



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

CENTRO DE NANOCIENCIAS Y NANOTECNOLOGÍA

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE  
TRANSISTORES TRANSPARENTES TIPO P BASADOS  
EN PELÍCULAS DELGADAS DE SNO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

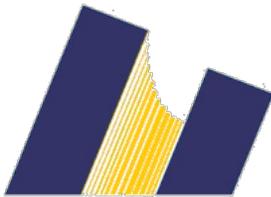
LICENCIADO EN NANOTECNOLOGÍA

P R E S E N T A :

CITLALLI MONTSERRAT VALDÉS NOGUERÓN

TUTOR

DR. WENCEL DE LA CRUZ HERNÁNDEZ



ENSENADA, B.C. 2020



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 Noguero

# Agradecimientos

Agradezco al Dr. Wencel de la Cruz por su confianza y paciencia mostrada como asesor de este proyecto, así como a la M.C. Angélica Garzón Fontecha por su apoyo en el desarrollo del mismo. Quiero agradecer al Dr. Harvi Castillo, a la M.I. Irene Barberenas, al Dr. Javier López y a la Dra. Noemi Abundiz por brindarme el conocimiento suficiente en las técnicas de la UNaFab para poder desarrollar este trabajo.

Agradezco al Laboratorio Nacional de Nanofabricación y al proyecto PAPIIT-IN112918 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, a mis profesores que siempre estuvieron dispuestos a compartir sus conocimientos de manera franca y a los compañeros que siempre me dieron un consejo de manera desinteresada.

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, a Alejandro por la complicidad durante estos cuatro años, a David por su apoyo y su noble amistad y a Kevin por su acompañamiento. Agradezco a mis amigos del laboratorio que me enseñaron a querer Ensenada: Santiago y Mario, también agradezco a Penélope que permaneció a la distancia. Finalmente, agradezco a Luis por aconsejarme, alentarme y creer en mí.

# Resumen

El desarrollo de tecnologías transparentes ha motivado el uso de óxidos semiconductores transparentes en la fabricación de transistores de películas delgadas, puesto que permite su uso en aplicaciones ópticas y optoelectrónicas. Por lo anterior, en el presente trabajo se realizó la fabricación y caracterización de transistores de películas delgadas. Se utilizó óxido de estaño como semiconductor, ITO como electrodo compuerta,  $Al_2O_3$  como material dieléctrico y titanio para los electrodos fuente y drenador. Se hizo uso de la técnica de fotolitografía para la fabricación de transistores micrométricos. Se realizó el decapado del semiconductor vía húmeda empleando ácido clorhídrico y polvo de zinc.

Los resultados mostraron la obtención de películas delgadas de ITO con resistividad en el orden de  $10^{-4} \Omega cm$ , es decir, en condiciones óptimas para ser utilizadas como material conductor. También se obtuvieron películas delgadas de SnO con un bandgap de 2.79 eV y una movilidad de  $0.16 cm^2/Vs$ . Finalmente, se logró la modulación de la conductividad en los transistores de película delgada al suministrar diversos voltajes en la compuerta consiguiendo corrientes en el drenador en el orden de  $10^{-3} A$ .

# Abstract

The development of transparent technologies has motivated the use of transparent semiconductor oxides in the thin film transistors development, and it allows their use in optical and optoelectronic applications. Therefore, in the present work, thin film transistors based on p-type SnO thin film as semiconductor were fabricated; using ITO thin film as the gate electrode, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin film as the dielectric layer, and Ti thin film as the source and drain electrodes. The basis of the fabrication was the photolithography process, and the semiconductor wet etching was improved using hydrochloric acid and zinc powder. The results show the obtaining of thin films of ITO with resistivity in the order of  $10^{-4} \Omega cm$  (an optimal value for a conductive material), the SnO films with a bandgap of 2.79 eV and mobility of  $0.16 cm^2/Vs$ . Finally, the modulation of the conductivity in the thin film transistors were achieved by supplying various voltages in the gate, and the achieved current in the drain was in the order of  $10^{-3} A$ .

# Índice general

<b>Agradecimientos</b>	<b>III</b>
<b>Resumen</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.0.1. Objetivos . . . . .	8
1.0.2. Hipótesis . . . . .	8
<b>2. Marco teórico</b>	<b>10</b>
2.1. Nanotecnología . . . . .	10
2.1.1. ¿Qué es la Nanotecnología? . . . . .	10
2.1.2. Nanomateriales . . . . .	11
2.2. Películas delgadas . . . . .	13
2.2.1. Métodos de síntesis de películas delgadas . . . . .	13
2.2.2. Caracterización de películas delgadas . . . . .	15
2.2.3. Aplicaciones de las películas delgadas . . . . .	19
2.3. Dispositivos semiconductores . . . . .	19
2.3.1. Semiconductores . . . . .	20
2.3.2. Transistores . . . . .	23
<b>3. Metodología</b>	<b>29</b>
3.1. Fabricación del dispositivo . . . . .	29

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	VII
3.2. Caracterización del dispositivo . . . . .	31
<b>4. Resultados</b>	<b>33</b>
4.0.1. Películas delgadas de ITO . . . . .	33
4.0.2. Películas delgadas de SnO . . . . .	34
4.0.3. Fabricación del dispositivo . . . . .	36
<b>5. Conclusiones</b>	<b>44</b>

# Índice de figuras

1.1. Miniaturización del transistor. . . . .	1
1.2. Esquema de transistores MOSFET y TFT. . . . .	3
1.3. Síntesis de nanomateriales. [17] . . . . .	5
1.4. Proceso para transferencia de patrones usando fotolitografía . . . . .	6
1.5. Laboratorio Nacional de Nanofabricación. . . . .	7
2.1. Esquema de la diferencia entre las escalas micro y nanométrica.[17] .	11
2.2. Clasificación y ejemplos de nanomateriales. [18] . . . . .	12
2.3. Dibujo de técnica de pulverización catódica. . . . .	14
2.4. Proceso de depósito por capa atómica.[48] . . . . .	15
2.5. Esquema del arreglo experimental utilizado realizar análisis por elip- sometría. [33] . . . . .	16
2.6. Fenómeno sucedido en una medición por efecto Hall. [28] . . . . .	18
2.7. Separación de bandas. [28] . . . . .	20
2.8. Clasificación de los materiales desde el punto de vista eléctrico. . . . .	21
2.9. Estructuras del SnO: a) Tipo rutilo. b) Tetragonal. [36] . . . . .	22
2.10. Principio de funcionamiento del transistor MOSFET con sustrato tipo p. [28] . . . . .	25
2.11. Estructura del transistor MOSFET. . . . .	25
2.12. Curva I-V transistor MOSFET. . . . .	27
2.13. Arquitectura transistor TFT. . . . .	28
3.1. Esquema del transistor de película delgada basado en SnO. . . . .	31

3.2. Esquema del transistor fabricado en este trabajo. . . . .	31
3.3. Arreglo experimental para mediciones eléctricas. . . . .	32
4.1. Espectro XPS de SnO. . . . .	36
4.2. Dispositivos fabricados a)Panorama general. b)Transistor 80/20. . . .	38
4.3. Curvas I-V de transistor con relación W/L: a)60/40 y b)180/60. . . .	41

# Capítulo 1

## Introducción

"There's a plenty room at top of the bottom."(Richard Feynman, 1959). Esta línea de pensamiento fue el inicio de una revolución tecnológica, el parteaguas para la búsqueda de la miniaturización de la tecnología que ha gobernado el enfoque del desarrollo tecnológico actual, el vertiginoso progreso de esta área ha permitido que su campo de acción sea muy extenso, de manera que los microsistemas, la microelectrónica y sus sistemas asociados han sido el elemento clave del desarrollo de la vida contemporánea, siendo visible en áreas como: telecomunicaciones, instrumentación, robótica, dispositivos electrónicos y electrodomésticos.[1]

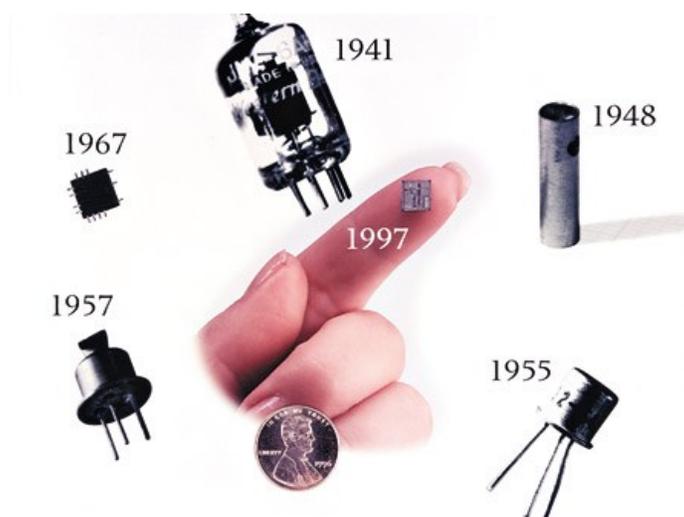


Figura 1.1: Miniaturización del transistor.

El desarrollo del primer transistor (en 1947) marcó el punto de inflexión en el área tecnológica, se trata de un elemento esencial dentro del campo de la microelectrónica. De forma general, la geometría de estos dispositivos consta de tres terminales y en esencia, permite controlar el paso de corriente o voltaje entre dos de sus terminales a través de la modulación de corriente o voltaje en su tercer terminal. Su funcionamiento se basa en las propiedades de conducción de los materiales semiconductores, los cuales poseen un carácter aislante, pero bajo ciertas condiciones pueden comportarse como materiales metálicos.

El uso de este tipo de dispositivos se incrementó de manera dramática en la década de los años 50's, tal como se muestra en la figura 1.1 su uso permitía la miniaturización de la tecnología y eliminaba la necesidad de un filamento para el paso de corriente. A partir de su implementación el transistor evolucionó y se ha ajustado a las constantes demandas de la sociedad. En consecuencia, a lo largo de los años, han surgido una gran variedad de tecnologías y geometrías referentes al funcionamiento de los transistores, esto permitió la miniaturización de los mismos hasta poseer dimensiones micro y nanométricas.[2]

Los primeros transistores en desarrollarse fueron los de contacto de punto, los cuales no tuvieron gran impacto a nivel comercial debido a la dificultad de su producción, como consecuencia, surgieron los transistores de unión y los transistores bipolares de unión, los cuales tuvieron un fuerte impacto en las tecnologías de la época. Un par de años más tarde surgieron los transistores de efecto campo (FET por sus siglas en inglés, Field Effect Transistor), este tipo de dispositivo motivó una nueva era en la tecnología electrónica.

El principio de funcionamiento del transistor de efecto campo consiste en generar una densidad de corriente eléctrica a través de la aplicación de un campo eléctrico, poseen tres terminales conocidas como fuente, drenador y compuerta y controlan la corriente existente entre el drenador y la fuente a través de un potencial aplicado en la compuerta. En 1952 surgió el primer transistor de efecto campo, conocido como transistor de efecto campo de unión (JFET por sus siglas en inglés, Junction Field Effect Transistor), este dispositivo es capaz de modular la corriente que circula a tra-

vés del transistor por uniones p-n polarizadas de manera inversa. Años después surgió el transistor metal-óxido-semiconductor (MOSFET) donde, a diferencia de su predecesor, la corriente se controla a través de la aplicación de una diferencia de potencial a un contacto (conocido como compuerta) separado del semiconductor por una capa aislante, este tipo de transistor causó revuelo en la industria microelectrónica y actualmente es la base de la electrónica digital. A la par surgió el transistor conocido como transistor de película delgada (conocido como TFT por sus siglas en inglés, Thin Film Transistor) este dispositivo posee una estructura y principios de operación similares a las asociadas al transistor MOSFET. La diferencia fundamental entre estos transistores se basa en la construcción y arquitectura de los mismos, la figura 1.2 muestra la comparación entre ambos transistores. Los transistores TFT son la base en la microelectrónica de películas delgadas, teniendo su aplicación más significativa en el desarrollo de la microelectrónica flexible y como elementos de conmutación de píxeles en las pantallas planas.[3, 4]

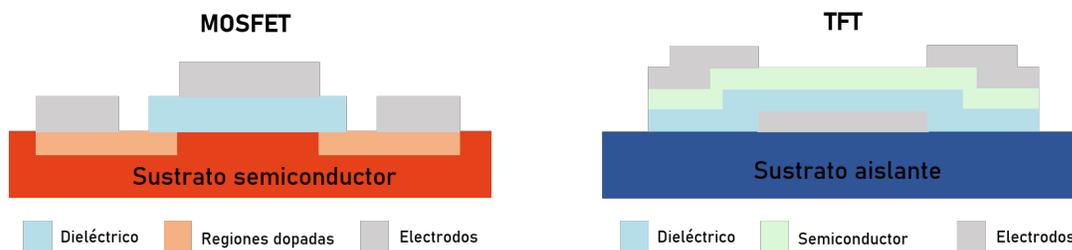


Figura 1.2: Esquema de transistores MOSFET y TFT.

