



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES

MAESTRÍA EN MATERIALES Y SISTEMAS ENERGÉTICOS RENOVABLES

TESIS

“Diseño y fabricación de un sensor de pH utilizando TFTs”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

PRESENTA:

Gerardo Giovanni Espinosa De La Cruz

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz

Dr. Jesús Javier Alcantar Peña

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Abril de 2024.



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS
SECRETARÍA ACADÉMICA
DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 12 de octubre de 2023

Oficio No. SA/DIP/887/2023

Asunto: Autorización de Impresión de Tesis

C. Gerardo Giovanni Espinosa De la Cruz

CVU: 1104093

Candidato al Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables

Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables

UNICACH

Presente

Con fundamento en la opinión favorable emitida por escrito por la Comisión Revisora que analizó el trabajo terminal presentado por usted, denominado **Diseño y fabricación de un sensor de pH utilizando TFTs** cuyos Directores de tesis son el Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz (CVU 46253) y Dr. Jesús Javier Alcántar Peña (CVU 426362) quienes avalan el cumplimiento de los criterios metodológicos y de contenido; esta Dirección a mi cargo **autoriza** la impresión del documento en cita, para la defensa oral del mismo, en el examen que habrá de sustentar para obtener el **Grado de Maestro en Materiales y Sistemas Energéticos Renovables**.

Es imprescindible observar las características normativas que debe guardar el documento impreso, así como realizar la entrega en esta Dirección de un ejemplar empastado.

Atentamente
"Por la Cultura de mi Raza"

Dra. Carolina Orantes García
Directora



DIRECCIÓN DE
INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

C.c.p. Dr. Héber Vilchis Bravo, Encargado de la Dirección, Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento
Dr. Carlos Alonso Meza Avendaño, Coordinador del Posgrado, Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables, UNICACH. Para su conocimiento
Archivo/minutario.

RJAG/COG/ep/gtr

2023 AÑO DE FRANCISCO VILLA
EL REVOLUCIONARIO DEL PUEBLO

Dirección de
Investigación
y Posgrado

Dirección de Investigación y Posgrado
Libramiento Norte Poniente No. 1150
Colonia Lajas Maciel C.P. 29039
Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México
Tel:(961)6170440 EXT.4360
investigacionyposgrado@unicach.mx

Agradecimientos

Gracias a Dios, por haberme dado la oportunidad de culminar mi tesis a tiempo, así como en el que en todo momento está conmigo ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez, por darme la sabiduría, fortaleza y coraje para alcanzar mis objetivos.

Gracias a mis papás Eugenia Leocadia De La Cruz Pimienta y a Gerardo De La Cruz Espinosa Albores por haberme dado su apoyo incondicional durante todos estos años que ha durado la maestría, por ser la razón más grande aliciente para el cumplimiento de mis metas que tienen un gran significado para ellos y para mí que son la alegría y el orgullo. Así como sus consejos, valores y enseñanzas para hacerme un estudiante de bien pero principalmente por el enorme cariño y amor que me han brindado y lo siguen haciendo día a día.

Gracias a mis hermanos por la presencia, consejos, cariño y respaldo que me han impulsado a seguir adelante, a pesar de las dificultades, diferencias y problemas que hemos tenido eso no ha sido un obstáculo para que los resolvamos y podamos lograr nuestras metas.

Gracias a mis asesores de tesis el Dr. Jorge Evaristo Conde Díaz y al Dr. Jesús Javier Alcántar Peña, por su comprensión, su paciencia, recomendaciones y sus llamadas de atención ya que gracias a eso pude terminar mis estudios profesionales en tiempo y forma.

Gracias al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) por haberme dado la posibilidad de realizar el dispositivo, así como al área de micro tecnologías por esa disponibilidad de ayudarme en todo momento.

Gracias a mis amigos de posgrado y en general ya que, por la amistad brindada pero principalmente por las recomendaciones de cada uno, se pudo terminar un grado más de estudio en mi vida.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada que duró todo el transcurso del posgrado y que me permitió concluir este trabajo de investigación, así como también al Instituto de Investigación e Innovación en Energías Renovables (IIER) por la postulación al programa de BECAS NACIONALES.

Índice de figuras

Figura 1.1 Escenario del sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en Wi-Fi [9].....	2
Figura 1.2 (Color en línea) (a) Los datos de XRR realizados para la película de a-IGZO guardadas a diferentes presiones de la cámara., (b) una ampliación del gráfico de (a) los espectros de XRR depositadas a 5 mTorr y 1 mTorr [17].....	4
Figura 1.3 Sección transversal del prototipo de biosensor de pH ISFET de plástico flexible, utilizando un TFT de canal IGZO de puerta inferior, ancho/ largo = 9/9 μm y una capa de sensor de pH ITO de puerta extendida de 1 x 3 mm [23].....	6
Figura 1.4 (a) Esquema del equipo recocido y el perfil de temperatura dentro de las muestras para (a) horno de recocido térmico convencional (CTA) y (b) horno de recocido por microondas (MWA).	7
Figura 1.5 Esquema en sección transversal del sensor de silicio policristalino a baja temperatura (LTPS) TFT [27].....	8
Figura 1.6 Color en línea, sección transversal esquemática de a-IGZO TFT de doble puerta para evaluar los efectos de la puerta superior [28].	9
Figura 1.7 Esquema del IGZO TFT ISFET de doble puerta [29].....	10
Figura 2.1 Fuente: INEGI Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegaciones 2015. Modulo ambiental de agua potable y saneamiento.....	14
Figura 2.2 Escala de medida del pH [11].....	18
Figura 2.3 Modelo de Bohr que muestra electrones en órbitas alrededor del núcleo, se compone de protones y neutrones. Las “colas” en los electrones indican movimiento.....	19
Figura 2.4 Muestra de dos átomos simples como el hidrógeno (a) y el helio (b).....	20
Figura 2.5 Diagrama de un átomo de carbón.	21
Figura 2.6 Diagrama de energía para los tres tipos de materiales.	22
Figura 2.7 Diagrama de bandas de energía de un átomo excitado en un cristal de silicio puro (intrínseco).	23
Figura 2.8 Desarrollo de pares electrón-hueco en un cristal de silicio. Los electrones en la banda de conducción son electrones libres.....	24
Figura 2.9 Pares de electrón-hueco en un cristal de silicio.....	25
Figura 2.10 Átomo de impureza de antimonio (Sb) en el centro. El electrón extra proviene del átomo de Sb se convierte en electrón libre.	26
Figura 2.11 Átomo de impureza trivalente en una estructura de cristal de silicio. Un átomo de impureza de boro (B) se muestra en el centro.	27
Figura 2.12 Esquema del sistema de deposición láser pulsado.....	29
Figura 2.13 Esquema de un sistema de pulverización catódica (Sputtering).	32

Figura 2.14 Esquema del método sol-gel para el depósito de spin-on-glass.....	34
Figura 2.15 Diagrama del transistor de película fina.	35
Figura 2.16 Sistema para producción de silicio metalúrgico.	40
Figura 3.1 Estructura del TFT con el semiconductor a-IGZO, el SiO ₂ y el Si.	44
Figura 3.2 Patrón de los contactos superiores de TFTs	45
Figura 3.3 a) Tricloroetileno (C ₂ HCl ₃), b) cristalizador de 20 cm de diámetro	46
Figura 3.4 a) Oblea nueva de silicio tipo P dopado con Boro), b) Oblea con la solución de Tricloroetileno.	47
Figura 3.5 Oblea de silicio en el ultrasonido	48
Figura 3.6 Limpieza de residuos del Tricloroetileno, con ayuda del agua desionizada	48
Figura 3.7 Oblea de silicio con la acetona.....	49
Figura 3.8 Inspección visual de la oblea de silicio.....	49
Figura 3.9 a) Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) b) Mezcla del ácido con el peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂)	50
Figura 3.10 Sección frontal del TFT de a-IGZO.....	51
Figura 3.11 Orientación de la oblea de Silicio.....	53
Figura 3.12 Horno tubular para el crecimiento térmico del silicio	55
Figura 3.13 Ajuste manual de 3cc/min al flujo del oxígeno.....	55
Figura 3.14 Colocación de las obleas de silicio en la base de cristal.....	57
Figura 3.15 Distribución de los botones de seguridad del horno tubular	57
Figura 3.16 Manómetro con un valor de 0.02 MPa	58
Figura 3.17 Calentamiento de las resistencias en el horno tubular	58
Figura 3.18 Obleas de silicio con crecimiento térmico	59
Figura 3.19 Elipsometro Angstrom	59
Figura 3.20 Magnetron sputtering Angstrom Engineering	61
Figura 3.21 Plasma de iones de argón en el magnetrón sputtering.....	63
Figura 3.22 Depósito del óxido de indio, galio y zinc en un cuarto de oblea de Si/SiO ₂	64
Figura 3.23 Depósito del Aluminio en un cuarto de oblea de Si/SiO ₂ /IGZO.....	65
Sustrato (Silicio tipo P dopado con Boro), configuración de 100	66
Figura 3.24 a) Esquema de la oblea del silicio en 3D, b) vista frontal del silicio.....	66
Figura 3.25 a) Esquema del proceso de fabricación del silicio con el crecimiento del óxido de silicio, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio	66
Figura 3.26 a) Esquema del proceso de fabricación. Depósito de la capa activa del IGZO, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio/óxido de indio, galio y zinc.....	67

