor de forma $K= 0.9$, $\lambda= 1.5406$, B es el ancho medio del pico considerado para el cálculo y θ_B es el ángulo correspondiente con el máximo del pico ($2\theta_B$).

Los cálculos realizados a partir de los datos experimentales mostrados en la figura 4.1 y mediante el uso de la ecuación de Debye-Scherrer, 4.1, nos arrojaron los resultados que ordenamos en la tabla 4.1. que se muestra a continuación:

Tabla 4.1 Crecimientos de grano del material policristalino.

Muestra	100W 20 min	100W 15 min	100W 10 min	75W 20 min	75W 15 min	75W 10 min	50W 20 min	50W 15 min	50W 10 min
τ (nm)	10	10	8	11	9	9	12	9	9

Como se puede observar en la figura 4.2 para las potencias menores, 75 y 50 watts, entre mayor es el tiempo de depósito se piensa que se crece una película de fondo más uniforme y el tamaño de grano muestra una tendencia de aumento conforme aumenta el tiempo. Sin embargo en la grafica correspondiente a 100 Watt de esta misma figura, se puede observar una atenuación constante en los tiempos de 15 y 20 minutos. Esto deberá marcar su correspondiente comportamiento de confinamiento espacial.

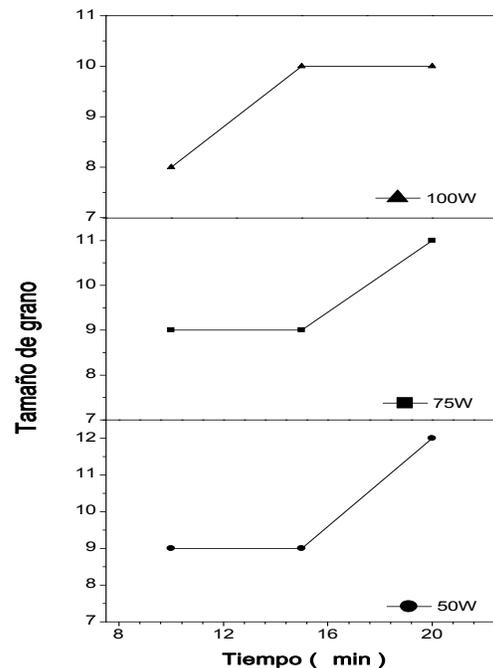


Figura 4.2 Tamaño de grano vs Tiempo de depósito de capas de ZnO.

4.2 Caracterización Morfológica superficial (AFM).

En la figura 4.3 se muestran las micrografías de escala de $1 \times 1 \mu\text{m}$ de la topografía superficial de películas delgadas de ZnO depositadas a diferentes potencias y manteniendo constante el tiempo de depósito, la rugosidad de las muestras pudo determinarse y en general se obtuvo que esta tiende a disminuir como la potencia de depósito sea menor, para un tiempo constante de depósito.

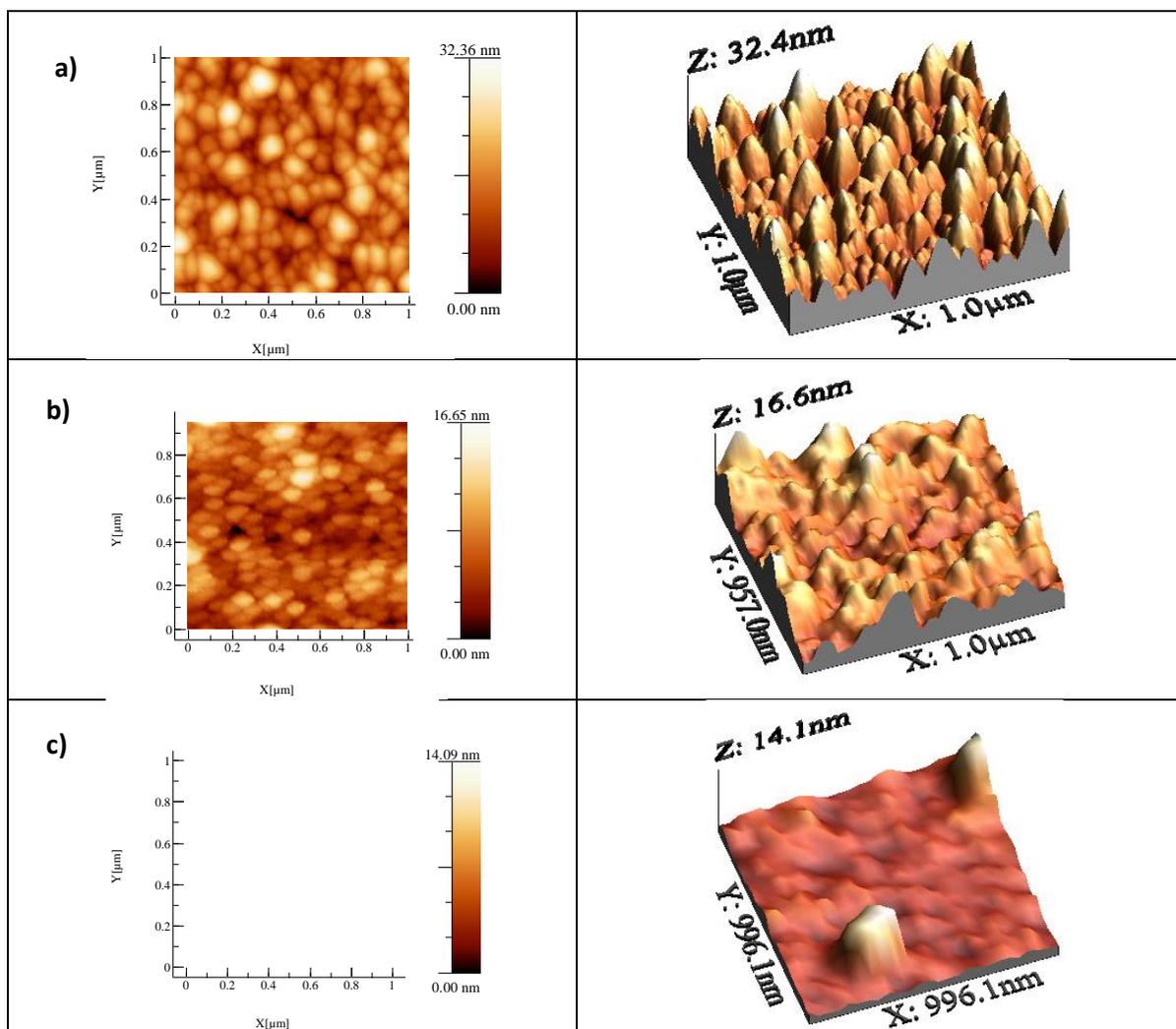


Figura 4.3 Micrografías superficiales por AFM de algunas muestras representativas, a) 100W15, b) 75W15, c) 50W15.

Además en las imágenes de AFM de las muestras seleccionadas se advierte una estructura de agregados (Clústers), la cual gráficamente es de mayor escala que la del tamaño de grano de la estructura policristalina encontrada por DRX. El tamaño que presentan los agregados de estas muestras no es uniforme, es decir, que existen regiones de la película donde hay trazas o distribuciones de agregados de mayor o menor crecimiento.

En la tabla 4.2 se muestran los valores de rugosidad, así como el rango de tamaños de agregados que se forman, a partir de los datos de AFM [28], correspondientes a la figura 4.3.

Tabla 4.2 Valores promedio de rugosidad y agregados de las muestras.

Muestra	100W 20 min	100W 15 min	100W 10 min	75W 20 min	75W 15 min	75W 10 min	50W 20 min	50W 15 min	50W 10 min
RMS(nm)	10	10	8	11	9	9	12	9	9
Agregados(nm)	-	40-120	-	-	60-120	-	-	50-200	-

La rugosidad representada por RMS nos indica superficies muy planas, lo cual es consistente con el campo de la microelectrónica. Sin embargo la súper estructura de agregados, en tres muestras seleccionadas, presentan una distribución de tamaños de agregados en la cual la menos regular corresponde a la muestra de 50 Watts donde esporádicamente muestran agregados de 200 nm.

4.3 Caracterización Óptica

En la figura 4.4 se muestran los resultados de transmitancia y reflectancia óptica de las películas de ZnO, para las diferentes potencias y tiempos considerados, estas muestras presentan alta transparencia que fluctúa alrededor del 80% para la transmisión, mientras que su reflexión fluctúa alrededor de un 15% para reflexión, en el rango de 400 a 840 nm. En este tipo de espectros es conocido que entre mejor definidas y abundantes estén las oscilaciones de este, correspondería a un mayor espesor de las capas del material. En nuestra figura 4.4 y 4.7 este comportamiento es observado para las muestras depositadas con mayores potencias.