Los dispositivos TFT's son dispositivos de tres terminales que requiere de los siguientes componentes: una capa semiconductor separada de la compuerta por una capa de algún material aislante, y los contactos fuente y drenador de cierto ancho separados por una distancia  $L$  y que están en contacto con el material semiconductor. Las capas semiconductoras típicamente se depositan por métodos físicos, que permiten un mejor control de la síntesis del material, el electrodo compuerta puede fabricarse con un metal, un óxido conductor, o en su caso, un polímero conductor. El primer material utilizado como semiconductor en un transistor fue el germanio,

sin embargo, se trata de un material poco abundante y su uso se vio afectado por la gran demanda que se suscitó en los años 50's, por lo que el material semiconductor más utilizado en este tipo de aplicaciones es el silicio, debido a su abundancia y a la facilidad de su obtención, sin embargo la fabricación de tecnología basada en este material requiere tratamientos térmicos a altas temperaturas ( $<1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Es por ello que se ha popularizado la búsqueda de materiales semiconductores que permitan el desarrollo de diversas aplicaciones (como la electrónica flexible) a temperaturas menores a  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que abrió un panorama para la ingeniería de materiales en el desarrollo de semiconductores compuestos. El desarrollo de tecnologías transparentes motivó la propuesta del uso de óxidos semiconductores transparentes, pues permite el desarrollo de transistores totalmente transparentes, favoreciendo su uso en aplicaciones ópticas y optoelectrónicas.[5, 6]

En la actualidad ya se han implementado óxidos semiconductores tipo n como capa activa en dispositivos TFT's (Nomura, et al., 2003). Estos materiales han demostrado poseer un buen comportamiento eléctrico, lo que ha permitido un buen desempeño en dispositivos electrónicos y en la electrónica flexible, además de su buena estabilidad para el diseño de dispositivos asociados más complejos. En contraparte, la falta de materiales semiconductores tipo p con buena conductividad y propiedades eléctricas ha retrasado el uso de estos en aplicaciones prácticas, es decir, en dispositivos que posean un menor poder de operación pero una menor degradación en el rendimiento del dispositivo. En consecuencia, uno de los objetivos de la electrónica transparente es mejorar las propiedades conductoras de los óxidos tipo p para promover su implementación. En 2008 Yoichi Ogo, et al. implementaron el uso de óxido de estaño ( $\text{SnO}$ ) tipo p en transistores de película delgada, en estos se lograron movilidades de efecto campo a temperatura ambiente de  $1.3\text{ cm}^2/\text{Vs}$  y una razón de corriente de encendido apagado de  $10^2$ .

El principal reto en la comercialización de este tipo de dispositivos ha sido la fabricación de los mismos, puesto que al miniaturizar los dispositivos asociados, es necesario desarrollar técnicas que permitan la construcción de estos dispositivos a escalas micro y nanométricas. El surgimiento de nuevas técnicas de síntesis de materiales ha permi-

tido tener un mayor control del crecimiento de las películas delgadas, esto se traduce en una mejora en las propiedades eléctricas de los transistores. La implementación de mejoras en el control de crecimiento de películas delgadas repercute directamente en las movilidades de los portadores de carga a temperatura ambiente, tal como lo muestra Guzmán Caballero, et al. (2018), quienes al llevar un control de la dirección cristalina del crecimiento del semiconductor obtuvieron movilidades de hasta  $2.64 \text{ cm}^2/Vs$  a una misma razón de corriente de encendido-apagado, demostrando que puede mejorarse la respuesta del transistor con el control de crecimiento de las películas delgadas de los componentes activos. [7, 8, 9]

En la búsqueda de técnicas que permitan la miniaturización de transistores, surge la implementación de técnicas de nanofabricación, donde se comprenden procesos diseñados para manufacturar elementos o dispositivos con estructuras de dimensiones micro y nanométricas. Las técnicas de nanofabricación utilizadas en la manufactura de dispositivos semiconductores pueden dividirse en técnicas de aproximación bottom-up y top-down, las cuales hacen referencia al modo en el que se llega a la estructura deseada, ya sea partiendo del material en bulto o construyendo el material a partir de unidades estructurales, ambos procesos están señalados en la figura 1.3.

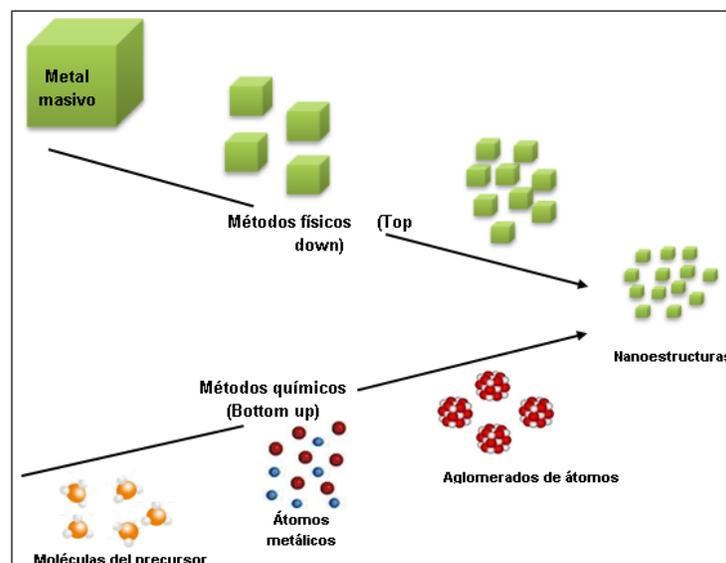


Figura 1.3: Síntesis de nanomateriales. [17]

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. En este proceso se hace uso de una fotomáscara, la cual es una plantilla que contiene el patrón que se quiere transferir, esta se coloca sobre una capa protectora 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 en la figura 1.4. Una vez que se grabó el patrón, se retira la capa protectora y el material es decapado para lograr la geometría deseada, por lo que es intuitivo inferir que el proceso de decapado es un paso crucial en la fabricación de los microdispositivos.

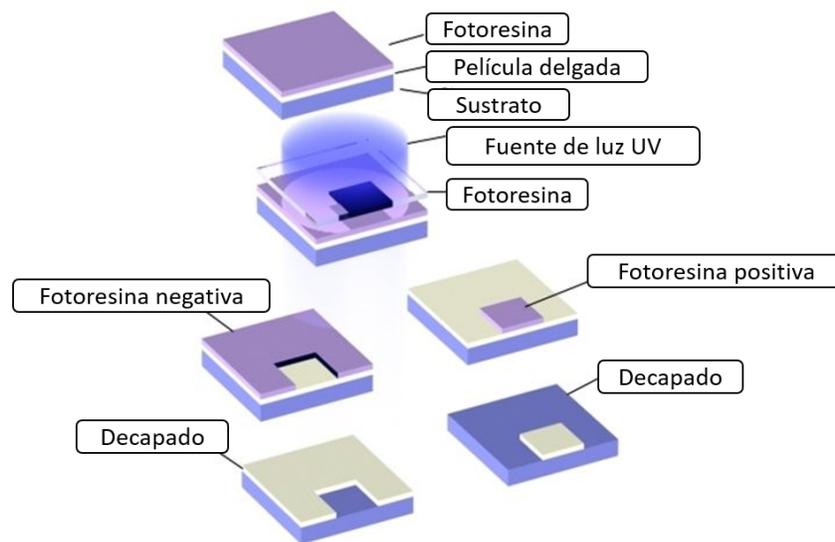


Figura 1.4: Proceso para transferencia de patrones usando fotolitografía

El decapado de los materiales puede realizarse por medio de dos métodos: decapado húmedo y decapado seco. El decapado húmedo, consiste en la remoción del material por medio de reacciones químicas, mientras que el decapado 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) ha optado por hacer

uso de decapados secos, esto debido a la gran resolución que puede obtenerse, sin embargo, representa una técnica con costos más elevados, poca selectividad, requiere el uso de vacío e implica el uso de gases que pueden resultar nocivos para la salud, por lo que implementar técnicas de decapado húmedo para la microfabricación mejoraría la selectividad de los materiales, incrementaría las razones de decapado y disminuiría en gran medida los costos de producción.

Debido al tamaño de los dispositivos y a las características de esta técnica, el ambiente de fabricación de estos microdispositivos necesariamente debe estar controlado, 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.[10, 11, 12, 13] En el 2014 se aprobó la implementación del Laboratorio Nacional de Nanofabricación en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM, mostrado en la figura 1.5, 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.[14]



Figura 1.5: Laboratorio Nacional de Nanofabricación.

### 1.0.1. Objetivos

#### Objetivo general

Fabricar y caracterizar microtransistores transparentes tipo p de películas delgadas a bajas temperaturas basados en películas delgadas de SnO como semiconductor activo.

#### Objetivos específicos

- Depositar películas delgas de ITO por la técnica de pulverización catódica con propiedades eléctricas típicas de un material conductor.
- Depositar películas delgadas de SnO por la técnica de pulverización catódica con propiedades típicas de un semiconductor tipo p.
- Depositar películas delgadas de  $Al_2O_3$  por la técnica de depósito por capa atómica con propiedades típicas de un material dieléctrico.
- Desarrollo de la metodología necesaria para decapar vía húmeda las películas de ITO y SnO.
- Realizar fabricación de microtransistores basados en películas delgadas depositadas anteriormente.
- Realizar la caracterización de los dispositivos a través de curvas I-V suministrando diversos voltajes a la compuerta.

### 1.0.2. Hipótesis

Es posible llevar a cabo la fabricación de transistores transparentes de película delgada tipo p, utilizando SnO como óxido semiconductor, implementando únicamente el

uso de decapados húmedos para la definición de la geometría de sus componentes activos, lo que generaría una disminución en los costos de producción de los dispositivos semiconductores transparentes.

# Capítulo 2

## Marco teórico

### 2.1. Nanotecnología

La nanotecnología se ha caracterizado por ser un área de investigación versátil y con un futuro prometedor. Esta tiene el objetivo principal de controlar la estructura y el comportamiento de la materia a un nivel atómico y molecular, lo cual ha permitido al ser humano una mejor comprensión de los fenómenos físicos a estas escalas y el descubrimiento de ciertas propiedades con potenciales aplicaciones. Las aplicaciones desarrolladas a partir de esta rama tecnológica son cada vez más tangibles y su impacto en la sociedad cada día es más notorio.[16]

#### 2.1.1. ¿Qué es la Nanotecnología?

La palabra nanotecnología deriva del prefijo griego "nano", cuyo significado es enano. En términos científicos se define como la milmillonésima parte de un metro, de manera que se comprende como nanotecnología a aquellas actividades científicas y tecnológicas que se llevan a cabo en el rango de uno a cien nanómetros (tal como se muestra en la figura 2.1). El término nanotecnología es relativamente nuevo, empero, dispositivos y estructuras de estas dimensiones han existido en la Tierra desde su creación. No se tiene un dato claro acerca de la fecha en la que el ser humano comenzó a utilizar materiales de dimensiones nanométricas, sin embargo, existe evidencia de

la presencia de estos en vitrales de la Edad Media o pinturas de las antiguas comunidades mayas. [1, 16]

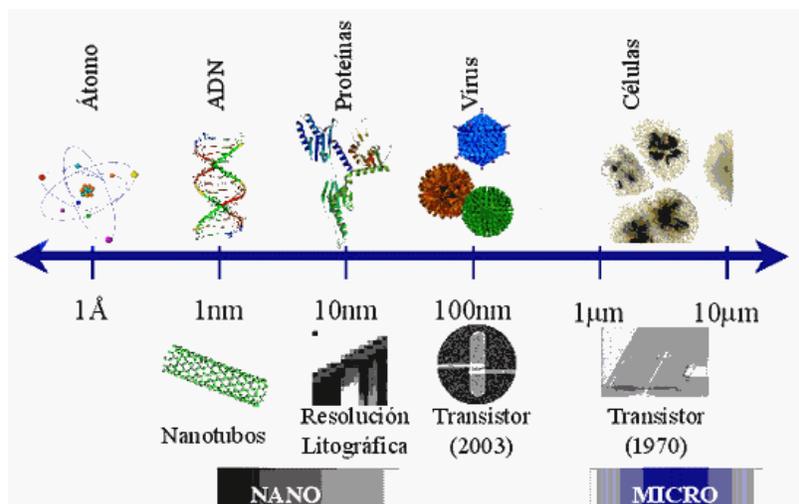


Figura 2.1: Esquema de la diferencia entre las escalas micro y nanométrica.[17]

### 2.1.2. Nanomateriales

Existen un sinnúmero de materiales con dimensiones englobadas dentro del rango de uno a cien nanómetros, cada uno posee características específicas y diferenciadas, por lo que pueden ser clasificados de múltiples formas, una de las más comunes es de acuerdo al número de dimensiones que presentan. De acuerdo a esta clasificación se establecen cuatro categorías, nanomateriales 0D, 1D, 2D y 3D, señalados en la figura 2.2. A través de esta nomenclatura se indica el número de dimensiones de la nanoestructura.[19, 20]

#### Nanomateriales 0D

Los nanomateriales con estructura 0D son considerados el bloque de construcción más simple a partir del cual se puede diseñar un material. Al hablar de un material 0D se hace referencia a los materiales que poseen sus tres dimensiones dentro del régimen nanométrico y que además poseen diámetros menores a los 100 nm. Dentro de este

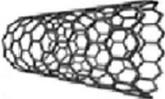
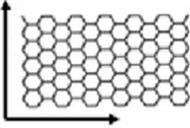
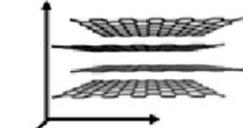
0D	1D	2D	3D
 <b>Fulereo</b>	 <b>Nanotubo de carbono</b>	 <b>Grafeno</b>	 <b>Grafito</b>

Figura 2.2: Clasificación y ejemplos de nanomateriales. [18]

grupo se engloban materiales como las nanopartículas, nanocristales o nanoclusters. Generalmente se acuña el término de nanopartícula a todas aquellas estructuras 0D (sin importar la morfología), de modo que una nanopartícula puede tener carácter metálico, óxido o semiconductor. Sin embargo, una definición más específica es la de una estructura sólida amorfa o semicristalina cuyo tamaño oscila entre los 10 y 100 nm, a comparación de los nanoclusters que se definen como estructuras amorfas o semicristalinas cuyo tamaño se encuentra entre uno y diez nanómetros. [19]