Figura 3.27 a) Esquema del proceso de fabricación. Si/SiO ₂ /IGZO con la shadow mask, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio/óxido de indio, galio y zinc/SM	67
Figura 3.28 a) Esquema del proceso de fabricación. Depósito del Al, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio/óxido de indio, galio y zinc/Aluminio	67
Figura 3.29 a) Esquema del proceso de fabricación. Colocación de los contactos de drenaje, fuente, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio	68
Figura 3.30 Cortadora láser generando los patrones de la fuente y el drenaje	69
Figura 3.31 Depósito del IGZO en una oblea de Si/SiO ₂	70
Figura 3.32 Caracterización eléctrica del dispositivo en la estación de prueba MST-4000A	71
Figura 3.33 Distribución de los contactos circulares para las mediciones CTLM en un semiconductor	72
Figura 3.34 a) Medición en el círculo de 5 μm y b) medición en el círculo mayor de 50 μm	73
Figura 3.35 Voltage – corriente del IGZO	74
Figura 3.36 Resistencia total graficada vs espacio de la brecha IGZO. El mejoramiento con ajuste lineal al factor de corrección es evidente	76
Figura 3.37 Curva logarítmica V _{DS} vs I _{DS} del TFT de a-IGZO de 90 nm	78
Figura 3.38 Curva característica de salida del IGZO TFT. Hay una modulación en la corriente I _{DS} en función del voltaje de compuerta V _{GS}	79
Figura 3.39 Ajuste de normalización (I _{DS}) ^{1/2} de la curva de transferencia del IGZO-TFT	80
Figura 4.1 Curva transferencial I-V del cambio de parámetros en la densidad de estados similares a donantes	81
Figura 4.2 Curva I-V del cambio de parámetros en la movilidad de electrones y densidad de estados similares a aceptores	82
Figura 4.3 Curva I-V del cambio de parámetros de la movilidad de electrones y huecos	83

Índice de tablas

Tabla 1. Comandos del simulador Silvaco-ATLAS	40
Tabla 2. Parámetros clave de simulación y propiedades del TFT a-IGZO [15]	41
Tabla 3. Parámetros usados en simulaciones 2-D [17]	42
Tabla 4. Conjunto de parámetros de defectos profundos y de cola [17]	43
Tabla 5. Parámetros utilizados para el crecimiento térmico del óxido de silicio (SiO ₂)	56
Tabla 6. a) Resultados del espesor de 25 nm, b) de 26 nm y c) de 27 nm	60
Tabla 7. Condiciones de depósito de la película de IGZO ₄	63

Tabla 8. Etapas del proceso RCA para la limpieza de las obleas de silicio	65
Tabla 9. Resumen de parámetros iniciales para los depósitos del IGZO	69
Tabla 10. Factores de corrección para nueve diferentes espacios de la brecha (gap)	75
Tabla 11. Parámetros encontrados en el IGZO utilizando el método del CTLM.....	77
Tabla 12. Parámetros del IGZO utilizados en la simulación.....	84
Tabla 13. Parámetros de cola y defectos profundos usados en la simulación de Silvaco-ATLAS.....	84

Contenido

Agradecimientos	i
Índice de figuras	ii
Índice de tablas	iv
Abstract	viii
Resumen	ix
Introducción	x
Problemática	xii
Objetivos	xiii
General.....	xiii
Específicos	xiii
Justificación	xiii
Capítulo 1: Antecedentes	1
1.1. Sensores de pH.....	1
1.2. Tecnología de los transistores de película delgada y sus aplicaciones.	3
1.3. Silvaco-ATLAS	11
Capítulo 2: Marco teórico	12
2.1. Calidad del agua	12
2.2. Ionización del agua.....	14
2.3. ¿Qué es el pH?.....	15
2.3.1. Ácidos	17
2.3.2. Bases.....	17
2.4. Semiconductores.....	18

2.4.1.	Bandas de energía	22
2.4.2.	Corriente en semiconductores	23
2.4.3.	Electrones de conducción y huecos	24
2.4.4.	Semiconductores tipo N y P	25
2.5.	Películas delgadas	27
2.6.	Métodos de depósito para la obtención de películas delgadas.....	28
2.6.1.	Depósito por láser	28
2.6.2.	Depósito químico en fase de vapor (CVD)	29
2.6.3.	Depósito de capas atómicas (ALD).....	30
2.6.4.	Pulverización catódica (Sputtering).....	31
2.6.5.	Depósito por baño químico (CBD).....	33
2.6.6.	Depósito sol-gel utilizando spin-on-glass.....	33
2.7.	Transistores de película delgada	35
2.8.	Materiales amorfos	36
2.9.	Aluminio y sus aleaciones	37
2.10.	Caracterización de materiales.....	38
2.10.1.	Síntesis de silicio.....	39
Capítulo 3: Detalles experimentales y simulaciones.....		40
3.1.	Simulación del transistor de película delgada en TCAD Silvaco.....	40
3.1.1	Parámetros extraídos de la literatura	41
3.1.2	Suscitar diferentes tipos de estructuras del TFT	43
3.2.	Diseño del dispositivo TFT.....	44
3.3.	Limpieza de sustratos.....	46
3.4.	Fabricación detallada para el transistor de película delgada basado en a-IGZO tipo N. ..	51
3.3.1.	Estructura del TFT.....	51
3.3.2.	Sustrato de silicio tipo P dopado con Boro	52
3.3.3.	Dieléctrico de Compuerta óxido de silicio (SiO ₂).....	53
3.3.4.	Semiconductor óxido de indio, galio y zinc (IGZO).....	60
3.3.4	Metalización de contactos	64
3.3.5	Fabricación del Dispositivo TFTs de a-IGZO tipo N.....	65
3.3.6.	Dificultades durante el proceso de fabricación del dispositivo	68
3.5.	Caracterización del dispositivo.....	71
3.5.2.	Método de Línea de Transferencia Circular (CTLM).....	71

3.5.3. Familia de curvas de salida.....	78
3.5.5. Voltaje de umbral V_T	80
Capítulo 4: Resultados y discusión.....	81
4.1. Comportamiento del dispositivo modificando los defectos del a-IGZO	81
4.2. Parámetros mejorados en la simulación.....	83
4.3. Conclusiones.....	85
Referencias	86

Abstract

In recent years, thin-film transistors (TFTs) have gained attention as a next-generation technology due to their advantages, including ease of fabrication, excellent uniformity, low-temperature processing, cost-effectiveness, compact device dimensions, compatibility with chip integration, and flexibility for various substrates. In this study, we aimed to optimize the behavior of a TFT device by modifying a-IGZO defects and analyzing their impact on device performance using Silvaco-Atlas software simulations. Key parameters such as threshold voltage (V_T), sub-threshold slope (S), and turn-on voltage (V_{ON}) were extracted from the respective I-V curves.