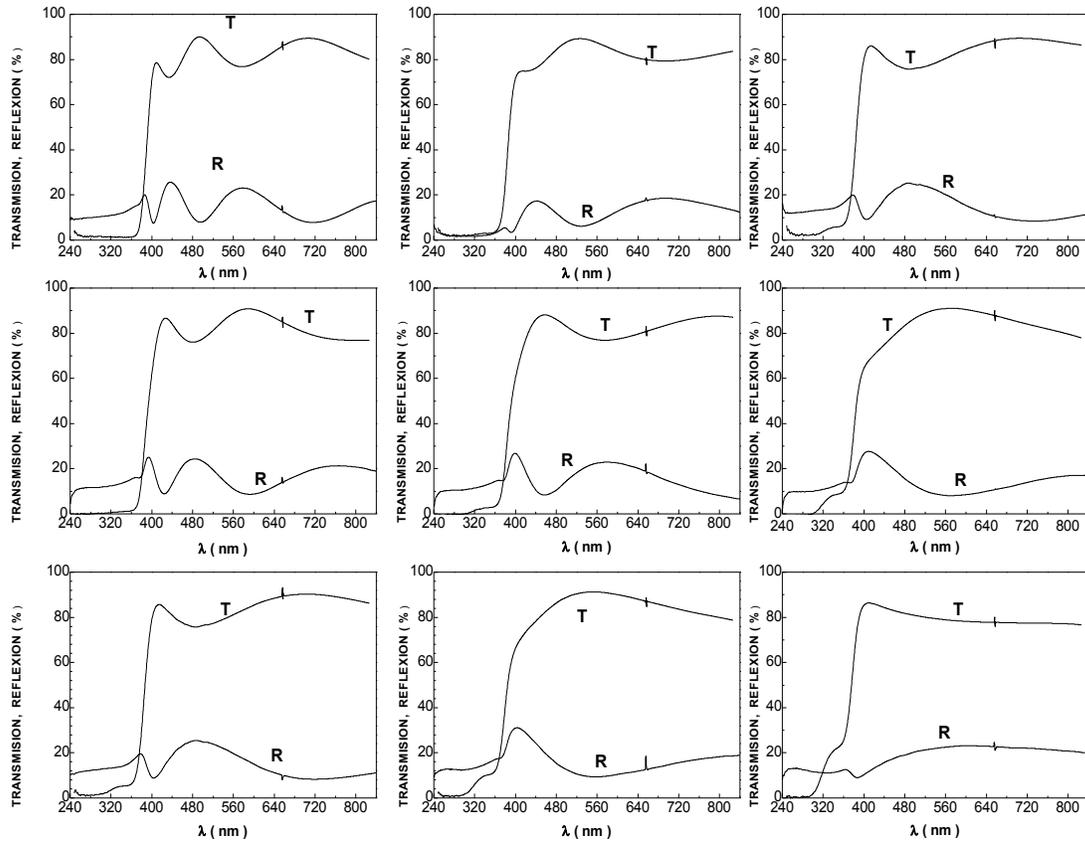


Figura 4.4 Espectros de transmisión y de Reflexión de capas de ZnO depositadas en potencias de 100, 75 y 50 Watts y tiempos de 20, 15 y 10 minutos.

Las oscilaciones en los espectros de R y T son debidas a las interferencias de los haces reflejados en las interfaces aire/película y película/sustrato en la cara superior y no por efectos de absorción ya que la posición de los máximos (mínimos) de R si correspondan con la posición de los mínimos (máximos) en T. Cuando lo anterior se cumple en una determinada región, la absorción es despreciable, no obstante en todo el espectro habrán de ser consideradas T, R y la absorción (A), lo cual nos permite estimar la absorción en todo el espectro considerado mismo que emplearemos para calcular la banda de energías prohibidas del material.

4.3.1 Cálculo de la banda de energías prohibida

Los siguientes grupos de espectros mostrados en la figura 4.5, son los espectros de absorción obtenidos mediante las medidas de T y R mostradas anteriormente. En la literatura se encuentra que el borde de absorción del ZnO se encuentra alrededor de 3.5eV,

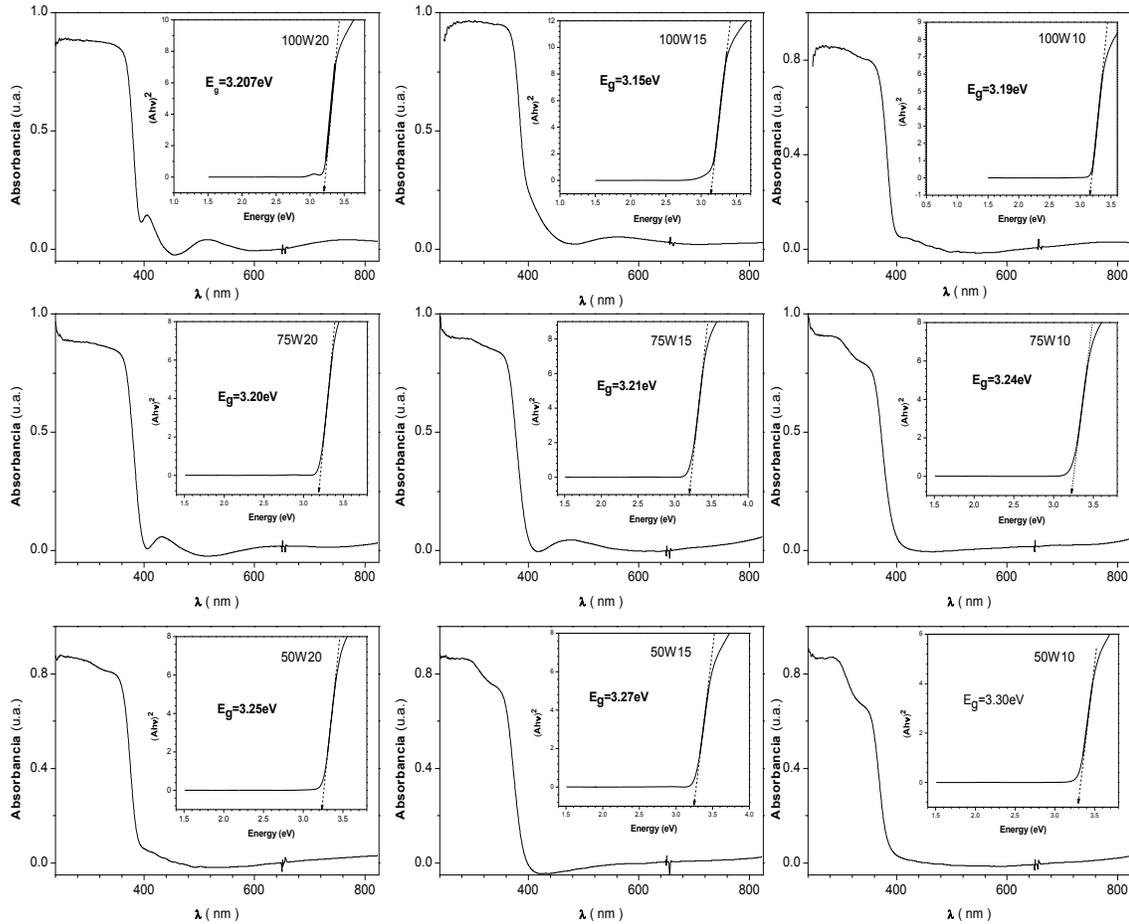


Figura 4.5 Espectros de Absorción de capas de ZnO depositadas en potencias de 100, 75 y 50 Watts y tiempos de 20, 15 y 10 minutos.

en nuestro caso lo encontramos entre 3.26 y 3.44 eV (360-380 nm).

Los recuadros donde se grafica $(Ahv)^2$ vs energía ($h\nu$) nos representan la región de comportamiento lineal para los semiconductores de banda directa de energía en los cuales se cumple:

$$A \sim \frac{(h\nu - E_g)^{1/2}}{h\nu} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{C_1(h\nu - E_g)^{1/2}}{h\nu}$$

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

Esto nos justifica un comportamiento lineal $(\alpha h\nu)^2$ con respecto a la energía del fotón, así que extrapolando la parte lineal de la curva para $(\alpha h\nu)^2 = 0$ se puede determinar el valor de E_g . En la tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos para las series de 100, 75 y 50watts en series de tiempos.

