



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN CIENCIA E
INGENIERÍA DE MATERIALES
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA**

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE
MICROTRANSISTORES TRANSPARENTES DE PELÍCULAS
ULTRADELGADAS DE ZnO TIPO n DEPOSITADAS POR LA
TÉCNICA DE ABLACIÓN LÁSER.

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIA E INGENIERÍA DE
MATERIALES

P R E S E N T A

CITLALLI MONTSERRAT VALDÉS NOGUERÓN

TUTOR PRINCIPAL

DR. WENCEL DE LA CRUZ HERNÁNDEZ
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA

COMITÉ TUTOR

DRA. KARINA GARAY PALMETT
CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA

DRA. MA. DE LA PAZ CRUZ JÁUREGUI
CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA

ENSENADA BAJA CALIFORNIA A 08 DE NOVIEMBRE DE 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres, con todo el amor ...

Hago constar que el trabajo que presento es de mi autoría y que todas las ideas, citas textuales, datos, ilustraciones, gráficas, etc. tomados de cualquier obra o trabajo de terceros, han sido debidamente identificados y citados en el cuerpo del texto y en la bibliografía y acepto que en caso de no respetar lo anterior puedo ser sujeto de sanciones universitarias. Afirmo que el material presentado no se encuentra protegido por derechos de autor y me hago responsable de cualquier reclamo relacionado con la violación de derechos de autor.

Citlalli Montserrat Valdés Noguera

Agradecimientos

Agradezco al Dr. Wencel De la Cruz por su confianza y paciencia mostrada como asesor de este proyecto. Quiero agradecer al Dr. Harvi Castillo, a la M.I. Irene Barberena, al Dr. Javier López y a la Dra. Noemí Abundiz por brindarme el conocimiento suficiente en las técnicas de la UNaFab para poder desarrollar este trabajo.

Agradezco al Laboratorio Nacional de Nanofabricación, al proyecto PAPIIT-IT101021, y al proyecto Conacyt No 194758 por el financiamiento de este trabajo de tesis. También agradezco al CNyN y a la UNAM que me dieron la oportunidad de alcanzar una nueva meta en mi vida.

Agradezco a mis padres, Martha Noguerón y César Valdés por haber sido partícipes y espectadores durante cada paso de este proceso y por no haber soltado mi mano en los tramos donde perdí el equilibrio. A mi hermano Leonardo Valdés por su apoyo a pesar de la distancia y a mi familia en general.

Agradezco a mis amigos que fueron parte fundamental en mi desarrollo académico y personal. Agradezco el apoyo incondicional de Luis Miranda para el desarrollo de este proyecto.

Índice general

Agradecimientos	III
1. Introducción	1
1.1. Materiales semiconductores	1
1.2. Óxidos semiconductores transparentes	4
1.3. Transistores de películas delgadas	6
1.4. Técnicas de fabricación	10
1.5. Tecnología de diseño asistida por computadora (TCAD)	12
1.6. Objetivos	14
1.7. Hipótesis	15
2. Metodología	16
2.1. Depósito de películas delgadas	16
2.1.1. Pulverización catódica	16
2.1.2. Técnica de ablación láser	19
2.2. Caracterización de películas delgadas	21
2.2.1. Elipsometría	21
2.2.2. Espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X	23
2.2.3. Efecto Hall	25
2.3. Fabricación del dispositivo	28
2.3.1. Fotolitografía	28
2.3.2. Proceso de fabricación del dispositivo	30
2.4. Caracterización del transistor	32

2.5. Simulación de transistores de película delgada	34
3. Resultados	37
3.1. Películas delgadas de ITO	37
3.1.1. Mediciones eléctricas	37
3.1.2. Mediciones químicas	39
3.1.3. Mediciones ópticas	41
3.1.4. Tasa de depósito y remoción de ITO	42
3.2. Películas delgadas de SiO ₂	43
3.2.1. Mediciones químicas	43
3.2.2. Tasa de depósito y de remoción de SiO ₂	45
3.3. Películas delgadas de ZnO	47
3.3.1. Mediciones químicas	47
3.3.2. Mediciones eléctricas	51
3.3.3. Mediciones ópticas	52
3.3.4. Tasa de depósito y de remoción de ZnO	53
3.4. Películas delgadas de IZO	54
3.4.1. Mediciones eléctricas	54
3.4.2. Mediciones químicas	56
3.4.3. Mediciones ópticas	58
3.4.4. Tasa de depósito y de remoción de IZO	59
3.5. Dispositivos	61
3.5.1. Fabricación de dispositivos	61
3.5.2. Mediciones eléctricas de los dispositivos	64
3.5.3. Mediciones ópticas de los dispositivos	67
3.6. Simulaciones en COMSOL	68
4. Conclusiones	70

Índice de figuras

1.1. Clasificación de los materiales desde un punto de vista eléctrico.	2
1.2. Estructuras cristalinas del ZnO a) Sal de roca b) blenda de Zinc c)Wurtzita.	5
1.3. Estructura de un transistor de películas delgadas.	6
1.4. Proceso para transferencia de patrones usando fotolitografía.	11
2.1. Dibujo de la técnica de pulverización catódica.	18
2.2. Esquema del proceso de ablación láser.	21
2.3. Esquema del arreglo experimental utilizado para realizar análisis por elipsometría.	22
2.4. Fenómeno sucedido en una medición por efecto Hall.	26
2.5. Esquema del arreglo experimental utilizado para mediciones por técnica Van der Pauw. [48]	27
2.6. Propuesta de diseño del transistor.	30
2.7. Diseño de fotomáscaras utilizadas para la fabricación del transistor.	32
2.8. Curva típica de un transistor FET tipo n.	33
2.9. Arreglo experimental para mediciones eléctricas.	34
2.10. Esquema del dispositivo simulado en COMSOL.	35
3.1. Espectro XPS de baja resolución de ITO.	39
3.2. Espectros XPS de alta resolución de ITO. a)O 1s. b)In 3d. c)Sn 3d.	40
3.3. Transmitancia del ITO.	42
3.4. Razón de crecimiento del ITO.	43
3.5. Ataque químico de películas delgadas de ITO.	43

3.6. Espectro de baja resolución de SiO ₂	44
3.7. Espectro de alta resolución de SiO ₂ . a)O 1s b)Si 2p.	45
3.8. Razón de crecimiento de SiO ₂	46
3.9. Razón de remoción de SiO ₂	46
3.10. Espectros XPS de baja resolución de ZnO.	47
3.11. Espectros XPS de alta resolución de O 1s ZnO a)1 mTorr b)3 mTorr c)5 mTorr d)10 mTorr e)15 mTorr f) 20 mTorr.	48
3.12. Espectros XPS de alta resolución de Zn 2p en ZnO a)1 mTorr. b)3 mTorr. c)5 mTorr. d)10 mTorr. e)15 mTorr. f) 20 mTorr.	49
3.13. Mediciones eléctricas de las películas delgadas de ZnO.	51
3.14. Propiedades ópticas de ZnO. a) Transmitancia. b) Gráfico de Tauc. . .	52
3.15. Razón de crecimiento ZnO	54
3.16. Razón de remoción de ZnO	54
3.17. Espectro de alta resolución de IZO	56
3.18. Espectros de alta resolución de IZO	57
3.19. Transmitancia IZO.	59
3.20. Razón de crecimiento IZO.	60
3.21. Razón de remoción de IZO.	60
3.22. Proceso de fabricación.	61
3.23. Dispositivos fabricados.	63
3.24. Curvas I-V para transistores con (W/L) a) 80/10 b)160/60 c) 160/80. .	66
3.25. Transmitancia del dispositivo.	67
3.26. Simulación de curvas I-V en dispositivo TFT.	69

Capítulo 1

Introducción

El mundo de la tecnología ha evolucionado considerablemente en las últimas décadas, la sociedad ha experimentado un acondicionamiento tecnológico, tal que, la vida contemporánea se ha visto asistida por algún dispositivo o sistema artificial. Las comodidades tecnológicas tienen su origen a partir del acelerado desarrollo e industrialización en disciplinas como la microelectrónica, la cual ha sufrido cambios constantes y avances significativos en los dispositivos asociados a la misma. Durante la década de los 60's la reducción del tamaño de equipos y maquinaria se convirtió en una meta primordial para el desarrollo tecnológico, por lo que la reducción de los espacios ocupados por la electrónica requerida para el funcionamiento de dicha instrumentación se volvió una tarea necesaria.

Uno de los avances mas notorios dentro del proceso de miniaturización de los componentes electrónicos se dio a través de la invención del transistor, el cual basa su funcionamiento en las propiedades de los materiales semiconductores que se utilizan para su construcción, y que, a través de diversas aplicaciones, forma parte del desarrollo de la vida cotidiana actual.

1.1. Materiales semiconductores

Los materiales pueden clasificarse a través de diversos ámbitos. Desde un punto de vista eléctrico, los materiales se clasifican en: aislantes, conductores y semiconducto-

res, tal como se muestra en la figura 1.1. Esta clasificación depende de la estructura electrónica de cada material.

Un material posee una gran cantidad de átomos multielectrónicos en su estructura. Al hacer esta consideración el número de orbitales de valencia es elevado y, por lo tanto, la diferencia de los niveles de energía entre ellos es pequeña, de manera tal, que estos niveles comienzan a formar bandas continuas en vez de estados discretos de energía. Sin embargo, al no tener orbitales de valencia en ciertos rangos de energía, se genera un espaciamento entre las bandas, conocido como “brecha prohibida”. Las bandas generadas se conocen como banda de valencia y banda de conducción que corresponden a los electrones de valencia y a los electrones libres que se han desligado del átomo y pueden favorecer la conducción en el material. [2]

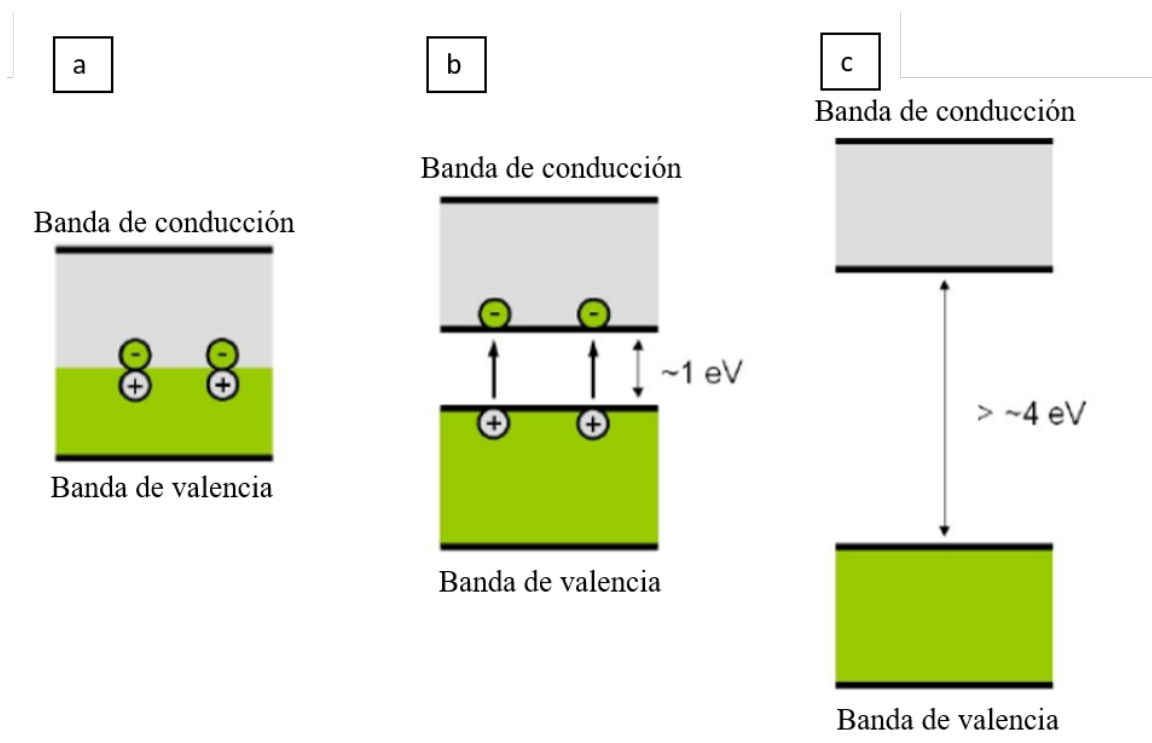


Figura 1.1: Clasificación de los materiales desde un punto de vista eléctrico.

Un material semiconductor posee una brecha prohibida que oscila entre 1 y 4 eV, de tal manera que al administrársele energía o someterlo a un campo eléctrico, los electrones de valencia pueden ganar la energía suficiente para pasar a la banda de

conducción y convertirse en electrones libres. Conforme un electrón es excitado a la banda de conducción, se genera un estado desocupado en la banda de valencia conocido como “hueco”, el cual se asume como una cuasipartícula de carga positiva. Como esta situación se repite sucesivamente, puede considerarse que el hueco posee movilidad. Se considera que un hueco tiene una carga de la misma magnitud que la del electrón, pero de signo opuesto. Así, en presencia de un campo eléctrico, los electrones y los huecos excitados se mueven en direcciones opuestas. Además, en los semiconductores, tanto los electrones como los huecos son dispersados por las imperfecciones de la red. Los electrones y los huecos son conocidos como los portadores de carga de los diversos materiales semiconductores. En función del tipo de portadores de carga mayoritarios en un semiconductor, se identificarán semiconductores tipo p y tipo n, con huecos y electrones como portadores mayoritarios, respectivamente.

A 0 K, los electrones de valencia ocupan todos los estados hasta un nivel de energía máximo (conocido como E_v). Desde el borde superior de la banda de valencia hasta el borde inferior de la banda de conducción (conocido como E_c), hay una brecha de energía libre de estados donde los electrones no pueden ubicarse. La generación de pares electrón-hueco produce un número igual de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia. En la banda de conducción los electrones se comportan como electrones libres.

Del mismo modo, se encuentran los huecos en la banda de valencia. El aumento de la energía para ellos es equivalente a la disminución de la energía de los electrones, y viceversa. La magnitud de la brecha prohibida de energía, es una característica clave de los semiconductores. Se nombrarán intrínsecos cuando se encuentran en estado puro, es decir, que no hayan sido dopados (impurificados) para incrementar o disminuir sus propiedades eléctricas. Los semiconductores extrínsecos son aquellos que han sufrido un dopaje, es decir, su conductividad mejora a través de la adición de impurezas. [2, 3]

1.2. Óxidos semiconductores transparentes

Actualmente, los semiconductores más conocidos son el silicio y el germanio, que se caracterizan por ser materiales semiconductores intrínsecos. Típicamente, poseen una brecha prohibida de 1.17 y 0.74 eV, respectivamente, lo cual los hace atractivos para el desarrollo de tecnologías semiconductoras. Sin embargo, las elevadas temperaturas asociadas a las tecnologías basadas en este tipo de materiales, además de sus correspondientes propiedades ópticas, dificulta su uso en el desarrollo de otro tipo de aplicaciones (como la electrónica flexible en el desarrollo de pantallas, la cual, debido a sus características requiere temperaturas de fabricación menores a 400°C).[3]

En aras de posibilitar las diversas aplicaciones de los materiales semiconductores, se ha trabajado en la búsqueda de semiconductores compuestos que permitan modular las propiedades eléctricas del material, que permitan temperaturas de fabricación menores a 400°C, y que promuevan características ópticas transparentes. Este es el caso de los óxidos semiconductores, los cuales generan gran interés por sus propiedades ópticas y por la posibilidad de usarse en esta rama de la tecnología.

La existencia de algunos compuestos conocidos como óxidos metálicos conductores (TCO, por sus siglas en inglés) ha tomado relevancia en las tecnologías actuales. Se trata de óxidos con propiedades eléctricas conductoras y una baja absorción de la luz. Se han podido modular las propiedades eléctricas de algunos TCO's a través de la adición de impurezas para promover materiales con características semiconductoras. Las características propias de los TCO's permiten una alta movilidad de los portadores de carga y la preservación de las propiedades eléctricas del material a pesar del sometimiento a cierto estrés mecánico, permitiendo el desarrollo de tecnologías flexibles y transparentes. Los óxidos semiconductores transparentes poseen una resistividad del orden de $10^{-3} \Omega \text{ cm}$ y una transmitancia promedio del 80 % en el rango de la luz visible [4].

Históricamente, los semiconductores transparentes se han utilizado como electrodos transparentes, de tal manera que han sido mayormente estudiados los óxidos semiconductores con conductividad de tipo n. Actualmente, uno de los óxidos semiconductores

transparentes más utilizados es el ZnO, que posee una brecha prohibida de 3.3 eV. El enlace Zn-O posee un carácter iónico fuerte que se encuentra en el límite entre el compuesto covalente y el compuesto iónico. Generalmente, el ZnO cristaliza en tres fases distintas: wurtzita, blenda de zinc y sal de roca, mostradas en la figura 1.2.

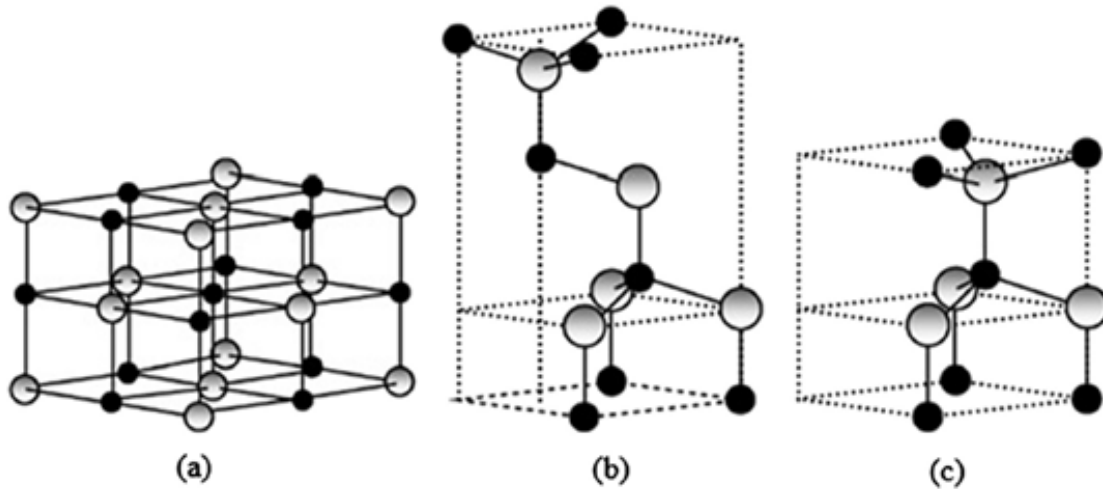


Figura 1.2: Estructuras cristalinas del ZnO a) Sal de roca b) blenda de Zinc c)Wurtzita.

Típicamente, el ZnO es un semiconductor de tipo n debido a su naturaleza inherente de formar películas delgadas deficientes de oxígeno. La movilidad de las películas delgadas de ZnO puede alcanzar valores de hasta $110 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, además conservan su brecha prohibida y sus cualidades transparentes a temperaturas de depósito relativamente altas, lo que las hace atractivas para la electrónica de alto rendimiento en diversas condiciones de temperatura.

El ZnO es uno de los materiales más importantes en el desarrollo de la industria de dispositivos de efecto de campo (presente y futura) debido a sus características físicas y a su facilidad de síntesis. Actualmente, se presume al ZnO en sus diversas formas cristalinas, policristalinas o en dispersiones de nanopartículas, puesto que supondría la posibilidad de fabricar dispositivos eficientes, de bajo costo y amigables con el medio ambiente.

Las características de dichos materiales abren la posibilidad de fabricación de dispo-

sitivos electrónicos (diodos, transistores, capacitores) con características particulares, los cuales serían parte de la vida contemporánea. Esto se traduciría en una innovación tecnológica con gran repercusión en el desarrollo de la humanidad, generando grandes ganancias económicas proyectadas en el 2012 por Barquina y colaboradores a alcanzar los 87,200 millones de dólares anuales alrededor del año 2025 [9].

1.3. Transistores de películas delgadas

En la actualidad, los óxidos semiconductores juegan un papel importante en las aplicaciones de dispositivos semiconductores. El transistor de películas delgadas (mejor conocido como TFT por sus siglas en inglés) es un transistor de efecto campo con estructura y principio de operación similares al transistor MOSFET (transistor de efecto campo metal-óxido-semiconductor), pero a diferencia de estos, la arquitectura de un TFT permite hacer uso de diferentes tipos de sustratos (vidrios, sustratos flexibles como polietilentereftalato, poliamida u otros polímeros) para su fabricación. Esto facilita el desarrollo de la electrónica flexible, pues permiten la implementación de dispositivos con características transparentes y con un alto coeficiente de elasticidad.

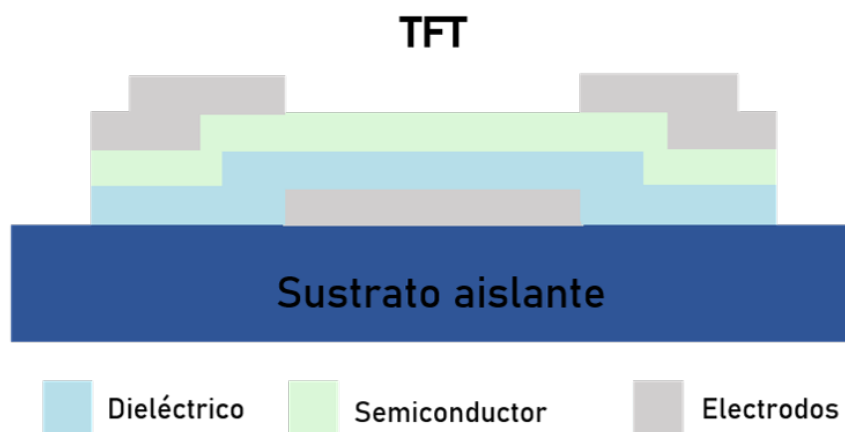


Figura 1.3: Estructura de un transistor de películas delgadas.

La figura 1.3 muestra la arquitectura de un dispositivo TFT, que cuentan éstos con tres terminales que requieren de: un sustrato aislante, una capa semiconductor (separada de la compuerta por una capa de algún material aislante), y los contactos fuente, drenador y compuerta, a través de los cuales se controla el paso de corriente en el dispositivo. Típicamente, las capas del material semiconductor se depositan por métodos físicos, los cuales permiten un mayor control de la síntesis del material[10]. El primer transistor fabricado con estructura metal óxido semiconductor fue fabricado en 1964 por Lasens Y Koelmans, el dispositivo se fabricó a partir de técnicas de fotolitografía con SnO_2 tipo n como capa activa en un sustrato de vidrio. El trabajo pionero de Prints et al. mostró el primer TFT basado en un semiconductor óxido completamente transparente, el cuál se fabricó utilizando la técnica de ablación láser para depositar SnO_2 dopado con antimonio. A partir de este exitoso trabajo se visualizó el incremento de interés en los semiconductores óxidos, principalmente, la atención se centró en los TFT's basados en ZnO puesto que las principales ventajas son la alta movilidad del canal de los electrones, la correspondiente corriente de excitación más alta y velocidades de funcionamiento más rápidas. Otra de las ventajas, es que el ZnO se puede depositar a temperatura ambiente o a temperaturas no mayores a los 400°C . Además, este material es reconocido por ser un material ecológico y económico.[12] La tabla 1.1 resume las propiedades eléctricas de los transistores de películas delgadas (TFT's por sus siglas en inglés) tipo n competitivas en el mercado, donde la movilidad corresponde a la movilidad de efecto campo de los dispositivos y la relación (I_D^n/I_D^{off}) corresponde a la relación de encendido-apagado del dispositivo [13, 14].