The novelty of our approach lies in utilizing a-IGZO as a pH-sensitive layer, replacing silicon-based high-K dielectrics. Previous work demonstrated a maximum pH sensitivity of 53.3 mV/pH using a-IGZO. In our investigation, we optimized the a-IGZO film through RF sputtering in an argon plasma environment. The outcome of our study resulted in TFT characteristics tailored for our specific application, achieving improved pH sensitivity. These enhancements position the device as a promising candidate for pH detection applications, solidifying its status as a next-generation TFT technology.

Resumen

En los últimos años, los transistores de película delgada (TFT) han llamado la atención como una tecnología de próxima generación debido a sus ventajas, que incluyen facilidad de fabricación, excelente uniformidad, proceso de fabricación a baja temperatura, costos de producción reducidos, dimensiones compactas del dispositivo, compatibilidad con la integración en chips y flexibilidad para diversos sustratos. En este estudio, nuestro objetivo fue optimizar el comportamiento de un dispositivo TFT mediante la modificación de defectos en a-IGZO y analizar su impacto en el rendimiento del dispositivo mediante simulaciones en el software Silvaco-Atlas. Se extrajeron parámetros clave como el umbral de voltaje (V_T), la pendiente sub-umbral (S) y el voltaje de encendido (V_{ON}) a partir de las respectivas curvas I-V.

La novedad de nuestro enfoque radica en utilizar a-IGZO como una capa sensible al pH en lugar de dieléctricos de alta constante dieléctrica basados en silicio. Trabajos anteriores demostraron una sensibilidad máxima al pH de 53.3 mV/pH utilizando a-IGZO. En nuestra investigación, optimizamos la película de a-IGZO a través de la deposición mediante RF sputtering en un entorno de plasma de argón. El resultado de nuestro estudio se tradujo en características TFT adaptadas para nuestra aplicación específica, logrando una mejor sensibilidad al pH. Estas mejoras posicionan al dispositivo como un candidato prometedor para aplicaciones de detección de pH, consolidando su estatus como una tecnología TFT de próxima generación.

Introducción

El interés de este trabajo nace en medir, observar y analizar la calidad del agua en Chiapas, México, conocido por sus bosques nubosos, reconocidos por la UNESCO por su alta biodiversidad y su amplia contribución a los servicios ambientales [1]. El problema radica en el acceso al agua de suficiente calidad y disponibilidad humana dado que es un asunto de vital importancia para las autoridades y la sociedad en su conjunto [2], en el estado ya antes mencionado, solo el 88.9% tiene una cobertura en el agua potable lo que indica coberturas inferiores al 90% y de acuerdo al censo de población y vivienda 2020 en materia de alcantarillado solo cuenta con el 89.7%, el proceso de crecimiento de la población ha sido uno de los factores determinantes ya que ha pasado de 4,796,580 millones a 5,543,828 en solo 10 años, siendo el estado número 8 más poblado [3]. De esta manera, el pH es un parámetro de mucho interés debido a su gran variedad de aplicaciones que van desde las influencias ambientales en las propiedades industriales y biomédicas. Generalmente hablando, la determinación del pH es de vital importancia en los campos relacionados con las ciencias de la vida, industria alimentaria, investigación farmacéutica e investigación de suelos y aguas terrestres. Tradicionalmente, las mediciones del pH se han realizado mediante técnicas electroquímicas, a menudo utilizando sensores muy específicos, sin embargo, estos procedimientos tienen algunas desventajas que deben ser considerados en cuenta durante la fase de medición asociada con el monitoreo continuo [4].

Por ende, se estudió el comportamiento del dispositivo TFT como sensor de pH, y se optó por realizar simulaciones en Silvaco-Atlas debido a su capacidad reconocida para analizar con precisión los defectos del semiconductor a-IGZO. La elección de Silvaco se basó en su reputación en la industria y su historial de proporcionar resultados confiables en simulaciones de dispositivos electrónicos avanzados. Este software permitió llevar a cabo un análisis exhaustivo de los defectos del material a-IGZO y obtener diferentes parámetros clave, tales como el voltaje umbral (V_T), la pendiente de sub-umbral (S), el voltaje de encendido (V_{ON}), entre otros, mediante el análisis de las correspondientes curvas I-V. En

trabajos anteriores, se ha encontrado que al utilizar el semiconductor a-IGZO como capa sensible al pH en lugar de dieléctricos de alta K basados en silicio, se obtiene una sensibilidad máxima al pH de 53.3 mV/pH. Por lo tanto, en este estudio se optimizó la película de a-IGZO depositada por sputtering de RF en plasma de Argón utilizando el óxido de silicio como dieléctrico, así como se obtuvieron las características adecuadas del TFT para su aplicación como sensor de pH. Uno de los mayores retos de este trabajo de investigación fue encontrar un depósito ideal para utilizar el IGZO como un buen semiconductor, así como realizar sus respectivas caracterizaciones eléctricas. La importancia de implementar el transistor de película delgada como sensor de pH se debe a las características particulares del IGZO, que se profundizarán más adelante en el tema. A pesar de que se tienen pocos avances en la investigación en relación a este tema debido a la falta de instalaciones adecuadas nacionalmente, se espera desarrollar y fabricar un transistor de película delgada optando por la técnica de la máscara de sombra para definir los patrones de la fuente y el drenaje en el Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial ubicado en Querétaro. La tesis se complementa de dos partes: la simulación y la parte experimental. La forma para poder llevar a cabo el proyecto se complementó con una estancia en el centro de investigación mencionado anteriormente. La importancia de caracterizar el dispositivo y obtener los valores antes mencionados radica en la necesidad de hacer un transistor ideal para después implementarlo en aplicaciones, que en nuestro caso será en un sensor debido a la alta sensibilidad que tienen los cambios de pH, así como también a su sistema de bajo consumo energético, los sensores de pH basados en transistores de película delgada se presentan como una opción altamente prometedora para diversas aplicaciones. Asimismo, el tamaño también desempeña un papel crucial, ya que la fabricación de dicho sensor se enfocará en dimensiones muy reducidas. Estos conectores de diseño permiten la integración en dispositivo portátiles y sistemas con formas curvas o irregulares, expandiendo significativamente las posibilidades de implementación.

Problemática

La mala calidad del agua en Chiapas es un problema generalizado y preocupante. Es notoria la falta de monitoreo de la calidad del agua, lo que resulta en una falta de información actualizada sobre este recurso vital. La información de país proporcionada por la CONAGUA es para 2018, lo que indica una necesidad urgente de actualizar los datos más recientes. Existen importantes limitaciones debido a la falta de sensores de pH desarrollados específicamente para estas condiciones utilizando tecnología de transistores de película delgada (a-IGZO TFT). Dada la riqueza en flora y fauna de las aguas superficiales de la región, contar con equipos de monitoreo se convirtió en una prioridad. La falta de información precisa sobre la calidad del agua puede afectar negativamente la salud de los ecosistemas y las comunidades locales que dependen de estos recursos hídricos.

Además, el desafío de obtener parámetros apropiados para simular el desarrollo de estructuras de transistores de película delgada se complica por las diferencias entre el software utilizado, siendo Silvaco ATLAS la primera opción, mientras que varias lecturas admiten el uso de otros programas. Esta variación dificulta la obtención de resultados consistentes y confiables, lo que a su vez afecta la precisión y confiabilidad del dispositivo. En este caso, un sensor de pH basado en TFT a-IGZO, especialmente diseñado para las características del agua de Chiapas, sería una solución valiosa y necesaria. Dichos dispositivos permitirán el acceso a información más precisa y actualizada sobre la calidad del agua, lo que facilitará la toma de decisiones informadas para abordar la contaminación y la conservación de este recurso hídrico vital.

Objetivos

General

Diseñar y fabricar un sensor de pH utilizando TFTs para monitorear la calidad del agua

Específicos

- Estudiar en base a simulaciones los TFTs para censar pH.
- Diseñar la estructura de un TFT que pueda recibir un líquido.
- Simular la estructura TFT y diseñar sus mascarillas para su fabricación.
- Fabricar TFT como sensor de pH.