### Nanomateriales 1D

Los materiales 1D o también conocidos como monodimensionales, poseen dos de sus dimensiones por debajo de los 100 nanómetros, por lo general se trata de materiales que poseen una longitud variable. Dentro de este tipo de estructuras se encuentran los nanotubos y nanohilos. Se entiende como nanotubo una estructura tubular con diámetros menores a los 100 nm y que poseen longitudes de hasta un par de micras, este tipo de estructuras se caracterizan por sus buenas propiedades mecánicas. Los nanotubos más estudiados han sido los nanotubos de carbono, sin embargo, también se han obtenido nanotubos a partir de materiales inorgánicos. Por otro lado un nanohilo es una estructura cristalina alargada que de manera similar al nanotubo posee diámetros por debajo de los 100 nm. Actualmente se han obtenido nanohilos de diversos materiales metálicos, óxidos y semiconductores que han generado interés en el mundo científico por sus potenciales aplicaciones en optoelectrónica, nanoelectrónica y sensores.[19]

## Nanomateriales 2D

Dentro de los materiales 2D o bidimensionales, se encuentran las capas finas de material con grosores que no superan los 100 nm. En este rubro se encuentran las películas delgadas, las cuales han tenido un gran impacto en áreas de desarrollo de materiales y tecnología. Sus principales aplicaciones se centran en recubrimientos o en áreas de fotoelectrónica y optoelectrónica. [19]

## 2.2. Películas delgadas

Se entiende como película delgada a los materiales 2D o bidimensionales con espesores menores a un par de micras, para ser consideradas nanomateriales su espesor cae dentro del régimen nanométrico. Generalmente, las películas son depositadas sobre un sustrato y dependiendo de su aplicación es como se realiza la síntesis del nanomaterial. Las películas delgadas pueden ser de cualquier tipo de material, ya sean óxidos, metales e incluso sustancias orgánicas. Una de las principales ventajas de las películas delgadas es que al poseer dimensiones tan pequeñas pueden despreciarse algunos de los efectos físicos. Se considera que la utilidad de una película delgada es mayor cuando posee ciertas características, tales como: químicamente estable en su entorno de operación, que posea buena adhesión al sustrato, que tenga un espesor uniforme con composición química controlada y en la mayoría de los casos una baja densidad de imperfecciones.

La importancia de las películas delgadas radica en su amplio uso, teniendo mayor impacto en la industria electrónica y optoelectrónica, desarrollo de fotónica o incluso en la implementación de recubrimientos.[18, 20, 21]

### 2.2.1. Métodos de síntesis de películas delgadas

Las aplicaciones en el uso de películas delgadas han ido creciendo a la par del desarrollo de nuevas tecnologías, con ello, el abanico de posibilidades para la formación de películas delgadas se ha elevado y mejorado. Los métodos de síntesis de este tipo

de materiales bidimensionales pueden clasificarse de diversas maneras, una de las más conocidas es de acuerdo a las características del método, por lo que se conocen métodos químicos y físicos.

Tanto los métodos físicos, como los métodos químicos involucran la formación de un vapor del material a depositar que se condensa en la superficie deseada. En el caso de los procesos físicos este vapor se genera a través del calentamiento (evaporación) o por el bombardeo de iones energéticos, por otro lado, los procesos químicos involucran la formación del vapor a partir de precursores que propician una reacción y dan origen al material deseado. Entre las técnicas más populares de crecimiento y depósito de películas delgadas están: depósito por capa atómica, pulverización catódica, ablación láser, evaporación térmica o depósito químico en fase vapor. A continuación se hará una breve descripción de algunas de estas técnicas.[22]

### 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. Esta consiste en erosionar el material de un blanco (sólido) por medio del ataque con iones energéticos que generan la vaporización del material, el material al ser vaporizado establece un flujo de átomos que viajan hacia un sustrato, logrando el depósito de capas finas del material, tal como se muestra en la figura 2.3.[22, 23]

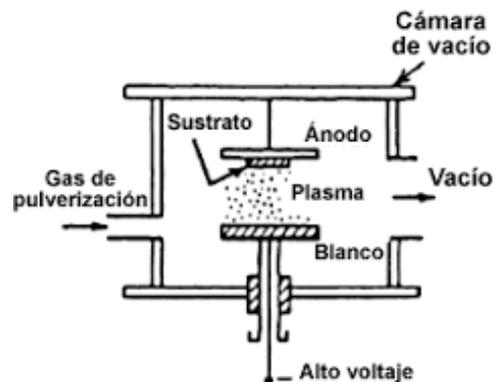


Figura 2.3: Dibujo de técnica de pulverización catódica.

### Depósito por capa atómica. [23]

El depósito por capa atómica mejor conocido como ALD por sus siglas en inglés (Atomic Layer Deposition), es una técnica química que basa su principio en las reacciones entre vapores químicos. En esta técnica se utilizan precursores en fase gaseosa que son expuestos con el fin de crear monocapas. Se trata de una técnica atractiva por el grado de control que puede tenerse al realizar el depósito capa por capa. Esta técnica consta de cuatro pasos (señalados en la figura 2.4) que se repiten un número finito de veces (dependiendo de la tasa de depósito del material y del grosor deseado). Primeramente se expone el primer precursor, el cual se absorbe sobre la superficie del sustrato, posteriormente se hace una purga en el sistema con algún gas inerte para limpiar los residuos del precursor, se expone el segundo precursor el cual reacciona con la capa del primer precursor y finalmente, se hace una segunda purga para expulsar los excesos de los precursores y los subproductos, logrando la formación de una monocapa del material. [22, 24, 25]

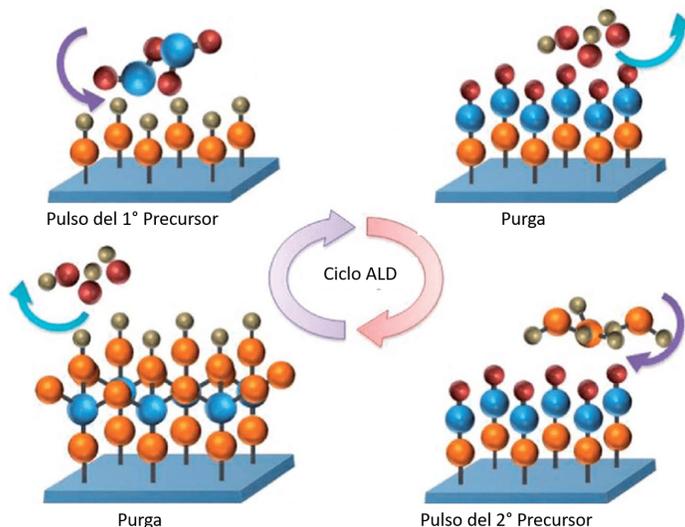


Figura 2.4: Proceso de depósito por capa atómica.[48]

### 2.2.2. Caracterización de películas delgadas

Una actividad primordial en la síntesis de materiales es la caracterización de los

mismos con el fin de conocer su composición química, estructura cristalina, propiedades ópticas, eléctricas y mecánicas. Suele haber una correlación entre los factores involucrados en el método de depósito y las propiedades obtenidas, lo cual permitirá modular dichas propiedades para ser ajustadas a las características convenientes.

### Elipsometría

La elipsometría es una técnica de caracterización que permite determinar algunas de las propiedades ópticas de superficies y recubrimientos de medios a partir del cambio en la polarización de la luz al interactuar con el material. En la figura 2.5 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 analizar 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.[33]

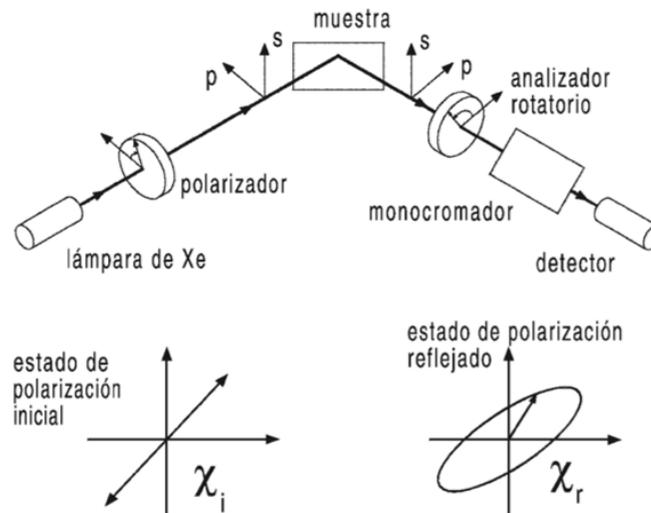


Figura 2.5: Esquema del arreglo experimental utilizado realizar análisis por elipsometría. [33]

Esta técnica permite medir algunos parámetros elipsométricos, los cuales no brindan información directa de las propiedades del material, para ello 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 medir.

### **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 principio de operación se resume en el bombardeo de fotones con energías  $h\nu$  a la superficie de la muestra, lo que propicia (por efecto fotoeléctrico) la emisión de fotoelectrones con energías características. 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 todos los elementos presentes (con concentraciones mayores a 0.1 %), determinación cuantitativa de la superficie del material y obtención de información acerca del entorno molecular. Al incidir un fotón sobre un átomo puede ocurrir tres eventos: que lo atraviese sin interactuar 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 esta 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. [34]

## Efecto Hall

En el campo de la fabricación de dispositivos semiconductores es necesario cuantificar las propiedades eléctricas de los materiales a utilizar, tales como: conductividad, resistividad y la concentración de los portadores de carga. Para llevar a cabo un análisis de los portadores se hace uso del efecto Hall, este 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 2.6), esto genera una acumulación de portadores en uno de los extremos del material.

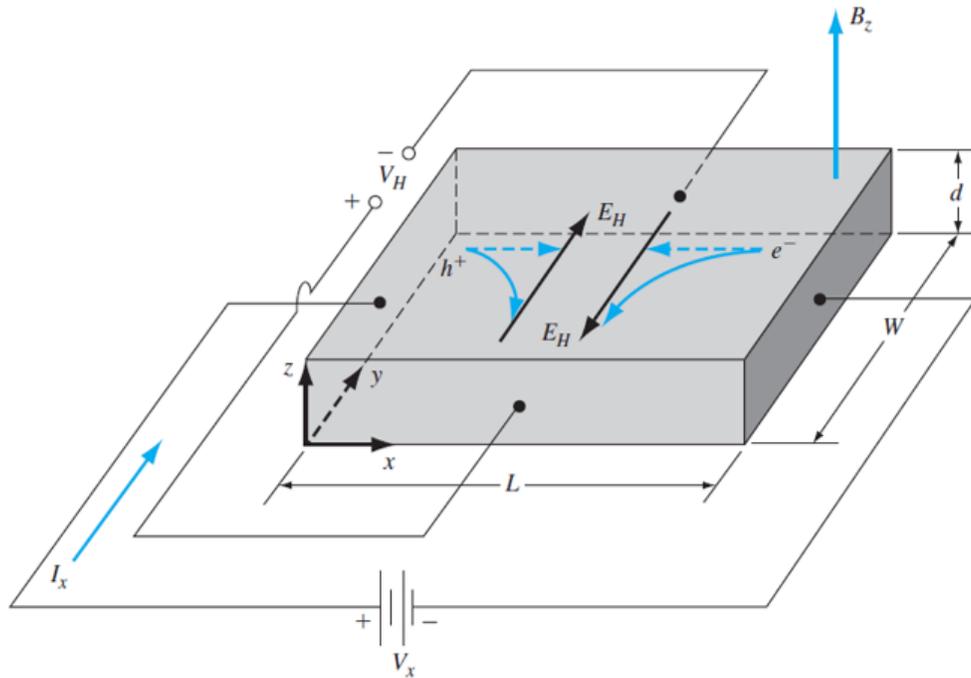


Figura 2.6: Fenómeno sucedido en una medición por efecto Hall. [28]

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 ecuación 2.1.

$$V_H = \left( \frac{I_x B_z}{epd} \right) \quad (2.1)$$

Donde  $I_x$  es la corriente suministrada,  $Bz$  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 los tipo, serán huecos) y  $d$  el grosor del material. A partir de estas relaciones puede determinarse algunas de las propiedades eléctricas del material.[26]

### 2.2.3. Aplicaciones de las películas delgadas

Las aplicaciones prácticas de las películas delgadas cubren diversas áreas de la vida humana, teniendo un papel importante en el recubrimientos de superficies duras, recubrimiento ópticos, películas magnéticas para analizar datos, dispositivos ópticos de almacenamiento de datos. Actualmente las películas delgadas son la base de los componentes electrónicos y pantallas planas.

La mayoría de los dispositivos fabricados en la actualidad, en cualquier rama (óptica, energía, electrónica) en algún momento de su fabricación hacen uso de apilamientos de materiales sólidos con espesores no mayores a una micra, pueden llegar a tenerse apilamientos de varias capas, conocidos como "multicapas" dependiendo de la aplicación. De manera general, las películas delgadas poseen dos aplicaciones importantes, la primera de ellas es que son empleadas para optimizar las propiedades de los sustratos que recubren y la segunda es para la fabricación de dispositivos con propiedades específicas, como es el caso de componentes electrónicos (capacitores, transistores o diodos).[26, 27]

## 2.3. Dispositivos semiconductores

La electrónica actual posee sus elementos fundamentales en los dispositivos semiconductores, los cuales como su nombre lo indica se basan en las propiedades semiconductoras de algunos materiales. Los dispositivos semiconductores fueron el elemento que permitió reemplazar la tecnología termoiónica. Dentro de esta clasificación se encuentran los diodos, los diversos tipos de transistores y las fotoresistencias.