Tabla 1.1: Propiedades de diversos dispositivos TFT.

Tipo de transistor	Movilidad (cm^2/Vs)	I_D^n/I_D^{off}
a-Si TFT	1.5	10^8
TFT orgánico	0.02	10^6
ZnO	110	10^{12}

La tabla 1.1 resume las propiedades de TFT's con características diversas, donde las

movilidades de efecto campo varían en un par de ordenes de magnitud, sin embargo, se evidencía la mejora al utilizar ZnO como capa activa del dispositivo. Durante los últimos años, la mejora de los transistores de película delgada basados en ZnO ha despertado gran interés. Diversos grupos han trabajado en la optimización de la capa activa de los TFT's y la producción de películas delgadas utilizando diversas técnicas de depósito, como: ablación por láser pulsado, pulverización catódica, depósito por capa atómica, entre otros. La tabla 1.2 resume algunos de los resultados obtenidos para diversos dispositivos TFT's fabricados bajo diversas técnicas y condiciones.

De manera general, un transistor es un dispositivo de tres terminales, donde la resistencia del canal entre dos electrodos (fuente y drenador) se controla por un tercer electrodo conocido como compuerta. Si el ancho del canal es controlado por el campo eléctrico aplicado en la compuerta del transistor, el dispositivo se conoce como transistor de efecto campo (FET, por sus siglas en inglés). Los dispositivos FET's pueden ser dispositivos de portadores de carga mayoritarios. Este es el caso de los transistores de película delgada, en los que la conductividad ocurre principalmente por los portadores de carga acumulados, a diferencia de los transistores MOSFET, los cuales son dispositivos de portadores de carga minoritarios y la conductividad predominante se debe a la formación de una capa de inversión [2].

Tabla 1.2: Estado del arte TFT's basados en ZnO.

Material	Técnica	Dieléctrico	$\mu(cm^2/Vs)$	I_D^{on}/I_D^{off}	Referencia
ZnO	Spin-coating	RSiO	0.07	10^4	Fleischhaker et. al
ZnO	ALD	Al ₂ O ₃	3.07	10^2	Cherenak et. al
ZnO	Sputtering	SiO ₂	1.3	10^6	Park et. al
ZnO	Hidrotermal	PMMA	7.53	10^4	Lee et. al
ZnO	Spin-coating	SiO ₂	.35	10^6	Song et. al
ZnO	PEALD	Al ₂ O ₃	20	10^7	Zhao et. al
ZnO	PLD	Parileno	3.2	10^7	Nomura et. al

Las técnicas físicas de depósito de películas delgadas, como ablación láser reactiva (PLD), aportan ventajas que pueden considerarse relevantes para efectos de la com-

posición química del material, particularmente para el caso del ZnO. Por ejemplo, con PLD se puede lograr un control en la concentración de las diferentes especies variando las condiciones de depósito, haciendo que la composición química en el ZnO sea favorablemente 1:1, además de un mayor control en el crecimiento. Un TFT podría definirse como un dispositivo de efecto campo de portadores de carga mayoritarios que está compuesto por tres componentes: la capa semiconductora (canal), la capa aislante (dieléctrico) y los electrodos metálicos (fuente, drenador y compuerta). En un transistor de películas delgadas tipo n, la modulación de la conductancia en el canal se logra por la formación de una capa de acumulación de portadores mayoritarios, es decir, electrones que se acumulan en la interfase semiconductor/dieléctrico.

Al aplicar un pequeño voltaje, V_D , en el drenador, el canal actúa como una resistencia. Esto significa que la corriente a través de él (I_D) incrementará linealmente conforme se incremente el voltaje V_D ; esto se conoce como la región lineal. Conforme V_D se incrementa aún más, I_D se desvía de la relación lineal debido a que la acumulación de portadores cerca del drenador decrece. El voltaje V_D al cual la región del canal cercana al drenador está completamente ausente de portadores se le conoce como voltaje de saturación V_{Dsat} .

La fabricación de transistores de películas delgadas involucra el estudio de nuevos materiales compatibles con dicha tecnología, arrastrando consigo la comprensión de fenómenos físicos relacionados a la ingeniería de materiales. Es necesario lograr el depósito de materiales con características eléctricas óptimas para garantizar la fabricación y el proceso eficiente en los dispositivos semiconductores, pues juegan un rol determinante en qué tipo de materiales y dispositivos trascienden las barreras de los laboratorios. La capacidad de producir materiales transparentes abrió la posibilidad de fabricar dispositivos transparentes funcionales, aplicables a diversas áreas de la tecnología.

1.4. Técnicas de fabricación

La búsqueda de implementación de nuevos materiales y nuevas geometrías en los dispositivos electrónicos ha motivado la búsqueda de técnicas que permitan la miniaturización de transistores. A partir de este objetivo surge la implementación de técnicas de nanofabricación en el desarrollo de la microelectrónica, donde se comprenden procesos diseñados para manufacturar elementos o dispositivos con estructuras de dimensiones micro y nanométricas. En el diseño y fabricación de microdispositivos la técnica de litografía es una técnica ampliamente utilizada, la cual, consiste en la transferencia y el grabado de un patrón sobre una superficie. Específicamente, para el caso de la industria de dispositivos semiconductores, se hace uso de la fotolitografía[22, 23].

En este proceso se hace uso de una fotomáscara, la cual es una plantilla sobre un sustrato de cuarzo que contiene el patrón que se quiere transferir hecho principalmente de cromo (para que no deje pasar la luz). La fotomáscara se coloca sobre una capa protectora (conocida como fotoresina) colocada previamente sobre la superficie a la que se transferirá el patrón. se hace incidir la luz sobre la fotomáscara (lo cual ocasionará que la fotoresina sea modificada químicamente) y, de esta manera, se graba el patrón requerido sobre la muestra. El proceso puede observarse esquemáticamente en la figura 1.4. Una vez que se grabó el patrón, se remueve el material para lograr la geometría deseada, y por último se retira la capa protectora usando solventes adecuados. De lo anterior es intuitivo inferir que el proceso de remoción del material es un paso crucial en la fabricación de los microdispositivos [24].

La remoción de los materiales puede realizarse por medio de dos métodos: húmedo y seco. El húmedo consiste en la remoción del material por medio de reacciones químicas, mientras que el seco consiste en la remoción del material a través del uso de plasma.

En las últimas décadas, tanto la industria como la investigación (Guzmán-Caballero, et al., 2018) han optado por hacer uso de procedimientos secos. Esto se debe a la gran

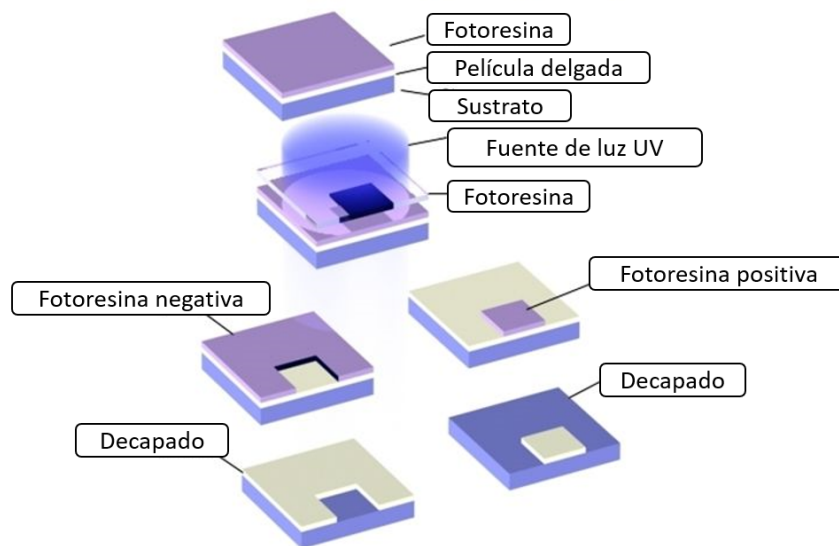


Figura 1.4: Proceso para transferencia de patrones usando fotolitografía.

resolución que puede obtenerse. Sin embargo, representa una técnica con costos más elevados y poca selectividad. Además requiere el uso de vacío e implica el uso de gases que pueden resultar nocivos para la salud, por lo que implementar técnicas de remoción del material por vía húmeda para la microfabricación mejoraría la selectividad de los materiales, incrementaría las razones de remoción del material y disminuiría en gran medida los costos de producción [25].

Debido al tamaño de los dispositivos y a las características de esta técnica, se requiere un ambiente con una cantidad de partículas de polvo controladas durante su fabricación, puesto que la presencia de partículas de polvo afectaría gravemente la geometría del dispositivo y por ende su funcionamiento. Se ha demostrado que su fabricación se ve ampliamente favorecida al realizarse dentro de un ambiente controlado. Para ello se ha hecho uso de cuartos limpios, diseñados para poseer bajos niveles de contaminación[25, 26].

En el 2014 se aprobó la creación del Laboratorio Nacional de Nanofabricación en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM, el cual posee una infraestructura de cuarto limpio, además de equipo y mobiliario para realizar procesos de litografía con resolución a escalas micrométricas. Actualmente, no se ha logrado un control de partículas, empero, ya se cuenta con un ambiente controlado en cuanto a

temperatura y humedad [26].

1.5. Tecnología de diseño asistida por computadora (TCAD)

En aras de mejorar el desarrollo de la electrónica transparente y/o flexible, la simulación de dispositivos con herramientas de diseño asistido por computadora (TCAD por sus siglas en inglés) se ha vuelto importante para el diseño, análisis, caracterización y desarrollo de nuevos dispositivos. Esta herramienta permite la reducción de tiempo y costo de diseño de dispositivos en comparación con el enfoque experimental. Además, permite ver claramente los efectos físicos en los dispositivos semiconductores. Por lo tanto, una comprensión clara del TCAD utilizado para el análisis de semiconductores es esencial para obtener un resultado de simulación preciso y confiable.

Las herramientas TCAD son ampliamente utilizadas en la industria de los dispositivos semiconductores y circuitos integrados. El modelado TCAD requiere, en primer lugar, especificar la estructura del dispositivo y definir las propiedades adecuadas de los materiales utilizados en cada una de las capas que conforman el dispositivo. A continuación, se calculan de manera numérica el potencial, el campo eléctrico, las concentraciones de portadores y las corrientes, sujetos a las condiciones de contorno y a las condiciones iniciales, de acuerdo con las ecuaciones que lo gobiernan. En este caso, las ecuaciones de continuidad de Poisson y las ecuaciones de continuidad electrón/hueco.

Tanto Alsharif y colaboradores (2016), como Chu y colaboradores (2019) proponen la simulación de propiedades mecánicas y eléctricas de dispositivos TFT's para el análisis del comportamiento eléctrico usando diversas geometrías y modos de fabricación que permitan un mayor aprovechamiento de las propiedades de los semiconductores utilizados [28].

En el presente trabajo se abordarán temas desde los materiales utilizados para la generación de dichos transistores, así como la metodología pertinente para la fabri-

cación de un transistor transparente y la optimización de sus propiedades eléctricas por medio de métodos computacionales.

El presente trabajo está orientado a la búsqueda de la optimización de las propiedades eléctricas (en este caso, típicas de un material conductor) de películas delgadas de ITO e IZO depositadas por métodos físicos. Además de encontrar las condiciones idóneas de crecimiento para el depósito de las películas delgadas de ZnO con propiedades eléctricas típicas de un material semiconductor. Finalmente, el trabajo se orienta en la aplicación de dichas propiedades para la fabricación de transistores transparentes de películas delgadas, además se llevará a cabo la simulación de las propiedades eléctricas del dispositivo fabricado a partir de las características y condiciones experimentales logradas.

1.6. Objetivos

Objetivo general.

Fabricar y caracterizar microtransistores transparentes basados en películas delgadas de ZnO depositadas por la técnica de ablación láser reactiva para su potencial aplicación en electrónica flexible.

Llevar a cabo la simulación del dispositivo (en softwares comerciales) con las características de fabricación y las propiedades de los materiales utilizados.

Objetivos específicos

- Encontrar las condiciones de crecimiento de películas delgadas de ZnO por medio de la técnica de ablación láser. Las películas que se obtengan deben tener propiedades eléctricas típicas de un semiconductor.
- Depositar películas delgadas de SiO₂ por la técnica de ablación láser con propiedades eléctricas típicas de un dieléctrico.
- Depositar películas delgadas de óxido de estaño dopado con indio (ITO por sus siglas en inglés) por la técnica de pulverización catódica con propiedades eléctricas típicas de un conductor.
- Depositar películas delgadas de óxido de zinc dopado con indio (IZO por sus siglas en inglés) por la técnica de pulverización catódica con propiedades eléctricas típicas de un conductor.
- Realizar la fabricación de microtransistores basados en películas delgadas de ZnO. Realizar la caracterización de los microtransistores fabricados.
- Realizar la simulación de transistores de películas delgadas basados en películas delgadas de ZnO y SiO₂ y electrodos de ITO e IZO.

1.7. Hipótesis

Es posible llevar a cabo la obtención de materiales con propiedades ópticas y eléctricas favorables para llevar a cabo la fabricación de microtransistores totalmente transparentes de película delgada utilizando ZnO (depositado por la técnica de ablación láser reactiva) como óxido semiconductor y contactos eléctricos transparentes, además del análisis de sus propiedades a través de la simulación de dichos dispositivos.

Capítulo 2

Metodología

El proceso de fabricación de transistores a base de películas delgadas consta de varias técnicas empleadas de forma secuencial. Partiendo de un sustrato (material soporte), seguido por el depósito o crecimiento del material o materiales deseados en forma de película delgada, pasando por una etapa final de formación de relieves a través de procesos ya sean físicos o químicos. En el presente capítulo se describen las metodologías para el crecimiento y caracterización de las películas delgadas utilizadas en el dispositivo, así como, la metodología pertinente para la fabricación y caracterización del dispositivo. También se enuncian los parámetros utilizados para la simulación de los transistores fabricados en el software comercial COMSOL.

2.1. Depósito de películas delgadas

2.1.1. Pulverización catódica

La técnica de pulverización catódica es una de las técnicas más utilizadas en el depósito de películas delgadas debido a su versatilidad y facilidad de implementación para diversos materiales. La técnica consiste en la transferencia de momento entre iones energéticos provenientes de un plasma generado por una descarga eléctrica sobre un gas a baja presión con los átomos de un sólido (en este caso el blanco del material). Para llevar a cabo la generación del plasma se aplica una diferencia de potencial entre

el cátodo (en este caso el blanco del material) y el ánodo (generalmente se trata de las paredes de la cámara de vacío), la diferencia de potencial provoca que los iones generados en el plasma se aceleren hacia el blanco. El ion golpea al blanco y lleva a cabo un proceso de transferencia de energía y por lo tanto de momento a los átomos que componen al sólido, esto produce una serie de colisiones consecutivas que genera la eyección de los átomos, los cuales viajarán por medio de fase gaseosa hacia el sustrato.

La técnica de sputtering puede llevarse a cabo a través de dos tipos de fuente de poder:

- **Fuente de corriente directa (DC)** En la técnica de sputtering DC la fuente de poder utilizada es de corriente directa, esta característica la hace útil preferentemente para materiales (blancos) conductores, su principio de funcionamiento es el que se explica con anterioridad.
- **Fuente de radiofrecuencia (RF)** A diferencia de la técnica de sputtering DC la técnica de sputtering RF utiliza corriente alterna, este tipo de técnica es mayormente utilizada para blancos de materiales dieléctricos y su tasa de depósito suele ser menor comparado con la técnica de sputtering DC.

La técnica de sputtering RF consiste en dos procesos: en el primer ciclo el blanco se carga negativamente, lo que genera la polarización de los átomos. Los átomos del gas son atraídos hacia la fuente, donde eliminan los átomos de la fuente. Los átomos de la fuente y los iones del gas ionizado permanecen en la superficie del blanco debido a la polarización del mismo. En el segundo ciclo, el blanco se carga positivamente. Esto provoca la expulsión de iones de gas y átomos fuente debido a la polarización inversa. Éstos se aceleran hacia el sustrato y, por tanto, se produce la deposición.

Se llevó a cabo el depósito de películas delgadas de ITO (óxido de indio dopado con estaño) por pulverización catódica con fuente de radiofrecuencia (RF), a temperatura ambiente sobre sustratos de vidrio. Se utilizó un blanco de ITO (In_2O_3 -90 %/ SnO_2 -10 %) de 2 pulgadas de diámetro al 99 % de pureza y se utilizó Argón como gas inerte.

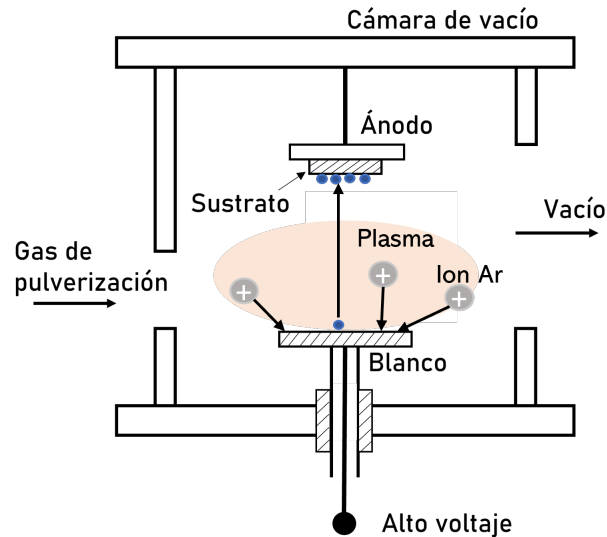


Figura 2.1: Dibujo de la técnica de pulverización catódica.

Las potencia y la distancia entre el blanco-sustrato se variaron para determinar las condiciones idóneas para obtener películas delgadas de ITO con características eléctricas típicas de un óxido conductor. La tabla 2.1 enlista las condiciones de depósito que se mantuvieron constantes para el crecimiento de las películas delgadas de ITO.

Tabla 2.1: Parámetros experimentales para depósitos de películas delgadas de ITO.

	Limpieza del blanco	Depósito
Flujo de Argón	4 sccm	4 sccm
Presión de trabajo	14 mTorr	14 mTorr
Tiempo	10 minutos	Variable

Se depositaron películas delgadas de IZO (óxido de indio dopado con zinc) por pulverización catódica. Se utilizó un blanco de IZO (In_2O_3 -90%/ZnO₂-10%) de 2 pulgadas al 99% de pureza separado del sustrato y se utilizó Argón como gas inerte. Se utilizaron fuentes RF y DC para encontrar las condiciones idóneas de depósito de películas delgadas de IZO con características conductoras. Además se varió la potencia y la distancia blanco-sustrato. La tabla 2.2 señala las condiciones de depósito que se mantuvieron constantes para el depósito de las películas delgadas de IZO, las cuales actuarán como electrodos superiores del dispositivo.

Tabla 2.2: Parámetros experimentales para depósitos de películas delgadas de IZO.

<i>Fuente DC</i>	Limpieza del blanco	Depósito
Flujo de Argón	5 sccm	5 sccm
Presión de trabajo	20 mTorr	15 mTorr
Tiempo	10 minutos	Variable
<i>Fuente RF</i>		
Flujo de Argón	4 sccm	4 sccm
Presión de trabajo	11 mTorr	11 mTorr
Tiempo	20 minutos	Variable

2.1.2. Técnica de ablación láser

La técnica de ablación láser es una técnica de deposición física de vapor (PVD por sus siglas en inglés), se trata de uno de los métodos físicos más eficientes dentro de los procesos de nanofabricación. Este método consiste en la ablación de un blanco (la mayoría sólidos) causado por un calentamiento local intenso producido por pulsos de intensa radiación láser focalizados en áreas muy pequeñas. En esta técnica se hace uso de láseres de alta potencia que provocan la evaporación de pequeñas cantidades de material que se depositan sobre el sustrato, de manera tal, que la energía de los átomos que llegan al sustrato poseen energías de $\approx 1\text{keV}$.

Esta técnica posee características específicas que la hacen útil para el crecimiento de óxidos y/o nitruros u otros materiales con un mayor grado de complejidad.[32] Entre sus principales ventajas se destaca:

- La capacidad de controlar los espesores de las películas depositadas debido a la baja velocidad de depósito de la técnica.
- Al no aplicarse polarización en el blanco no se restringen las características eléctricas y magnéticas de los materiales a utilizar por lo que puede emplearse con una gran variedad de materiales.

- La presión de trabajo puede variar en un amplio rango debido a las altas energías de los láseres utilizados.
- Permite asegurar la conservación de la composición química del blanco con el material depositado.

Al igual que otras técnicas PVD, dentro de esta técnica también puede emplearse un gas reactivo para producir óxidos, nitruros o carburos. A pesar de ser una técnica que representa un alto costo de producción, lo interesante de esta técnica es que el material crece en un ambiente de alto bombardeo iónico lo que provoca que el material pueda crecer con una orientación preferencial o puedan inducirse cambios de fase que dependerán de los parámetros del plasma producido. Entre los inconvenientes a resaltar en esta técnica sobresalen el salpicado (*splashing* en inglés), que consiste en el depósito de gotas del material ablacionado (debido a la alta potencia del láser incidente) con tamaños que pueden llegar al orden de micras, que se depositan sobre la película. Otra de las desventajas es la poca homogeneidad del espesor de las películas en el área de depósito, de manera que se limita el área útil de la película depositada a unos cuantos centímetros cuadrados. Es importante mencionar que para reducir dichos efectos se emplea la rotación del sustrato y la implementación de pulsos ultracortos (nano o femtosegundos). [31, 32]

En el presente trabajo se depositaron películas delgadas de óxido de silicio usando un sistema RIBER LDM-32, a través de la ablación de un blanco de SiO_2 de 2 pulgadas de diámetro al 99.99% de pureza. Se empleó un láser pulsado a 10 Hz de Nd-YAG a 1064 nm, el cual está acondicionado para proporcionar un haz de salida con longitud de onda de 266 nm. La potencia de láser utilizada fue de 86-92 mW, con tiempos de depósito de una hora. La capa de óxido de silicio funge como capa aislante en el dispositivo.