Justificación

Si bien existen diferentes tipos de sensores de pH, los TFTs que regularmente son para materiales amorfos, como el CdS, IGZO, ZnO, Si, CIGS, CZTS, entre otros, todos esos materiales tienen una característica, cuentan con muchos defectos, pero al igual su fabricación es muy económica. Por eso buscamos específicamente fabricar un sensor pH utilizando TFTs, que sea monitoreado en el estado de Chiapas, México. Este sensor servirá para monitorear la calidad del agua, en diferentes tipos de aguas superficiales ya que de acuerdo con la UNICEF alrededor de 2.200 millones de personas en todo el mundo no cuentan con servicios de agua potable gestionados de manera segura, el agua no potable mata a 297.000 niños menores de 5 años cada año [5]. Dicho sensor se integrará al Proyecto de Monitoreo de la Calidad del Agua, dado que el proyecto ya cuenta con una sonda de

calidad del agua con algunos sensores como tales son con la detección de arsénico, un sistema integrado de medición de turbidez y coliformes, sensor de temperatura y conductividad, la detección de coliformes, detección de hidrocarburos [6], la detección del pH, este sensor es vital para adaptar el pH a las necesidades específicas de la aplicación de los sensores en cuestión[7].

Capítulo 1: Antecedentes

1.1. Sensores de pH

El siguiente punto es la mención del avance en los sensores de pH, se han encontrado diversos artículos en donde hacen referencia sobre las aplicaciones que le dan, cabe destacar que en una investigación aluden sobre algunos materiales sensibles a la medida de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa en relación a los procedimientos y sensores. Se puede señalar uno de los elementos muy importantes y no solo para el sensor de pH sino para cualquier tipo de sensor, estamos hablando de la precisión en la obtención de datos, por ejemplo, del que ya se ha mencionado anteriormente, la sal estando presente particularmente en el artículo, hace que las evaluaciones de datos sean nada exactos, por lo que se ha investigado básicamente en examinar diversos materiales entre ellos los polímeros y químicos que efectúan una sensibilidad y que existen diversos rasgos esenciales del material que se deben tomar en cuenta para tener una respuesta mejorada en tiempo real, determinación del sensor [8].

Además, también es importante resaltar que los sensores de pH pueden incluirse en diversas áreas de investigación cómo se mencionó anteriormente, pero la idea principal es encontrar una buena calidad de agua ya sea con el objetivo particular de cada trabajo realizado, cómo es el caso de la piscicultura, básicamente es la crianza de peces en estanques o en estructuras como jaulas y corrales, es importante señalar el uso que se le da al sensor en este caso, ya que es utilizado para una buena alimentación del ser humano, pero así como todo lo que comemos hay que tener en cuenta que el crecimiento de cada pez tiene que ser el adecuado por ello se toman en consideración varios parámetros como los son: el pH, el oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica, la temperatura, la dureza, la transparencia, el nitrito, entre otros. Se ha trabajado en un conjunto de sensores para determinar la calidad del agua teniendo en cuenta el enlace que existe entre la piscicultura

y las investigaciones, por ejemplo, tenemos la Figura 1.1 como diversos sensores obtienen la información requerida y posteriormente son enviados a un módulo de micro controlador, se ve el uso de las energías renovables y finalmente tener dichos datos en algunos módulos de salida como lo son: computadoras portátiles, Tablet, celulares, etc., [9].

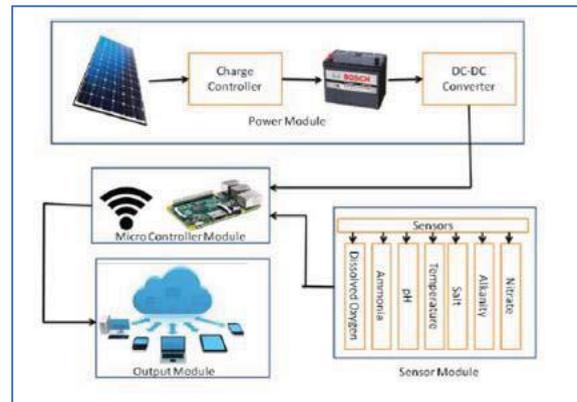


Figura 1.1 Escenario del sistema de monitoreo de la calidad del agua basado en Wi-Fi [9]

Así pues, cómo se ha visto anteriormente, la sensibilidad de los sensores de pH de algunos materiales, los diferentes usos que le dan también debemos tener en cuenta sus desventajas, sus deficiencias, sus limitantes, como por ejemplo: las tiras de pH colorimétricas que comúnmente se conocen dan resultados totalmente fuera de los reales y son desechables después de usarlos por primera vez, algo semejante ocurre con los electrodos de vidrio, al constituir como parte fundamental importante del instrumental para los análisis químicos y estudios físico-químicos son muy frágiles. De la misma forma se ha investigado la resolución al pH de varias capas que constituyen de $Ti_3C_2T_x$, nano hojas, así como policonstrucciones realizadas por medio de ensamblaje capa por capa. Ahora bien, los MXenes se sabe que son una clase de compuestos inorgánicos bidimensionales, dichos materiales lo constituyen en capas de nitruros o carbonitruros de metales de transición, algunos átomos de espesor de carburos. Por eso, ya se han hecho comparaciones entre la utilidad de la polietilenoamina ramificada sensible al pH o de las múltiples capas acopladas con poli (dialdimetilamonio) de electrolito sólido. Teniendo en cuenta los MXenes, han indicado ser convenientes para algunos sensores resistivos para diversos estímulos, ya que

lo que se ha planteado es aumentar la solución a estímulos particulares variando el polication [10].

Recogiendo lo más importante, también se han hecho investigaciones recientes para buscar algún tipo de sensor de pH apoyado de la indo anilina, visto que por todas las limitantes al utilizar los métodos comunes y más usados para la obtención de datos como lo son el electrodo de vidrio y el papel tornasol, se ha buscado otra alternativa como lo es la indo anilina sintetizada que no fue nada genotóxico. Cabe destacar que se consigue la voltamperometría de corriente alterna y así aprovecharlo para determinar el pH dentro del rango de 2 y 12. Aunque en otro sentido también mostró una histéresis, pero muy despreciable, una sensibilidad de 56 mV / pH, evaluando de manera correcta el pH de la leche, el té, la sangre, la saliva, la orina y jugo de naranja, dichos resultados claramente se cotejaron con un electrodo de vidrio calibrado con soluciones certificadas [11].

1.2. Tecnología de los transistores de película delgada y sus aplicaciones.

El siguiente punto es la relación que tienen los semiconductores amorfos con los transistores de película delgada, uno de varios materiales es el óxido de zinc, galio e indio (IGZO), que ha despertado muchísimo el interés en la comunidad científica dada su elevada movilidad de electrones inclusive cuando se trabajan a bajas temperaturas, se estudió que a 175° C muestra una muy buena movilidad del canal incremental (μ_{inc}) de $\sim 17 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ y un voltaje de encendido (V_{on}) de $\sim 1 \text{ V}$ [12]. Por una parte, también se han realizado investigaciones relacionadas al desarrollo de la oscilación de la puerta por debajo del umbral y la movilidad del efecto de campo, vale destacar que esto se ha logrado por la oscilación de la presión de la cámara, por ejemplo, con 1 mTorr mejoraron enormemente teniendo valores de 21 cm^2/Vs y 0.17 V/década, a diferencia de los 11.4 cm^2/Vs y 0.87 V/década realizados con una presión de 5 mTorr, un claro ejemplo podemos verlo en la Figura 1.2 [13].