### 2.3.1. Semiconductores

Los materiales pueden clasificarse, desde el punto de vista eléctrico, como aislantes, conductores y semiconductores. Esta clasificación depende de la estructura electrónica de cada material. Al considerar un gran número de átomos el número de orbitales de valencia es elevado y la diferencia entre los niveles de energía entre ellos es pequeña, de manera que como se muestra en la figura 2.7 estos niveles forman bandas continuas en vez de niveles discretos de energía, al no tenerse orbitales dentro de ciertos niveles de energía esto produce un espaciamiento entre las bandas, conocido como brecha de banda prohibida. Las bandas que se generan se conocen como banda de valencia y banda de conducción, la primera de ellas está ocupada por los electrones que se encuentran en la última capa de cada átomo, mientras que en la banda de conducción se encuentran los electrones libres que se han desligado del átomo y pueden moverse con facilidad para promover la conducción en un material.[28]

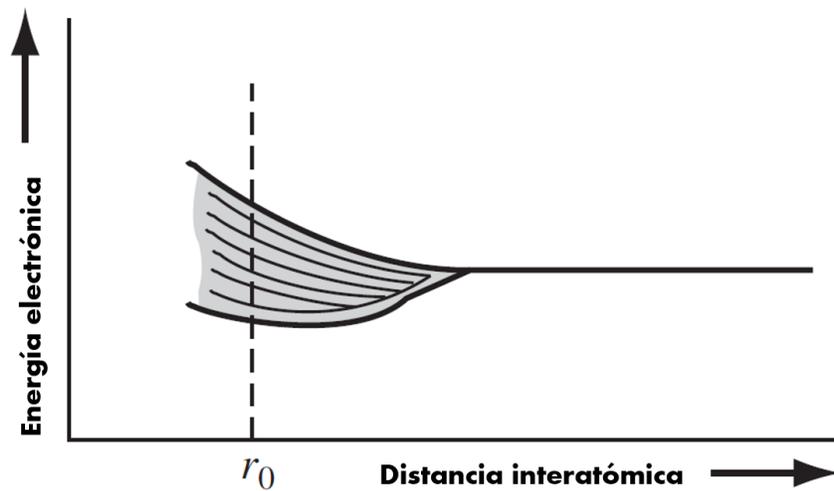


Figura 2.7: Separación de bandas. [28]

Los materiales conductores se caracterizan por tener una superposición entre la banda de valencia y la banda de conducción, tal como se muestra en la figura 2.8 (a), de manera que los electrones se mueven libres a lo largo del material. Un material aislante posee un espaciamiento entre sus bandas mayor a los 4 eV, por lo tanto

necesita el suministro de grandes cantidades de energía para que los electrones de la banda de valencia tengan la suficiente energía para pasar a la banda de conducción y comportarse como electrones libres por lo que la conductividad de estos materiales es muy baja y poseen altas resistividades. Finalmente, un material semiconductor es un material que posee una brecha de banda prohibida que va de 1 a los 4 eV, de manera que al administrarse energía o someterse a un campo eléctrico los electrones de la banda de valencia pueden ganar energía y moverse a estados de energía mayores, es decir, a la banda de conducción, permitiendo que los electrones se muevan a lo largo del cristal. La resistividad de este tipo de materiales puede modularse en varios órdenes de magnitud.

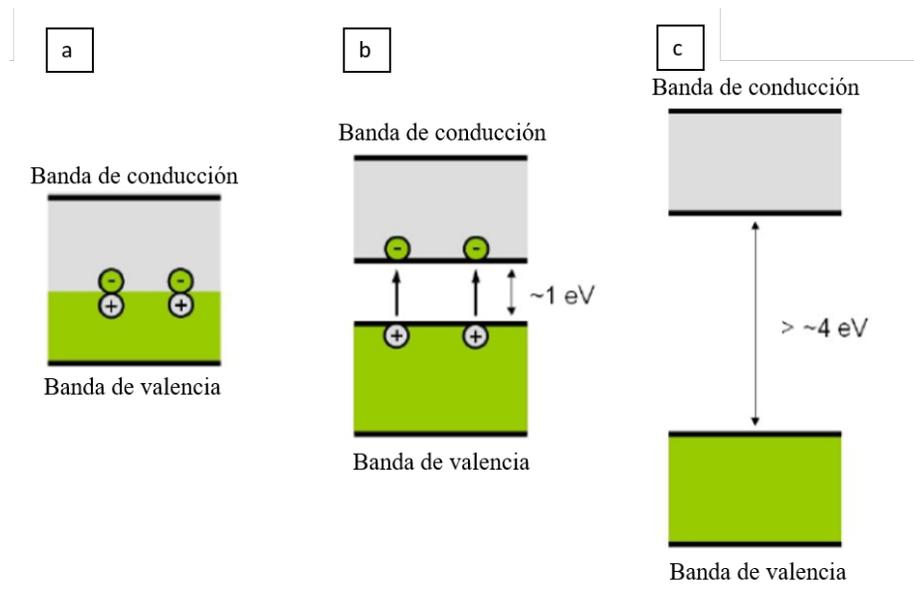


Figura 2.8: Clasificación de los materiales desde el punto de vista eléctrico.

Los semiconductores más conocidos son el silicio y el germanio, estos se conocen como semiconductores intrínsecos, es decir, que se encuentran en su estado puro y no han sido dopados con impurezas, estos poseen una brecha de banda prohibida de 1.17 y 0.74 eV respectivamente, la cual los hace atractivos para aplicaciones electrónicas. Sin embargo, la búsqueda de semiconductores compuestos en los que se pueda modular la brecha de banda prohibida ha permitido el surgimiento de nuevos materiales con

características determinadas, tal es el caso de los óxidos semiconductores, los cuales presentan gran interés en aplicaciones de electrónica flexible. [28]

### Óxidos semiconductores: óxido de estaño

Los óxidos semiconductores actualmente juegan un papel importante en las aplicaciones de dispositivos semiconductores, debido a la gran masa efectiva de huecos en estos materiales. La mayoría de estos se caracterizan por ser de tipo n y es necesario promover los semiconductores tipo p para mejorar el rendimiento de los dispositivos. El óxido de estaño es uno de los materiales que ha generado mayor interés para ser utilizado en diversas aplicaciones debido a que es transparente, puede presentar altos valores de movilidad. El óxido de estaño se encuentra en dos tipos de fases cristalinas: estructura tipo rutilo (ver figura 2.9 b) , presente en el dióxido de estaño ( $SnO_2$ ) (ver figura 2.9 a) y la estructura tetragonal presente en el monóxido de estaño (SnO).[7, 35, 36]

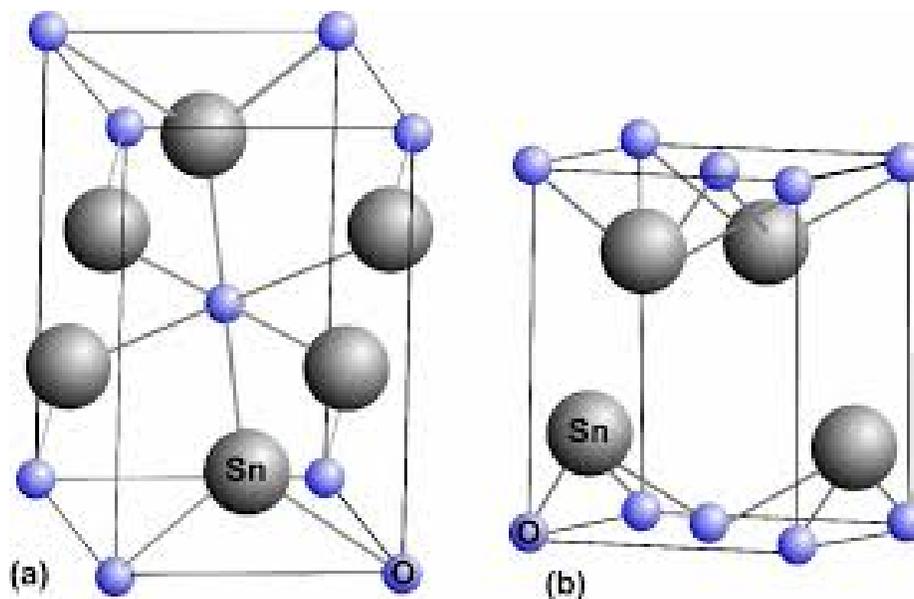


Figura 2.9: Estructuras del SnO: a) Tipo rutilo. b) Tetragonal. [36]

En el campo de la electrónica flexible el interés se centra en obtener películas delgadas tipo p para promover su uso como dispositivos semiconductores complementarios

con altas movilidades. Se ha demostrado que pueden obtenerse películas delgadas de SnO tipo p por medio del dopaje con átomos de elementos que posean cationes de valencia más bajos, como el indio, manganeso, aluminio zinc. En estudios recientes se ha sugerido que la conductividad tipo p del SnO se debe a las vacancias de oxígeno en la estructura del cristal y esta puede modularse por medio de los flujos de gases suministrados durante la síntesis del material. [36] Típicamente se reportan bandas de brecha prohibida que rondan los 2.5 y 3.5 eV para el SnO, sin embargo las propiedades físicas y eléctricas del material no han sido estudiadas detalladamente.

### 2.3.2. Transistores

Los transistores se convirtieron en la unidad básica de funcionamiento de la electrónica actual, permitieron la miniaturización de los sistemas y la reducción en gran medida de las pérdidas de calor de los equipos en los que se implementaron. Estos dispositivos superaron cualquier previsión tecnológica que se tenía hasta los años 50's, permitieron la construcción de circuitos integrados para lograr el funcionamiento de microprocesadores y los ordenadores actuales. Las funciones de un transistor pueden resumirse en: elemento amplificador de señales y dispositivo que permite el corte o paso de corrientes eléctricas a partir de pequeñas señales de control.

Los transistores se clasifican en dos unidades básicas, los transistores bipolares (BJT), que constan de uniones de semiconductores NPN o PNP y los transistores de efecto campo (FET), donde la señal de entrada crea un campo eléctrico que controla el paso de la corriente a través del dispositivo.

#### Transistores de Efecto Campo

Los transistores de efecto campo presentan un gran número de ventajas comparados con los transistores bipolares, este tipo de transistores presenta una alta impedancia de entrada por lo que la potencia requerida es mucho menor, esta característica ha motivado su implementación en diversas aplicaciones, convirtiéndose en el principal dispositivo utilizado en circuitos integrados.

Existen dos grandes clases de transistores de efecto campo: los transistores de efecto campo con arquitectura de metal, óxido y semiconductor (MOSFET) y el transistor de campo de unión (JFET). El transistor MOSFET propició la segunda revolución electrónica en el período de los años 70's puesto que permitió el desarrollo de microprocesadores con diseños más sofisticados y derivó en un incremento en el poder de cálculo en las computadoras de la época. Los transistores MOSFET poseen la característica de ser elementos pequeños, lo que confiere la posibilidad de tener una alta densidad de elementos en un área muy pequeña. Por otro lado, los transistores JFET se tienen interfases pn o en su caso uniones de barrera Schottky que dan paso a uniones de metal-semiconductor (MESFET's) utilizados en aplicaciones que requieren una alta velocidad de funcionamiento y el uso de frecuencias altas (orden kHz).[28]

### **Transistores MOSFET**

Un transistor MOSFET se caracteriza por su estructura metal-óxido-semiconductor, este tipo de dispositivos permite la modulación de la corriente a través de la aplicación de un campo eléctrico perpendicular a la superficie del transistor y a la dirección de la corriente que circula por el mismo, a este fenómeno se le conoce como efecto campo (FE por sus siglas en inglés).

Los fundamentos físicos detrás de este dispositivo pueden explicarse de una manera más sencilla haciendo una comparación con un capacitor de placas paralelas, donde un material aislante separa las placas. En el caso de un transistor MOSFET se coloca un semiconductor tipo p como sustrato de manera que la compuerta (metal) queda conectada a un voltaje negativo con respecto al semiconductor. De la estructura del capacitor en su polarización directa se sabe que una carga negativa se inducirá en la placa superior y una carga positiva en la placa inferior lo que generará un campo eléctrico. El campo eléctrico generado provoca que los portadores de carga mayoritarios (en este caso huecos) experimenten una fuerza hacia la interfaz óxido-semiconductor, lo que generará una capa de acumulación de huecos, tal como se muestra en la figura 2.10.[28, 29]

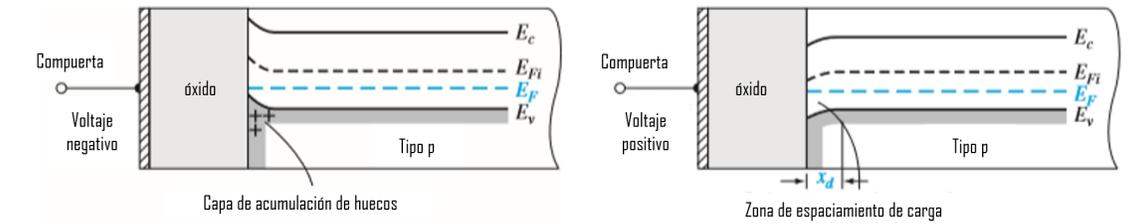


Figura 2.10: Principio de funcionamiento del transistor MOSFET con sustrato tipo p. [28]

Si por el contrario, se polariza el electrodo en su estado inverso (voltaje positivo en la compuerta), los huecos experimentarán una fuerza que los llevará fuera de la interfase óxido-semiconductor que generará una zona de espaciamiento de carga negativa, si se incrementa la magnitud del voltaje aplicado se espera que la zona de espaciamiento de carga crezca hasta que culmine la inversión total de la superficie del semiconductor, de esta manera se crea una capa de inversión de electrones en la interfase óxido-semiconductor. Este fenómeno ocurre de manera contraria al tener un sustrato de tipo n. La corriente se modula al incrementar o reducir esta zona de espaciamiento de carga puesto que modula el paso de electrones a través del dispositivo lo que tiene un impacto directo en la corriente que circula a través del dispositivo.