Así mismo, se depositaron películas delgadas de óxido de zinc (ZnO) utilizando el mismo arreglo experimental, pero utilizando un blanco de Zn de dos pulgadas de diámetro y una pureza de 99.95%. Los depósitos se realizaron en atmósfera reactiva de oxígeno a presiones parciales de 3, 5, 10, 15 y 20 mTorr. La potencia del láser varió

de 80 a 100 mW, mientras que el tiempo de depósito rondó de 50 minutos a 1 hora.

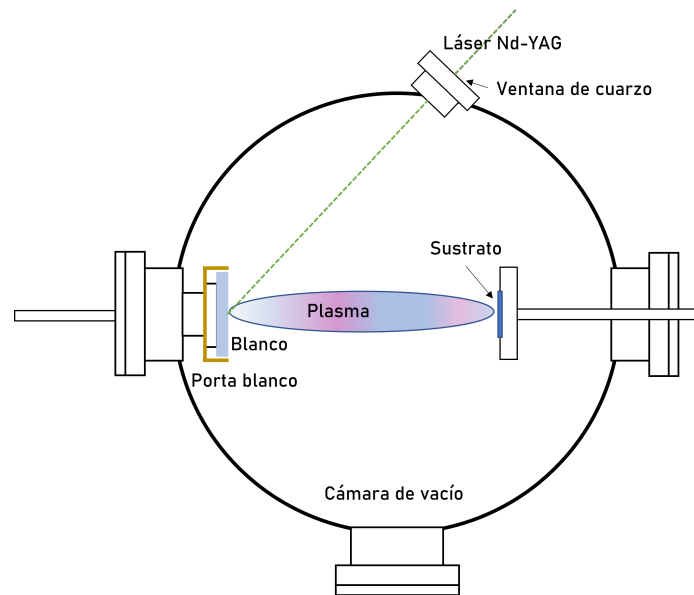


Figura 2.2: Esquema del proceso de ablación láser.

2.2. Caracterización de películas delgadas

2.2.1. Elipsometría

La elipsometría es una técnica de caracterización que permite determinar algunas de las propiedades ópticas de superficies y recubrimientos a partir del cambio en la polarización de la luz al interactuar con el material. Es una técnica utilizada ampliamente para el monitoreo de las propiedades físicas de las películas delgadas, puesto que brinda información de alta sensibilidad en la determinación de los espesores de los materiales. En la figura 2.3 puede observarse un esquema del arreglo experimental necesario para llevar a cabo este análisis. Este arreglo se compone de un brazo de iluminación, el cual engloba una fuente de luz y una serie de componentes ópticos que permiten obtener un haz colimado con una polarización conocida. También posee un brazo analizador, en el cual se disponen los elementos ópticos necesarios para ana-

lizar la polarización de la luz reflejada (o transmitida). Esta polarización se analiza a partir de la señal obtenida por un fotodetector colocado en la parte posterior de los componentes ópticos del brazo de análisis. La luz blanca se polariza al pasar por un polarizador lineal, la luz que incide a la muestra se refleja de manera elípticamente polarizada debido al cambio en amplitud y fase relativa. Finalmente, la luz pasa a través de un polarizador rotante conocido como analizador y un detector capaz de registrar el tipo de variaciones y las intensidades proporcionales a los parámetros de polarización elíptica. Por medio de esta técnica es posible medir las variaciones de la polarización en la reflexión, la transmisión y a partir de esta información determinar las propiedades ópticas de las películas con un alto grado de precisión.

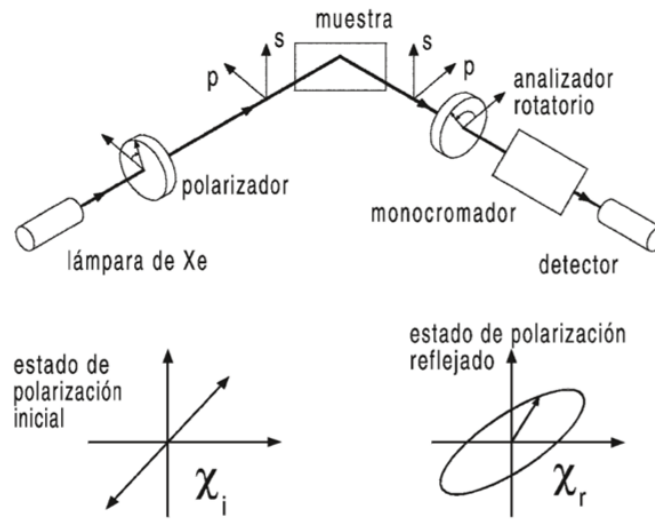


Figura 2.3: Esquema del arreglo experimental utilizado para realizar análisis por elipsometría.

Esta técnica permite medir algunos parámetros elipsométricos, los cuales no brindan información directa de las propiedades del material, sino que se hace uso de modelos teóricos que permiten extraer información a partir de estos parámetros, de manera que puede obtenerse el grosor del material, la rugosidad, el porcentaje de huecos presentes en una capa, los índices de refracción de las capas y sus respectivos coeficientes de extinción.

La elipsometría resulta ser una técnica útil al tratarse de un análisis no destructivo, sin embargo, es una técnica que requiere de un conocimiento amplio acerca del material que se va a caracterizar.[34, 36]

En este trabajo se llevó a cabo el análisis de elipsometría utilizando un equipo Woollam Alpha SE con un ángulo de incidencia de setenta y cinco grados y con longitudes de onda de los 300 a los 900 nm, esto con la finalidad de conocer algunas de sus características físicas: espesor de la película, rugosidad y/o porosidad de la muestra. Además, se obtuvo el coeficiente de absorción (α) de las películas delgadas para determinar la transmitancia de las mismas a partir de la ecuación 2.1.

$$\%T = 10^{(-\alpha)} \times 100 \quad (2.1)$$

2.2.2. Espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X

La espectroscopía de fotoelectrones emitidos por rayos X (conocido por sus siglas en inglés XPS, X-ray Photoelectron Spectroscopy) es una técnica de caracterización que permite el análisis químico de la superficie de un material. Permite obtener información cualitativa y cuantitativa de la composición química del material. El funcionamiento de la técnica está basado en la emisión de los electrones de la muestra a analizar debida a la excitación por rayos X, la energía de los electrones fotoemitidos puede medirse y de esta manera obtener información del elemento del cual provienen y posteriormente el enlace químico característico dependiendo de la resolución del equipo. La popularidad de la técnica se debe a que proporciona un alto grado de información y puede implementarse en una gran variedad de muestras. Permite la identificación de casi todos los elementos presentes (con concentraciones mayores a 0.1 %, a excepción del hidrógeno), determinación cuantitativa de la superficie del material y obtención de información acerca del entorno molecular.

Al incidir un fotón sobre un átomo pueden ocurrir tres eventos: que lo atravesase sin interaccionar con él, que sea dispersado por un electrón de un orbital generando una pérdida de energía o que el fotón transfiera su energía al electrón generando su emisión. Si ningún electrón es emitido por un átomo se debe a que la energía de excitación

(proveniente del fotón) es muy baja. Si ésta se incrementa gradualmente comienza a observarse la fotoemisión de electrones por parte del átomo. Cuando se supera la frecuencia umbral del material, el número de electrones emitidos es proporcional a la intensidad de iluminación [27]. Posterior al evento de fotoemisión se producen ciertos fenómenos para disminuir la energía total del sistema, entre ellos están el acoplamiento entre el momento angular del orbital y el momento del spin. El acoplamiento spin-orbita entre el spin del electrón y el momento angular orbital posibilita el desdoblamiento en energías que genera dos estados finales que difieren en energía, dando pie a la aparición de dobletes en el espectro.

Al realizar un análisis del espectro XPS es necesario conocer las características del mismo, para ello se realiza un amplio barrido del espectro conocido como espectro de alta resolución para obtener información de las especies presentes en la muestra, y posteriormente se hacen barridos en rangos más pequeños (alrededor de 20 eV) conocidos como espectros de baja resolución para estudiar con mayor detalle la composición química de los elementos encontrados. [39]

Se llevó a cabo el análisis XPS de las películas de ITO, SiO₂ y ZnO depositadas para determinar su composición química. Se utilizó una fuente monocromática SPECS Focus 600 de Al, así como un analizador de electrones Phoibos 100. Se empleó un compensador SPECS FG 500A de carga eléctrica para contrarrestar los efectos de carga en la superficie de la muestra. Se tomaron espectros de alta resolución para cada una de las películas, así como, espectros de baja resolución en las zonas de interés. La tabla 2.3 señala los parámetros utilizados para los espectros de alta y baja resolución.

Tabla 2.3: Parámetros utilizados en las mediciones XPS.

Espectro	Barridos	Separación (eV)	Energía de paso (eV)
Alta resolución	10	1	100
Baja resolución	15	0.1	20

Se llevaron a cabo las cuantificaciones relativas porcentuales a partir del cálculo de

las áreas de los picos de interés, tal como se establece en la ecuación 2.2.

$$X_i = \frac{AN_i}{\sum_{i=1}^n N_i} * 100 \% \quad (2.2)$$

Donde X_i hace referencia a la concentración atómica relativa del i -ésimo elemento, AN_i es el área normalizada de la señal en el espectro XPS del i -ésimo elemento y n es el número total de elementos considerados para la cuantificación. El área normalizada se calcula como se indica en la ecuación 2.3.

$$AN_i = \frac{A_i}{(F.S) * (I.M.F.P.) * (K.E.)^{F.T.}} \quad (2.3)$$

Donde A_i es el área obtenida del pico XPS del elemento correspondiente, I.M.F.P. es el promedio del camino libre medio inelástico de los electrones para cada elemento que escapa del sólido, K.E. la energía cinética de los electrones que dan origen a una señal y F.S. la probabilidad de que ocurra el efecto fotoeléctrico.[40, 41]

2.2.3. Efecto Hall

En el campo de la fabricación de dispositivos semiconductores es necesario cuantificar las propiedades eléctricas de los materiales a utilizar, tales como: la conductividad, la resistividad, la concentración y el tipo de los portadores de carga. Para llevar a cabo un análisis de los portadores se hace uso del efecto Hall. Éste es un fenómeno en el que al tener una corriente circulando a lo largo del material e inducir un campo magnético B perpendicular a la corriente, se genera una fuerza de torque sobre los portadores que es perpendicular tanto a la corriente, como al campo magnético (como se muestra en la figura 2.4 para una muestra en bulto). Esto genera una acumulación de portadores en uno de los extremos del material.

La acumulación de los portadores es cuantificable y detectable en forma de señal de voltaje, conocido como voltaje Hall. Para un semiconductor, este voltaje puede expresarse tal como se señala en la ecuacion (4.13).

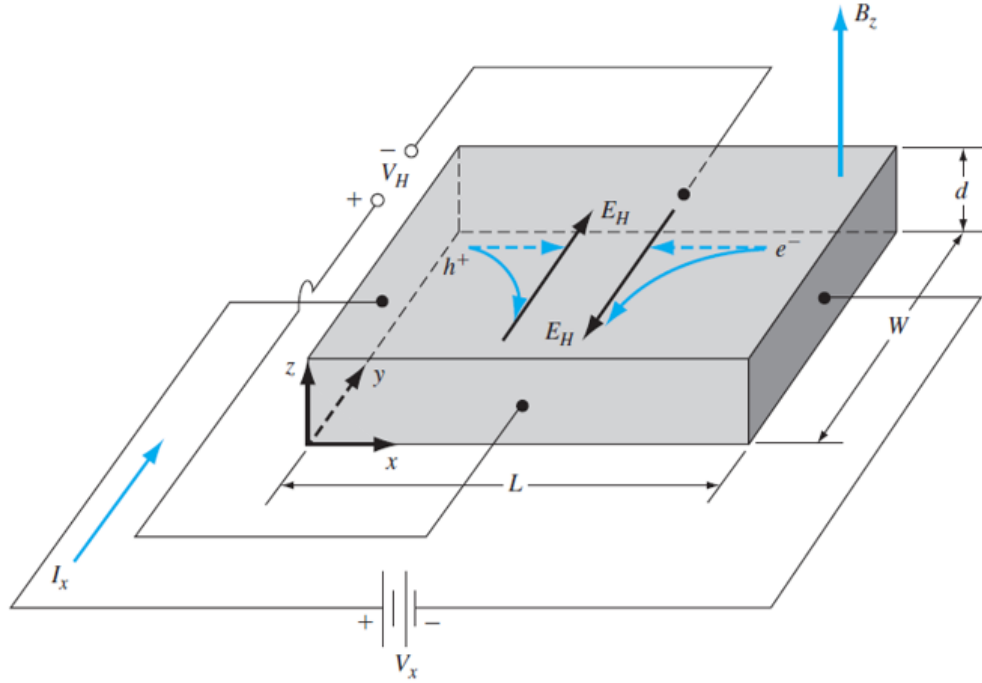


Figura 2.4: Fenómeno sucedido en una medición por efecto Hall.

$$V_H = \left(\frac{I_x B_z}{epd} \right) \quad (2.4)$$

Donde I_x es la corriente suministrada, B_z el campo magnético inducido en el material, e la carga del electrón, p la concentración de portadores presentes en el material (que para el caso de nuestro material de interés, serán electrones) y d el grosor del material. A partir de estas relaciones pueden determinarse algunas de las propiedades eléctricas del material.

Específicamente, para llevar a cabo la caracterización eléctrica de las películas delgadas se empleó el método de Van der Pauw, el cual hace uso del teorema de reciprocidad. En este caso se tienen 4 puntos de contacto en la superficie de la muestra y se aplica un voltaje entre dos de ellos, se mide la corriente existente entre los dos restantes y viceversa para todas las configuraciones posibles, las muestras deben cumplir con las condiciones citadas a continuación

- Los contactos deben estar en la periferia de la muestra.
- Los contactos deben ser lo suficientemente pequeños.

- La muestra debe ser lo suficientemente delgada.
- La muestra es lo más homogénea posible.

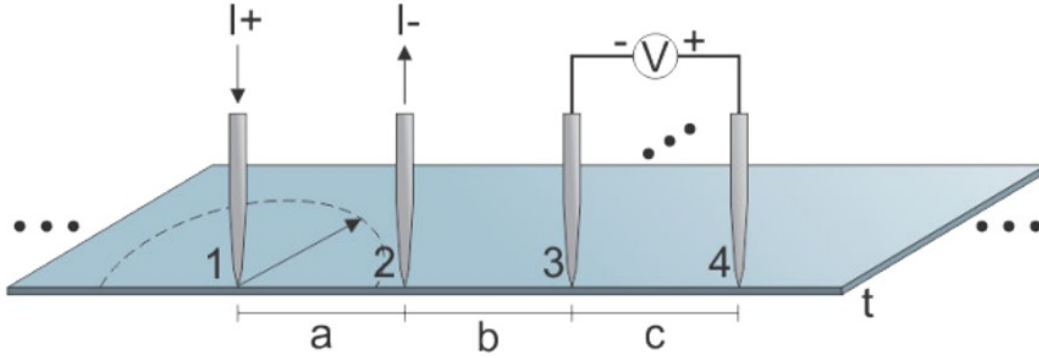


Figura 2.5: Esquema del arreglo experimental utilizado para mediciones por técnica Van der Pauw. [48]

En este caso se considera la película delgada como una superficie semi-infinita de espesor t con las puntas en el borde, tal como se muestra en la figura 2.5. Se determina la diferencia de potencial de los puntos 4 y 3 cuando la corriente ingresa por el punto 1 y sale por el punto 2. A partir de ello, se define una cantidad denominada resistencia característica $R_{12,43}$ cuando la corriente ingresa por el punto 1 y sale por el punto 2 y se mide la diferencia de potencial entre 2 y 3. Se define otra resistencia característica $R_{23,14}$ cuando la corriente ingresa por el punto 2 y sale por el punto 3, y se mide la diferencia de potencial entre 1 y 2.

De tal manera que cuando $R_{12,34} = R_{23,14} = R$, se cumple la ecuación de Van der Pauw

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln(2)} R. \quad (2.5)$$

Donde ρ es la resistividad de la muestra. Van der Pauw recomienda que para lograr mediciones con un menor error, deben usarse muestras simétricas, la forma de trébol es la más recomendada para minimizar los errores producidos por el tamaño de contacto, sin embargo, al ser una geometría complicada de producir, la forma cuadrada con contactos en los vértices es la más aceptada.

En este mismo arreglo, al aplicar un campo magnético de intensidad constante, puede medirse directamente el voltaje Hall, por efecto Hall, de donde se determinan de manera indirecta otros parámetros, como la concentración y el tipo de portadores mayoritarios denotados por el signo (negativos para electrones, positivo para huecos). Se realizaron mediciones de efecto Hall a través del equipo HMS 5000 Hall Effect Measurement System para las diversas películas utilizadas (ZnO e ITO). Esto con la finalidad de determinar las propiedades eléctricas del material, es decir, el tipo de portador, la concentración de portadores, la movilidad de los mismos y la resistividad de la muestra analizada. [42, 43]

2.3. Fabricación del dispositivo

2.3.1. Fotolitografía

Para llevar a cabo la fabricación del dispositivo con dimensiones micrométricas, es necesario hacer uso de técnicas especiales que permitan definir la geometría del transistor. La figura 2.6 muestra la propuesta del transistor a desarrollar. El proceso de fotolitografía permite crear patrones con relieve en el material deseado haciendo uso de fotoresina (la cual es una resina fotosensible y con resistencia a ataques químicos y físicos) y fotomáscaras (sustratos que contienen grabados con la geometría que se desea generar en el material).[23]

Para llevar a cabo el proceso de fotolitografía, la estructura tridimensional del dispositivo se divide en capas delgadas bidimensionales, cada una de las cuales se fabricará en pasos separados de tal manera que el dispositivo terminado consistirá en características fabricadas una capa a la vez y muy bien alineadas para asegurar el correcto funcionamiento del dispositivo. Los principales procesos de esta técnica se mencionan a continuación.

1. Se prepara un patrón de la capa del dispositivo que va a fabricarse, donde se identifiquen las posiciones y el material de cada capa.
2. Miniaturizar el patrón para lograr la escala deseada y reproducir copias del patrón

en un molde de impresión, el cual se conoce como fotomáscara.

3. Depositar el material base para que la capa se fabrique, en este proceso se hace referencia al depósito de las películas delgadas.
4. Transferir el patrón por la técnica de fotolitografía desde la fotomáscara al material base, a través del uso de un polímero fotosensible llamado fotoresistencia y su posterior exposición a luz ultravioleta.
5. Revelar la muestra, donde se establecen las características que se mantendrán en la película delgada.
6. Llevar a cabo el ataque húmedo (a través de ácidos) o seco (a través de plasma) para remover el material no deseado y manteniendo las características deseadas en la película.
7. Eliminar la fotoresina a través de lavados con acetona y limpiar la muestra.

El proceso de depósito, transferencia, grabado, revelado, ataque y eliminación se repite capa a capa, tantas veces como sea necesario para construir la estructura completa del dispositivo. Esta técnica permite la fabricación simultánea de varios dispositivos en un mismo sustrato, lo que permite llevar a cabo procesos de fabricación a bajos costos.

De manera específica, los pasos que comprenden el proceso fotolitográfico son:

- Limpieza de la superficie del sustrato de la muestra
- Aplicación de la fotoresina
- Horneado suave, para establecer las propiedades de la fotoresina
- Alineación de la fotomáscara en la muestra
- Exposición de la fotoresina a luz UV
- Revelado de la fotoresina y ataque químico o físico
- Eliminación de la fotoresina y limpieza de la muestra para los pasos posteriores

Para el desarrollo de este trabajo se hizo uso de la técnica de fotolitografía para definir la geometría de cada una de las capas que componen el dispositivo.

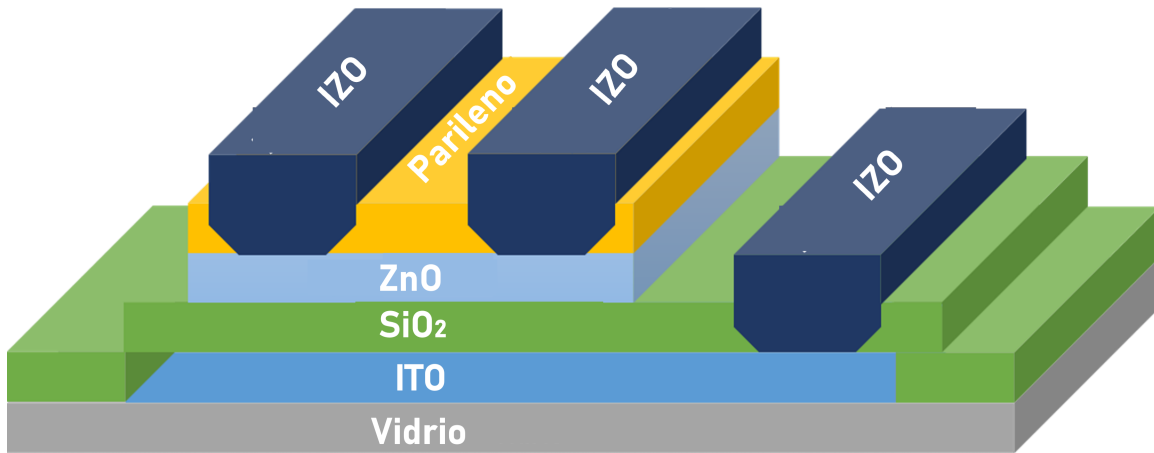


Figura 2.6: Propuesta de diseño del transistor.

2.3.2. Proceso de fabricación del dispositivo

El proceso de fabricación del dispositivo consta de varias etapas. A continuación se enlistan cada uno de los pasos utilizados para lograr la geometría deseada.

1. Limpieza del sustrato

Para llevar a cabo la limpieza de sustratos se hizo uso de la técnica de limpieza práctica de portaobjetos de vidrio en UTD. Primeramente, se sumergieron los vidrios en un vaso de precipitado con Alconox y se sonicaron diez minutos, los sustratos se enjuagaron con agua desionizada y posteriormente se sumergieron en acetona para sonicarse otros 10 minutos. Se retiró la acetona y se sumergieron en alcohol isopropílico para sonicarse 10 minutos. Al terminar el sonicado se les removió cualquier partícula usando isopos, posteriormente se sumergieron en alcohol isopropílico por 30 segundos y cada uno de los vidrios se secó usando nitrógeno.

2. Depósito de película delgada de ITO y transferencia de patrón

Se llevó a cabo el depósito de la película delgada de ITO usando la técnica de pul-

verización catódica con fuente RF. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de fotolitografía usando la primera fotomáscara mostrada en la figura 2.7 a), para definir la geometría de las compuertas del dispositivo.