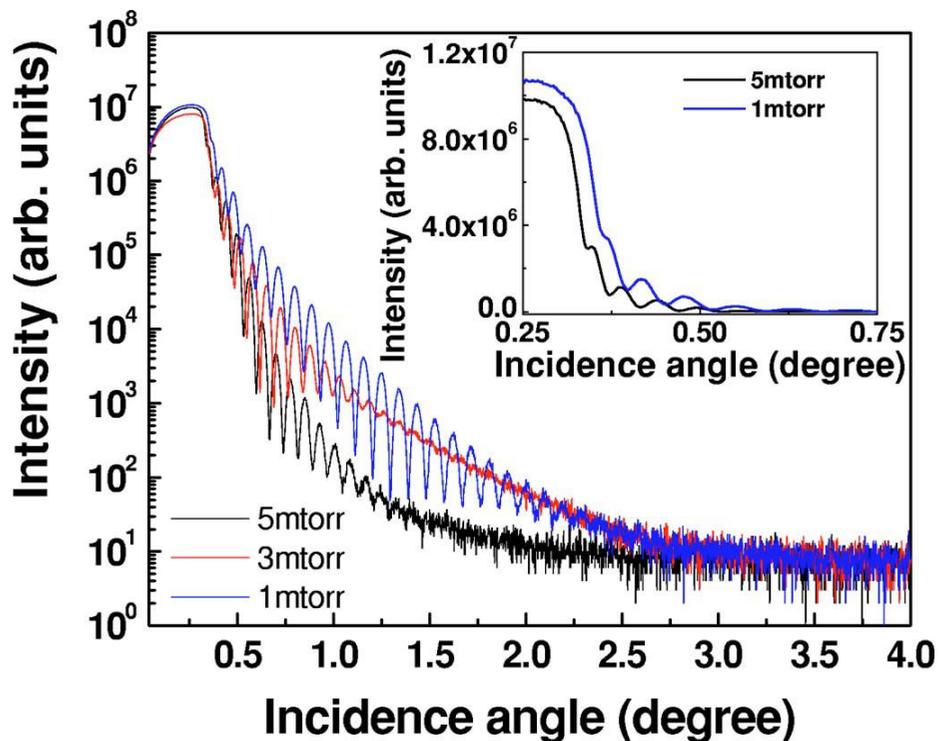


Figura 1.2 (Color en línea) (a) Los datos de XRR realizados para la película de a-IGZO guardadas a diferentes presiones de la cámara., (b) una ampliación del gráfico de (a) los espectros de XRR depositadas a 5 mTorr y 1 mTorr [17].

Algo similar ocurre con el cobre (Cu), un metal que también ya ha sido utilizado para mejorar la movilidad de efecto de campo obteniendo valores de $9.64 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ y un fuerte incremento en la baja región V_{DS} , también se ha estudiado por el electrodo de poca resistividad, se han realizado comparaciones con los TFT de óxido de zinc, galio e indio amorfo (a-IGZO) y los electrodos de fuente/drenaje del cobre (Cu), para evaluar las resistencias efectivas, dichos parámetros se obtuvieron realizando una serie de TFT con diversas longitudes de canal [14]. Sin embargo, se ha obtenido una conducción muy limpia teniendo una asignación de pendiente en la cola de banda ($E_a = 13 \text{ meV}$) y con una resistencia de contacto específica menor a $2.7 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}^2$ en los transistores de película delgada amorfos de In-Ga-Zn-O, el cual se pudo realizar con una comparación tanto como por los resultados calculados y los experimentales, sustentan los medidos por una simulación bidimensional de las propiedades eléctricas de la radiofrecuencia, así mismo se utilizaron los parámetros de la movilidad de efecto de campo con un valor de $12 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, una oscilación del sub-umbral de 0.13 V/década , un voltaje umbral de 1.15 V y una correlación de encendido/apagado superior a 10^{10} , para tener una buena precisión en los

datos obtenidos de las propiedades eléctricas se utilizó el modelo de densidad de estados [15].

Otro punto es, el estudio y la investigación que se ha realizado en la señalización de un proceso reducido y optimizado de tinta y de impresión, considerando que será para el modelado por inyección de tinta de los transistores de película delgada de óxido de zinc, galio, indio amorfo (a-IGZO). Ya se ha hecho mención, pero igual es importante resaltar la solución de materiales de óxidos metálicos como los amorfos para la fabricación de transistores de película fina que ha tenido un gran interés, por ejemplo, se llevó a cabo un estudio sobre los efectos de la estructura del dispositivo en la movilidad de los electrones que incluso llegan a ser similares a los del silicio amorfo (a-Si). En los resultados se obtuvo un valor récord de $2.5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ S}^{-1}$ en la movilidad de electrones teniendo en cuenta los TFT de contacto superior de puerta inferior [16].

Con respecto a los transistores de efecto de campo de puerta extendida (EGFET) se ha logrado obtener una elevada sensibilidad de pH con un valor de 129.1 mV/pH superando el límite de Nernst, en este punto el sensor de pH ya se hace presente creado con las características eléctricas distinguibles de un transistor de película delgada IGZO con una comparación de corriente de encendido/apagado de 3.7×10^7 , una movilidad de efecto de campo con el valor de $17.62 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ y una oscilación bajo del umbral de 86 mV/dec, así que para mejorar enormemente la estabilidad química así como su sensibilidad se logró gracias al modo de operación de doble puerta [17]. Dentro de las investigaciones también podemos agregar que los modelos matemáticos han contribuido en gran medida a los transistores de película amorfa de indio-galio-óxido de zinc, van enfocados a los modelos analíticos de corriente y capacitancia, esperando que sean usados para la optimización de los procesos de fabricación y para la valoración prospectiva del efecto de las condiciones del proceso en el rendimiento del circuito, después de diversas simulaciones se encontró que es viable a la expectativa de comportamientos complicados de circuito a causa del modelo analítico planteado y a la metodología de la investigación. A medida que los

científicos sigan avanzando en estos temas se espera que más adelante sea una herramienta vigorosa en el proceso de optimización y diseño de circuito con TFT de semiconductores de óxido amorfo, agregando los TFT a-IGZO [18].

En relación con los transistores de película delgada de óxido metálico de indio-galio-óxido de zinc también se han utilizado para la fabricación y la utilidad medida de un prototipo de biosensor de transistor de efecto de campo sensible a iones de puerta extendida flexible (ISFET), los resultados obtenidos han demostrado la posibilidad de ampliar directamente la tecnología de observación de diodos emisores de luz orgánicos de sustrato plástico flexible a la elaboración de biosensores ISFET de plástico a costos relativamente bajos, toda esta investigación se sustenta a la demostración que tuvo la corriente de drenaje ISFET respondiendo correctamente a la concentración de datos del pH, en la Figura 1.3 se puede ver un esquema del prototipo ya mencionado [19].

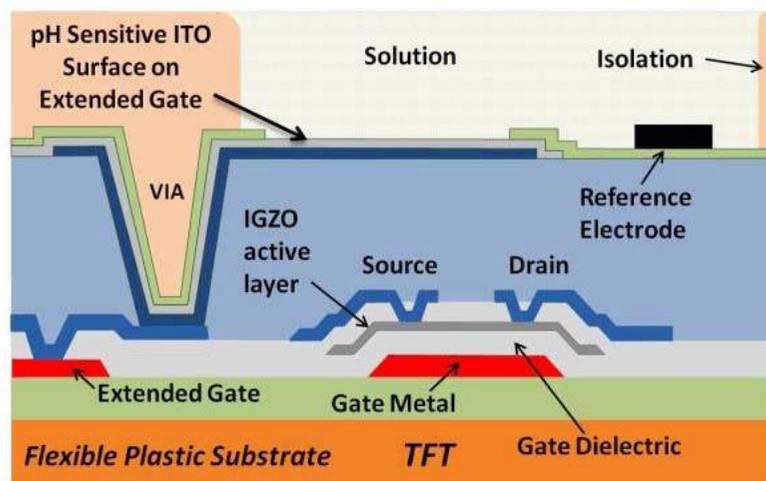


Figura 1.3 Sección transversal del prototipo de biosensor de pH ISFET de plástico flexible, utilizando un TFT de canal IGZO de puerta inferior, ancho/largo = $9/9 \mu\text{m}$ y una capa de sensor de pH ITO de puerta extendida de $1 \times 3 \text{ mm}$ [23].