Tabla 4.3 Resultados de la banda de energías prohibida de las series.

Muestra	100W 20 min	100W 15 min	100W 10 min	75W 20 min	75W 15 min	75W 10 min	50W 20 min	50W 15 min	50W 10 min
E_g (eV)	3.207	3.15	3.19	3.20	3.21	3.24	3.25	3.27	3.30

En la figura 4.6 se ubican estos mismos valores para E_g agrupados en las potencias, considerando el tiempo como variable de depósito.

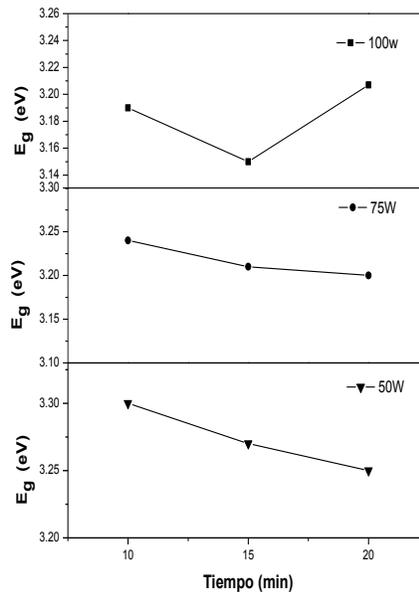


Figura 4.6 Banda prohibida vs Tiempo de depósito.

Las dos graficas inferiores de la figura 4.6 corresponderían al razonamiento de que al aumentar el tiempo de depósito se experimenta un correspondiente aumento en el tamaño de grano de los nanocristales de ZnO y a esto le corresponde una disminución en el ancho de banda prohibida en contraste con el resultado de la grafica superior de 100 Watts.

4.3.2 Cálculo de los espesores

El espesor de la muestra se calculó obteniendo el espectro de reflectancia óptica (Rf) de la película solamente para las muestras depositadas, este espectro es mostrado en la Fig. 4.7. Rf se obtuvo despreciando las contribuciones de la interface sustrato aire de la parte posterior del sustrato, por lo tanto obteniendo la medición de un sistema sustrato/película, se determinaron las posiciones de las longitudes de onda de los máximos y los mínimos mediante el empleo de la ecuación:

$$R_f = \frac{2R - R_s - RR_s}{2 - 3R_s + RR_s}$$

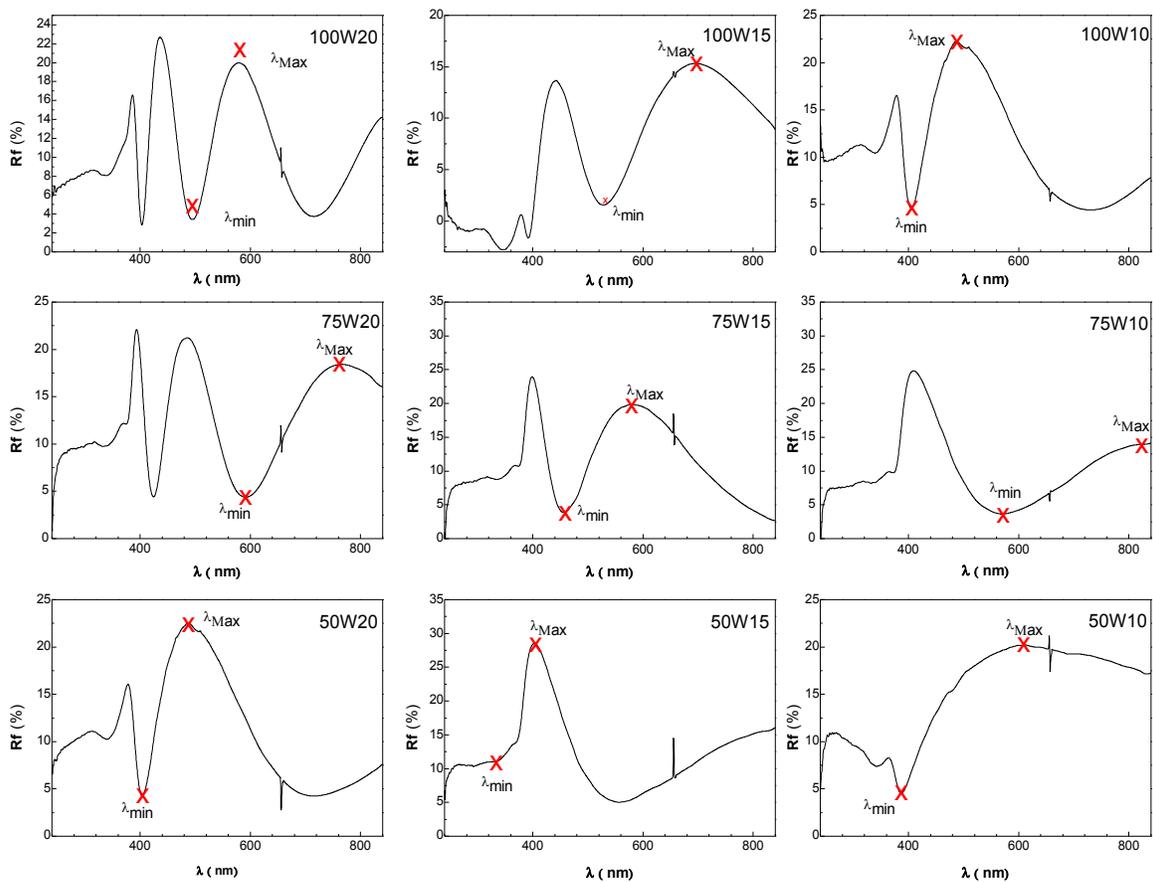


Figura 4.7 Espectros calculados de Reflectancia (Rf) para un sistema aire/ZnO/vidrio.

Tabla 4.4 Valores de índices de refracción y espesores del ZnO calculadas a partir de las franjas de interferencia del espectro Rf.

Muestra	100W 20 min	100W 15 min	100W 10 min	75W 20 min	75W 15 min	75W 10 min	50W 20 min	50W 15 min	50W 10 min
d (nm)	420	293	290	334	259	252	280	192	133
λ_{Max}	578.95	693.98	485.51	765.84	583.56	821.38	486.87	403.75	604.57
λ_{min}	494.67	527.7	404.78	592.12	456.2	568.04	403.41	328	387.05
n (λ_{Max})	2.0188	1.8739	2.0924	1.9534	2.0132	1.8249	2.0997	2.2567	2.01932

Como se puede notar en la tabla anterior el índice de refracción de nuestros materiales crecidos fue calculado para las longitudes de onda específicas correspondientes con los valores máximos de la reflectancia óptica del sistema aire/película/sustrato y estos concuerdan con los que se reportan en la literatura [1].

Se comprueba que las películas de mayor espesor presentan más interferencias que las de menor espesor, así como también las depositadas a mayor tiempo y mayor potencia como era de esperarse. Las tendencias o correlaciones entre el espesor, potencia y el tiempo de crecimiento son mostradas gráficamente en la figura 4.8.

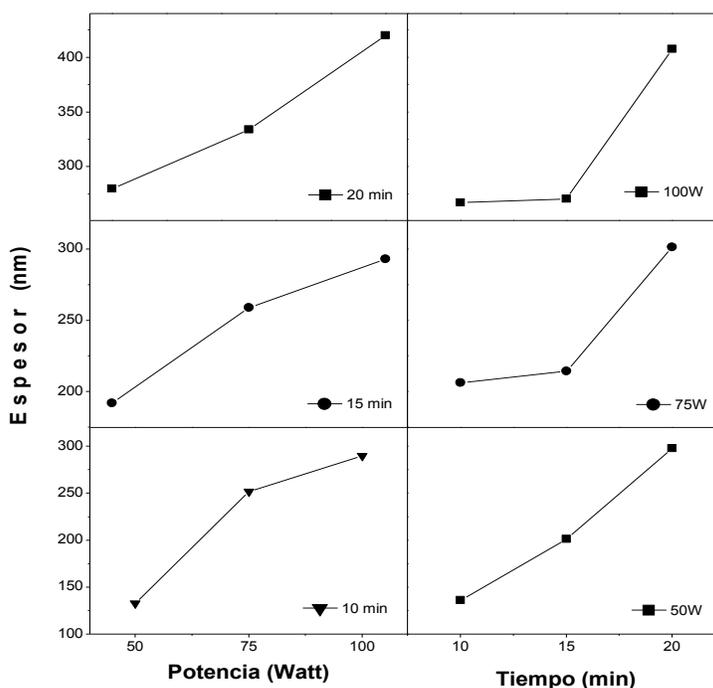


Figura 4.8 Espesor de las capas de ZnO vs potencia y vs Tiempo.