3. Depósito de las películas delgadas de SiO₂, ZnO y parileno.

Se llevó a cabo el depósito de las películas delgadas de SiO₂ y ZnO por la técnica de ablación láser, con posterioridad a ello se realizó el depósito de la película delgada de parileno tipo C, el cual es un polímero (polipara-xilileno) utilizado como capa aislante o capa de proyección en dispositivos semiconductores y circuitos integrados. El depósito de esta película se llevó a cabo por la técnica de deposición química de vapor. Primeramente, en el vaporizador se sublima el dímero presente, se consigue el craqueo térmico del gas del dímero con un tubo de pirólisis a 650 ° C y como resultado se llevan a cabo la formación de monómeros altamente reactivos. Los monómeros reactivos acceden, por difusión, a la posterior cámara de vacío, en la que el material de recubrimiento está dispuesto sobre un soporte giratorio. Los monómeros reactivos se polimerizan en superficies frías y forman finas capas de poli(para-xilileno) o parileno.

4. Transferencia de patrón en películas de parileno y ZnO. Se hizo uso de la fotomáscara número 2 mostrada en la figura 2.7 b) para llevar a cabo la delimitación del área de trabajo del dispositivo.

5. Abrir vías a la compuerta

Se hizo uso de la máscara 3, mostrada en la figura 2.7 c) para transferir el patrón necesario sobre las películas y abrir vías hacia el contacto inferior, en este caso, la película delgada de ITO.

6. Abrir vías al semiconductor.

Se hizo uso de la máscara 4 para abrir vías hacia el material semiconductor, en este caso el ZnO.

7. Depósito de película delgada de IZO y transferencia de patrón

Se llevó a cabo el depósito de la película delgada de IZO por medio de la técnica de pulverización catódica por fuente de radiofrecuencia. Una vez obtenido el depósito se hizo la transferencia del patrón de la máscara para definir la geometría de los contactos superiores.

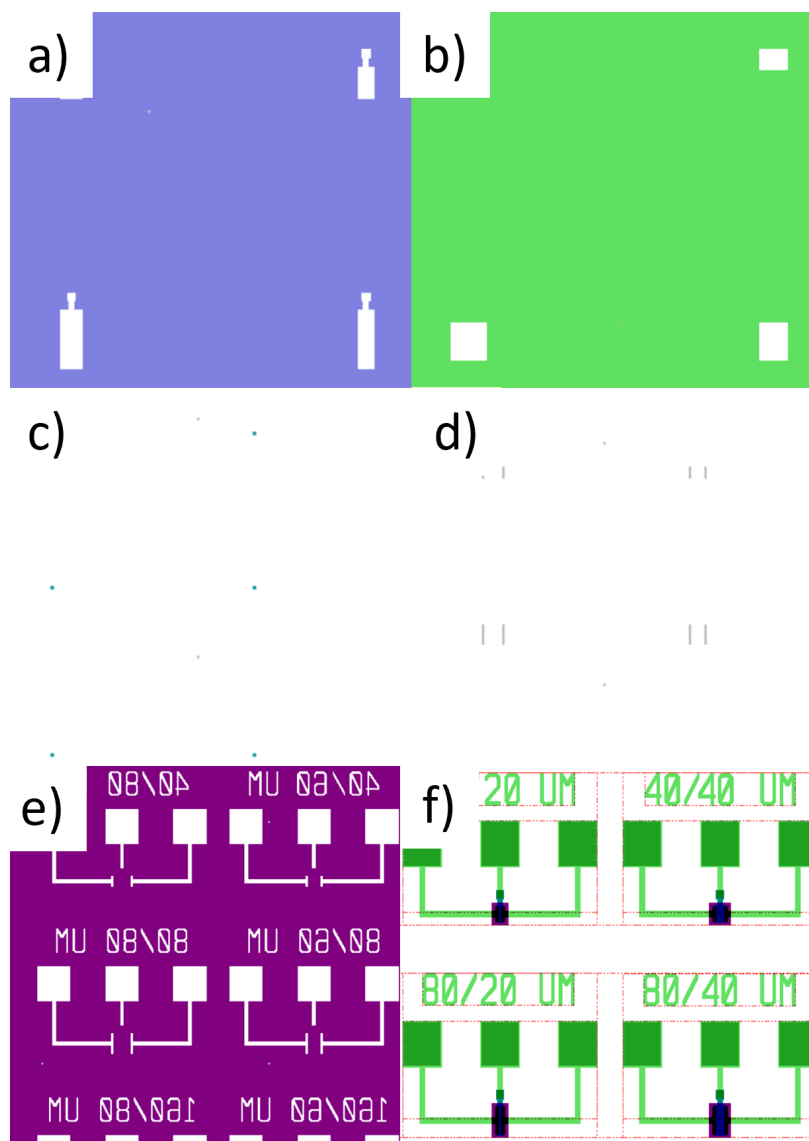


Figura 2.7: Diseño de fotomáscaras utilizadas para la fabricación del transistor.

2.4. Caracterización del transistor

Los dispositivos TFT's son dispositivos de tres terminales que poseen un principio de funcionamiento similar a los transistores metal-óxido-semiconductor. En ambos casos el funcionamiento se logra a través de los siguientes componentes: una capa dieléctrica colocada entre la capa del semiconductor y el electrodo compuerta con los electros

fuente y drenador en contacto con el semiconductor. La modulación de la corriente entre los electrodos fuente y drenador se logra mediante la inyección capacitiva de portadores de carga cerca de la interfaz dieléctrica/semiconductora (lo que se conoce como efecto de campo).

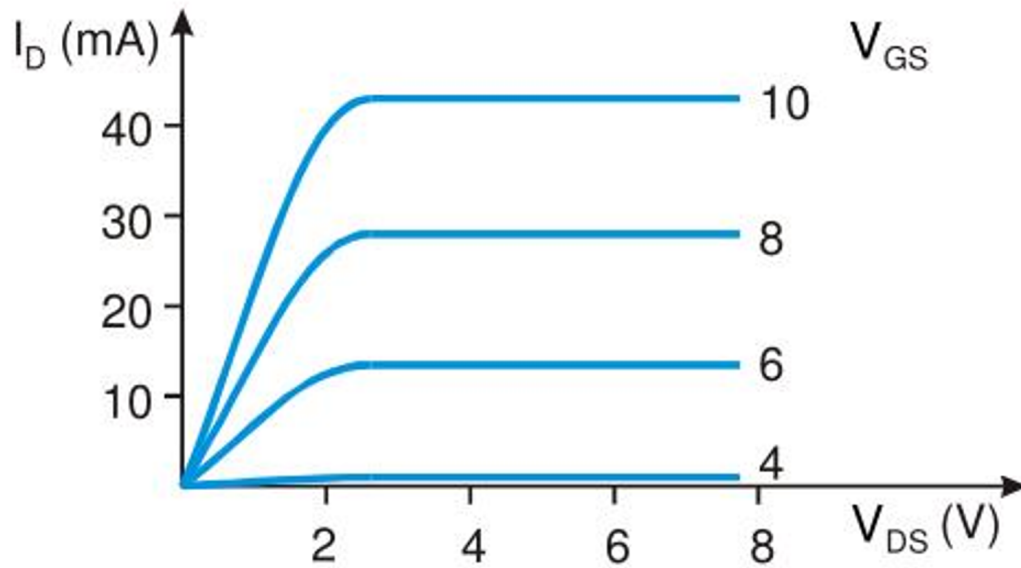


Figura 2.8: Curva típica de un transistor FET tipo n.

Incluso aunque ambos tipos de transistores MOSFET's y TFT's se basan en el fenómeno de efecto campo para modular la conductancia en la capa activa en los TFT's esto se logra por una capa de acumulación y no por una capa de inversión como sucede en los transistores MOSFET. La figura 2.8 muestra la curva I-V típica para un TFT, como se observa en la figura existen dos zonas principales de funcionamiento del dispositivo. Para valores pequeños de voltajes entre la fuente y el drenador, el dispositivo opera en la región lineal y la corriente en el drenador I_D es aproximada por la ecuación 2.6.

$$i_D = \mu_N C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad (2.6)$$

Donde W es el ancho del canal, μ es la movilidad del canal, C_{ox} es la capacitancia específica de la capa dieléctrica por unidad de área y L es la longitud del canal. Cuando $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T$ el dispositivo pasa a operar en la zona de saturación y la

corriente en el drenador se aproxima por la ecuación 2.7.

$$i_D = \frac{1}{2} \mu_N C_{OX} \left(\frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.7)$$

La caracterización de los dispositivos se realiza a través de la medición de curvas I-V. Es necesario medir la corriente en el electrodo drenador al incrementar la diferencia de potencial entre el drenador y la fuente a diferentes voltajes entre compuerta y fuente. Para ello se hará uso del arreglo experimental mostrado en la figura 2.9, el cual consta de una estación de prueba con microscopio (probe station), el equipo de medición de semiconductores Keithley 4200-SCS y una fuente de voltaje externa para suministrar el voltaje entre compuerta y fuente.

Se realizó un barrido de voltaje en el drenador de los 0 a los 20 V y se tomaron mediciones I-V suministrando de 0 a 7V en el electrodo compuerta.



Figura 2.9: Arreglo experimental para mediciones eléctricas.

2.5. Simulación de transistores de película delgada

Las simulaciones de dispositivos TFT son una idea interesante para el desarrollo de los mismos, ya que proporcionarían una visión única, tanto en el diseño como en

el funcionamiento de éstos. Recientemente, COMSOL Multiphysics lanzó el módulo semiconductor que permite un análisis amplio de la operación de dispositivos semiconductores, al nivel de la física fundamental. El módulo se basa en las ecuaciones de deriva-difusión, utilizando modelos de transporte isotérmicos o no isotérmicos con la opción de elegir el método de elementos finitos (FEM) o el método de volumen finito (FVM) para modelar [28]. La construcción de un prototipo TFT con COMSOL permitirá un análisis más detallado de las características eléctricas del dispositivo.

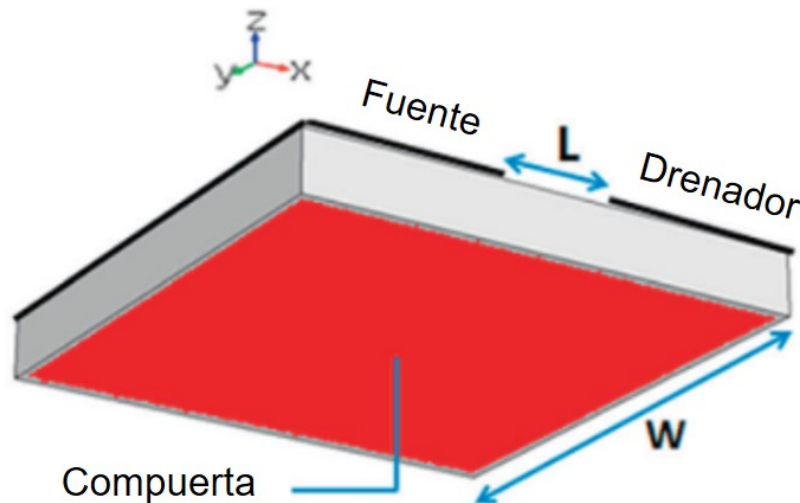


Figura 2.10: Esquema del dispositivo simulado en COMSOL.

En este trabajo, se simuló un modelo de TFT basado en películas delgadas de ZnO utilizando COMSOL Multiphysics, la arquitectura del mismo se muestra en la figura 4.8. Esta simulación se realizó a partir del modelo Fermi-Dirac suponiendo un caso ideal, sin trampas existentes en el semiconductor o en la interfaz semiconductor / dieléctrico. Además, al tratarse de un transistor de películas delgadas se tomó en cuenta la solución de la corriente dependiente únicamente de portadores mayoritarios (en este caso, electrones).

Se realizó la simulación para los dispositivos de película delgada de ZnO, con la geometría mostrada en la figura de la propuesta. Se contruyeron con una razón de

ancho/largo (80/10) μm , (160/60) μm y (160/80) μm y se realizó un barrido de voltaje en el electrodo drenador de los 0 a los 20 V a diferentes voltajes en la compuerta (0 a 6 V). En la tabla 4.4 se muestran los parámetros utilizados, los cuáles se obtuvieron a partir de las bibliotecas del software, así como, de la literatura y las mediciones obtenidas por efecto Hall.

Tabla 2.4: Propiedades utilizadas en la simulación del dispositivo.

Parámetro	
Semiconductor	ZnO
Pemitividad relativa	8.5
Brecha de banda prohibida	3.614 eV
Afinidad electrónica	4.5 V
Nv	$3.5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$
Nc	$3.7 \times 10^{18} / \text{cm}^3$
Movilidad de electrones	$18 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Movilidad de huecos	$1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
Dieléctrico	SiO₂
Pemitividad relativa	7.5
Grosor	20 nm
Electrodo inferior	ITO
Función trabajo	5.53 v

Capítulo 3

Resultados

Los resultados obtenidos a través de las mediciones y métodos de caracterización que se realizan para cada etapa del proceso se muestran en el presente capítulo. Estos son de suma importancia para observar el adecuado funcionamiento de los materiales y las películas delgadas, así como, su acoplamiento para garantizar el buen funcionamiento del dispositivo y para el desarrollo y estudio de comparación con las simulaciones.

3.1. Películas delgadas de ITO

3.1.1. Mediciones eléctricas

Se depositaron películas delgadas de ITO por la técnica de pulverización catódica con fuente de radiofrecuencia. Se variaron las condiciones de depósito para determinar las condiciones idóneas de depósito para obtener películas delgadas de ITO con propiedades eléctricas típicas de un conductor. De acuerdo con Minami Tadatsugu, et al. (2000), un óxido conductor necesariamente posee resistividades menores a $1 \times 10^{-3} \Omega$. El ITO comercial posee una resistividad típica de $\approx 2 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$.

La tabla 3.1 enlista la resistividad y la movilidad obtenidas por la técnica de Van der Pauw para las películas delgadas de ITO depositadas en sustratos de vidrio de 1 cm x 1cm de ≈ 100 nm bajo las diferentes condiciones.

Tabla 3.1: Mediciones eléctricas de películas delgadas de ITO.

Potencia (W)	Distancia al blanco (cm)	$\rho(\Omega cm)$	Movilidad (cm^2/Vs)
70	28	2.09×10^{-2}	4.614
80	28	1.28×10^{-3}	3.78×10^2
90	28	6.16×10^{-3}	1.341×10^3
50	4	8.23×10^{-4}	8.21×10^2
70	4	4.5×10^{-4}	1.50×10^3

A partir de las mediciones eléctricas obtenidas se observó un incremento en la movilidad y en la resistividad de las películas al incrementar la potencia en la fuente, además, dichos valores se vieron mejorados al disminuir la distancia entre el blanco y el sustrato. Se determinó que la potencia a utilizar para obtener películas delgadas de ITO con características idóneas para ser usadas como electrodos sería de 70 W con 0 W de potencia reflejada, una distancia entre el blanco y el sustrato de 4 cm, flujo de argón de 4 s.c.c.m y una presión de trabajo de 14 mTorr. La tabla 3.2 muestra las propiedades eléctricas obtenidas para las películas delgadas depositadas bajo las condiciones mencionadas.

Tabla 3.2: Mediciones eléctricas de películas delgadas de ITO.

Película	Movilidad (cm^2/Vs)	Resistividad (Ωcm)	Concentración (cm^{-3})
ITO	1.5×10^3	4.5×10^{-4}	-4.7×10^{20}

Se ha demostrado que las resistividades típicas obtenidas para este material en procesos físicos de depósito se mantienen en el orden de $1 \times 10^{-4} \Omega cm$, valor consistente con los resultados obtenidos para las películas delgadas de ITO depositadas en el laboratorio. Sreenivas, et al. (1990) afirman que además de las ventajas ópticas y flexibles de usar este material como electrodo, también es un óxido conductor transparente con una elevada concentración de portadores que permite extender la vida de los dispositivos en los que se implementa. Así pues, se verificó que las películas delgadas de ITO depositadas bajo estas condiciones poseen conductividades tipo n y las características necesarias para ser utilizadas como electrodo en el dispositivo.

3.1.2. Mediciones químicas

A partir de los resultados obtenidos en las mediciones eléctricas, se depositaron películas de ITO bajo las condiciones establecidas y se tomó el espectro XPS de alta resolución para identificar los elementos presentes en la muestra. Al tratarse de un óxido de indio dopado con estaño, se identificaron los picos correspondientes a las señales del indio, oxígeno, estaño y carbono, esta última atribuida a la contaminación de la muestra por el carbono presente en el ambiente.

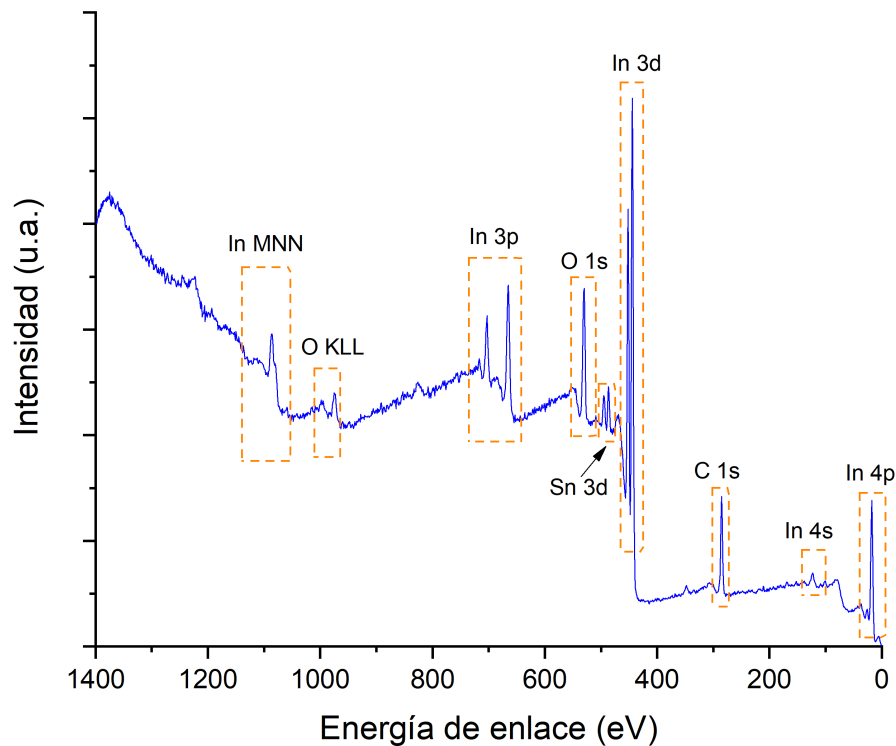


Figura 3.1: Espectro XPS de baja resolución de ITO.

Se tomaron los espectros de baja resolución para analizar con mayor detalle las señales de los elementos presentes en la muestra de ITO, las cuales se presentan en la figura 3.1. Se tomaron espectros para los picos correspondientes al oxígeno 1s, indio 3d y estaño 3d.

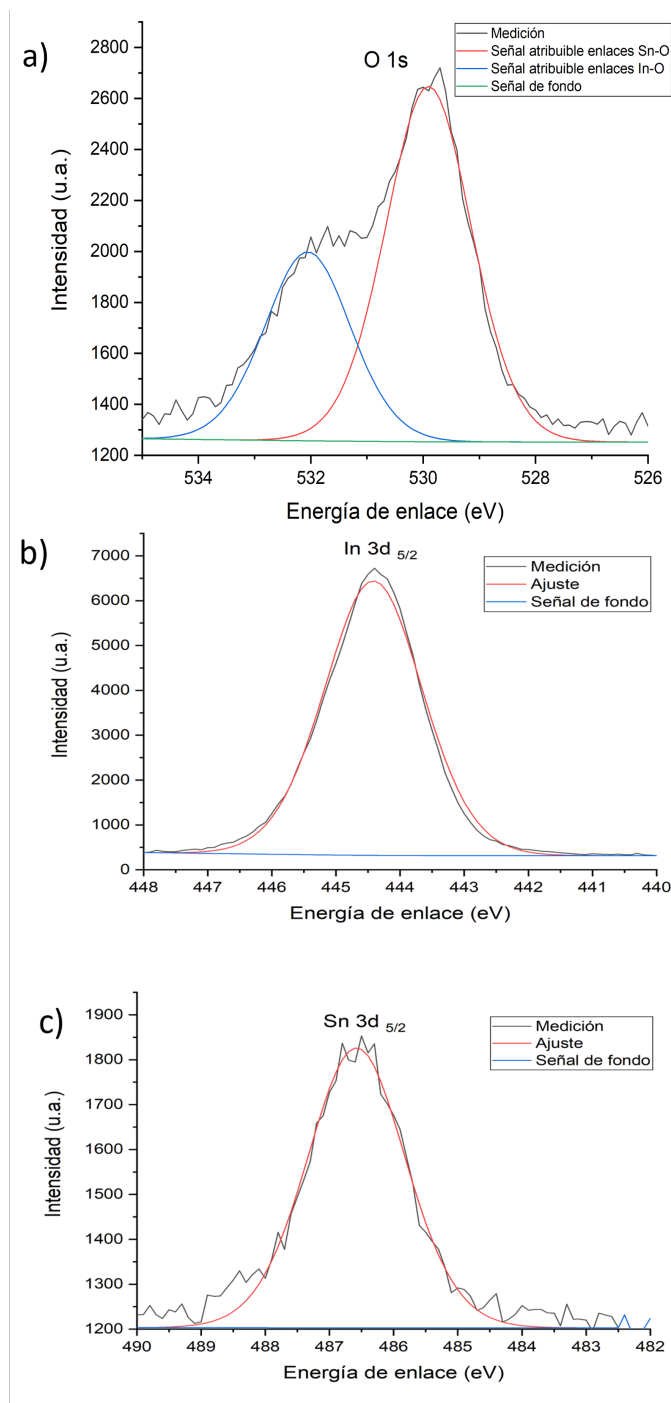


Figura 3.2: Espectros XPS de alta resolución de ITO. a) O 1s. b) In 3d. c) Sn 3d.

Los espectros muestran la medición para las especies con los respectivos ajustes, utilizando una corrección de fondo de tipo Tougaard [40]. El ajuste por gaussianas para el caso del oxígeno muestra la presencia de 2 especies atribuibles tanto a los enlaces

metálicos, es decir, señal proveniente de la formación de SnO, la segunda gaussiana se atribuye a las regiones deficientes de oxígeno causadas por la inserción de In ⁺³ y por tanto atribuible a la formación de In₂O₃. La tabla 3.3 señala los resultados de la cuantificación para la muestra de ITO.

Tabla 3.3: Cuantificación química de películas delgadas de ITO.

Especie	Posición pico (eV)	K.E.(eV)	F.S.	I.M.F.P. (nm)	(%)
O 1s	529.8	956.8	2.93	2.327	58.3
In 3d _{5/2}	444.1	1042.5	13.32	2.482	37.78
Sn 3d _{5/2}	486.2	1000.4	14.80	2.414	3.92

La cuantificación de las películas delgadas de ITO sugiere una mayor concentración de óxido de indio en comparación con el óxido de estaño tal como lo sugiere la composición del blanco utilizado. Dichos valores son consistentes con los reportados por Li, Y et al. (2007) para ser utilizados como electrodos transparentes [41].