Un transistor MOSFET esta compuesto por tres electrodos, uno conectado a la fuente, otro al drenador y un último conocido como compuerta, tal como se muestra en la figura 2.11.[29, 30]

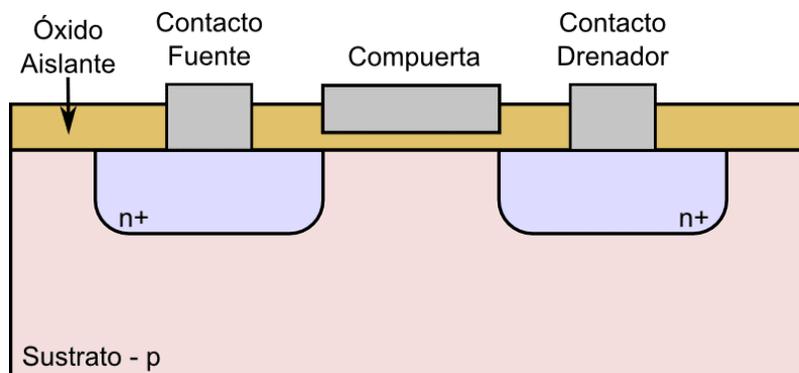


Figura 2.11: Estructura del transistor MOSFET.

Si la fuente y el sustrato se conectan a tierra y el voltaje aplicado a la compuerta alcanza el valor necesario para generar la zona de inversión, bajo la compuerta se forma el canal entre el drenador y la fuente, al existir una diferencia de potencial entre los extremos del canal, los electrones son atraídos por el drenador generando una corriente entre ellos. El voltaje necesario para producir el canal se conoce como voltaje de estrangulamiento ( $V_T$ ) y se especifica como el valor necesario para producir una corriente de 1 a 10  $\mu A$ . Una vez que el voltaje de compuerta alcanza el valor suficiente para formar el canal, es decir, que  $V_{GS} > V_T$ , la corriente del drenador puede expresarse de acuerdo a la ecuación 2.2. [26]

$$i_D = \mu_N C_{OX} \left( \frac{W}{L} \right) [(V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2] \quad (2.2)$$

Donde  $L$  es el largo y  $W$  el ancho del canal,  $\mu_N$  la movilidad de los portadores en el canal y  $C_{OX}$  es la capacitancia por unidad de área del material óxido que separa la compuerta del canal. Cuando la diferencia de potencial entre el drenador y fuente es muy pequeña, la expresión de la corriente puede aproximarse conforme lo señala la ecuación 2.3, a esta zona de funcionamiento se le conoce como zona lineal o resistiva.

$$i_D = \mu_N C_{OX} \left( \frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_T) V_{DS} \quad (2.3)$$

Cuando el voltaje suministrado entre el drenador y la fuente ( $V_{DS}$ ) alcanza el valor de la diferencia entre  $V_{GS}$  y  $V_T$  hay un aumento observable en el voltaje del canal, donde también decrece la densidad de carga promoviendo que la zona de carga espacial se ensanche y exista un estrechamiento del canal inhomogéneo. Este fenómeno es más pronunciado en las zonas más alejadas de la fuente y es conocido como estrangulación del canal. Ocurre cuando el voltaje entre la fuente y el drenador ( $V_{DS}$ ) es mayor a cero e igual a la diferencia de voltaje entre  $V_T$  y el voltaje compuerta-fuente ( $V_{GS}$ ), conforme se aumenta el voltaje  $V_{DS}$  el punto de estrangulación se corre hacia la fuente de manera que si ( $V_{DS}$ ) es mayor o igual a la diferencia entre  $V_{GS}$  y  $V_T$  la corriente del drenador se mantiene constante a pesar de los aumentos en el voltaje suministrado  $V_{DS}$ , llegando a su punto de saturación, durante este fenómeno la corriente en el

drenador puede expresarse de acuerdo a la ecuación 2.4

$$i_D = \frac{1}{2} \mu_N C_{OX} \left( \frac{W}{L} \right) (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2.4)$$

Las tres condiciones de operación se muestran de manera gráfica en la figura 2.12, donde se señala el voltaje aplicado  $V_{DS}$  vs la corriente en el drenador para diferentes  $V_{GS}$ . [28, 29, 30]

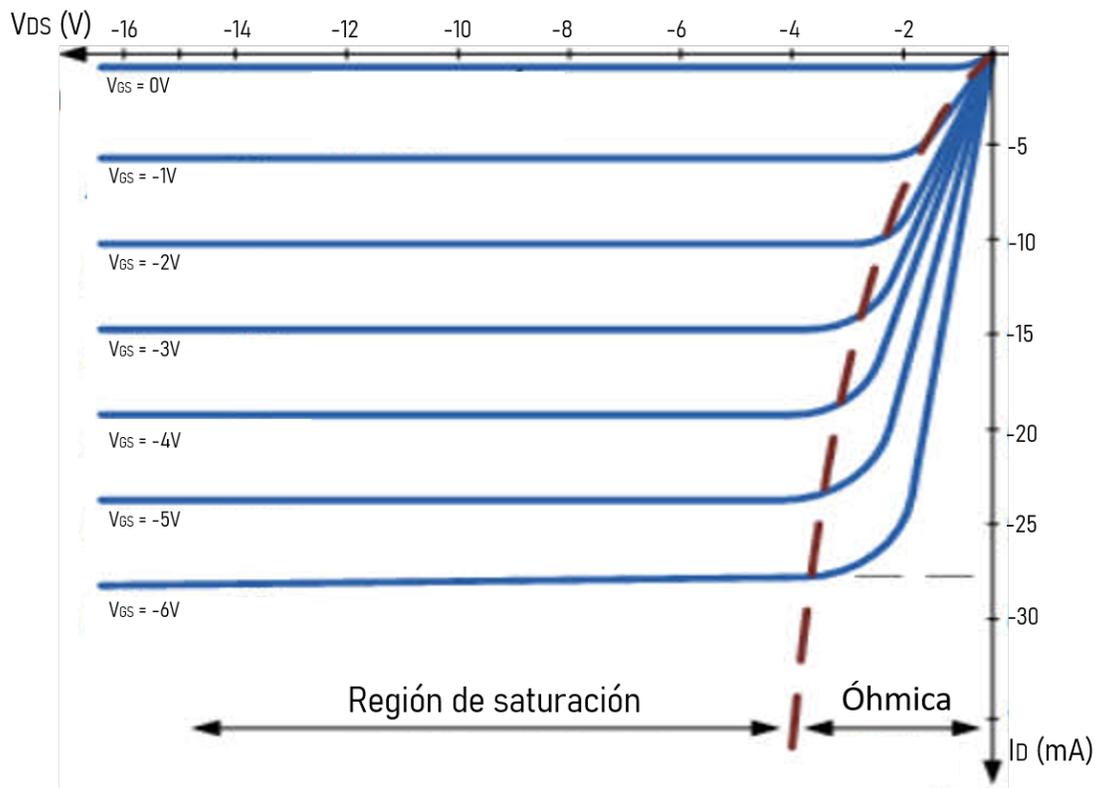


Figura 2.12: Curva I-V transistor MOSFET.

### Transistores de película delgada (TFT's)

Los transistores de película delgada (TFT's) poseen un principio de funcionamiento similar a los transistores MOSFET, sin embargo, su arquitectura es diferente. Se caracterizan por no importar el tipo de sustrato y la posibilidad de poseer un semiconductor policristalino de grano fino, además la fuente y el drenador son formados

por regiones metálicas que tocan el semiconductor. De esta manera el canal es policristalino con las regiones de fuente y drenador de metal, tal como se muestra en la figura 2.13.

Para este caso se tiene que, al someterse a valores bajos negativos de voltaje  $V_{GS}$ , el canal producido tendrá un comportamiento lineal, como en el caso del transistor MOSFET, conforme se aumenta el voltaje  $V_{GS}$  hasta llegar a la zona de estrangulamiento, el canal sufrirá una acumulación de electrones lo que generará un incremento en la conductividad del dispositivo y por lo tanto un incremento en la corriente. La forma de sus curvas características I-V es similar a la de los dispositivos FET con: zonas lineales, de estrangulamiento y la zona de saturación. La principal diferencia entre los transistores MOSFET y los de película delgada radica en el material del sustrato/canal, tal como se muestra en la figura 2.13.[29]

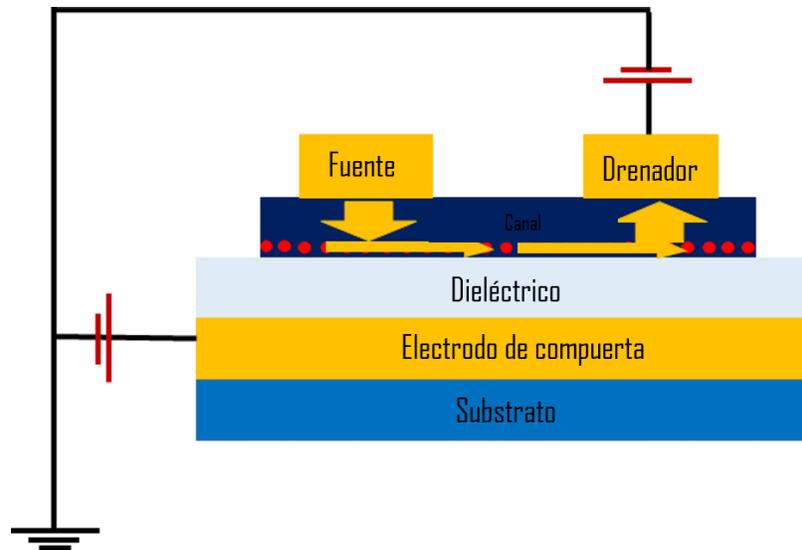


Figura 2.13: Arquitectura transistor TFT.

Este tipo de transistores son utilizados para la visualización de áreas grandes, poseen voltajes umbral mayores a los de los transistores MOSFET convencionales y debido al material del canal poseen movilidades menores, por lo que para generar corrientes apreciables es necesario voltajes  $V_{GS}$  más altos, por lo que los voltajes de trabajo serán más altos.[30]

# Capítulo 3

## Metodología

### 3.1. Fabricación del dispositivo

Se realizó la fabricación de un transistor de película delgada tipo p basado en SnO como semiconductor, se hizo uso de la técnica de fotolitografía y de procesos de decapado húmedo. Para el proceso de fabricación se utilizaron vidrios como sustrato del dispositivo, se les depositó óxido de indio dopado con estaño (ITO) para ser utilizado como electrodo inferior, esta película delgada se depositó haciendo uso de la técnica de pulverización catódica con fuente de radiofrecuencia (RF) utilizando una potencia de 70 W con 0 W de potencia reflejada, se trabajó con presiones base en el orden de  $1 \times 10^{-6}$  Torr, se utilizaron 5 s.c.c.m de flujo de argón como gas inerte y se trabajó a una presión parcial de 12 mTorr. El decapado del material se realizó vía húmeda utilizando polvo de zinc y ácido clorhídrico a una concentración del 1 %.

Debido a las características del ITO como película transparente se realizó el depósito cromo por la técnica de pulverización catódica para resaltar las marcas de alineación. Se utilizaron potencias de 70 W a presiones base del orden de  $1 \times 10^{-6}$  Torr y con una presión parcial de 4 mTorr, el decapado del material se realizó vía húmeda con decapante de cromo el cual es un compuesto de ácido perclórico y nitrato de cerio-amonio. Posteriormente, se depositó óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) por medio de la técnica de depósito por capa atómica (ALD) para ser utilizada como película dieléctrica en el dispositivo. Se utilizó el sistema Beneq TFS 200, se realizó el depósito a 200 °C, ha-

ciendo uso de los precursores trimetil-aluminio (TMA) y agua con dosis de 50 ms, se repitió el proceso 160 ciclos para obtener películas de 20 nm. Las películas delgadas de alúmina se decaparon con ácido fosfórico concentrado.

Se depositó el semiconductor (SnO) por la técnica de pulverización catódica, utilizando una presión parcial de oxígeno del 9.5%. respectivamente. Se realizó el depósito a una presión de 1.6 mTorr con una potencia de 30 W, se realizó el recocido de la película a 180°C durante 30 minutos. El decapado de la película de SnO se llevó a cabo siguiendo el mismo procedimiento utilizado para las películas de ITO.

El dispositivo se recubrió con poli(p-xilileno), mejor conocido como parileno, para la protección de sus componentes activos. El proceso se llevó a cabo en el equipo Labcoater 2010 a una temperatura ambiente con 260 mg de Parileno C, el parileno se decapó usando plasma de oxígeno con un flujo de 30 cc/min y una potencia de 50 W.