Vale la pena decir que la variación de la densidad del estado de la interfaz con la tensión de polarización aplicada derivado de las propiedades de capacitancia-tensión y la

combinación de la densidad dada por los estados de la interfaz con la oscilación por debajo del umbral, se describe la distribución de energía de las trampas a granel para sugerir un método separando la densidad de estado sub brecha en transistores amorfos de película delgada IGZO. En dicha investigación los resultados fueron favorables al obtener un buen ajuste con algunos datos experimentales [20]. Hasta ahora no se ha mencionado ningún método de fabricación para los transistores, por ello, en algunos estudios experimentales se hizo una comparación entre dos métodos, el primero es el recocido térmico convencional (CTA) y el segundo es el recocido de microondas (MWA), el ultimo es aplicado en el estudio para la elaboración de transistores de película delgada (TFT) amorfos de In-Ga-Zn-O (a-IGZO) sin afectaciones térmicas a los sustratos flexibles de poliimida (PI). Por otra parte, una de las ventajas de la energía de microondas es su alta eficiencia para el calentamiento selectivo de materiales a diferencia del convencional (CTA). Por ejemplo, en las pruebas realizadas, el recocido de microondas (MWA) desarrolló al a-IGZO TFT a 600 W durante un tiempo de 2 minutos, comparado con un recocido térmico convencional (CTA) dónde para este caso se requirió 30 minutos con una temperatura de 300° centígrados, se encontró un rendimiento eléctrico mayor dado que las trampas/defectos se eliminaban de manera efectiva, también la estabilidad en los TFT de MWA, mejoramiento de las características estáticas y dinámicas y se llegó a la conclusión de que un proceso como el recocido de microondas (MWA) es favorable con la conversión de energía eficiente permitiendo así la fabricación de dispositivos electrónicos de elevado rendimiento. Dicho proceso se puede visualizar en la imagen 1.4 [21].

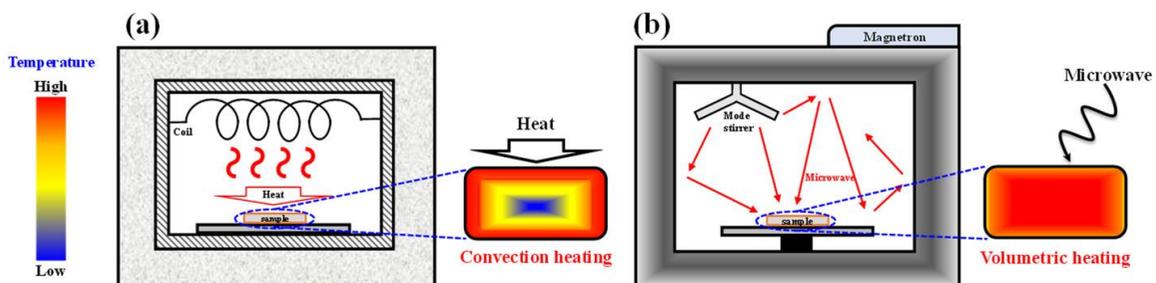


Figura 1.4 (a) Esquema del equipo recocido y el perfil de temperatura dentro de las muestras para (a) horno de recocido térmico convencional (CTA) y (b) horno de recocido por microondas (MWA).

Ahora bien, otro material que ha sido utilizado con los transistores de película delgada es el silicio policristalino (poli-Si) a baja temperatura, que como ya se mencionó anteriormente uno de los objetivos es poder encontrar una buena y alta estabilidad, ya se ha informado un avance significativo gracias al proceso de sinterización de H_2 . Se tuvo un aumento de la estabilidad gracias al incremento resultante en el número de enlaces hidróxidos de silicio ($Si - OH_2^+$) y en el óxido de silicio ($Si - O$) tal como el agregar el hidrogeno (H) en el óxido de la puerta para disminuir los enlaces de silicio, al final se encontró que el proceso de fabricación es relativamente simple, así como tener un bajo y dentro de los muchos sistemas que hay se podría integrar el sensor, todo esto se puede ver en la Figura 1.5 [22].

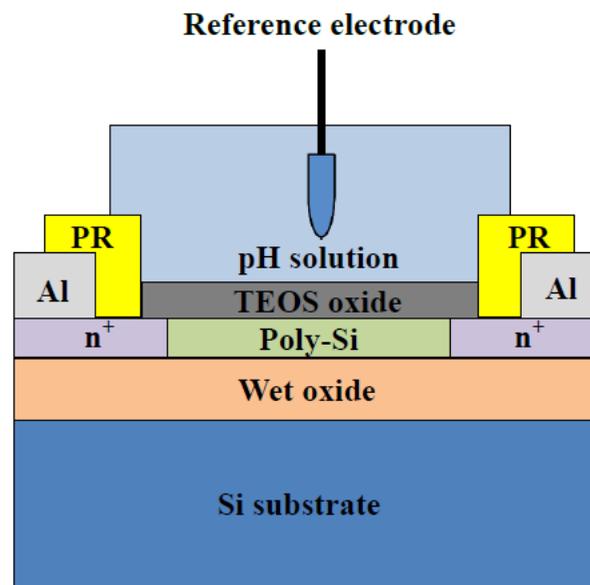


Figura 1.5 Esquema en sección transversal del sensor de silicio policristalino a baja temperatura (LTFT) [27].

En relación con la sensibilidad del pH, buscando otra manera de mejorarla, recapitulando a los transistores de película delgada de In-Ga-Zn-O amorfo se encontró que una nueva forma para aumentarla, se debe a las propiedades del aislador de la puerta inferior y una elevada relación de capacitancia entre el aislante sensible a iones y la detección del pH que

usa cambios de voltaje de umbral en las características de traslado de la puerta inferior. La relación de los campos eléctricos de la puerta inferior y superior y de la base en operaciones completamente agotadas son las propiedades del material a-IGZO y el modelo de silicio sobre el aislante (SOI), en particular, la utilización de los efectos de puerta superior influiría en las características intrínsecas de los TFT a-IGZO, un ejemplo del esquema se puede reflejar en la Figura 1.6 [23].

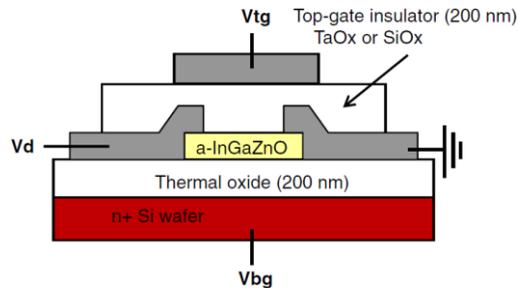


Figura 1.6 Color en línea, sección transversal esquemática de a-IGZO TFT de doble puerta para evaluar los efectos de la puerta superior [28].

Por otra parte, también se ha obtenido un mejoramiento en la sensibilidad de pH de ~ 160 mV/pH, distinto al del límite de Nernst con un valor de 59 mV/pH. Como se ha dicho, la temperatura es un factor importante dado que para la investigación las características de los transistores de película delgada se optimizaron recociendo la película del IGZO haciendo diferencia en esos parámetros, se pudo descartar los problemas relacionados a la elevada resistencia de contacto y la pasivación crítica de los electrodos de fuente / drenaje para cuidar de la muestra del electrolito gracias al uso de un a-IGZO de doble capa intercalando los electrodos de fuente / drenaje, gracias a la operación de puerta doble se tuvo un incremento de 6.7 veces a diferencia de la puerta única el cual su valor era de 24 mV/pH y el desempeño de los transistores de efecto de campo sensibles a iones (ISFET) TFT de doble puerta con una variación de voltaje en la puerta inferior suprime el requisito de un electrodo de referencia necesario en los ISFET de una sola puerta, un esquema ilustrativo se puede visualizar en la Figura 1.7 [24].

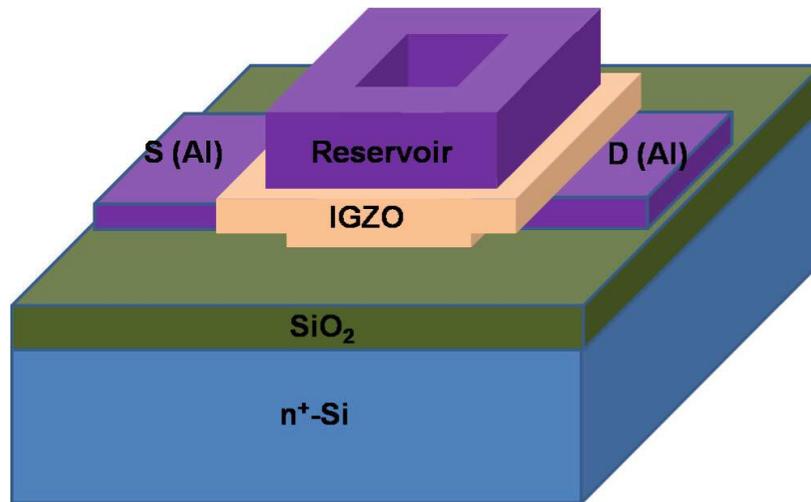


Figura 1.7 Esquema del IGZO TFT ISFET de doble puerta [29].