3.1.3. Mediciones ópticas

A partir de las mediciones de absorbancia obtenidas por la técnica de elipsometría, medida de los 300 a 800 nm, se determinó el porcentaje de transmitancia de una película delgada de ITO de 100 nm depositada bajo las condiciones mencionadas en función de la longitud de onda. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 3.3.

A partir del porcentaje de transmitancia obtenida en función de la longitud de onda se determinó un porcentaje de transmitancia (en el rango del espectro visible) de $\approx 80\%$, valor coincidente con el reportado por Amalathas et, al (2016) en películas depositadas bajo condiciones similares y del que se presume ser efectivo para su implementación en el desarrollo de la electrónica flexible.

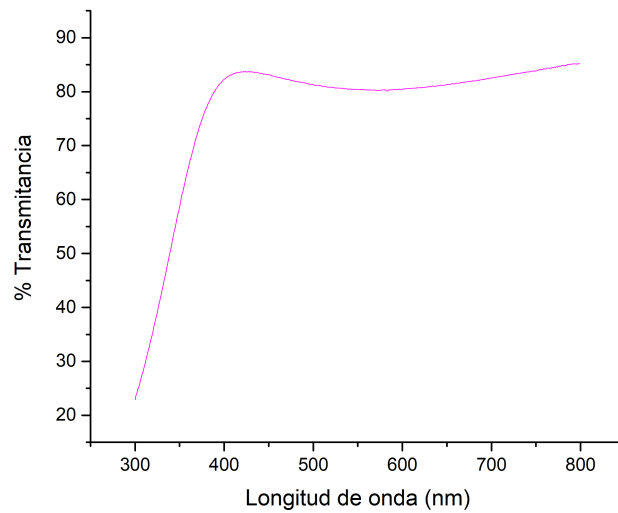


Figura 3.3: Transmitancia del ITO.

3.1.4. Tasa de depósito y remoción de ITO

Se llevó a cabo el depósito de películas delgadas de ITO con las condiciones señaladas y variando los tiempos de depósito de .5, 1, 2 y 5 minutos, para determinar la tasa de crecimiento del material y tener un mayor control del depósito del material para implementarse en la fabricación del dispositivo.

Se determinó una tasa de crecimiento de 118.56 ± 2.59 nm/min. A través de las mediciones se evidencia la dependencia lineal entre el espesor de la película y el tiempo de depósito, lo que permite un mayor grado de control y reproducibilidad en las características de los dispositivos semiconductores. El ITO es un óxido de indio dopado con estaño, por lo tanto, tal como lo señala Cobianu et al. (2001) para la remoción de SnO_2 , en la remoción del ITO puede implementarse el uso de polvo de zinc para obtener un ataque químico más eficiente y uniforme. Se utilizó una solución de ácido clorhídrico al 1% a la que se le añadió polvo de zinc, evidenciando una reacción química visible y eficiente que permite un mejor control y una posible disminución a las afecciones al dispositivo en el proceso de ataque químico. Se logró establecer una tasa de remoción del material de $13.48 \pm .91$ nm/s, tal como se muestra en la figura 3.5 [43].

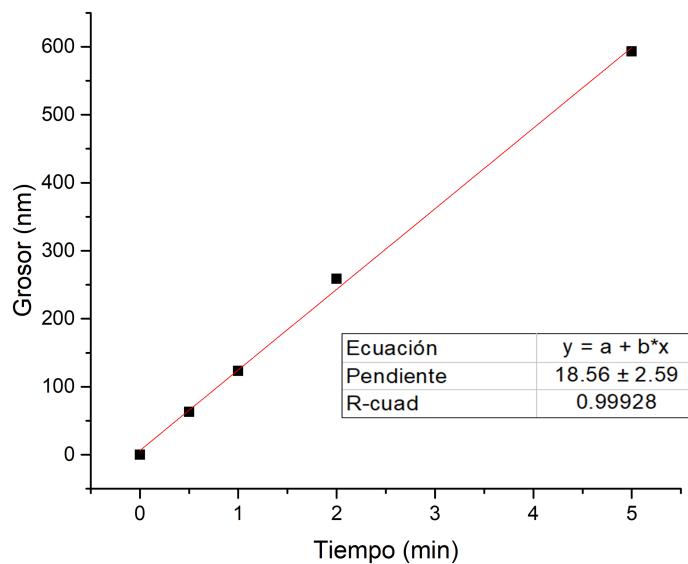


Figura 3.4: Razón de crecimiento del ITO.

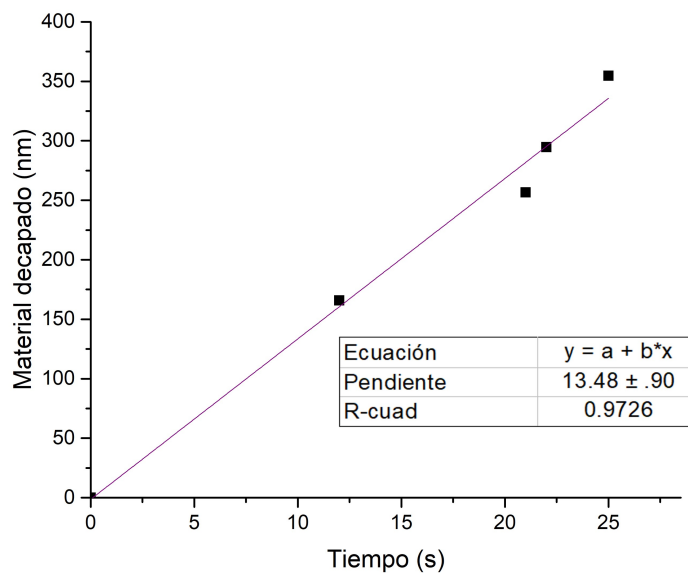


Figura 3.5: Ataque químico de películas delgadas de ITO.

3.2. Películas delgadas de SiO_2

3.2.1. Mediciones químicas

Se realizaron mediciones XPS a las películas de SiO_2 depositadas por el método de ablación láser. Como primer paso, se procedió a identificar las señales XPS de

las especies presentes en un espectro de baja resolución. Se identificaron los picos correspondientes a la señal de silicio, oxígeno y carbono, se identificó el doblete correspondiente a la señal proveniente del silicio 2p en el rango de los 100 a 165 eV, mientras que el pico correspondiente al oxígeno 1s se ubicó en el rango de los 530 a 540 eV. Se procedió a realizar el correspondiente análisis de alta resolución para los picos de silicio y oxígeno para determinar la composición cuantitativa de la película.

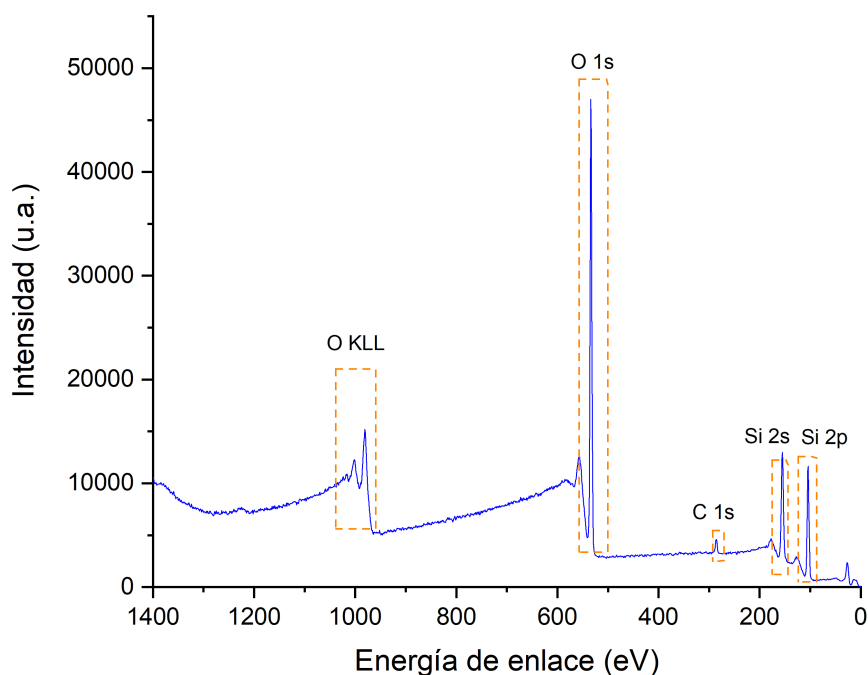


Figura 3.6: Espectro de baja resolución de SiO₂.

La señal de oxígeno se ajustó utilizando el modelo de Tougaard para la señal de fondo. Se logró el ajuste a partir de una gaussiana atribuida a la señal de oxígeno O₂. Así mismo se ajustó la señal de Si 2p_{3/2} a través de una gaussiana, relacionada con la presencia de cationes Si⁺². Estos resultados sugieren la formación del compuesto SiO₂. La tabla 3.4 muestra los resultados de la cuantificación realizada a partir de los espectros obtenidos.

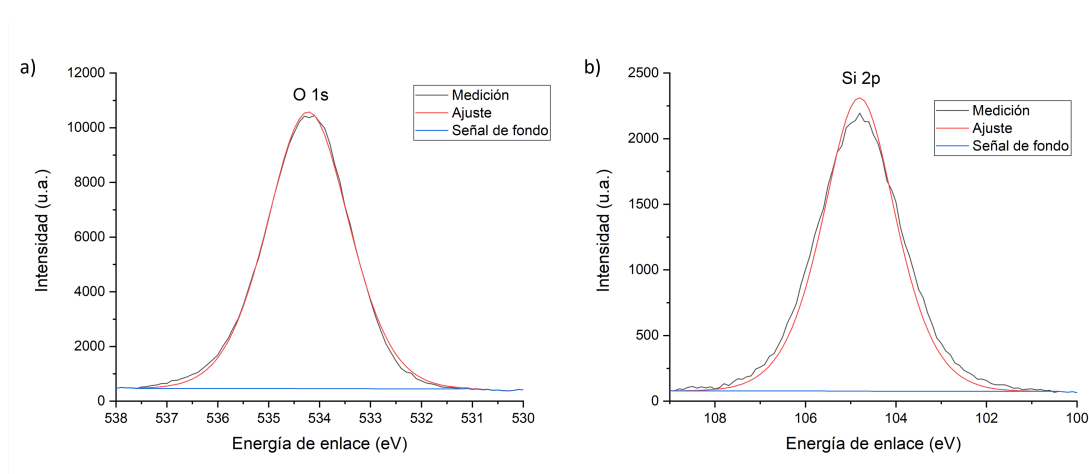


Figura 3.7: Espectro de alta resolución de SiO_2 . a) O 1s b) Si 2p.

Tabla 3.4: Cuantificación química películas delgadas de SiO_2 .

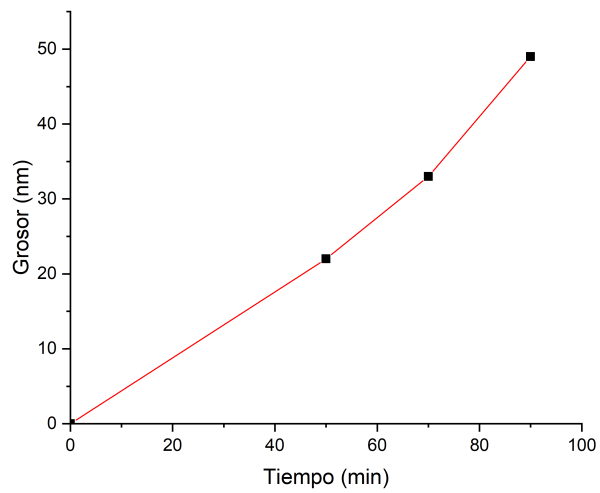
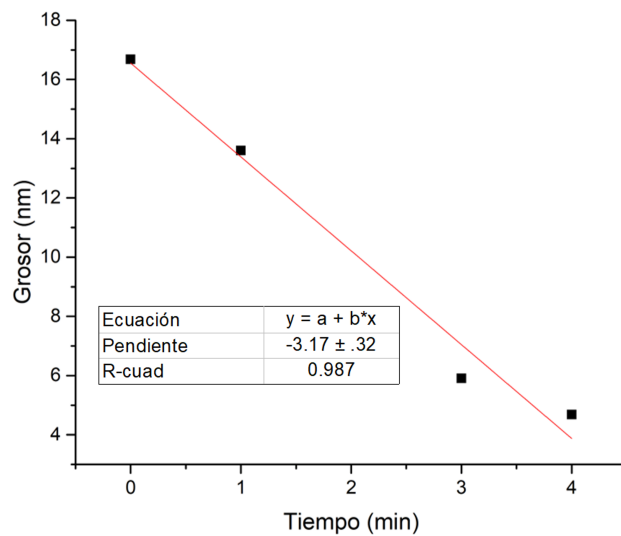
Especie	Posición pico (eV)	K.E. (eV)	F.S.	I.M.F.P. (nm)	%
Si 2p	103.3	1383.3	0.817	3.083	38.89
O 1s	532.72	953.88	2.93	2.654	61.10

3.2.2. Tasa de depósito y de remoción de SiO_2

Se llevó a cabo el depósito de películas delgadas de SiO_2 por el método de ablación láser con una potencia de láser de 80 a 100 mW variando el tiempo de depósito de 50 a 90 minutos. La figura 3.8 muestra los datos referentes a los diversos depósitos realizados.

Debido a las características de la técnica utilizada no se evidenció un comportamiento lineal del crecimiento del material respecto al tiempo de depósito, esto debido a la alta potencia del láser que pega en el blanco y provoca fenómenos como el mencionado splashing. Sin embargo los datos obtenidos pueden dar cuenta del tiempo de depósito necesario para lograr el grosor deseado en las películas delgadas.

Se llevó a cabo la remoción de películas delgadas de SiO_2 usando métodos físicos. De acuerdo con lo reportado por Mogab et. al. (1978) un método eficiente para la remoción de SiO_2 es el uso de la técnica de ataque seco o mejor conocido como ataque con plasma. Su eficiencia aumenta al llevar a cabo el proceso haciendo uso de combinaciones de gases de oxígeno y tetrafloruro de carbono.

Figura 3.8: Razón de crecimiento de SiO_2 .Figura 3.9: Razón de remoción de SiO_2 .

Se hizo uso de esta técnica para determinar la metodología eficiente para la remoción de SiO_2 . [?] La figura 3.9 muestra una tasa de remoción de 3.16 nm/min lograda con la metodología citada .

3.3. Películas delgadas de ZnO

3.3.1. Mediciones químicas

Se tomaron espectros XPS para las películas de ZnO depositadas con presiones parciales de Oxígeno de 1, 3, 5, 10, 15 y 20 mTorr. La figura 3.10 muestra los espectros de baja resolución de las diversas películas donde se identificaron los picos presentes en la señal.

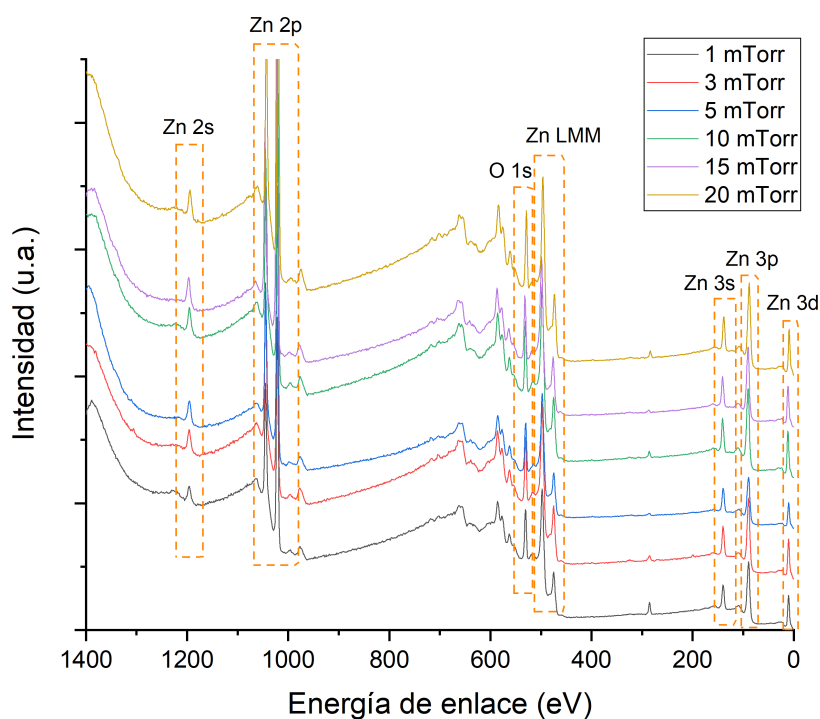


Figura 3.10: Espectros XPS de baja resolución de ZnO.

De acuerdo con lo reportado por Moulder et. al (1979) se identificaron todos los picos presentes en las muestras de ZnO, por lo que se infiere una alta calidad química del ZnO y se concluye la nula presencia de elementos contaminantes. Cabe destacar que el análisis XPS de las películas de ZnO se llevó a cabo de manera in-situ, por lo que la presencia de carbono en la superficie (debida a la interacción de la muestra con la atmósfera) es apenas perceptible en los espectros de baja resolución.

Con la finalidad de conocer la composición química de las películas delgadas de ZnO en la superficie y los enlaces presentes, se llevaron a cabo las mediciones de alta resolución para los picos correspondientes al oxígeno 1 s y al zinc 2 p. Dichos espectros se ajustaron a través de gaussianas y utilizando el modelo de Tougaard para la señal de fondo.

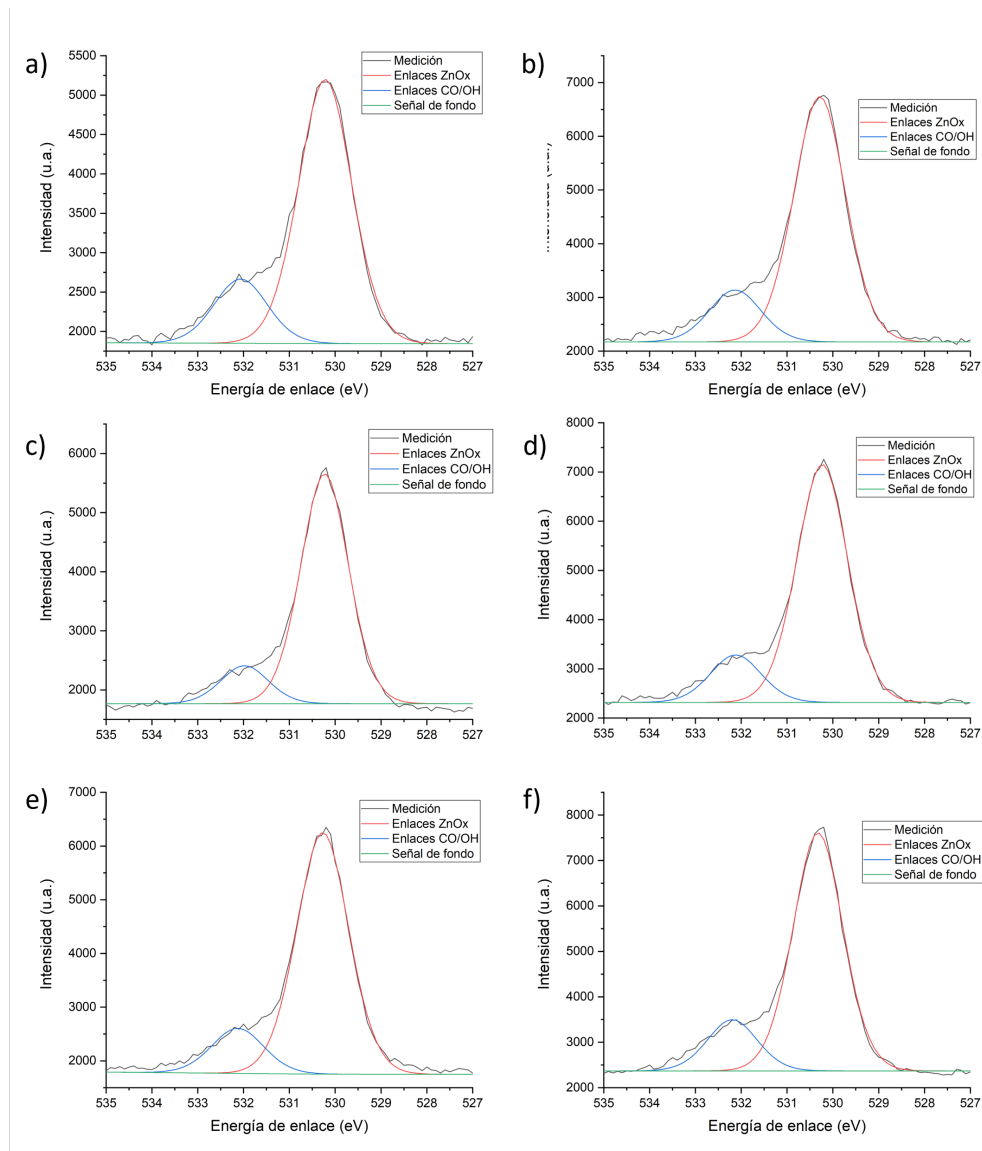


Figura 3.11: Espectros XPS de alta resolución de O 1s ZnO a)1 mTorr b)3 mTorr c)5 mTorr d)10 mTorr e)15 mTorr f) 20 mTorr.