4.4 Caracterización eléctrica del Dispositivo

Como se ha indicado con anterioridad las películas delgadas de ZnO están interviniendo como un medio activo o canal de conducción en el transistor diseñado a base de heterouniones, véase figura 3.6, en los resultados siguientes ahora son correlacionados los parámetros de crecimiento de esta capa activa de ZnO con parámetros eléctricos convencionales para el estudio del comportamiento de los transistores de películas delgadas descritos anteriormente. En los análisis de estos resultados se decidió anexar dos crecimientos con y sin calentamiento del sustrato a potencia de depósito 150 Watt y calentamiento de sustrato a 150°C para los mismos tipos de crecimientos de 10, 15 y 20 minutos. Así mismo para la elaboración del dispositivo el sustrato paso a ser una capa compuesta SiO₂/Si

4.5 Resultados del Dispositivo (TFT)

En las siguientes graficas se muestran los resultados experimentales de los transistores en términos de las curvas características para dispositivos tipo FET, como se podrá observar el comportamiento de los transistores elaborados, marca una tendencia y comportamiento aproximado para bajas potencias de fabricación y estas tendencia se va mejorando a medida que aumenta la potencia de depósito de la capa activa (ZnO). Las curvas características a las que nos referiremos son las que correlacionan V_D vs I_D para varios voltajes de compuerta constantes entre 0-40V y las que muestran $\sqrt{I_D}$ vs V_G para V_{DS} constante. Los parámetros de fabricación de los TFTs de ZnO son: una compuerta aislante de SiO₂ que cuenta con un espesor de 100 nm y ancho de canal de $W=450$ micrómetros, longitudes de canal $L_1=80$, $L_2=40$, $L_3=20$ y $L_4=10$ micrómetros. En un área de sustrato de 1.5 x1.5 cm se depositaron 15 grupos de transistores, de los cuales se muestran los resultados más representativos.

En la figura 4.9 se observan los resultados que se obtuvieron en los transistores depositados a 50 watts a series de 10, 15 y 20 minutos para longitudes de canal cada una de 20 (L4) y 40 (L3) micrómetros. Se piensa que en el proceso de litografía, el reactivo removedor al ser aplicado en estas condiciones desprendió y daño algunos contactos afectando el comportamiento típico de un dispositivo FET. Así mismo podemos notar que la corriente con más alto voltaje de compuerta presenta una sub-saturación o un

escalonamiento antes de alcanzar una saturación fuerte, pero ocurre solo en los tiempos de 10 y 15 minutos, para longitudes de canal de 20 y 10 micrómetros y en el más alto voltaje de compuerta manejado. Esto se puede atribuir a fugas corriente, atrapamiento de carga o apantallamientos debido a la configuración tanto de los materiales y forma.

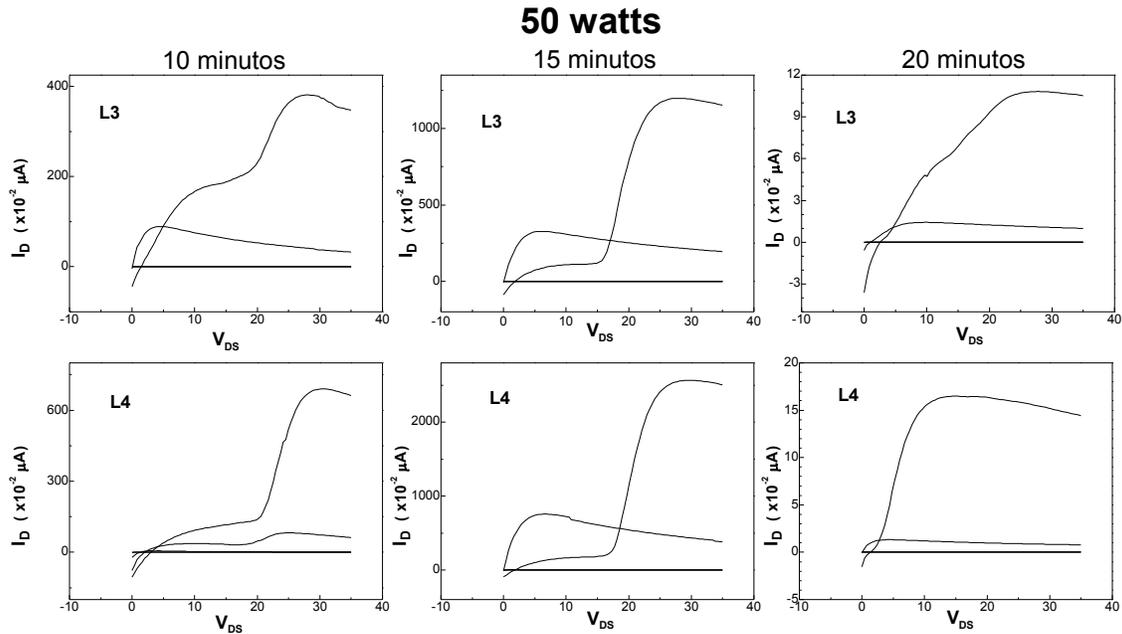


Figura 4.9 Características I_D - V_{DS} para transistores cuya capa activa se depositó a 50 watts.

En esta misma figura para voltajes de compuerta menores a 40 V y tiempos de 10 y 15 minutos de depósito se empieza a observar un mejor comportamiento, semejante a un transistor, para tiempos de 20 minutos el comportamiento de las curvas en general para todos los voltajes de compuerta empiezan a presentar las regiones que conforman las características normales de una curva I-V para estos dispositivos (región de corte, saturación y óhmica). Por otro lado en este grupo se observan algunas curvas que no presentan una saturación constante, si no que se presenta una atenuación ligera en la corriente I_D a medida que aumenta el V_{DS} , esto implica un aumento gradual en el límite de la zona de agotamiento.

Los siguientes parámetros considerados se ilustran en la fig. 4.10. y consisten en una potencia de depósito de 75 W con tres diferentes longitudes de canal y los mismos

tiempos antes mencionados para las muestras. En este grupo de transistores todos exhiben las tres regiones características para curvas de este tipo, no obstante persiste el posterior decaimiento de la corriente después de alcanzar el nivel de saturación, pese a que en cada gráfica hay una familia de cinco curvas, las cuales quedan determinadas a un V_G fijo, el espaciamiento respectivo en su nivel de saturación se encuentra desproporcionado, siendo menores para V_G menores por lo cual en una escala lineal no son apreciadas.

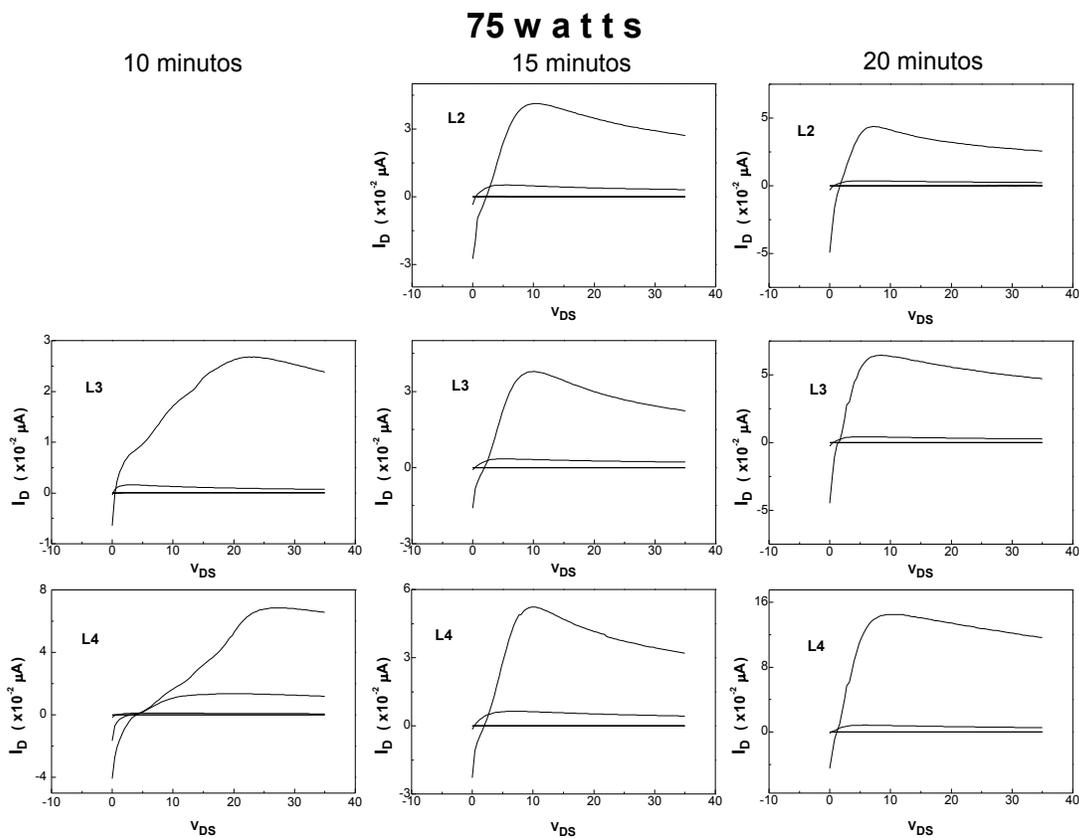


Figura 4.10 Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 75 watts.