Finalmente se hizo el depósito de titanio para ser utilizado como electródo superior, el proceso se realizó por la técnica de pulverización catódica a 50 W con 5 s.c.c.m de flujo de argón y una presión de trabajo de 5 mTorr. El decapado de este material se realizó vía seca utilizando plasma de tetrafluoroetano ( $CF_4$ ). El esquema general del dispositivo se muestra en la figura 3.1.

Para el proceso de fotolitografía utilizado en cada etapa de la fabricación del dispositivo se utilizó fotoresina positiva, para llevar a cabo la transferencia y alineación de las máscaras se hizo el recubrimiento de la película con fotoresina por medio de la técnica denominada spin coating, esta película se secó a 100°C durante un minuto. Para la transferencia y/o alineación se utilizó el equipo MIDAS MDA-400M, en el modo de contacto por vacío, la lámpara utilizada posee una longitud de onda de 365 nm, se utilizó con una potencia de 300 W y con una intensidad oscilante entre los 13.5 y 14.5. La figura 3.2 muestra un esquema de la geometría final del transistor.

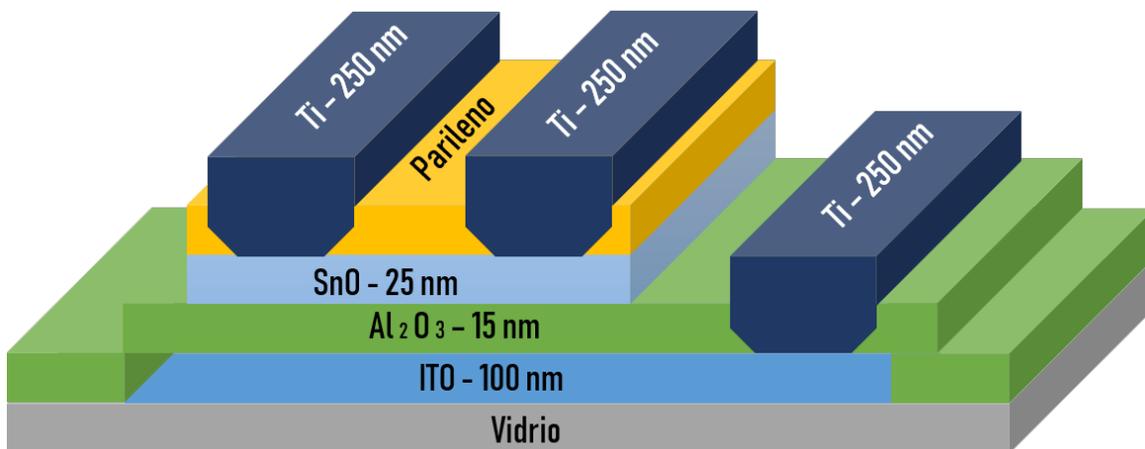


Figura 3.1: Esquema del transistor de película delgada basado en SnO.

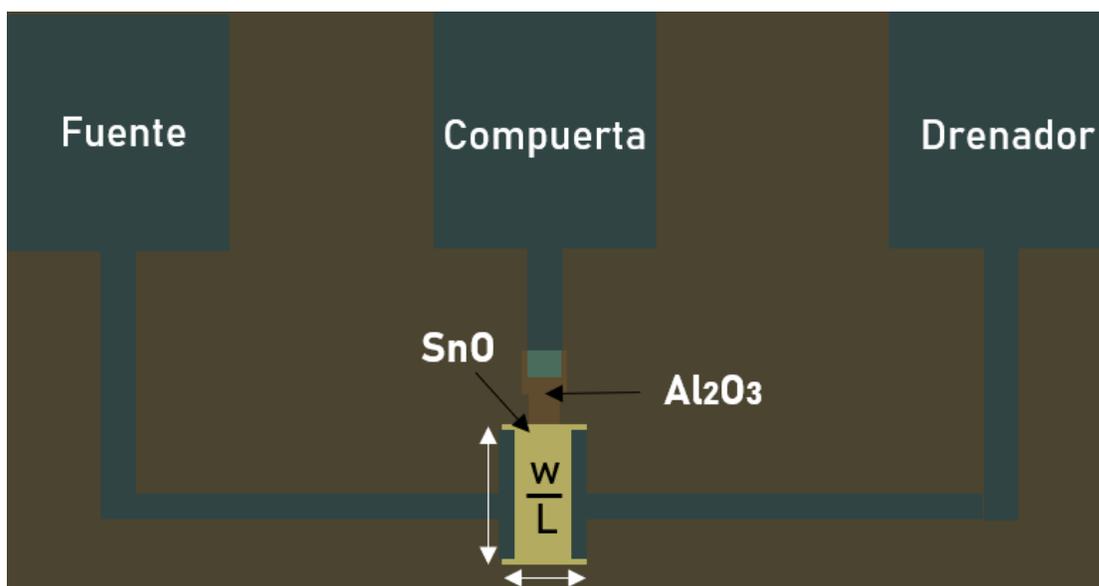


Figura 3.2: Esquema del transistor fabricado en este trabajo.

### 3.2. Caracterización del dispositivo

Las películas de SnO e ITO se caracterizaron a través del equipo de efecto Hall, mientras que, la caracterización de los dispositivos resultantes se realizó con la medición de curvas IV, se midió la corriente en el electródo drenador al incrementar

la diferencia de potencial entre el drenador y la fuente a diferentes voltajes entre compuerta y fuente. Para ello se hizo uso del arreglo experimental mostrado en la figura 3.3, 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 hizo un barrido de voltaje en el drenador de los 0 a los 6 V y se tomó la medición I-V suministrando 0, 1, 2 y 3 V en el electrodo compuerta.



Figura 3.3: Arreglo experimental para mediciones eléctricas.

# Capítulo 4

## Resultados

### 4.0.1. Películas delgadas de ITO

#### Depósito de ITO

Se determinaron las condiciones óptimas para el crecimiento de películas delgadas de ITO, de acuerdo a las condiciones citadas anteriormente se determinó una razón de crecimiento de  $89.92 \pm 3.02$  nm/min. El objetivo de la película es ser utilizada como electrodo debido a sus propiedades ópticas y eléctricas, por lo que se busca que el material posea una alta conductividad. Sreenivas, et al. (1990) afirman que el uso de este óxido conductor permite extender la vida de los dispositivos en los que se implementa, a comparación del uso de electrodos metálicos.[37, 38] La tabla 4.1 muestra las propiedades eléctricas obtenidas por mediciones de efecto Hall para el ITO depositado en este trabajo.

<b>Película</b>	<b>Movilidad (<math>cm^2/Vs</math>)</b>	<b>Resistividad (<math>\Omega cm</math>)</b>	<b>Concentración (<math>cm^{-3}</math>)</b>
<b>ITO</b>	$1.549 \times 10^3$	$4.56 \times 10^{-4}$	$-4.785 \times 10^{20}$

Tabla 4.1: Mediciones eléctricas de películas delgadas de ITO.

El ITO se clasifica como un óxido conductor transparente caracterizado por su baja resistividad y una alta transmitancia que lo hacen adecuado para aplicaciones de electrónica flexible, el ITO comercial posee una resistividad del orden de  $2 \times 10^{-4} \Omega cm$ ,

sin embargo las resistividades típicas obtenidas para este material en procesos físicos de depósito se mantiene en el orden de  $4.4 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  [36, 37], valor comparable con el obtenido en este trabajo, por lo que se asume que el óxido conductor transparente cumple con sus propiedades de óxido conductor y puede ser utilizado como electrodo inferior en el dispositivo.

### Decapado de ITO

Se probaron diversas recetas para el decapado de ITO por vía húmeda, la primera de ellas fue haciendo uso de ácido clorhídrico (HCl) concentrado, lográndose una razón de decapado de  $\approx 5.88 \text{ nm/min}$ , valor poco eficiente para el decapado del material. El ITO es un óxido de indio dopado con estaño, por lo tanto, tal como lo señala Cobianu, et al. (2001) para el decapado de  $\text{SnO}_2$ , en el decapado de ITO puede implementarse el uso de polvo de zinc para obtener un decapado más eficiente y uniforme [40, 41], se observó una mejora en la razón de decapado del material, disminuyendo el tiempo de decapado, además de presentar una reacción química visible que permite disminuir las afecciones al dispositivo. Se logró establecer una tasa de decapado de  $13.6 \text{ nm/s}$ .

## 4.0.2. Películas delgadas de SnO

### Depósito de SnO

Se realizó el depósito de  $\approx 37 \text{ nm}$  de SnO bajo las condiciones mencionadas, el propósito del material es ser utilizado como semiconductor, por lo que se busca que al suministrar impurezas de oxígeno, las propiedades eléctricas del material se vean mejoradas. La tabla 4.2 muestra las mediciones de las propiedades eléctricas del material depositado.

Película	Movilidad ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	Resistividad ( $\Omega \text{cm}$ )	Concentración ( $\text{cm}^{-3}$ )
SnO	0.15	25.2	$2.4 \times 10^{18}$

Tabla 4.2: Mediciones eléctricas de películas delgadas del dispositivo.

El óxido de estaño es un óxido semiconductor tipo n que puede modular sus propiedades a partir de las vacancias de oxígeno Caraveo-Frescas, et al. (2013) [7] y Fortunato, et al. (2010) [5] han reportado la obtención de óxido de estaño tipo p al mantener la presión parcial de oxígeno entre el 7 y 10 %, los valores obtenidos para las películas depositadas de SnO no son equiparables a los reportados en la literatura, de acuerdo a los resultados obtenidos por Caraveo-Frescas, et al. (2013) se reportan movilidades de hasta  $18.94 \text{ cm}^2/Vs$  [7], para películas de óxido de estaño tipo p, valor que difiere en gran medida del obtenido durante el depósito, esta disminución de la movilidad podría ser ocasionada por el incremento de impurezas de nitrógeno lo que conllevaría la disminución de vacancias de oxígeno.

A partir de las mediciones por elipsometría se determinó el bandgap del semiconductor, el cual resultó en un valor de 2.79 eV, valor englobado dentro de la definición de un material semiconductor y coincidente con Purbo, et al. (2015) quienes reportan un valor de 2.8 eV para películas de óxido de estaño tipo p depositadas por pulverización catódica DC y condiciones similares a las utilizadas en la fabricación del dispositivo.[43]

Se tomó un espectro XPS de la muestra con un porcentaje de 7.4 % de presión parcial de oxígeno, la figura 4.1 muestra la señal de Sn 3d de la película delgada de SnO antes y después del tratamiento térmico a 180 °C. La señal Sn 3d de la película presenta un desplazamiento del pico principal de 484.8 a 485.9 eV después de someterse al tratamiento térmico. [42]

### **Decapado de SnO**

Se implementó el uso de HCl en bajas concentraciones para el decapado del material, sin embargo, se obtuvieron decapados poco uniformes y con una tasa de decapado alta que impedía parar el proceso de decapado sin afectar la homogeneidad de la película. Se hizo uso del decapado propuesto por Cobianu, et al. (2001) lográndose decapados más uniformes con una razón de decapado de 5.66 nm/s, de tal manera, que el proceso de decapado del material se vio mejorado.[40, 41]

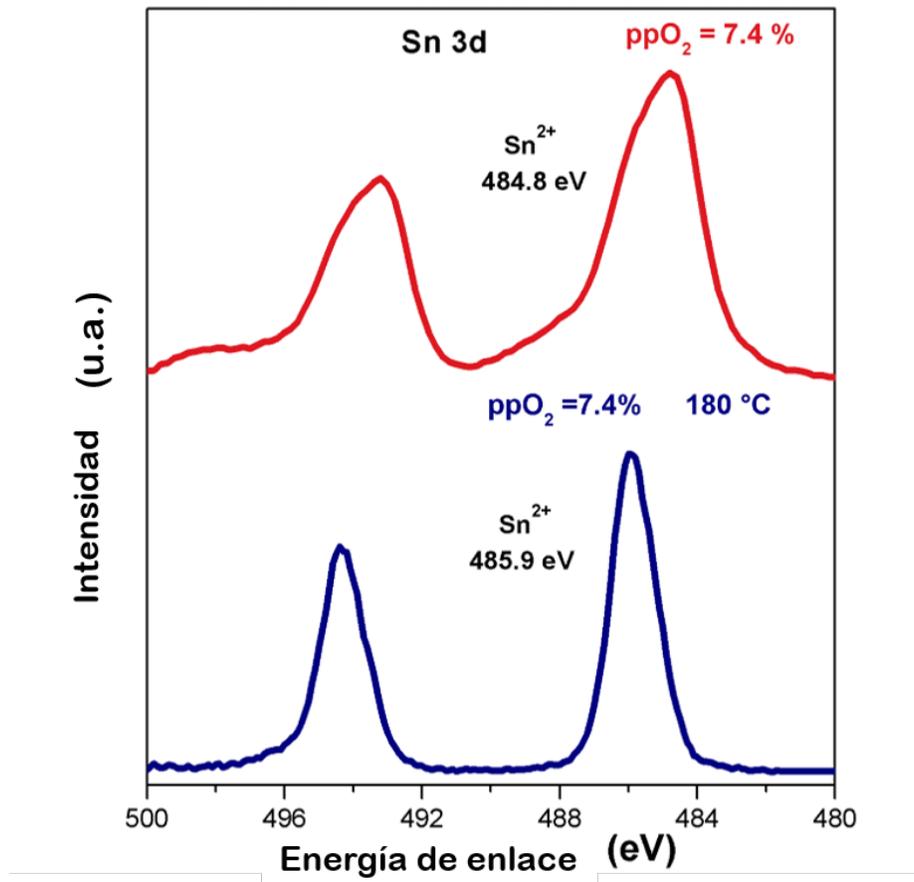


Figura 4.1: Espectro XPS de SnO.