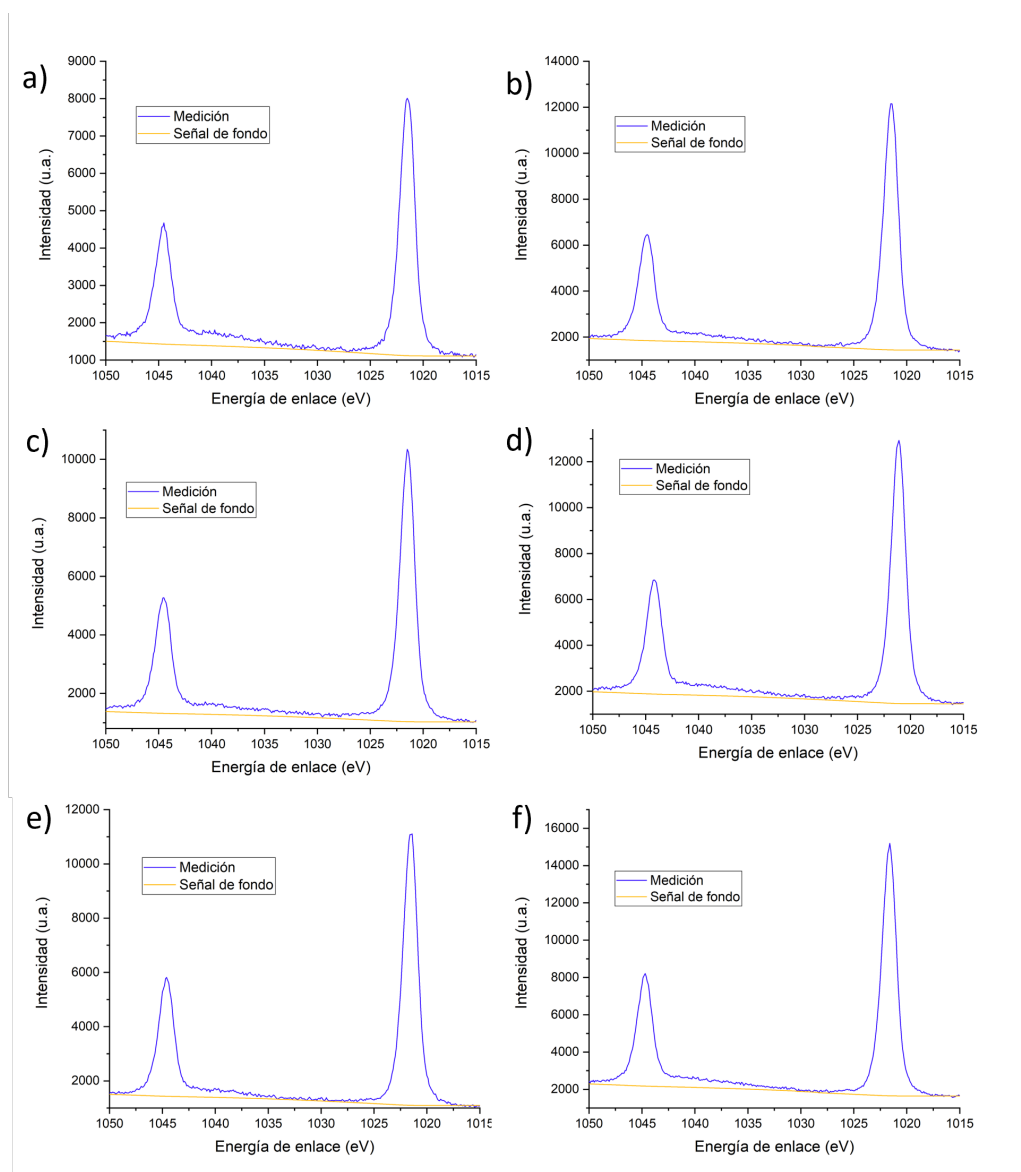


Figura 3.12: Espectros XPS de alta resolución de Zn 2p en ZnO a)1 mTorr. b)3 mTorr. c)5 mTorr. d)10 mTorr. e)15 mTorr. f) 20 mTorr.

La figura 3.11 muestra los espectros de alta resolución correspondientes al oxígeno 1s para las diversas muestras depositadas. Se observa que el pico correspondiente al oxígeno 1s se ubica en los 530.20 eV para todas las muestras. La señal del oxígeno se deconvolucionó en 2 gaussianas una de ellas correspondiente al oxígeno enlazado con el zinc (señal color rojo), asociado a la especie O^{-2} , mientras que la segunda señal (color azul) se atribuye a los posibles enlaces del oxígeno con especies contaminantes

en la muestra (carbono).

La figura 3.12 muestra los espectros de alta resolución para las diversas muestras analizadas. En ellas se muestra la señal correspondiente al zinc 2p. El pico correspondiente se descompone en un doblete relacionado con el Zn 2p_{1/2} y Zn 2p_{3/2} ubicados a ≈ 1021 y ≈ 1045 eV, respectivamente. Para el análisis de la señal de ZnO se utilizó una señal de fondo tipo Tougaard y se ajustó por medio de una sola gaussiana, correspondiente a la especie Zn⁺². La presencia de las especies Zn⁺² y O⁻² dan como resultado la formación de ZnO en la muestra.

Tabla 3.5: Cuantificación química de películas delgadas de ZnO.

Presión Parcial O	Porcentaje Zn (%)	Porcentaje O (%)
1mTorr	78.75	21.24
3mTorr	67.92	32.07
5mTorr	58.19	41.80
10mTorr	56.26	43.73
15mTorr	47.38	52.61
20mTorr	40.90	59.09

A través de los espectros de alta resolución se realizó la cuantificación pertinente para determinar la concentración de oxígeno y zinc en la superficie de las diversas películas depositadas y, de esta manera, determinar la composición química (mostrada en la tabla 3.5). Cabe destacar que, para la cuantificación únicamente se tomaron en cuenta las señales atribuidas al Zn 2p_{3/2} y al O 1s (enlaces ZnOx).

Los resultados obtenidos muestran la tendencia del incremento porcentual del oxígeno en la muestra al incrementar la presión de trabajo. Esta tendencia también ha sido reportada al depositar diversos materiales (erosión de blancos metálicos) en ambientes reactivos. Se evidencia que a una presión de 15 mTorr se obtienen películas delgadas con una composición más cercana a ZnO (en este caso, el material de interés). El control de la composición química de las películas depositadas permitiría tener un mejor control en la modulación de las propiedades físicas de las mismas.

3.3.2. Mediciones eléctricas

Se tomaron las mediciones eléctricas para las películas depositadas a 5, 10, 15 y 20 mTorr, siguiendo la misma metodología empleada para las películas de ITO. La figura 3.13 muestra la resistividad y la movilidad obtenidas para las diversas concentraciones de oxígeno en la muestra.

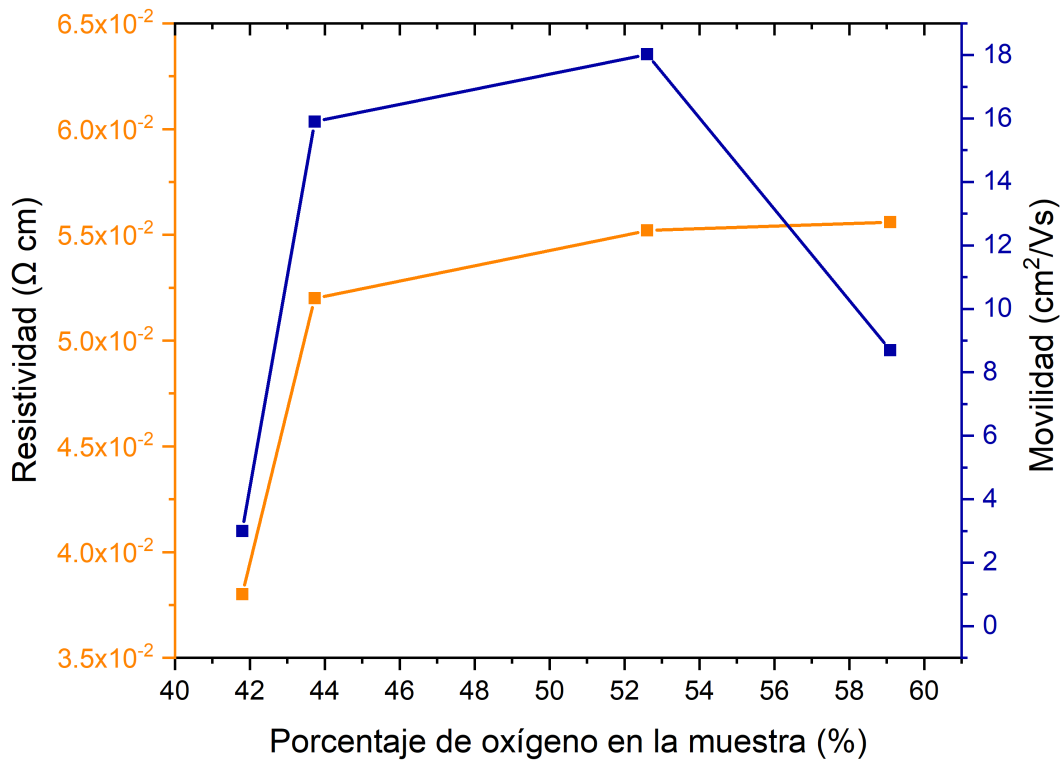


Figura 3.13: Mediciones eléctricas de las películas delgadas de ZnO.

Las películas obtenidas presentan una concentración de portadores de carga del orden de 10^{18} cm^{-3} con conductividades tipo n. A través de la figura 3.13 se observa que tanto la resistividad y la movilidad incrementan conforme se aumenta la concentración de oxígeno en la muestra, es decir se obtienen muestras menos conductoras. A partir de la muestra con $\approx 50\%$ de oxígeno no hay un aumento notorio en la resistividad, mientras que la movilidad decrece a partir de dicho valor. De manera particular, la muestra depositada a 15 mTorr fue de especial interés para emplearse como capa

activa del transistor debido a su composición química, su alta movilidad y baja resistividad. La tabla 3.6 señala las propiedades particulares para dicha muestra.

Tabla 3.6: Mediciones eléctricas de películas delgadas de ZnO.

Película	Movilidad ($cm^2(Vs)^{-1}$)	Resistividad (Ωcm)	Concentración (cm^{-3})
ZnO	18.31	5.49×10^{-2}	-7.3×10^{18}

3.3.3. Mediciones ópticas

A través del coeficiente de absorción, siguiendo la misma metodología que para las películas de ITO, se determinó el porcentaje de transmitancia en función de la longitud de onda de los 300 a los 800 nm. Se determinó una transmitancia promedio en el rango de la luz visible de ≈ 86.36 %.

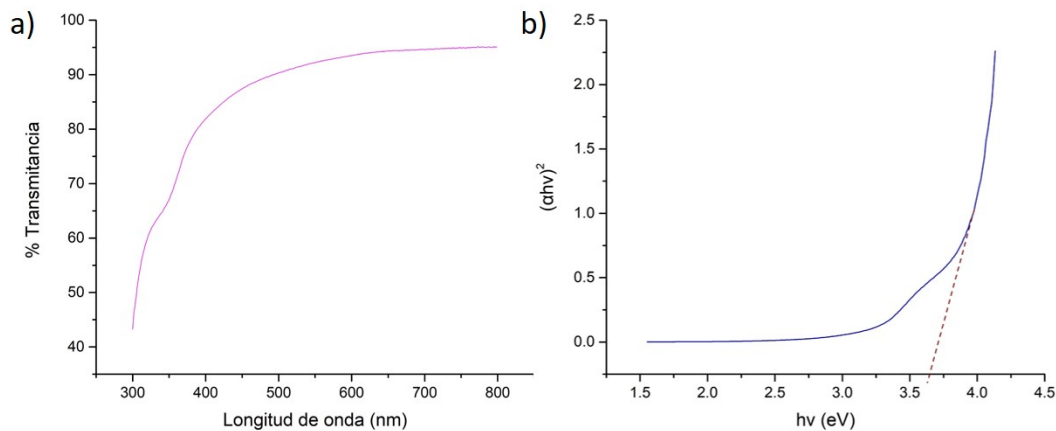


Figura 3.14: Propiedades ópticas de ZnO. a) Transmitancia. b) Gráfico de Tauc.

De la misma forma se determinó la brecha prohibida de la película de ZnO a través del coeficiente de absorción (α) que permite obtener la brecha prohibida E_g por medio de la extrapolación lineal de la pendiente que resulta de graficar $(\alpha hv)^2$ vs la energía de la longitud de onda incidente hv . El cruce de la extrapolación con el eje de las abcisas

da como resultado el valor E_g de la película y se conoce de manera popular como el gráfico de Tauc. La imagen 3.14 b) muestra el gráfico de Tauc para las películas delgadas de ZnO.

Por medio de las gráficas obtenidas, se determinó una brecha prohibida de 3.61 eV. El resultado difiere ligeramente de los valores típicamente reportados para el Óxido de Zinc, el cual posee una brecha prohibida que oscila entre los 3.3 y 3.4 eV en condiciones idóneas de depósito, con sustratos con orientación cristalina preferencial y con posteriores tratamientos térmicos [18, 21, 22].

3.3.4. Tasa de depósito y de remoción de ZnO

Se depositaron películas delgadas de ZnO sobre muestras de vidrio a tiempos de 40, 50, 60, 80 y 100 min, bajo las condiciones mencionadas en la metodología, para establecer una razón de crecimiento del material. El grosor obtenido para las diversas películas se muestra en la figura 3.15.

Es evidente la dependencia lineal del crecimiento de la película con respecto al tiempo. Se observa una razón de crecimiento de 0.4 ± 0.03 nm/min, esta razón de crecimiento permite tener un crecimiento controlado de la película y, por lo tanto, un buen grado de reproducibilidad; características óptimas para la fabricación de dispositivos semiconductores.

Para la remoción de ZnO se probó el uso de diversas soluciones ácidas de HCl, resultando la más óptima la solución con una concentración 1:1000 de HCl:H₂O. La figura 3.16 muestra los resultados obtenidos para la remoción del material, lográndose una razón de 0.15 ± 0.006 nm/s. La baja razón obtenida permitió un mayor control en el proceso de remoción de las películas, lo que permitió evitar el sobredecapado del material debido a errores en la manipulación de las muestras en la fabricación del dispositivo.

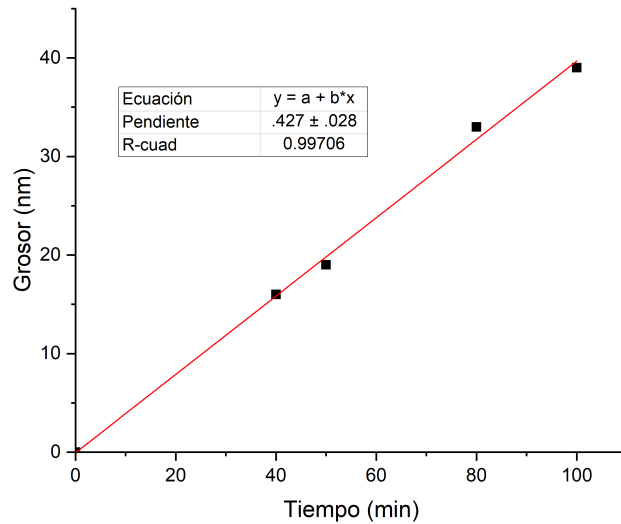


Figura 3.15: Razón de crecimiento ZnO

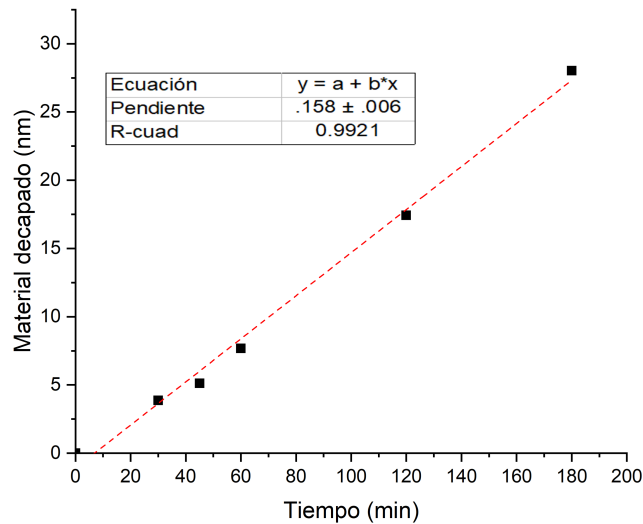


Figura 3.16: Razón de remoción de ZnO

3.4. Películas delgadas de IZO

3.4.1. Mediciones eléctricas

Se depositaron películas delgadas de IZO por la técnica de pulverización catódica con fuente DC y RF. Se variaron las condiciones de depósito para determinar las condi-

ciones idóneas de depósito para obtener películas delgadas de IZO con propiedades eléctricas típicas de un conductor. Se buscó la obtención de películas delgadas con resistividades en el orden de $1 \times 10^{-3} \Omega$ para ser utilizadas como electrodo superior en el dispositivo.

La tabla 3.7 enlista la resistividad y la movilidad obtenidas por la técnica de Van der Pauw para las películas delgadas de IZO depositadas en sustratos de vidrio de 1 cmx 1cm de ≈ 100 nm bajo diferentes condiciones.

Tabla 3.7: Mediciones eléctricas de películas delgadas de ITO.

Fuente	Potencia (W)	$\rho(\Omega cm)$	Movilidad (cm^2/Vs)
DC	50	6.18×10^{-2}	3.51
DC	40	6.32×10^{-2}	4.65
DC	30	7.04×10^{-2}	8.54
RF	40	9.7×10^{-2}	5.89
RF	30	1.19×10^{-3}	7.90

A partir de los resultados obtenidos por la técnica de Van der Pauw se determinó usar fuente RF con una potencia de 30 W con potencia reflejada de 0 W para el depósito de películas delgadas de IZO con propiedades eléctricas de una película conductora, ya que el interés de este material en el presente trabajo es el de ser utilizado como electrodo. La tabla 3.8 enlista las propiedades eléctricas obtenidas para las películas depositadas bajo las condiciones mencionadas.

Tabla 3.8: Mediciones eléctricas de películas delgadas de IZO.

Película	Movilidad (cm^2/Vs)	Resistividad (Ωcm)	Concentración (cm^{-3})
IZO	7.905	1.19×10^{-3}	-6.58×10^{20}

Los resultados señalan una conductividad de tipo n con resistividad baja y una alta concentración de portadores, es decir, con características particulares de un óxido conductor, lo que la hace óptima para ser utilizada como contacto superior en el dispositivo.

3.4.2. Mediciones químicas

Se realizaron las mediciones de XPS, de baja resolución para determinar las señales XPS de los elementos presentes en la muestra de IZO depositadas bajo las condiciones mencionadas, las cuales se muestran en la figura 3.17.

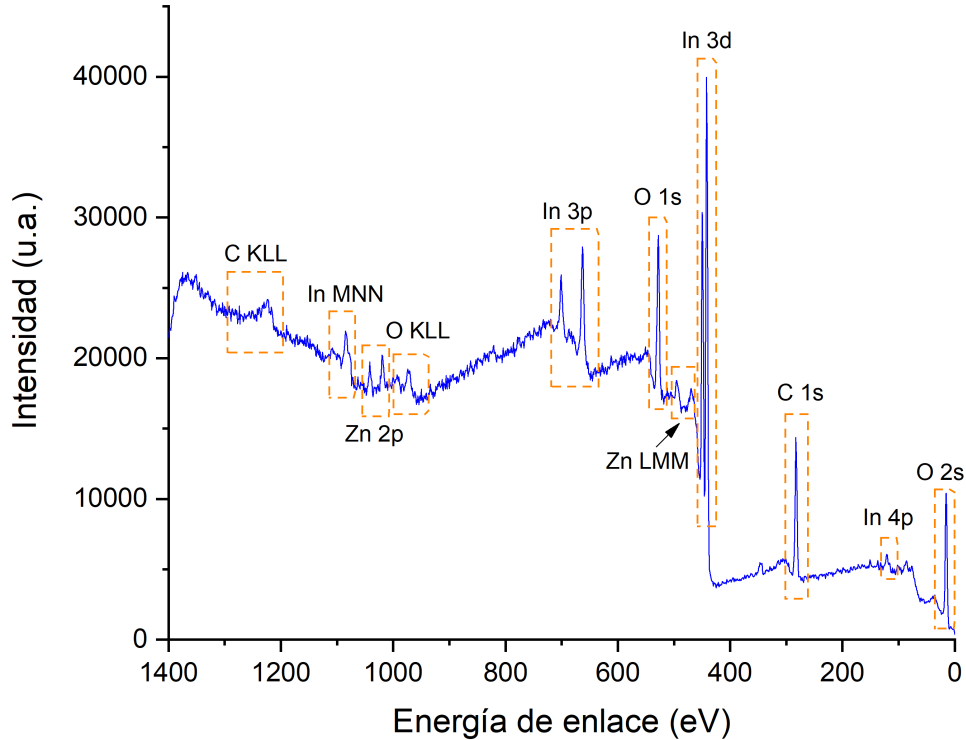


Figura 3.17: Espectro de alta resolución de IZO

A partir del espectro mostrado en la figura 5.17 se evidencian las señales correspondientes al zinc, oxígeno, indio y carbono. No se encontró la presencia de algún pico, además del carbono, debido a contaminantes, por lo que se infiere una buena calidad química de la película. Se tomaron los espectros de alta resolución correspondientes a las señales de oxígeno 1s, zinc 2p e indio 3d (mostradas en la figura 5.18) para un análisis más detallado. Las señales se ajustaron a través de gaussianas y utilizando el modelo de Tougaard para la señal de fondo.

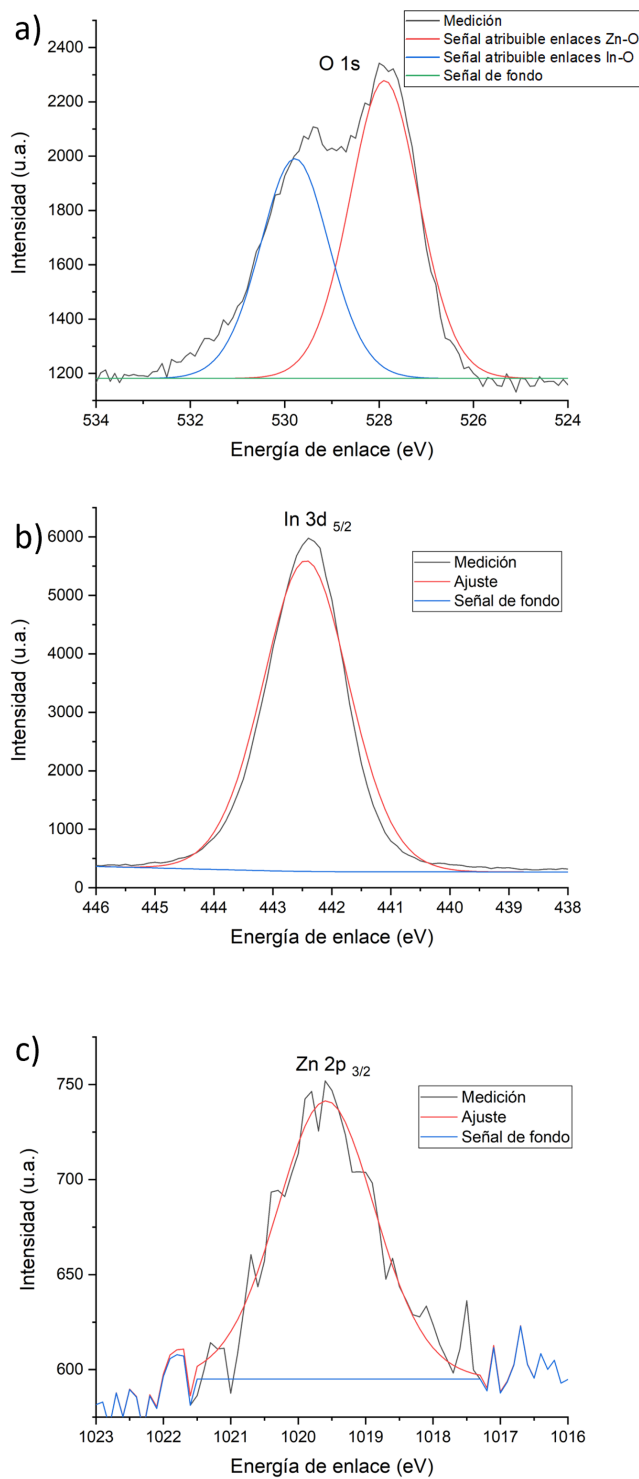


Figura 3.18: Espectros de alta resolución de IZO

El espectro correspondiente al O 1s se ajustó a partir de 2 gaussianas. La primera de ellas (mostrada en la figura 3.18 a) en color rojo) se atribuye a la señal de O₂ enlazado a iones metálicos. En este caso, corresponde a la señal proveniente de la formación de ZnO. La segunda gaussiana (en color azul) es atribuible a los iones O y O₂ en las regiones deficientes de oxígeno causadas por las vacantes de oxígeno cuando los cationes In⁺³ se insertan en las redes de óxido de zinc. La figura 3.18 b) corresponde a la señal de Zinc 2p_{3/2}, la cual se ajustó a través de una gaussiana correspondiente a la señal de Zn⁺² lo que sugiere la presencia del compuesto ZnO. La figura 5.18 c) corresponde al espectro de In 3d, el cual se descompone en las señales In 3d_{3/2} e In 3d_{5/2}. Esta se ajustó a través de una sola gaussiana que corresponde a los cationes In⁺³, lo que propicia la formación del compuesto In₂O₃, resultados consistentes con los análisis reportados por Lou S et al. (2018).