En este grupo de 75 W cabe señalar que los que manejan más nivel de corriente corresponden a los que presentan una capa activa más gruesa y longitud de canal más pequeña.

En el siguiente grupo de transistores, con parámetro de depósito de 100 W en general mantienen la tendencia alcanzar mayor nivel de corriente de saturación al aumentar

el espesor y disminuir la longitud del canal, véase fig. 4.11, el subgrupo de transistores de 15 minutos observó mejor respuesta de corriente con respecto a los demás.

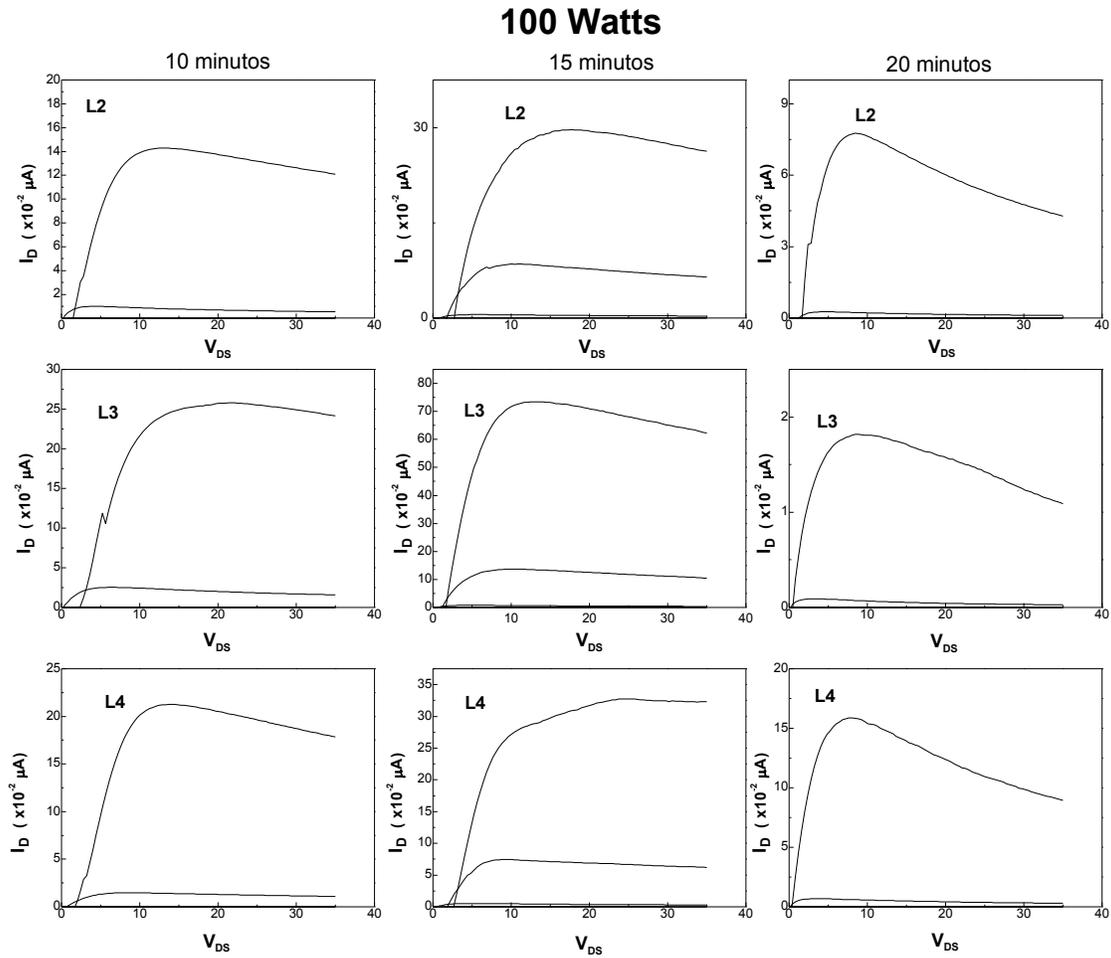


Figura 4.11 Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 100 watts.

Las figuras 4.12 y 4.14 corresponden mejor con las características típicas I_{DS} contra V_{DS} para varios V_{GS} de un transistor de efecto de campo. La conductancia del canal aumenta en proporción decreciente con el incremento del voltaje V_{DS} , manteniendo un voltaje de compuerta constante $V_G > 0$ y esta conductancia aumenta en mayor proporción conforme aumenta el voltaje V_G . Los portadores mayoritarios (electrones) son inducidos por el voltaje positivo V_G , así que se confirma que el canal de ZnO de nuestros TFTs es de tipo n. Los transistores fabricados son del tipo incremental (enhancement mode) y están normalmente apagados cuando $V_{GS}=0$ V, un voltaje positivo compuerta fuente ($V_G > V_S$) disminuye la resistencia del canal drenaje-fuente.

El subgrupo de transistores que se ilustran en la figura 4.12 muestra que en general las familias alcanzan niveles de saturación fuertes, así como mejor distribución de sus niveles de saturación con respecto al cambio de V_G , finalmente cabe señalar que para longitudes de canal de 40 y 20 micrómetros son mejores estos resultados.

Las corrientes de saturación obtenidas para $V_G = 40V$ y aproximadamente $V_{DS} = 20V$ fueron 0.012, 0.024, 0.04 y 0.092 micro amperes para longitudes de canal de 80, 40, 20 y 10 respectivamente.