### 4.0.3. Fabricación del dispositivo

La arquitectura de los transistores de película delgada (TFT's) consta de un sustrato aislante, sobre este se coloca una capa del electrodo compuerta y por encima del mismo una capa de algún material dieléctrico, se coloca el semiconductor y sobre este se sitúan los electrodos para la fuente y el drenador. En el caso del dispositivo fabricado el ITO funge como electrodo compuerta, la  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como material dieléctrico, el SnO como semiconductor y el Titanio es utilizado para los electrodos superiores. Cabe destacar que para los dispositivos fabricados, se colocó una película delgada de cromo entre el ITO y el dieléctrico para resaltar las marcas de alineación debido a las características transparentes del material, además de colocarse una capa de Parileno entre el semiconductor y los electrodos para la protección del dispositivo, esta protección puede alargar el tiempo de vida de los dispositivos en un orden de  $10^2$

switcheos.[4, 28]

### Decapado de $Al_2O_3$

El decapado del dieléctrico se realizó vía húmeda, probándose distintas concentraciones de ácido sulfúrico a diferentes temperaturas, tal como lo propone Lee, et al (2004) [44], sin embargo, no se logró el decapado uniforme del material, por lo que se propuso el uso de ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) para el decapado del material[45], se variaron las concentraciones del ácido obteniéndose una razón de decapado máxima de 0.6 nm/min con el ácido concentrado en su estado puro. Se buscó mejorar la eficiencia del proceso al calentar el ácido, sin embargo, no se obtuvieron resultados concluyentes, durante la reacción se produce un burbujeo debido a la liberación de  $H_2$  el cual afecta la homogeneidad del decapado, por lo que el proceso se vio mejorado al interrumpirse cada 30 segundos con un lavado de agua desionizada.

### Decapado de Parileno y Titanio

El Parileno es un polímero conocido por su uso en la protección de circuitos eléctricos, Hartney, et al. (1989)[46] demostraron que el uso de plasma de oxígeno para decapar polímeros es un método eficiente en su uso para procesos de litografía. Para el desarrollo del dispositivo se implementó el decapado seco para el parileno, se logró un decapado homogéneo a lo largo de la superficie de la película, además, se corroboró que se trata de un método eficiente con el que se consiguió una razón de decapado de 37.64 nm/min. De igual manera, se hizo uso del decapado seco para el decapado de la película de Titanio, se ha demostrado la eficiencia de este proceso con gases de fluoruro de carbono ( $CF_4$ ) y Oxígeno [47], sin embargo el proceso se vio favorecido al utilizar exclusivamente  $CF_4$ . No se logró estimar una razón específica para el decapado del material, pero a través de distintos ensayos se determinó el tiempo de decapado óptimo para no incurrir en daños a la transferencia del patrón y posibles afecciones a las películas subyacentes.

## Dispositivos

La figura 4.2 muestra una imagen de los dispositivos obtenidos, en la figura 4.2 a) se muestra un panorama general de los dispositivos fabricados y la figura 4.2 b) muestra la geometría del dispositivo correspondiente a una relación de ancho-largo de 80/20  $\mu\text{m}$ .

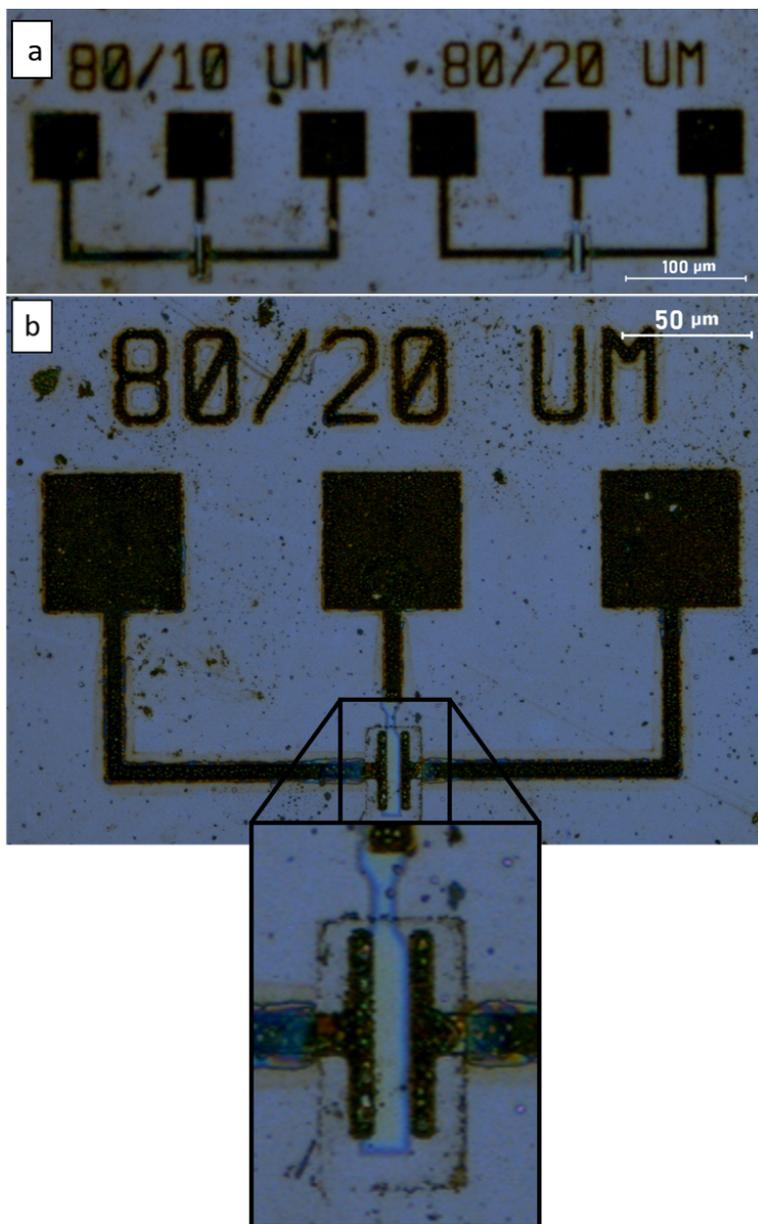


Figura 4.2: Dispositivos fabricados a) Panorama general. b) Transistor 80/20.

En la figura 4.2 b) se observa con mayor detalle un cambio en las tonalidades correspondiente a las diferentes capas de material utilizadas. Se observa una tonalidad café que abarca la mayor parte del dispositivo, esta corresponde al titanio que forma los electrodos superiores, se visualiza una figura en tonalidades azules correspondiente a la capa de ITO, la cual funge como electrodo inferior del material. Finalmente, se observa una región de tono amarillo opaco, esta sección corresponde al parileno colocado sobre el dispositivo para la protección del mismo.

En la figura 4.2 a) se observa la fabricación de dispositivos con diferentes relaciones de tamaño entre su largo y su ancho (relación concluyente para la corriente en el drenador, tal como señala la ecuación 3.3), conforme la relación ancho/largo sea menor la corriente en el drenador se verá disminuida, esta variación de proporciones se realizó con el fin de evaluar las propiedades del transistor al variar la relación de los mismos. La tabla 4.3 muestra las mediciones realizadas por elipsometría para determinar los grosores y las rugosidades de cada una de las capas que conformaron el dispositivo, también se muestra el error del ajuste a través del error cuadrático medio, conocido como MSE por sus siglas en inglés Mean Square Error.

<b>Película</b>	<b>Grosor (nm)</b>	<b>Rugosidad (nm)</b>	<b>MSE</b>
<b>ITO</b>	112.13 $\pm$ 1.15	2.04 $\pm$ .14	4.16
$Al_2O_3$	21.38 $\pm$ 3.11	0.45 $\pm$ 0.12	11.13
<b>SnO</b>	36.7 $\pm$ 1.03	0.44 $\pm$ 0.09	8.78
<b>Parileno</b>	320 $\pm$ 15.23	-	11.59
<b>Titanio</b>	287.5 $\pm$ 3.49	12.29 $\pm$ 1.98	24.33

Tabla 4.3: Mediciones de películas delgadas del dispositivo.

De forma general, la arquitectura del transistor se conoce como escalonada, consta de un contacto compuerta en la parte inferior, dos contactos superiores, un material aislante y el material semiconductor. La arquitectura típica de un TFT es conocida como coplanar, y aunque las diferencias son sutiles, también son cruciales para determinar la inyección de los portadores en la interfase fuente/canal. La arquitectura utilizada no permite la rápida degradación de las propiedades de inyección dentro de

estas interfaces, sin embargo, a comparación de la arquitectura coplanar es menos tolerante a los efectos de barrera de contacto.[48]

La función principal del transistor es modular la corriente en uno de los electrodos al suministrar una diferencia de potencial en los otros dos, conforme la distancia entre los mismos sea menor el campo eléctrico inducido será mayor, por esta razón se buscó que el grosor de las películas delgadas del material dieléctrico y el semiconductor tuvieran un grosor menor en comparado al grosor del contacto inferior. Para el transistor de películas delgadas, el contacto drenador y fuente están en contacto con el semiconductor 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.

En el caso de un transistor de película delgada, a diferencia de un transistor MOSFET se poseen distribuciones de carga bidimensionales ocasionadas por los grosores que presentan en su diseño, por lo tanto la homogeneidad de la primera capa es de suma importancia y 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 4.3 se buscó que el material fuera homogéneo y presentara rugosidades bastante bajas.

La figura 4.3 muestra las curvas de corriente-voltaje características de los TFT's, se varió el voltaje de compuerta de 0 a 3V variando el voltaje entre drenador y fuente de 0 a 6 V. La figura 4.3 a) muestra la curva característica para un transistor con una relación de ancho (W) con respecto a su largo (L), de 1.5, mientras que la figura 4.2 b) muestra la corriente en el drenador para una relación de ancho/altura de 2.

En ambos casos se varió el voltaje de compuerta de 0 a 3V y la corriente en el drenador,  $I_D$ , se mantuvo en el mismo orden de magnitud ( $1 \times 10^{-3}$  A), es decir no se registró un cambio significativo en la corriente. También es observable que cuando la relación W/L es de 1.5 se tienen corrientes menores en el drenador en comparación a los transistores donde la relación (W/L) es de 2, de manera cualitativa el resultado concuerda con la expresión señalada en la ecuación 2.3 donde la corriente en el drenador es proporcional a este parámetro (W/L).

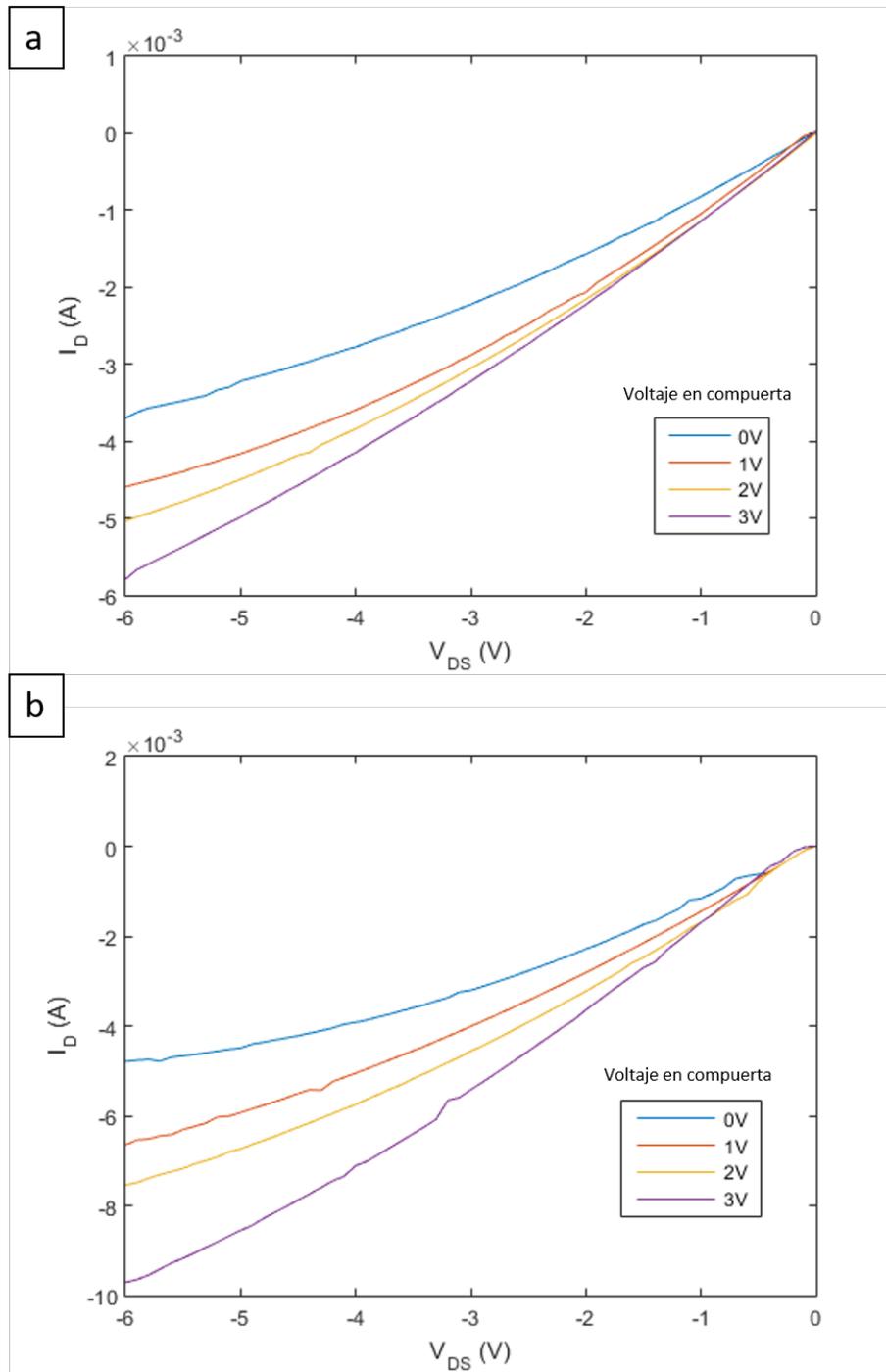


Figura 4.3: Curvas I-V de transistor con relación W/L: a)60/40 y b)180/60.