La cuantificación de las señales se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Cuantificación química de películas delgadas de IZO.

Especie	Posición pico (eV)	K.E. (eV)	F.S.	I.M.F.P. (nm)	%
O 1s	529.8	956.8	2.93	23.27	63.2
In 3d _{5/2}	444.1	1042.5	13.32	24.82	33.17
Zn 2p _{3/2}	1021	465.6	18.92	11.65	3.63

3.4.3. Mediciones ópticas

Se tomó el espectro de absorbanza de la película, se midió de los 300 a los 800 nm y se determinó el porcentaje de transmitancia de la película en función de la longitud de onda. Los resultados se muestran en la figura 3.19.

A partir de los resultados obtenidos se determinó un porcentaje de transmitancia promedio (en el rango del espectro visible) del $\approx 80\%$, valor por debajo del característico para un material transparente. La transmitancia del material podría incrementarse a través de la implementación de oxígeno en las condiciones de depósito de las películas delgadas.

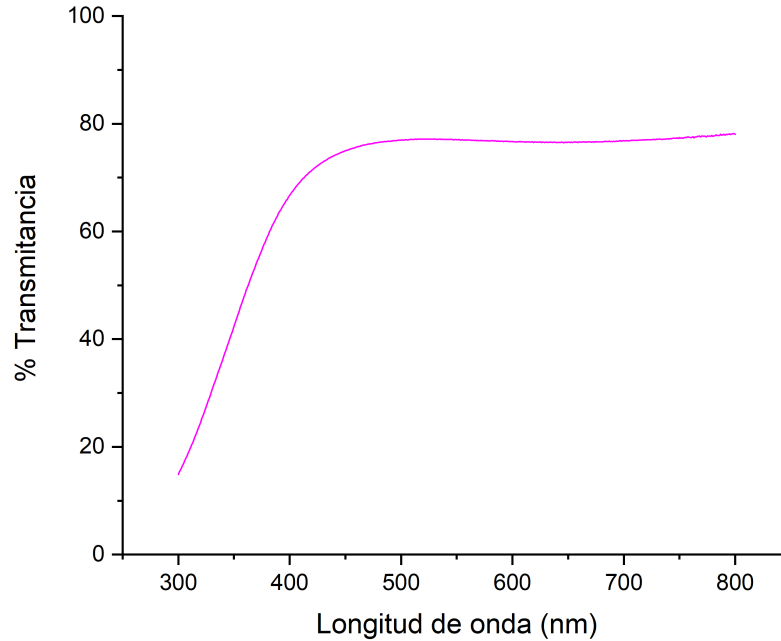


Figura 3.19: Transmitancia IZO.

3.4.4. Tasa de depósito y de remoción de IZO

Se llevó a cabo el depósito de películas delgadas de IZO, con tiempos de depósito de 10, 18, 20 y 30 minutos, para estimar la tasa de crecimiento del material bajo las condiciones mencionadas.

Se determinó una tasa de crecimiento de 8.72 ± 0.22 nm, que es baja comparada a la de otros materiales depositados bajo la misma técnica. Sin embargo, esto permite un mayor control del grosor en las películas depositadas lo que favorece el decapado controlado de dichas películas en el dispositivo. Se implementó el uso de HCl en bajas concentraciones para el decapado de IZO, tal como lo sugiere Song J et al. (2002). Se ensayó el proceso de decapado varias veces para encontrar una receta óptima que redujera o anulara las posibles afecciones al dispositivo. Se utilizaron soluciones de HCl al 2 y 5 %. La figura 3.21 muestra los resultados obtenidos[?].

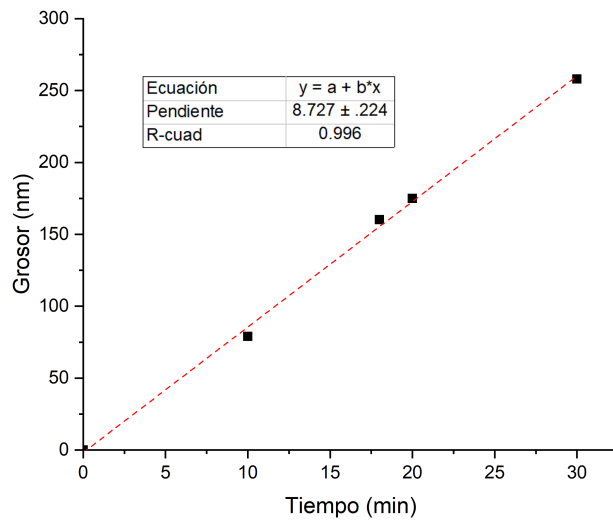


Figura 3.20: Razón de crecimiento IZO.

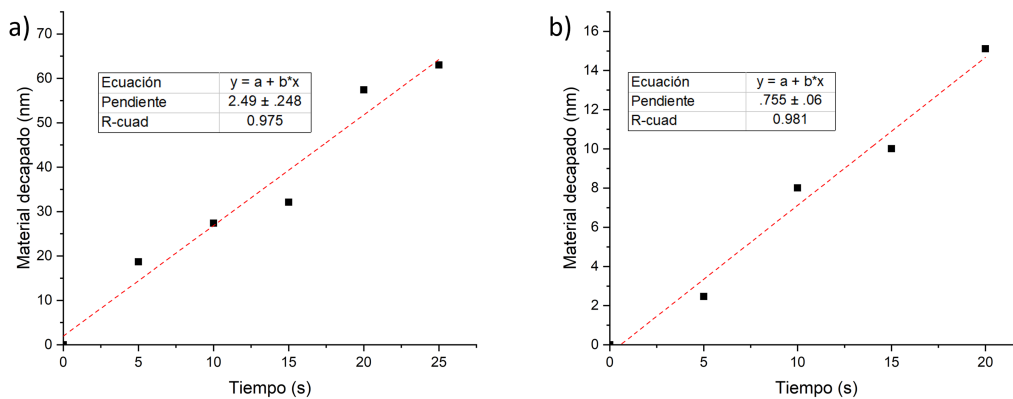


Figura 3.21: Razón de remoción de IZO.

Primeramente, se ensayó la remoción de las películas de IZO por vía húmeda con la solución de HCl al 5 %. Se obtuvo una razón de 2.49 ± 0.25 nm, tasa de remoción del material óptima para el proceso de ataque del material. Sin embargo, el material será utilizado como contacto superior del dispositivo, por lo que el control del proceso en esta etapa es crucial. Por ello se determinó remover un porcentaje de la película usando esta receta y emplear HCl a una menor concentración para la remoción de los

últimos 100 nm de la película, permitiendo un mayor grado de precisión. El ataque por vía húmeda de las películas delgadas de IZO con una concentración al 2 % permitió una razón de 0.75 ± 0.06 nm, razón óptima para llevar a cabo el proceso con un control más fino.

3.5. Dispositivos

3.5.1. Fabricación de dispositivos

La arquitectura de los transistores de película delgada (TFT's) consta de un electrodo compuerta (regularmente se trata de óxidos conductores transparentes). Por encima del mismo se coloca una película delgada del material dieléctrico, seguido de la película delgada del material semiconductor. Para el caso del dispositivo fabricado se utilizó ITO como electrodo compuerta, SiO_2 como material dieléctrico, ZnO como material semiconductor e IZO como contacto superior. La figura 3.22 muestra el proceso de fotolitografía para la fabricación de las compuertas en el dispositivo.

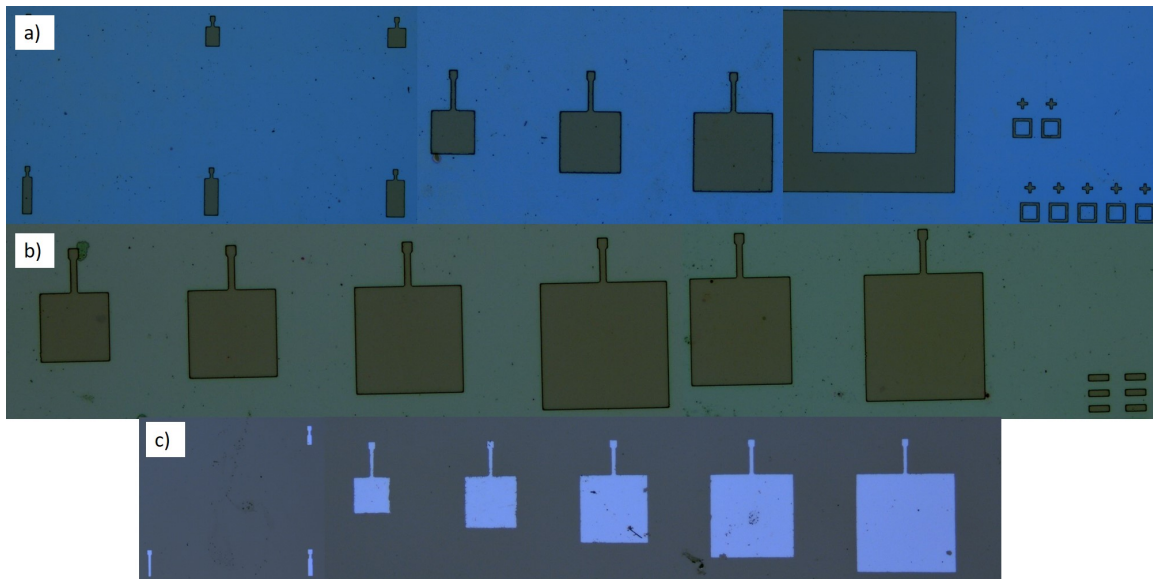


Figura 3.22: Proceso de fabricación.

1. La figura 3.22 a) corresponde a la película delgada con fotoresina una vez revelado

el patrón después del proceso de transferencia.

2. La figura 3.22 b) corresponde a los dispositivos una vez realizado la remoción del material (aún con la fotoresina sobre la película).

3. La figura 3.22 c) corresponde a las compuertas del dispositivo ya con la remoción de la fotoresina, es decir, las compuertas listas para pasar al siguiente proceso de fabricación. El proceso de fotolitografía se repitió para cada una de las etapas de la fabricación del dispositivo.

La figura 3.23 muestra una imagen de los dispositivos obtenidos. En la figura 5.23 a) se muestra un panorama general de los dispositivos fabricados y la figura 3.23 b) muestra la geometría del dispositivo correspondiente a una relación de ancho-largo de $40/20 \mu\text{m}$. En la figura 3.23 b) se observa con mayor detalle el cambio en las tonalidades correspondientes a las diferentes películas delgadas utilizadas en el dispositivo. La tonalidad grisácea corresponde al área del dispositivo donde se tiene la película delgada de Parileno, sobre el ZnO, SiO₂ e ITO. La tonalidad azul más intensa corresponde a la película delgada de ITO, el cual funge como electrodo inferior. La figura 3.23 a) muestra dispositivos con algunas de las relaciones W/L que fueron fabricadas. Cabe destacar que esta relación es determinante para la corriente que existirá entre los contactos fuente y drenador. Conforme la relación (W/L) sea menor, la corriente en el drenador se verá disminuida. Esta variación permite evaluar las propiedades del dispositivo con diversas geometrías.

La arquitectura del transistor fabricado es conocida como escalonada, es decir, consta de un contacto compuerta en la parte inferior, dos contactos superiores, un material aislante y el material semiconductor. Este tipo de arquitectura favorece la durabilidad de las propiedades de inyección de los portadores en la interfase fuente/canal. Sin embargo, como desventaja presenta una menor tolerancia a los efectos de barrera de contacto. Por lo tanto, la elección de los materiales a utilizar son de crucial importancia para favorecer el acoplamiento con el material semiconductor. Por esta razón, se implementó el uso de IZO e ITO con funciones trabajo de 5.23 y 5.53 eV, respectivamente.

Un transistor se caracteriza, principalmente, porque permite modular la corriente en

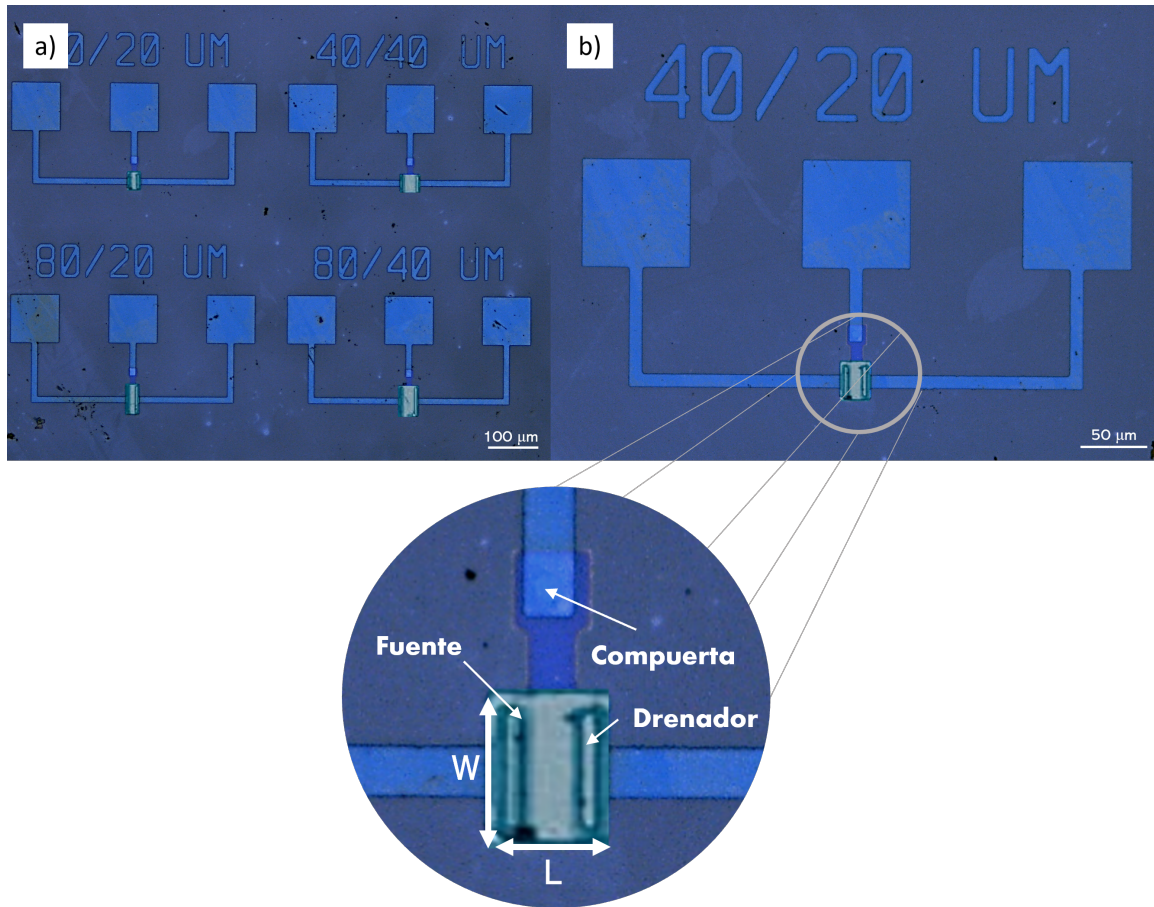


Figura 3.23: Dispositivos fabricados.

uno de los electrodos al suministrar una diferencia de potencial en los otros dos. Al tratarse de un transistor de efecto campo, conforme la distancia entre los electrodos sea menor, el campo eléctrico inducido será mayor. Por esta razón se buscó que el grosor de las películas delgadas, tanto del material dieléctrico y el semiconductor fueran de un grosor mucho menor, en comparación al grosor del contacto inferior. La geometría del transistor de películas delgadas fabricado posee contactos drenador y fuente que están en contacto con el material semiconductor. Éstos están separados una corta distancia entre ellos, mientras que el contacto compuerta se separa de la capa del semiconductor (capa activa) por la película delgada del material dieléctrico. La distancia entre ambos electrodos en este caso resulta de ≈ 50 nm, distancia que favorece los fenómenos de efecto campo.

Un transistor de película delgada, a diferencia de un transistor MOSFET posee dis-

tribuciones de carga bidimensionales ocasionadas por los grosores nanométricos que presentan en su diseño. Por lo tanto, la homogeneidad de las películas es de suma importancia. En el mejor de los casos las capas consecutivas ayudan a estabilizar la integridad de la primera capa en términos de difusión de impurezas y cristalinidad. Tal como lo señala la tabla 3.10 se buscó que el material fuera homogéneo y presentara rugosidades bastante bajas para favorecer un buen funcionamiento del dispositivo[2].

Tabla 3.10: Mediciones de películas delgadas del dispositivo.

Película	Grosor (nm)	Rugosidad (nm)	MSE
ITO	112.13 \pm 1.15	2.04 \pm .14	4.16
SiO₂	31.18 \pm 3.11	0.45 \pm 0.12	11.13
ZnO	36.7 \pm 1.03	0.44 \pm 0.09	8.78
Parileno	320 \pm 15.23	-	11.59
IZO	287.5 \pm 3.49	12.29 \pm 1.98	24.33

3.5.2. Mediciones eléctricas de los dispositivos

Se hicieron mediciones de corriente-voltaje para los dispositivos fabricados, las mediciones se tomaron haciendo un barrido de voltaje entre los electrodos fuente y drenador de 0 a 20 V. Se varió el voltaje suministrado al electrodo compuerta de 0 a 6 o 7 V en algunos dispositivos. Se obtuvieron las curvas características de un transistor. La figura 5.24 muestra las curvas de corriente-voltaje obtenidas. La figura 5.24 a) muestra la curva obtenida para un transistor con una relación de ancho (W) con respecto a su largo (L), de (80/10), la figura 5.24 b) muestra la corriente en el drenador para una relación (160/60) y finalmente, la figura 5.24 c) corresponde a la relación (160/80).

En todos los casos se varió el voltaje de compuerta. La corriente en el drenador, I_D , se mantuvo dentro de un orden de magnitud (1×10^{-4} A) para todos los dispositivos medidos. Es observable que, conforme la relación W/L decrece, la corriente en el drenador también disminuye. De manera cualitativa, el resultado concuerda con la

expresión señalada en la ecuación (1.2), donde la corriente en el drenador es proporcional a este parámetro (W/L).

Este dispositivo está diseñado para llevar a cabo la modulación de la densidad de carga en la capa activa (material semiconductor) y, por lo tanto, la conductividad podrá ser modulada a través de la aplicación de una diferencia de potencial en el electrodo compuerta.

Las cargas se inyectan a través del electrodo fuente y son recogidas por el electrodo drenador. La figura 3.24 evidencia este comportamiento al incrementarse la corriente en el drenador, I_D , al incrementarse el voltaje suministrado a la compuerta, es decir, el transistor cumple con su función de dispositivo modulador de corriente.

En las mediciones mostradas en la figura 3.24 se observa la nula presencia de corriente de fuga, es decir, todas las curvas poseen su origen en los límites $(0,0)$ para los ejes (x,y) . Dicho comportamiento se asocia al proceso de fabricación seguido, donde se tienen áreas de los transistores bien delimitadas a través del uso de la técnica de fotolitografía, puesto que permite un mayor control en el área superficial de las multicapas en el dispositivo y por lo tanto, reduce en gran medida la presencia de efectos no ideales en la operación eléctrica del transistor.

En las curvas obtenidas pueden observarse los modos de operación de un transistor para los diferentes voltajes suministrados en la compuerta. La región óhmica, donde el transistor tiene un comportamiento de resistencia entre el drenador y la fuente, presenta un comportamiento de conducción lineal en el dispositivo. Posteriormente, se presenta la zona de saturación, donde el canal de conducción sufre un estrangulamiento cerca del drenador y va desapareciendo. Sin embargo, la corriente entre el drenador y la fuente no se ve interrumpida debido al campo eléctrico generado en el dispositivo. Ésta se vuelve independiente del voltaje existente entre ambas terminales y por lo tanto la corriente permanece constante. En la figura 3.24 se observa la tendencia de las curvas a comportarse de manera constante. Trabajos previos del desarrollo de transistores tipo n basados en ZnO como capa activa fabricados con metodologías similares muestran comportamientos similares a los obtenidos en el presente trabajo.