En una investigación más reciente se obtuvo una alta sensibilidad con un valor de 387.58 mV/pH, mayor al anterior y por supuesto al del límite de Nernst que como sabemos tiene un valor de 59 mV/pH, así mismo también se encontró una linealidad del 99% o incluso más para un área pequeña de IPG. Para lograr obtener esos datos se propuso el desarrollo de un transistor de película delgada (TFT) con un diseño de puerta en el plano (IPG), que consiste en que los electrodos de canal y la puerta inferior se encuentran en el mismo plano, gracias a los efectos de acoplamiento capacitivo mejorado. Los parámetros considerados para la estabilidad y confiabilidad del sensor fueron efectos no ideales, como la histéresis y las propiedades de deriva y se cree que en un futuro los biosensores de tipo EG con estructura IPG puedan ser esenciales para sistemas de diversas áreas como la biomedicina, monitoreo ambiental, entre otros [25].

Finalmente, en una investigación más actual se obtuvo una sensibilidad al pH con un valor de 347.6 mV/pH donde se fabricó un transistor de efecto de campo sensible a iones de puerta doble basado en a-IGZO (DG ISFET) usando métodos sencillos y simples. A diferencia de otras búsquedas relacionadas a los sensores de pH donde han utilizado el Aluminio como dieléctrico en la puerta superior, para el desarrollo de este transistor se utilizó el óxido de Aluminio (Al_2O_3) y así obtener una mayor densidad del sitio de la superficie. Para corroborar los descubrimientos experimentales se planteó un modelo de simulación orientado en T-CAD agregando tres capas dieléctricas para mostrar la doble capa eléctrica formada en la

interfaz electrolito/aislante y en el electrodo de referencia. Con el paso del tiempo se seguirán buscando alternativas para poder mejorar y aumentar la estabilidad tomando como referencia a la de Nernst, así como también otros parámetros [26].

1.3. Silvaco-ATLAS

Silvaco proporciona soluciones de procesos de semiconductores analógicos, equipos de control, Automatización y diseño de dispositivos semiconductores CMOS, bipolar, SiGe y tecnologías compuestas (como SOI y FinFET). Entre los clientes se incluyen las principales empresas de semiconductores sin fábrica del mundo, fabricantes de semiconductores integrados, fundiciones y universidades. En Silvaco destacan dos importantes módulos semiconductores: ATHENA y ATLAS, para el trabajo el módulo que se estará utilizando será el ATLA, es un simulador eléctrico para dispositivos 2D y 3D que puede realizar análisis de CC, CA y transitorios para dispositivos basados en silicio, materiales binarios, ternarios y cuaternarios. Atlas puede caracterizar y optimizar dispositivos semiconductores de diversas tecnologías. En Illinois, están trabajando con Diseño de tecnología asistida por computadora (TCAD), donde pueden demostrar el diseño funcional del ZB-GaN HEMT y brindar orientación para garantizar un comportamiento normal. Esto incluye ajustar la fracción molar de Aluminio, la función de trabajo del metal de la puerta, la densidad de dopaje δ y el espesor de la capa de AlGa_N. Se descubrió que un contenido de Aluminio inferior al 35% y un δ dopado inferior a $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ provocarían un comportamiento normalmente apagado. Podemos mostrar un voltaje de encendido (VT) superior a 1 V y una densidad de escamas 2DEG superior a 10^{13} cm^{-2} [27].

Se pueden realizar simulaciones I_d / V_{GS} e I_D / V_D en dispositivos TFT con propiedades de material correspondientes a materiales amorfos IGZO (Indio Galio Zinc Óxido). El ejemplo muestra:

- Formación de estructuras utilizando la sintaxis Atlas

- Material de pasivación IGZO y ajustes del modelo.
- Función Forward I_d / V_{GS}
- Características I_d / V_{DS} en estado

El comando de teclado en la simulación TFT es la declaración de defectos. Se utiliza para definir la densidad continua de estados de trampa en silicio y la sección transversal de trampa asociada. La ejecución de las rampas I_d / V_{GS} e I_D / V_D es similar a la prueba de voltaje umbral de los dispositivos MOS descrita en el ejemplo MOS. Los resultados de este ejemplo se comparan con los datos experimentales publicados

Capítulo 2: Marco teórico

2.1. Calidad del agua

En los últimos años, la escasez de agua y la calidad del agua han sido temas muy relevantes, por lo que debemos considerar que tenemos suficiente agua dulce en todo el mundo para cubrir las necesidades y usos de la población en general. Ha sido en muchos casos que el agua misma se desperdicia, contamina y maneja de manera irresponsable. De esta forma, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) mencionó que no hay escasez de agua en el mundo, pero que hay muchas zonas del mundo que carecen de agua [28]. Para muchos países, representa el desafío más apremiante en el crecimiento socioeconómico, humano, agrícola, etc., porque en última instancia, cuanto más tiempo, más grave será la contaminación que los seres humanos produciremos en las aguas superficiales.

Por lo tanto, la calidad del agua se determina comparando las propiedades físicas y químicas de las muestras de agua con las pautas o estándares de calidad del agua. Se ha visto que los recursos hídricos son indispensables para nuestras actividades diarias y que tienen la capacidad de recuperarse. No obstante, son cada vez más amenazadas, ya sea para la alimentación, las materias primas y la energía. Citado de *Ban Ki-moon*, Un día tras otro vertemos millones de toneladas de aguas residuales sin tratarlas y en el agua limpia escasea y escaseará aún más a medida que avance el cambio climático [29]. Es notable saberlo ya que la población mundial crece enormemente con el pasar de los años, por lo cual, las demandas al igual incrementan.

Al mismo tiempo, en México, la calidad del agua no ha atraído mucha atención debido al problema inicial de la cantidad de agua y al problema de dónde obtener el agua. Sin embargo, la investigación institucional, los contaminantes existentes, los problemas de calidad y los aspectos sociales ya han comenzado. La infraestructura de tratamiento de aguas residuales municipales e industriales es inadecuada y el 8% de la población descarga incontrolablemente a fuentes de agua superficial [30].

Aunque Chiapas es un estado rico en recursos naturales y culturales, es un territorio de bosque nuboso y un hábitat reconocido por la UNESCO por su alta biodiversidad y extensa contribución a los servicios ambientales. Ríos, lagos y manantiales se encuentran al final del estado, sin embargo, existe cierto grado de contaminación en todas las áreas de la región. Esto generalmente se debe a la descarga de aguas residuales domésticas y al uso de diversos agroquímicos en la producción agrícola y ganadera [31]. Sin embargo, la entidad Sureste, donde se ubica Chiapas, recibe más de la mitad del agua renovable (67.2%) cada año, aunque la mayoría de la población tiene menos acceso a líquidos importantes por no contar con servicios básicos, como agua corriente en casa [32]. Como se puede ver en la figura 2.1 las tomas de agua para abastecimiento público en cada estado, tenemos

que Jalisco, la Ciudad de México y Oaxaca tienen las mayores tomas con las cantidades de 1,777, 1,553 y 1,536 respectivamente, pero Chiapas solo cuenta con 306.

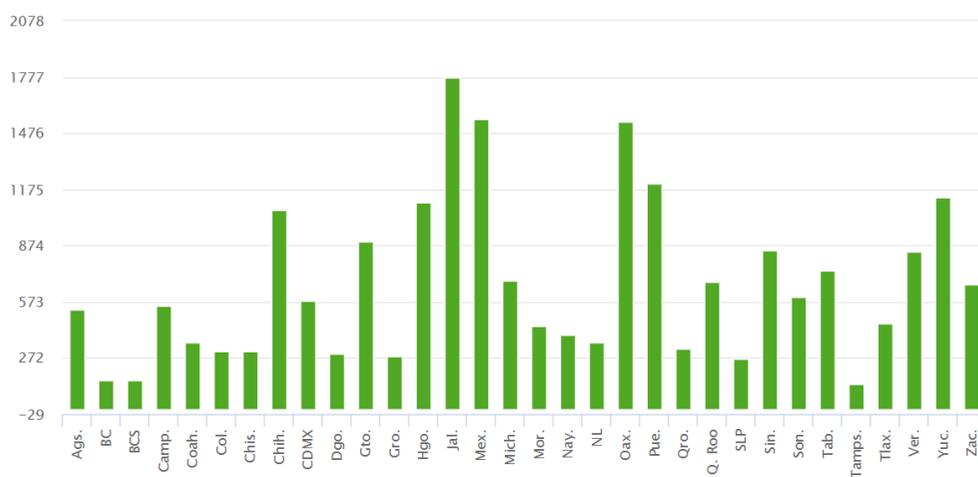


Figura 2.1 Fuente: INEGI Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegaciones 2015. Módulo ambiental de agua potable y saneamiento.