150 Watts CC 150 °C 10 minutos

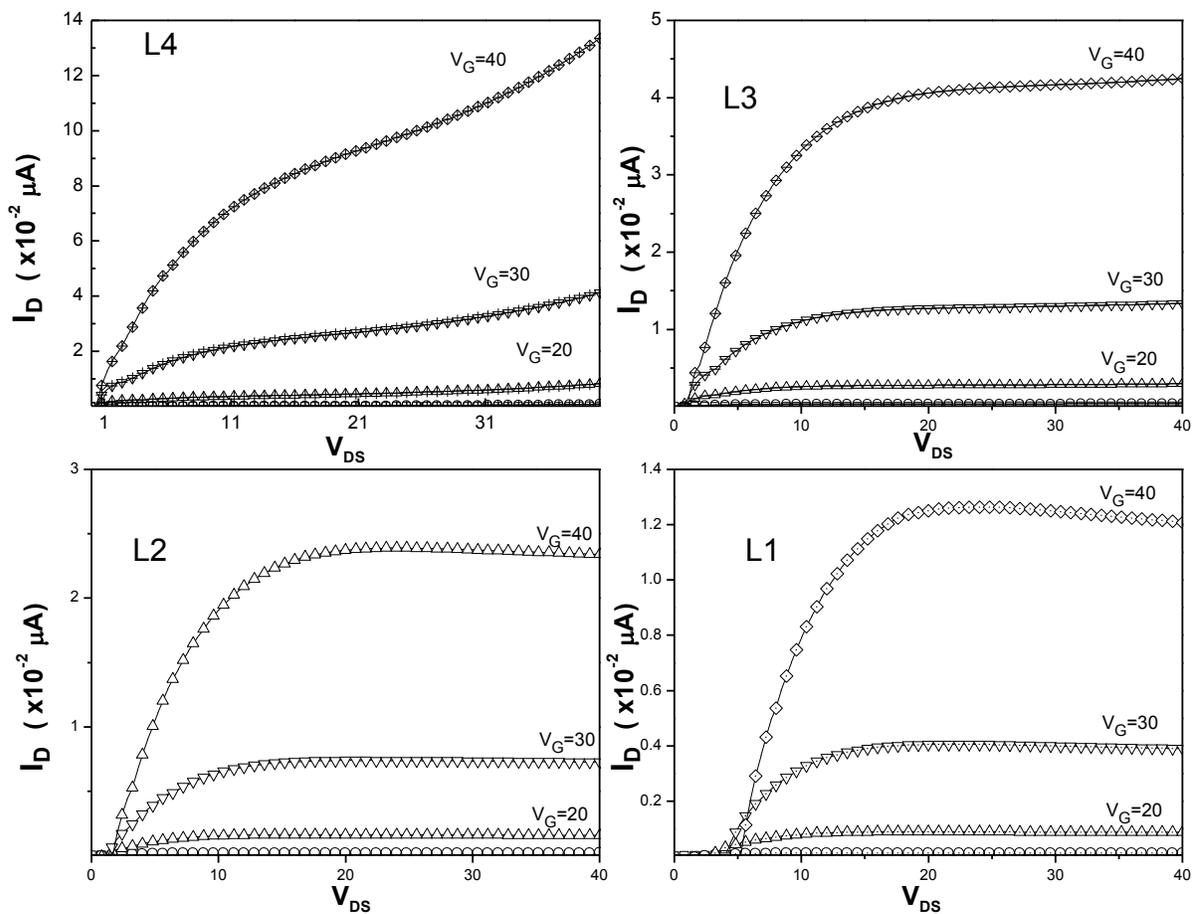


Figura 4.12 Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 150 watts y calentamiento de sustrato a 150°C.

La movilidad de efecto de campo y el voltaje umbral fueron obtenidas de la región de saturación usando la ecuación 3.8.

Donde la W y la L son el ancho y la longitud del canal, μ es la movilidad de efecto de campo, C_{SINX} es la capacitancia por unidad de área del dieléctrico, V_{TH} es el voltaje umbral y V_{GS} es el voltaje entre la compuerta y la fuente. El voltaje umbral y la movilidad de efecto de campo fueron calculadas mediante la grafica de la raíz cuadrada de la corriente del drenaje contra el voltaje de compuerta, en la región de saturación como se muestra en la fig. 4.13.

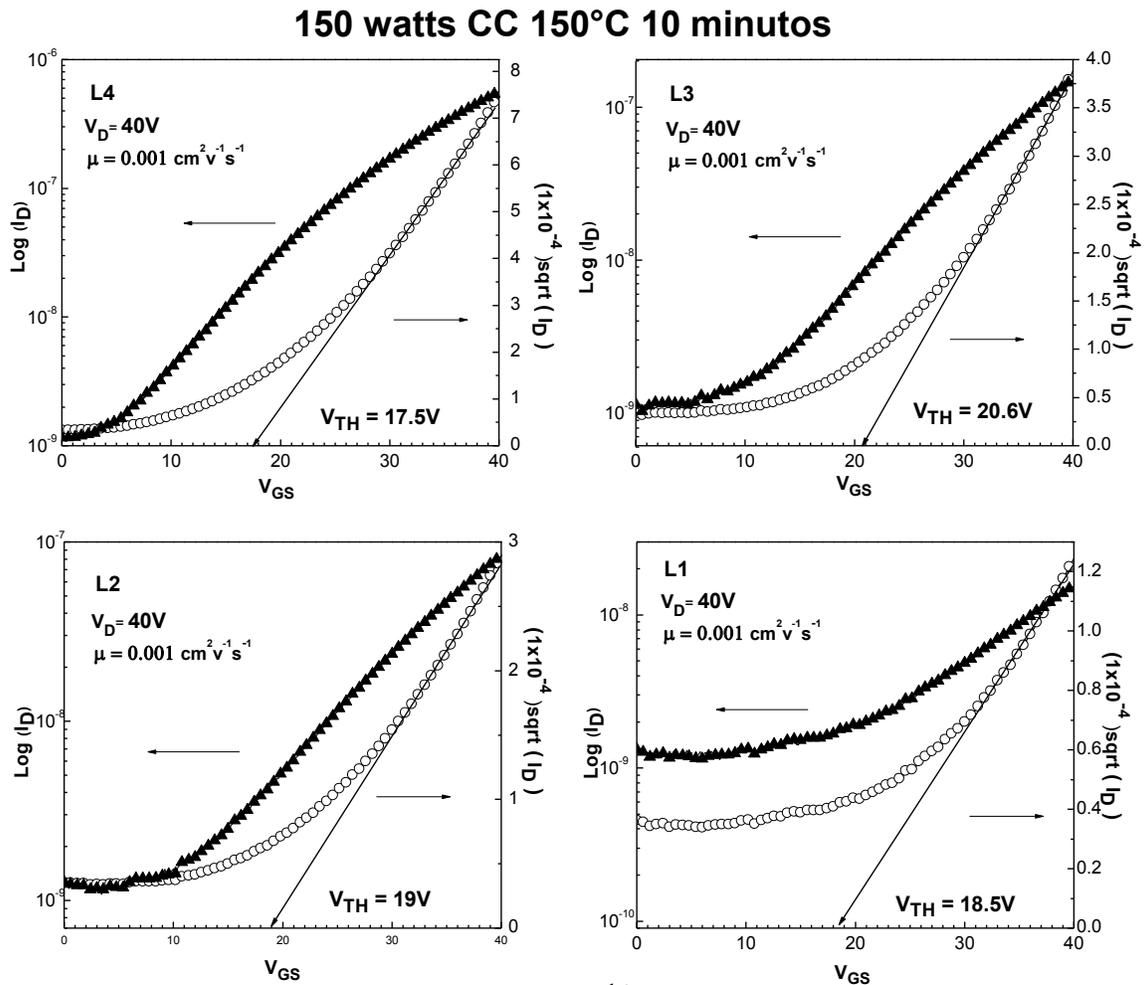


Figura 4.13 Características $\text{Log}(I_D)-V_G$ y $I_D^{1/2} - V_G$ con V_{DS} constante para transistores depositados a 150°C.

La movilidad de efecto de campo en saturación puede ser calculada de la siguiente fórmula:

$$\mu = \left(\frac{2L}{WC_{SINX}} \right) (m)^2$$

La capacitancia por unidad de área, C_{SINX} se calcula de la siguiente expresión:

$$C_{SINX} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{SINX}}{t_{SINX}}$$

ϵ_0 , ϵ_{SINX} son la permitividad en el vacío y la del oxido respectivamente, t_{SINX} es el espesor del oxido. Estos TFTs tienen movilidades de saturación en general para las tres longitudes de canal de $0.001 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$. El voltaje umbral (V_{TH}) obtenido para $L_1=80$ micras es 18.5 V, $L_2=40$ micras es 19, $L_3=20$ micras es 20.6 V y para $L_4=10$ es de 17.5 V. Sus razones de encendido, para $L_4 \sim 5 \times 10^2$, $L_3 \sim 10^2$, $L_2 \sim 8 \times 10^1$, $L_1 \sim 1.5 \times 10^1$. La proporción del voltaje requerido para el incremento corriente I_D por un factor de 10 (S) es 11, 14, 16 y 20 V/década respectivamente para L_4 , L_3 , L_2 y L_1 .