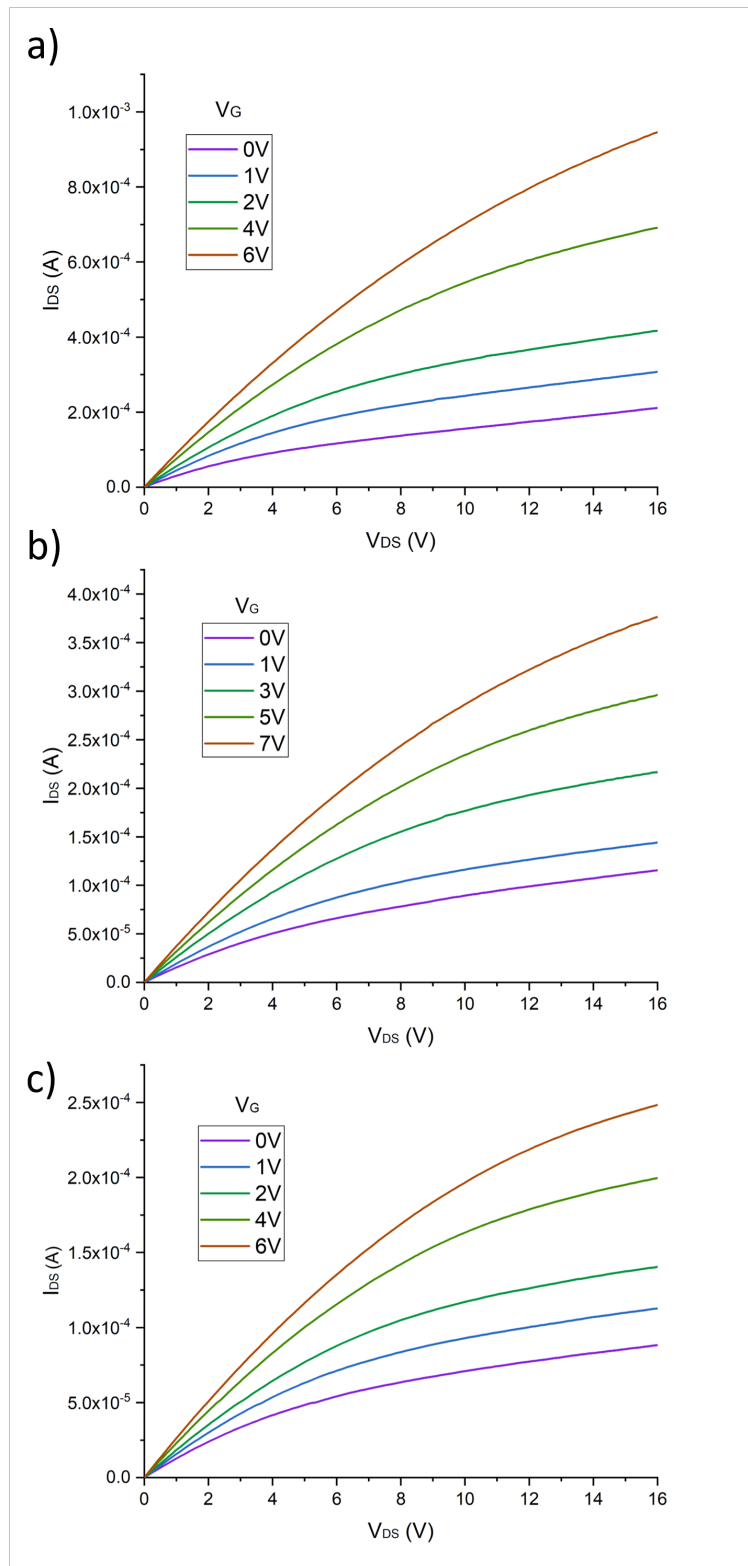


Figura 3.24: Curvas I-V para transistores con (W/L) a) 80/10 b)160/60 c) 160/80.

3.5.3. Mediciones ópticas de los dispositivos

Se midió la transmitancia del dispositivo en el rango de los 300 a los 800 nm, a partir de los resultados obtenidos se determinó el porcentaje de transmitancia del dispositivo, los resultados se muestran en la figura 3.25.

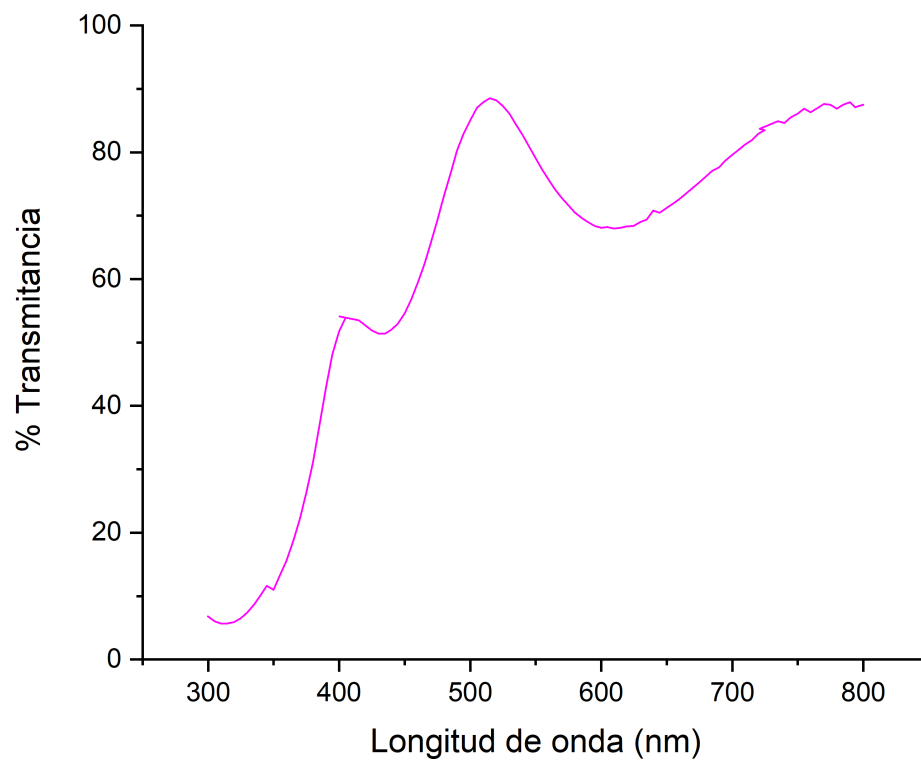


Figura 3.25: Transmitancia del dispositivo.

A partir de los resultados obtenidos se determinó un porcentaje de transmitancia promedio (en el rango del espectro visible) de $\approx 80\%$, valor coincidente con lo esperado para referirse a dispositivos transparentes.

3.6. Simulaciones en COMSOL

Se realizó la simulación de los dispositivos con relación (W/L) de (80/10), (160/60) y (160/80) y los resultados se muestran en la figura 3.26. En las curvas se evidencia el comportamiento típico de un transistor, donde la corriente se ve modulada a través de la aplicación de una diferencia de potencial, tanto en los electrodos fuente-drenador, como en el electrodo compuerta.

En las simulaciones realizadas también son evidentes las zonas de operación del transistor. Independientemente del tipo de patrón (la definición de los componentes), a un voltaje en el drenador muy bajo, $V_D = 0$, se forma una capa de acumulación con una concentración de electrones a lo largo de la interfaz semiconductor / dieléctrica creando un canal con una resistencia constante y, en consecuencia, características IV lineales. A medida que aumenta el voltaje en el drenador, aumenta la caída de potencial a lo largo de la longitud del canal (desde la fuente hasta el drenador). Por lo tanto, el voltaje entre la compuerta y el semiconductor cambia en función de la posición a lo largo del canal y el espesor de la capa de acumulación deja de ser constante. Debido a este efecto, parte del canal, en el extremo del drenaje, se agotará de los portadores libres y, a su vez, el grosor del canal se estrecha. Al aumentar el voltaje en el drenador más allá que V_{DSAT} , el canal será más resistivo y la corriente casi saturada. Los resultados obtenidos en la simulación concuerdan cualitativamente con los resultados obtenidos de manera experimental, la figura 5.26 d) muestra la superposición de las gráficas correspondientes al transistor con una relación ancho/largo de 80/10, donde las curvas mostradas en color rosa corresponden a las curvas obtenidas a partir de la simulación. Su eje y corresponde al localizado en el lado izquierdo de la figura, mientras que las curvas en color azul corresponden a las mediciones experimentales. Se evidencia el incremento en la corriente conforme se incrementa la relación (W/L), además de la similitud en la forma de las curvas. De manera cuantitativa, las gráficas obtenidas en la simulación muestran corrientes en un rango de 1×10^{-4} a 1×10^{-5} A.

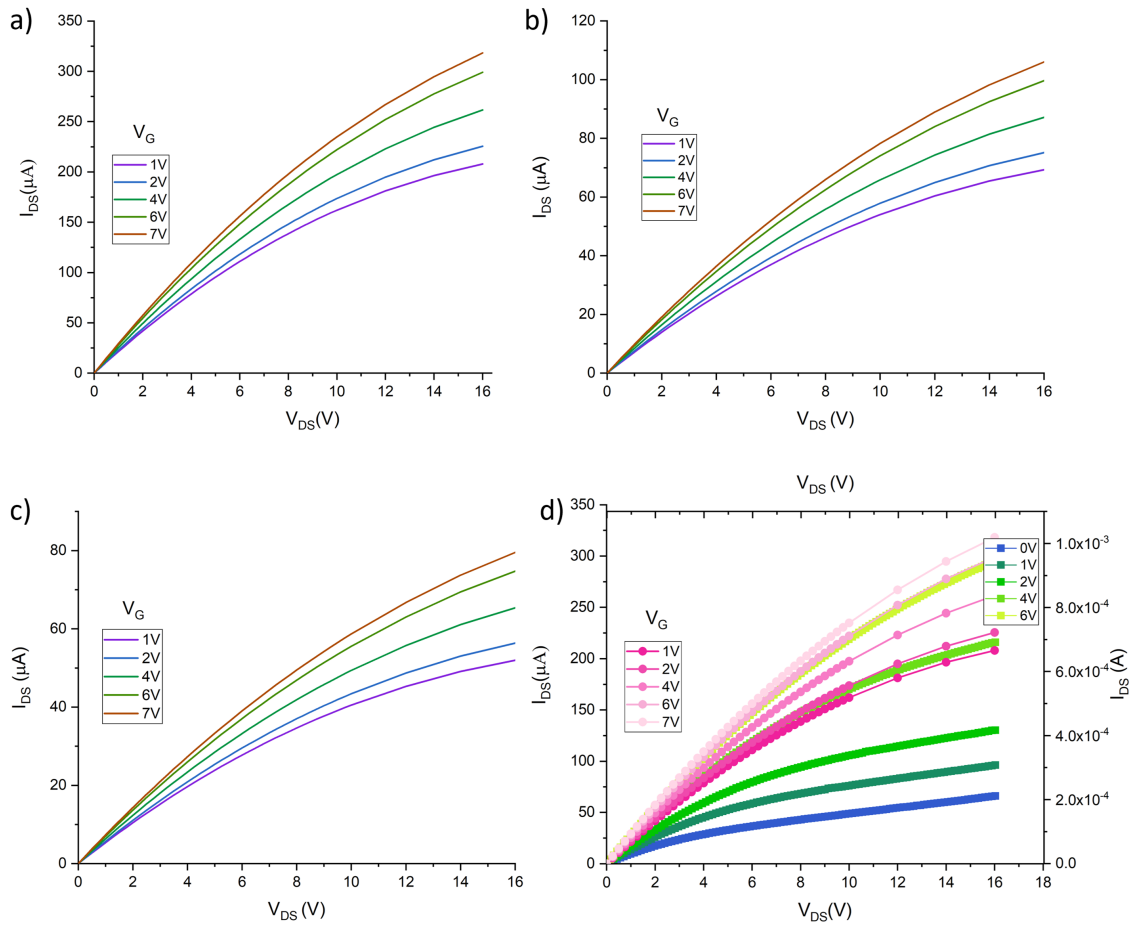


Figura 3.26: Simulación de curvas I-V en dispositivo TFT.

Los valores son cercanos a los obtenidos de manera experimental. Sin embargo, la discrepancia es evidente y se atribuye a las características ideales consideradas para la simulación del dispositivo y a las posibles afecciones en la fabricación de los dispositivos.

Capítulo 4

Conclusiones

- Se logró la obtención de películas delgadas de ITO e IZO con propiedades eléctricas atractivas para utilizarse como electrodos en el dispositivo y presentaron resistividades en el orden de 10^{-4} y 10^{-3} , respectivamente, Así mismo, presentaron porcentajes de transmitancia relativamente altos: $\approx 80\%$. Por lo tanto, sus propiedades ópticas y eléctricas los hacen atractivos para su implementación en el desarrollo de dispositivos semiconductores con aplicación en el área de la electrónica flexible.
- Las películas delgadas de ZnO a 15 mTorr, con un porcentaje de zinc del 47.38 %, y un porcentaje de oxígeno de 52.61 % presentaron una resistividad baja ($5.49 \times 10^{-2} \omega$) y una alta movilidad, lo que evidencia su uso como capa activa de un transistor de películas delgadas. Además, se obtuvo una brecha prohibida de 3.61 eV, con un porcentaje de transmitancia en el espectro visible de $\approx 85\%$. La brecha prohibida obtenida para las películas delgadas de ZnO fue alta en comparación con las reportadas por diversos autores, sin embargo con características óptimas para ser utilizada como material semiconductor.
- En este trabajo de tesis fue posible fabricar transistores con un alto grado de transmitancia a temperatura ambiente, a partir del uso de películas delgadas de ITO, IZO (usadas como electrodos), SiO₂ (utilizada como dieléctrico) y ZnO tipo n (utilizada como capa activa del dispositivo). Las películas de ZnO se

depositaron por el método de ablación láser con una atmósfera reactiva de Oxígeno.

- Se logró determinar una metodología óptima para el crecimiento y remoción de las películas mencionadas lo que favoreció el desarrollo de la metodología para la fabricación del dispositivo. Se logró llevar a cabo el uso de técnicas de microfabricación. En este caso fotolitografía para la definición de la geometría y los componentes del transistor.
- Se logró obtener transistores en los que se moduló la corriente a través de la aplicación de diferencias de potencial en los electrodos drenador y compuerta. Se obtuvieron corrientes en el orden de 10^{-4} A. Además se evidenció la dependencia de la corriente a la geometría de los dispositivos, se demostró la dependencia lineal de la corriente a la relación ancho-largo en los transistores fabricados.
- Se logró fabricar transistores de películas delgadas con un porcentaje de transmitancia del $\approx 80\%$, dicha característica lo hace atractivo para su implementación en el desarrollo de la electrónica flexible.
- Finalmente, se logró llevar a cabo la simulación de los dispositivos fabricados en un software comercial diseñado para tecnologías del silicio, en este estudio se adaptó la operación para trabajar con transistores de películas delgadas. Se logró la obtención de curvas que sustentaron de manera cualitativa los resultados experimentales.

Bibliografía

- [1] Cortés, L. (1998) *Presente y Futuro de la microelectrónica*, Revista Ingeniería e Investigación , Vol(41):64-68.
- [2] Neamen, D (2012). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*. Cuarta edición. Editorial Mc Graw Hill p.p. 331:433.
- [3] Kuo, Y (2013) *Thin film transistor. Past, present and future*, The Electromechanical Society Interface, Spring 2013:54-61.
- [4] Fortunato, E; Barquinha, P; Martins, R (2012) *Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances*, Adv Mater, 24 2945-86.
- [5] Brotherton, S (2013) *Introduction to Thin Film Transistors*, Springer, ISBN 978-3-319-00002-2.
- [6] Domaradzki, J., Borkowska, A., Kaczmarek, D., Prociow, E. (2006). *Transparent oxide semiconductors based on TiO₂ doped with V, Co and Pd elements*. Journal of Non-Crystalline Solids, 352(23-25), 2324–2327.
- [7] Caraveo-Frescas, J. A., Nayak, P. K., Al-Jawhari, H. A., Granato, D. B., Schwingschlögl, U. and Alshareef, H. N. (2013). *Record mobility in transparent p-type tin monoxide films and devices by phase engineering*. ACS Nano, 7(6),5160–5167.
- [8] Hoffman R L; Norris B J; Wager J F (2003) *ZnO based transparent thin film transistors* Appl. Phys. Lett.82 733–5
- [9] Barquinha, P., Martins, R., Pereira, L. and Fortunato, E. (2012). *Transparent oxide electronics: from materials to devices* John Wiley Sons

- [10] Fortunato, E; Barquinha, P; Martins, R (2012) *Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances*, Adv Mater, 24 2945-86.
- [11] Petti, Luisa; Münzenrieder, Niko; Vogt, Christian; Faber, Hendrik; Büthe, Lars; Cantarella, Giuseppe; Bottacchi, Francesca; Anthopoulos, Thomas D.; Tröster, Gerhard (2016). *Metal oxide semiconductor thin-film transistors for flexible electronics*. Applied Physics Reviews.
- [12] Özgür, U; Alivov, I; Liu, C; Teke, A (2005) *A comprehensive review of ZnO materials and devices*. Journal of Applied Physics 98.
- [13] Cross, R; Merlyne, M; Deane, S; Young, N. (2008) *A comparison of the performance and stability of ZnO TFTs with Silicon dioxide and Nitride as gate insulators*. IEEE Transactions on Electron Devices.
- [14] Fleischhaker, F; Wloka V; Hennig I. (2010) *ZnO based field-effect transistors (FETs): solution-processable at low temperatures on flexible substrates*J. Mater. Chem.20 6622–5
- [15] Cherenack, K H; Munzenrieder, N S; Troster, G. (2010) *Metal oxide semiconductor thin-film transistors for flexible electronics* IEEE Electron Device Lett.31 1254–6
- [16] Park, K; Lee, D-K; Kim, B-S; Jeon, H; Lee, N-E; Whang, D; Lee, H-J; Kim, Y J; Ahn, J-H. (2015) *Stretchable, Transparent Zinc Oxide Thin Film Transistors* Adv. Funct. Mater.20 3577–82.
- [17] Lee, C; Lin, M; Wu, W; Wang, J; Chou, Y; Su, W; Chen, Y; Lin, C. (2010) *Suppression of Oxygen Vacancy and Enhancement in Bias Stress Stability of High-Mobility ZnO Thin-Film Transistors with N₂O Plasma Treated MgO Gate Dielectrics* Semicond. Sci. Technol.25 105008.
- [18] Song, K; Noh, J; Jun, T; Jung, Y; Kang, H-Y; Moon, J. (2010) *Fully Flexible Solution-Deposited ZnO Thin-Film Transistors* Adv. Mater.22 4308–12

- [19] Zhao, D; Mourey, D; Jackson, T; (2010) *IEEE Electron Device Lett.* 31 323–5
- [20] Nomura, K; Ohta, H; Takagi, A; Kamiya, T; Hirano, M; Hosono, H (2004) *Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors.*, *Nature* 432 488–92.
- [21] Dosi, G. (1984) *Technical change and Industrial Transformation: The theory and an application of semiconductor industry* MacMillan. Londrés. ISBN 978-1-349-17523-9.
- [22] Kahrizi, M. (2011) *Micromachining Techniques for Fabrication of Micro and Nanostructures.* *Intek. Rijeka, Croacia.* ISBN 978-953-307-906-6.
- [23] Moreau, W. (2012) *Semiconductor lithography: Principles, practices and materials.* Plenum Press. ISBN: 978-1-4613-0885-0.
- [24] Prakash, A; Jency, J; Mathew, M. (2013). *A review of various wet etching techniques.* *International Journal of Computer Applications.*
- [25] Guzmán, D; Quevedo, M; De la Cruz, W; Ramírez, R (2018) *Fully patterned p-channel SnO TFTs using transparent Al₂O₃ gate insulator and ITO as source and drain contacts* *Semicond. Sci. Technol.* 33 035010.
- [26] *UNaFab Ensenada* CNyN, UNAM, Sitio web:<https://www.cnyn.unam.mx/unafab>
- [27] Alsharif,S; Farhaan,H; Al-Jawhari,H (2007) *Effect of patterning on the performance of p-type Cu₂O TFTs: a 3D simulation using Comsol Multiphysics.* *Eur Phys, J. Appl. Phys.* 77:10102.
- [28] Chu, T., Liu, Y. (2018). *A theoretical approach for simulations of anisotropic charge carrier mobility in organic single crystal semiconductors.* *Organic Electronics*
- [29] R. Behrisch (1981) *Sputtering by Particle Bombardment I: Physical Sputtering of Single-Element Solids* Springer, New York.

- [30] Varghese, J; MamourSakho, E; Parani,S; Sabu,T.(2019) *Introduction to nano-materials: synthesis and applications*. Chapter 3. Nanomaterials for Solar Cell Applications. Pages 75-95.
- [31] N.Saxena, A.A., D.M. Phase, R. Choudhary, D. Kanjilal. (2010) *Controlled formation of silicon nanocrystals by dense electronic excitation in PLD grown SiO films* Physica E vol. 42.
- [32] Fujiwara, H. (2003) *Spectroscopy Ellipsometry:Principles and applications*. John Wiley / Sons. ISBN 4-621-07253-6
- [33] Wollam, J. (1997) Guide to using WVASE 32.
- [34] Hudson, J. (1992) *Surface Science: An Introduction*. John Wiley Sons. ISBN 0-75069-159-X
- [35] Tougaard, S., Jansson, C. 1992. *Background correction in XPS: Comparison of validity of different methods*.Surface and Interface Analysis, 171-174. doi.org/10.1002/sia.740190133
- [36] Li, Y., Zhao, G., Zhi, X., Zhu, T. (2007). *Microfabrication and imaging XPS analysis of ITO thin films*. Surface and Interface Analysis, 39(9), 756–760.
- [37] Van der Pauw, L. J. 1958. *A method of measuring specific resistivity and hall effect of lamellae of arbitrary shape*. Philips Technical Review 20: 220-224.
- [38] Van der Pauw, L. J. 1958 *A method of measuring specific resistivity and hall effect of discs of arbitrary shape* Philips technical review.
- [39] Tadatsugu, M. (2000) *New n-type transparent conducting oxides*. MRS Bulletin, Volume 25.
- [40] Sreenivas, K; Sayer, M; Laursen, T. Whitton, J. (1990). *Characterization of Lead Zirconate Titanate (PZT)- Indium Tin Oxide (ITO) thin film interface*. Symposium Y-Ferroelectric Thin Films I. Volume 200.

- [41] Amalathas, A. P., Alkaisi, M. M. (2016). *Effects of film thickness and sputtering power on properties of ITO thin films deposited by RF magnetron sputtering without oxygen*. Journal of Materials Science: Materials in Electronics
- [42] Walker, P; Tarn, W. (1991) *Handbook of metal etchants*. CRC Press LLC.
- [43] Cobianu, C; Savaniu, C; Siciliano, P; Capone, S; Utrianien, M; Niinist, L. (2001) *SnO₂ sol-gel derived thin films for integrated gas sensors*. El Sevier. Sensors and Actuators.
- [44] Koshizaki, N., Umehara, H., Oyama, T. (1998). *XPS characterization and optical properties of Si/SiO₂, Si/Al₂O₃ and Si/MgO co-sputtered films*. Thin Solid Films, 325(1-2), 130–136.
- [45] Mogab, C. J., Adams, A. C., Flamm, D. L. (1978). *Plasma etching of Si and SiO₂—The effect of oxygen additions to CF₄ plasmas*. Journal of Applied Physics, 49(7).
- [46] Song, J. H., Kwon, D. J., Kim, S. G., Roh, N. S., Park, H. S., Park, Y. B., . . . Chung, K. H. (2002). *Advanced Four-Mask Process Architecture for the a-Si TFT Array Manufacturing Method*. SID Symposium Digest of Technical Papers
- [47] Lee, K. M., Lai, C. W., Ngai, K. S., Juan, J. C. (2016). *Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: A review*. In *Water Research* (Vol. 88, pp. 428–448). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.09.045>
- [48] Conde L. (2017). *Implementación de un sistema de medición de resistividad eléctrica en películas delgadas semiconductoras por el método de Van der Pauw* Tesis. Pontificia Universidad Católica del Perú.