El funcionamiento básico del transistor se basa en la modulación de la densidad de carga en la capa activa y, por lo tanto, su conductividad puede ser modulada por un voltaje aplicado en la compuerta. Las cargas son inyectadas y recogidas por los

electrodos drenador y fuente, respectivamente, en la figura 4.3 se evidencia este comportamiento al incrementarse la corriente en el drenador  $I_D$  cuando se suministran diferentes voltajes en la compuerta, es decir, a pesar de la elevada conductividad el transistor cumple su propósito de modulador. Asimismo, se evidencia la nula presencia de corriente de fuga, puesto que a pesar del incremento de voltaje en la compuerta el origen de las curvas I-V, se mantiene en los límites de los ejes x,y (0,0), este comportamiento es asociado al método de fabricación de los dispositivos, puesto que el uso de fotolitografía permite un mayor control del área superficial de las multicapas utilizadas, reduciendo en gran medida los efectos no ideales.

En la figura 4.3 también pueden observarse los tres modos de operación para los diferentes voltajes suministrados en la compuerta. La región de corte donde el transistor posee un comportamiento de interruptor abierto, es decir, no hay conducción entre el contacto drenador y fuente. La región óhmica que es mayormente visible en la figura 4.3 b), donde el transistor se comporta como una resistencia entre el drenador y la fuente y posee una pendiente constante, en esta región la corriente en el drenador se comporta como una línea recta. Finalmente, la zona de saturación, donde el transistor ha superado el valor de voltaje de saturación entre los contactos drenador y fuente y el canal de conducción sufre un estrangulamiento cerca del drenador y desaparece. La corriente entre fuente y drenador no se interrumpe debido al campo eléctrico generado pero se vuelve independiente de la diferencia de potencial entre ambas terminales, de manera que permanece constante, esta zona no es tan evidente en la figura, pero se observa la tendencia de la curva a comportarse constante. Trabajos previos del desarrollo de transistores tipo p con películas delgadas de SnO muestran corrientes  $I_D$  en el orden de  $1 \times 10^{-6}$  A, valor no equiparable a los obtenidos en el desarrollo del presente trabajo, esto debido a que durante la fabricación del dispositivo no se lograron las condiciones necesarias para obtener un material con las propiedades eléctricas del semiconductor, es decir, la muestra obtenida resultó con conductividades muy altas que se reflejan en el comportamiento del transistor.

En la figura 4.3 b) se observa que en la región de los 0 a los -0.2V la corriente permanece constante para finalmente abrir paso a la zona de contacto óhmico, este efecto

se produce debido al mal contacto entre el electrodo de titanio y el dispositivo. Con frecuencia los contactos producidos entre el metal y el semiconductor resultan no ser óhmicos esto causa que la corriente producida no posea características lineales, este efecto son particularmente visibles cuando el voltaje  $V_{DS}$  es bajo y tienden a pronunciarse para voltajes de compuerta altos, donde el dispositivo demanda una mayor corriente y el contacto metálico no puede suministrarlo, como se observa en la figura 4.3 b) para la curva I-V a un voltaje de compuerta de 3V. Este efecto puede reducirse al fabricar películas del contacto superior más compactas y con rugosidades menores, pues tal como lo señala la tabla 4.3 se obtuvo una película con poca homogeneidad.[4, 28, 48, 49]

# Capítulo 5

## Conclusiones

Durante la realización de este trabajo podemos concluir que es posible llevar a cabo la fabricación de dispositivos TFT's tipo p con SnO como semiconductor, haciendo uso de la técnica de fotolitografía y decapado húmedo empleando ácido clorhídrico con zinc en polvo. Para el material de la compuerta se lograron sintetizar películas delgadas de ITO con propiedades eléctricas de un material conductor y por tanto aptas para ser utilizadas como contacto inferior en el dispositivo. Las películas de ITO se obtuvieron con una resistividad del orden de  $10^{-4} \Omega cm$ .

En relación al material semiconductor activo en el transistor se pudieron sintetizar películas delgadas de SnO tipo p con un bandgap de 2.79 eV y con una movilidad de  $0.16 cm^2/Vs$ . Por otro lado fue posible llevar a cabo la implementación de decapado húmedo para lograr un decapado selectivo en las películas delgadas de ITO y SnO haciendo uso de polvo de zinc y HCl en bajas concentraciones.

En los transistores fabricados se logró la modulación de la conductividad en transistores de película delgada al suministrar diferentes voltajes en el electrodo compuerta, obteniéndose corrientes en el drenador en el orden de  $10^{-3} A$ .

# Bibliografía

- [1] Cortés, L. (1998) *Presente y Futuro de la microelectrónica*, Revista Ingeniería e Investigación , Vol(41):64-68.
- [2] Ward, J (2009) *History of transistors* Transistor Museum, Vol(1):1-8.
- [3] Kuo, Y (2013) *Thin film transistor. Past, present and future*, The Electromechanical Society Interface, Spring 2013:54-61.
- [4] Brotherton, S (2013) *Introduction to Thin Film Transistors*, Springer, ISBN 978-3-319-00002-2.
- [5] Fortunato, E; Barquinha, P; Martins, R (2012) *Oxide semiconductor thin-film transistors: a review of recent advances*, Adv Mater, 24 2945-86.
- [6] 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.
- [7] Caraveo-Frescas, J. A., Nayak, P. K., Al-Jawhari, H. A., Granato, D. B., Schwingenschlögl, 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] Chiang, H; Wager, J; Hoffman, R; Jeong, J; Keszler D (2005) *High mobility transparent thin-film transistors with amorphous zinc tin oxide channel layer*, Appl. Phys. Lett. 86 013503.

- [9] Keem, K.; Kang, J.; Yoon, C.; Yeom, D., Jeong, D.-Y.; Moon, B.-M.; Kim, S. (2007). *A fabrication technique for top-gate ZnO nanowire field-effect transistors by a photolithography process*. *Microelectronic Engineering*, 84(5-8)
- [10] Dosi, G. (1984) *Technical change and Industrial Transformation: The theory and an application of semiconductor industry* MacMillan. Londrés. ISBN 978-1-349-17523-9.
- [11] Kahrizi, M. (2011) *Micromachining Techniques for Fabrication of Micro and Nanostructures*. *Intek. Rijeka, Croacia*. ISBN 978-953-307-906-6.
- [12] Moreau, W. (2012) *Semiconductor lithography: Principles, practices and materials*. Plenum Press. ISBN: 978-1-4613-0885-0.
- [13] Prakash, A; Jency, J; Mathew, M. (2013). *A review of various wet etching techniques*. *International Journal of Computer Applications*.
- [14] *UNaFab Ensenada* CNyN, UNAM, Sitio web:<https://www.cnyn.unam.mx/unafab>
- [15] Guzmán, D; Quevedo, M; De la Cruz, W; Ramírez, R (2018) *Fully patterned p-channel SnO TFTs using transparent Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> gate insulator and ITO as source and drain contacts* *Semicond. Sci. Technol.* 33 035010.
- [16] Biel, B; Flores, F. (2006) *Nanociencia: Manipulación a escala nanométrica y molecular* *Nanociencia y Nanotecnología I*, Vol (34)
- [17] Méndez, C. (2015) *Avances en Nanotecnología*. [nanotecnología.cl](http://nanotecnología.cl)
- [18] Machado, F; Binotto, S; Zanella, I; Jung, M. (2015) *Carbon nanomaterials as adsorbents for environmental and biological applications: Nanoadsorbents*. Springer International Publishing.
- [19] TJong, S. (2014) *Nanocrystalline materials their synthesis-structure-property relationships and applications*. *Elsevier Insights. Segunda edición*. ISBN 978-0-12-407796-6.

- [20] Ozoemena, K; Chen, S. (2016). *Nanomaterials in Advanced Batteries and Supercapacitors*. Nanostructure Science and Technology.
- [21] Nieto, E.; Fernandez, F.; Duran, P.; Moure, C. Bol. Soc. Esp. Cerám. Vidrio. 1994, 33, 245.
- [22] Alivisatos, A. P. (1996). *Semiconductor clusters, nanocrystals and quantum dots*. Science, 271, 933-937.
- [23] R. Behrisch (1981) *Sputtering by Particle Bombardment I: Physical Sputtering of Single-Element Solids* Springer, New York.
- [24] Tiznado, H.; Zaera, F. (2006). *Surface Chemistry in the Atomic Layer Deposition of TiN Films from TiCl<sub>4</sub> and Ammonia*. The Journal of Physical Chemistry B, 110(27),
- [25] Seshan, K; Schepis, D. (2018). *Handbook of Thin Film Deposition*. Elsevier. pp. 439-448.
- [26] Haberkorn, N (2009) *Tuning of the martensitic transformation temperature in Cu-Zn thin films by control of zinc vapor pressure during annealing*. Scripta Materialia,
- [27] Joy, J. (1992) *Preparation of thin films*. Marcel Dekker Inc. ISBN 0-8247-8196-1.
- [28] Neamen, D (2012). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles*. Cuarta edición. Editorial Mc Graw Hill p.p. 331:433.
- [29] (2009) *Field Effect Transistors in Theory and Practice*. Freescale Semiconductor Vol(7) 1:10.
- [30] Lee, C.-W., Afzalian, A., Akhavan, N. D., Yan, R., Ferain, I., Colinge, J.-P. (2009). *Junctionless multigate field-effect transistor*. Applied Physics Letters
- [31] Andry, P; Kagan, C. (2003) *Thin film transistors* Marcel Dekker, INC. New York.

- [32] Caglar, Y; Caglar, M; Ilican, S; Aksoy,S. (2015) *Effect of channel thickness on the field effect mobility of ZnO-TFT fabricated by sol gel process*. Journal of Alloys and Compounds. Vol(621) 189:193
- [33] Fujiwara, H. (2003) *Spectroscopy Ellipsometry:Principles and applications*. John Wiley Sons. ISBN 4-621-07253-6
- [34] Hudson, J. (1992) *Surface Science: An Introduction*. John Wiley Sons. ISBN 0-75069-159-X
- [35] Peng-Jen, C; Horng-Tay, J. (2015). *Phase diagram of the layered oxide SnO:GW and electron-phonon studies*. Scientific Reports.
- [36] Garzón, A. (2016) *Síntesis y caracterización de películas delgadas de SnO:N tipo p para aplicaciones en electrónica flexible*. Tesis. CICESE.
- [37] 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.
- [38] Rao, A; Mansour, S; Bement,L. (1996). *Fabrication of ferroelectric PZT thin film capacitors with indium tin oxide (ITO) electrodes*. Material Letters.
- [39] *ITO coatings*. Prazisions glass & optik. Sitio web: <https://www.pgo-online.com/intl/ito.html>.
- [40] Walker, P; Tarn, W. (1991) *Handbook of metal etchants*. CRC Press LLC.
- [41] Cobianu, C; Savaniu, C; Siciliano, P; Capone, S; Utrianien, M; Niinist, L. (2001) *SnO<sub>2</sub> sol-gel derived thin films for integrated gas sensors*. El Sevier. Sensors and Actuators.
- [42] Garzon-Fontecha, A; Castillo, H; Restrepo-Parra, E; De La Cruz, W. (2018). *The role of the nitrogen flow rate on the transport properties of CrN thin films produced by DC magnetron sputtering*. Surface and Coatings Technology.

- [43] Purbo, S; Gunawan, H; Januar, M; Liu, K. (2015) *Preparation and characterization of p-type transparent tin monoxide thin films by DC Reactive Magnetron Sputtering*.
- [44] Lee, C; Yong, S; Eom, D; Seong, C; Joon, H. (2004) *Dual High-k Gate Oxide Characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films in Si (100) substrate*. The Electrochemical Society, Inc. Abs. 845.
- [45] (2013) *Aluminium etching*. Microchemicals. Sitio web: [https://www.microchemicals.com/downloads/application\\_notes.html](https://www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html).
- [46] Hartney, M; Hess, D; Soan, D. (1989) *Oxygen plasma etching for resist stripping and multilayer lithography*. Journal of Vacuum science and technology B: Microelectronics Processing and Phenomena 7.
- [47] Keswick, P; Marks, J. (1994) EE. UU. Patente N° US5399237A.
- [48] Lu, N; Jiang, W; Wu, Q; Geng, D; Li, L; Liu, M. (2018) *A review of compact model of thin film transistors (TFTs)*. Micromachines. MDP.
- [49] Greve, D. (2001) *Thin film transistors*. Encyclopedia of Materials: Science and Technology.
- [50] Eswar, N; Singh, S; Heo, J. (2019). *Atomic Layer Deposited Photocatalysts: Comprehensive Review on Viable Fabrication Routes and Reactor Design Approaches for Photo Mediated Redox Reactions*. Journal of Materials Chemistry A.