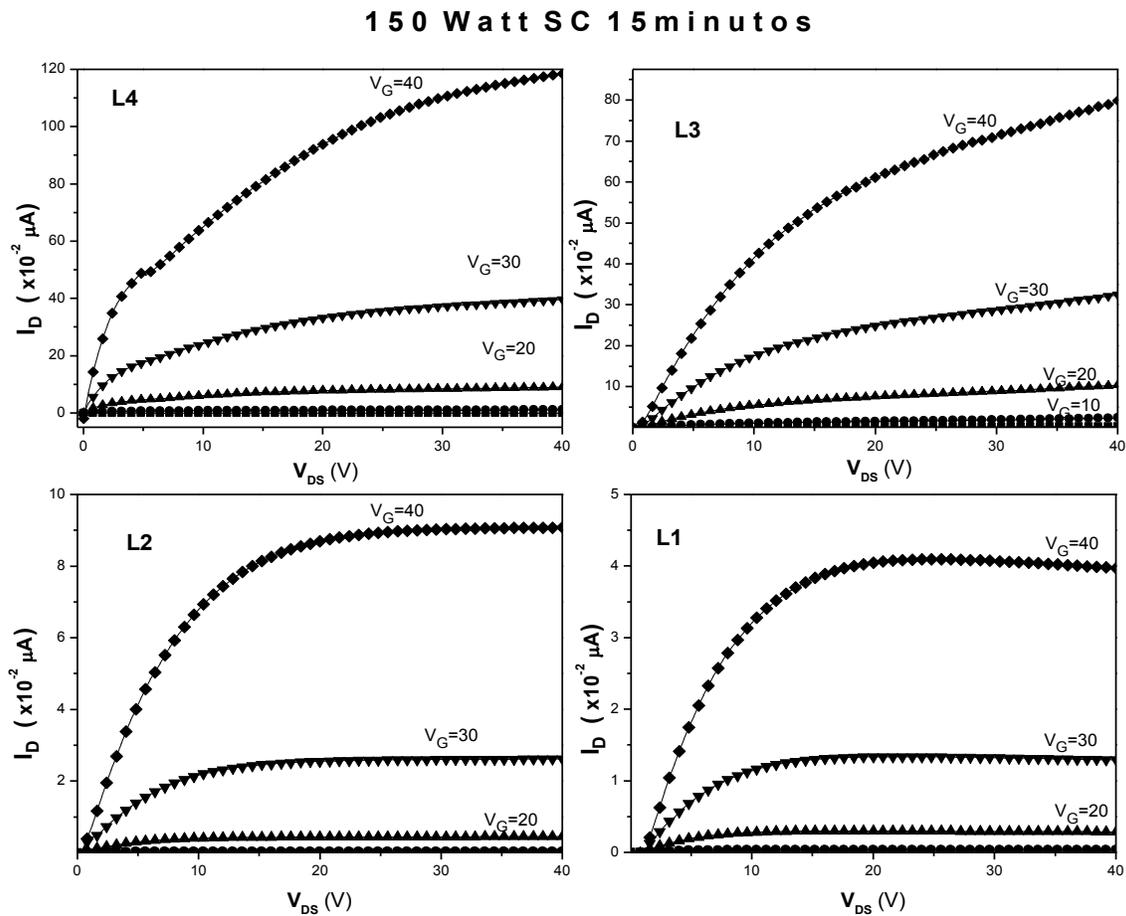


Figura 4.14 Características I_D - V_D para transistores cuya capa activa se depositó a 150 watts.

De la anterior figura 4.14 las familias de curvas para las longitudes de canal más grande (40 y 80 micrómetros) presentan una saturación definida en comparación de longitudes más pequeñas (10 y 20 micrómetros) en la cual aparece un crecimiento I_D más lento para mayores V_{DS} , así como se puede notar que longitudes de canal más pequeñas proporcionan mejores corrientes de saturación que las longitudes de canal más grandes.

Las corrientes de saturación obtenidas para $V_G = 40V$ y aproximadamente $V_{DS} = 20V$ fueron 0.04, 0.09, 0.72 y 1.16 micro amperes para longitudes de canal de 80, 40, 20 y 10 micras respectivamente. Estos transistores tienen espesor de canal del orden de 3000\AA , medido con perfilometro.

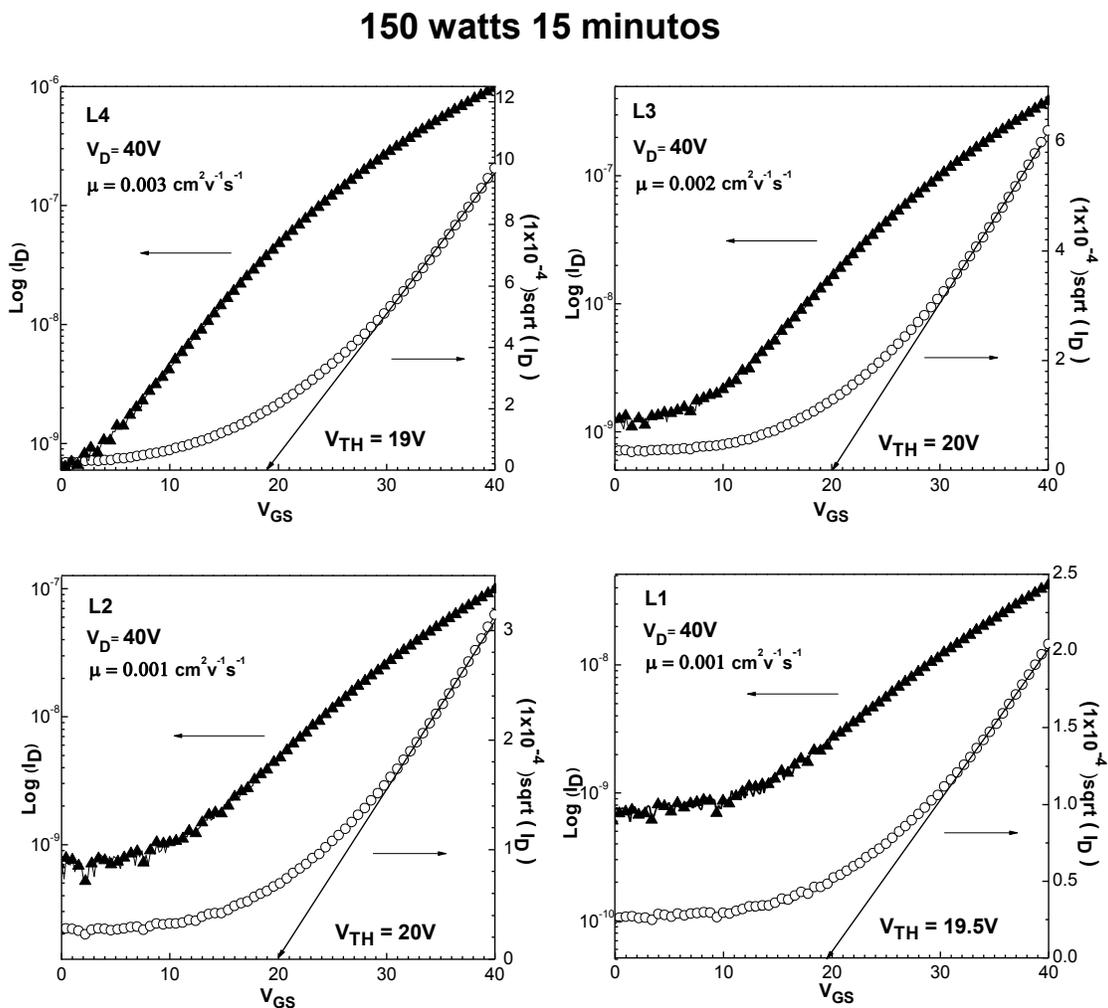


Figura 4.15 Características $\text{Log}(I_D) - V_G$ y $I_D^{1/2} - V_G$ con V_{DS} constante para transistores depositados a temperatura ambiente.

Estos TFTs tienen movilidades de saturación de $0.003 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$, $0.002 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$, $0.001 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ y $0.001 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$ respectivamente para L_4 , L_3 , L_2 y L_1 . El voltaje umbral (V_{TH}) obtenido para $L_4=10$ micras es 19 V, $L_3=20$ micras es 20 V, $L_2=40$ micras es 20 V y para $L_1=80$ es de 19.45 V. Su razón de encendido, para $L_4 \sim 1.5 \times 10^3$, $L_3 \sim 4 \times 10^2$, $L_2 \sim 0.16 \times 10^2$, $L_1 \sim 0.5 \times 10^2$. La proporción del voltaje requerido para el incremento corriente I_D por un factor de 10 (S) es 9, 11, 13 y 15 V/década respectivamente para L_4 , L_3 , L_2 y L_1 .

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

5.1 Conclusiones

- En este trabajo se demostró el proceso de fabricación de un Transistor FET a base de una película de ZnO utilizado como canal, tipo n. Además se realizó un análisis de las características, ópticas, eléctricas, estructurales y morfológicas de las películas de ZnO que permiten tener transistores con las mejores características.
- En lo que respecta a la fabricación de películas de ZnO por sputtering, se comprobó que el espesor incrementa conforme se incrementa la potencia de la fuente de RF, así como al incrementar el tiempo de depósito.
- De acuerdo a los estudios realizados con el XRD, las películas de ZnO resultantes son policristalinas con orientación preferencial en el plano (002) y presentan un tamaño de grano en el rango entre 8 y 12 nm.
- En lo que respecta a las propiedades ópticas de nuestras películas de ZnO, borde de absorción, transparencia e índice de refracción; hemos encontrado una concordancia con los valores típicos reportados en la literatura.
- Bajo ciertas condiciones de fabricación se logró elaborar satisfactoriamente el dispositivo buscado, (FET), basado en una heterounión de películas delgadas. Las curvas características I_D vs V_D e $I_D^{1/2}$ vs V_G mostraron el comportamiento típico de un dispositivo TFT. Los transistores que presentaron las mejores características son los que se fabricaron a una potencia de depósito de 150 Watts con un tiempo de 15 minutos. Para estas mismas condiciones pero depositando sobre un sustrato

mantenido a una temperatura de 150°C, se obtuvo el mismo comportamiento pero proporciones menores.

- En general, el voltaje umbral de los transistores se mantuvo en el rango de 18 a 20 V. Esto implica que las movilidades obtenidas son similares, es decir, no varían significativamente y se encuentran en el rango de 0.001-0.003 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$. De acuerdo a los análisis realizados no es posible encontrar una clara dependencia del V_{TH} con los parámetros de fabricación empleados, sin embargo consideramos que una de las posibles razones es que el grosor del óxido no es el apropiado.
- Las mejores corrientes de I_{D} obtenidas usando $V_{\text{G}}=40\text{V}$ para la serie de 150 Watts con las cuatro longitudes de canal fueron 0.04, 0.09, 0.72 y 1.16 micro Amperes en orden respectivo.
- Las mejores corrientes de I_{D} obtenidas a $V_{\text{G}}=40\text{V}$ para la serie de 150 Watts con calentamiento del sustrato con longitudes de canal L1, L2, L3 y L4 fueron 0.012, 0.024, 0.04 y 0.09.2 micro Amperes respectivamente.
- Para los dos casos de 150 Watts con y sin calentamiento del sustrato, las razones de encendido de I_{D} disminuyen conforme se va aumentando la longitud del canal, estas andan en razones menores a $\sim 10^{-3}$. En el caso del voltaje requerido para el incremento corriente I_{D} (S) la tendencia es opuesta, este voltaje de S aumenta conforme aumenta la longitud del canal, para 150 Watts con y sin calentamiento respectivamente se tienen valores de 9, 11, 13 y 15 V/década y 11,14, 16 y 20 V/década para longitudes de canal de 10, 20, 40 y 80 micrómetros respectivamente para los dos casos.
- En los caso donde las longitudes de canal son de 20 y 10 micrómetros, se presentan efectos de canal corto, estos presentan una conductancia de salida, en otras palabras no presentan una saturación fuerte o bien definida de I_{D} .

- Para longitudes de canal de 40 y 80 micrómetros la saturación de I_D se acercan más al comportamiento típico de los TFTs convencionales, debido a que manejan menores cantidades de corriente en comparación con los de longitudes de canal más corto.

5.2 Perspectivas

Es importante mencionar que en el experimento desarrollado en este trabajo todos los transistores que se depositaron sobre una oblea contenían una compuerta común sobre todo el sustrato, por lo que para mejorar las condiciones de movilidad y de corriente de fuga se propone como trabajo futuro realizar un proyecto en el que los transistores sean independientes, es decir dejar una calle entre cada dispositivo, además de que cada uno de estos debe tener una compuerta independiente. Por otro lado en algunos trabajos desarrollados por grupos que fabrican dispositivos múltiples en un solo sustrato han empleado anillos de guarda para disminuir las corrientes de difusión que incrementan las corrientes de fuga, por lo que también se propone probar una estructura que incluya un anillo de guarda.

El método de Sputtering es uno de los que hasta el momento ha dado muy buenos resultados a nivel mundial para fabricar transistores de ZnO usado como canal, sin embargo existen otros métodos que pueden ser utilizados para fabricar la película de ZnO como por ejemplo CVD, CBD crecimiento epitaxial, spray pirolisis, ablación laser, etc. Se propone hacer un estudio de contactos para mejorar las características de estos y hacerlos más óhmicos, esto mediante la reducción de la resistividad del semiconductor modificando la concentración de portadores en la región de contactos mediante el dopado de estas zonas. Se propone un estudio de flujo del gas en relación con volumen y geometría de la cámara del sistema de vacío, así como un estudio de la influencia del espesor del óxido sobre la carga inducida en la capa activa del dispositivo y finalmente comparar estos resultados involucrando diferentes tipos de semiconductores como capa activa en los dispositivos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hadis Morkoc and Umit Ozgur, Zinc Oxide Fundamental, Materials and Device Technology, WILEY-VCH Verlag, 2009.
- [2] Chennupati Jagadish and Stephen Pearton, Zinc Oxide-Bulk Thin Films and Nanostructures Processing, Properties, and Applications, ELSEVIER, 2006.
- [3] Norbert H. Nickel and Evgenii Terukov, Zinc oxide a material for micro and optoelectronic applications, IOS Press, Springer, 1999.
- [4] Kiyotaka Wasa, Makoto Kitabatake, Hideaki Adachi, THIN FILM MATERIALS TECHNOLOGY Sputtering of Compound Materials, Springer, 2004.
- [5] Gary Hodes, Chemical Solution Deposition of Semiconductor Films, Marcel Dekker, 2002.
- [6] S. J. CASTILLO, T. MENDIVIL-REYNOSO, et. al. Formation of ZnO in or on glasses by using the Sol-Gel and Chemical Bath Deposition Techniques, WSEAS TRANSACTIONS on CIRCUITS and SYSTEMS, 2010, 143-152.
- [7] OWNER'S OPERATION AND MAINTENANCE MANUAL OF THE MAK SPUTTERING SOURCES,US inc.
- [8] Irving P. Herman, Optical Diagnostics for Thin Film Processing, Academic Press, 1996.
- [9] Juan Carlos Gonzales, César A. Chung, DETERMINACIÓN DE LAS CONSTANTES ÓPTICAS DE UNA PELICULA DELGADA DE CdSe, Revista de investigación de Física. Vol 8, 2005.
- [10] MAX BORN M and EMIL WOLF, Principles of optics Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of ligh, SEVENTH EDITION, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2005.
- [11] H.G. Tompkins, W.A. McGahan, Spectroscopic Ellipsometry and Reflectometry, A User's Guide, JohnWiley & Sons Inc., New York, 1999.
- [12] B.D. Cullity, Elements of X-rays diffraction, Addison-Wesley Publishing.
- [13] Física Electrónica. Hemenway, Henry & Caulton. Ed. Limusa, Mexico 1980.
- [14] Microchip Fabrication, A Practical Guide to Semiconductor Processing, Fifth Edition, McGraw-Hill, 2004.

- [15] S. M. Sze & Kwok K. Ng, Physics Of Semiconductor Devices, Third Edition, WILEY-INTERSCIENCE, 2007.
- [16] Neil H. E Weste, Kamran Eshraghian, PRINCIPLES OF CMOS VLSI DESIGN, ADDISON-WESLEY PUBLISHING, 1988.
- [17] (10)DIETER K. SCHRODER, SEMICONDUCTOR MATERIAL AND DEVICE CHARACTERIZATION, 3Rd Ed, IEEE PRESS, WILEY-INTERSCIENCE, 2006.
- [18] Sorin Cristoloveanu, Silicon-on-insulator technology and devices XI, Electrochemical Society,2003.
- [19] Cherie R. Kagan Paul Andry, THIN-FILM TRANSISTORS, Marcel Dekker, 2003,.
- [20] (7)Yannis Tsvividis, Operation and Modeling of The MOS Transistor, Second Edition, OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- [21] UMESH K. MISHRA, JASPRIT SINGH, SEMICONDUCTOR DEVICE PHYSICS AND DESIGN, SPRINGER, 2008.
- [22] Robert F. Pierret, Field Effect Devices, Second Edition, Addison-Wesley Publishing, 1990.
- [23] Paul R. Gray, Paul J. Hurst, Stephen H. Lewis, and Robert G. Meyer, Analysis and Design of Analog Integrated Circuits, 4th ed., Wiley, 2001.
- [24] JOHN E. MAHAN, PHYSICAL VAPOR DEPOSITION OF THIN FILMS, WILEY-INTERSCIENCE, 2000.
- [25] KEVIN F. BRENNAN, APRIL S. BROWN, THEORY OF MODERN ELECTRONIC SEMICONDUCTOR DEVICES, WILEY-INTERSCIENCE, 2002.
- [26] Mark J. Jackson, Microfabrication AND Nanomanufacturing, CRC Press, 2006,387.
- [27] Kwok K. Ng, COMPLETE GUIDE TO SEMICONDUCTOR DEVICES, McGraw-Hill.
- [28] I.Horcas, R. Fernandez, J.M. Gomez-Rodriguez, J. Colchero, J. Gomes-Herrero, and A.M. Baro, Review of Scientific Instruments 78, 013705, 2007.