En ese mismo contexto, Chiapas aporta 30% del agua del país. Ríos, aguas subterráneas, pero no está convenientemente repartida e incluso se encuentra en parte contaminada. Si es bien cierto que se cuenta con una enorme riqueza natural cómo ya se mencionó con anterioridad, padece de limitada infraestructura en la distribución de agua que genera todo tipo de problemas de salud, a pesar de que cuenta con 81 cuencas hidrográficas. Se ha generado una crisis no por no tener agua, sino porque no está disponible para su distribución y por la contaminación de las actividades provocadas por quienes viven en las ciudades [33]. A partir de las evidencias anteriores, se ha comenzado con el estudio de los sensores de pH.

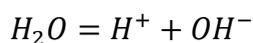
2.2. Ionización del agua

Puedes encontrar miles de moléculas de agua en una gota de agua, el agua está formada por un átomo de oxígeno y dos átomos de hidrógeno, y hay un puente de hidrógeno entre una molécula y la otra, que es un enlace intermolecular. Hay dos moléculas de agua en el electrodo negativo y el electrodo positivo. ¿Qué les sucede a dos moléculas de agua?, se observa una carga negativa parcial δ^- en el lado del oxígeno y una carga positiva parcial δ^+

en el lado del hidrógeno. La atracción entre estos dos polos a través de los enlaces de hidrógeno puede ser muy fuerte, y cuando las moléculas chocan entre sí, a veces están un poco más cerca y otras veces pueden estar más cerca de lo que piensas.: El átomo de hidrógeno de una molécula es capturado por otra molécula de agua, este ion acaba de formarse y se puede escribir como [34]:

2.3. ¿Qué es el pH?

Los iones de hidrógeno son especies muy comunes que se encuentran en muchas reacciones químicas. El pH significa potencial de hidrógeno, pero también se denomina potencial de hidronio y ambos se utilizan para explicar las propiedades de las soluciones ácidas y básicas [35]. Para soluciones acuosas, podemos escribir:



El equilibrio se produce en el agua entre lo alcalino (OH^-) y ácido (H^+). El valor de pH determina qué tan básica o ácida es una sustancia [35]. Matemáticamente, podemos escribir el pH como:

$$pH = -\log \alpha H^+$$

Dónde α =grado de disociación.

De esta manera en química sustenta que es una escala numérica así mismo utilizada para especificar la acidez o alcalinidad de una solución acuosa. Cabe destacar que es el logaritmo negativo en base 10 de la actividad de ion Hidrógeno. Por ejemplo, las soluciones con un pH menor a 7 son ácidas, sin embargo, las soluciones con un pH mayor a 7 son alcalinas o básicas. Tal es el caso del agua pura que tiene un pH de 7, lo que se refiere a que es neutra en otras palabras, no es ni ácida ni alcalina. A diferencia de la creencia popular, el valor de pH puede tener un valor menor que cero o mayor que 14 para los ácidos y las bases muy fuertes. Por lo contrario, son valores muy difíciles de medir con precisión. Las mediciones del pH son esenciales e importantes para diversas áreas del conocimiento científico como

la biología, la medicina, la química, la agricultura, la silvicultura, la ciencia de los alimentos, las ciencias ambientales, la oceanografía, la ingeniería química, la nutrición, el tratamiento y la depuración de aguas entre muchas más [36].

Todos los procesos químicos/biológicos/bioquímicos dependen del pH. La medición del pH es necesaria para determinar las propiedades químicas y el comportamiento de los materiales. La solubilidad y la cinética de reacción química de biomoléculas o productos químicos dependen del pH. El control del pH es esencial para controlar y prevenir reacciones químicas no deseadas y optimizar las reacciones beneficiosas deseadas [35].

- Las plantas y los animales que viven en lagos, océanos y ríos determinan su pH. La presencia de productos residuales de la industria química y vertidos de fábricas puede afectar al pH y la presencia de productos químicos nocivos en el agua y la presencia de sustancias que se pueden observar en el agua limpia. Es por esto que el pH es un indicador importante para el monitoreo ambiental (calidad del agua).
- El pH del suelo es un factor crítico en la agricultura. En su mayor parte, los cultivos están sanos cuando el pH es cercano a la neutralidad, con valores que oscilan entre 6 y 7,5. Por esta razón la absorción de nutrientes por el suelo se ve afectada por el valor del pH.
- Muchos procesos industriales incluyen semiconductores, alimentos, productos farmacéuticos, cemento y textiles, productos de consumo y más. Dependen en gran medida del pH. El pH también es importante en aplicaciones biomédicas, bio-procesamiento y control de desperdicios de alimentos [35].

La escala de pH se calcula debido a un conjunto de soluciones estándar cuyo pH es dado por acuerdo internacional (Covington, Bates and Durst, 1985). Los valores globales de pH primarios se determinan usando una celda galvánica mediante la medición de la diferencia de potencial entre un electrodo de hidrógeno y un electrodo estándar tal como el electrodo de cloruro de plata. El pH de las soluciones acuosas se puede medir con un electrodo de vidrio y un medidor de pH, o indicador. Es probable establecer la concentración de iones de Hidrógeno directamente, si el electrodo utilizado para tal fin es calibrado en términos de las concentraciones de iones de Hidrógeno. Podemos adicionar, que se ha usado ampliamente, es determinar una solución de concentración conocida de un ácido fuerte con una solución de concentración dada de base fuerte en presencia de una concentración relativamente alta de electrolito. Puesto que se saben las concentraciones del ácido y base, es fácil medir la concentración de iones de Hidrógeno de modo que el potencial medido se puede correlacionar con las concentraciones [36].

2.3.1. Ácidos

En relación con el pH es importante saber sobre los ácidos, un ácido es considerado comúnmente como cualquier compuesto químico que, cuando se disuelve en el agua, genera una solución con una actividad de catión hidronio [H_3O^+] mayor que el agua pura, es decir, un pH menor que 7. Ejemplos existen muchos y podemos hacer mención de ellos como el ácido acético (en el vinagre), el ácido clorhídrico, el ácido muriático (Salfuman), los jugos gástricos, el ácido acetilsalicílico (en la aspirina), o el ácido sulfúrico (usado en baterías de automóvil) [36].

2.3.2. Bases

Otro punto importante son las bases, es comprendida como cualquier compuesto químico que, cuando se disuelve en agua, crea una solución con una actividad de anión hidroxilo

mayor que el agua pura, es decir, un pH mayor que 7. Algunos ejemplos son los hidróxidos de los metales alcalinos y alcalinotérreos [NaOH, Ca (OH)₂].

Se puede señalar que los sistemas ácidos y bases se distinguen de las reacciones redox en que, en estas últimas hay un cambio en el estado de oxidación. Los ácidos pueden ser en forma de sólidos, líquidos o gases, determinando la temperatura y también puede haber sustancias puras o en solución. Si hablamos de algunas sustancias químicas teniendo las características de un ácido se le conoce como ácidos y, por otra parte, las características de base son básicas [36]. En la siguiente figura tenemos una escala para saber qué tan ácidos o bases son las sustancias determinando el valor del pH [37].



Figura 2.2 Escala de medida del pH [11].

2.4. Semiconductores

Acerca de los semiconductores, es importante agregar a la estructura atómica dado que es son temas fundamentales para diversas terminologías. Un átomo es la partícula más pequeña de un elemento que conserva sus características. Cada uno de los 109 elementos conocidos tiene átomos diferentes de todos los demás elementos; es decir, cada elemento tiene una estructura atómica única. Según el modelo de Bohr, los átomos tienen una estructura similar a un planeta y consisten en un núcleo central rodeado por electrones en

órbita, como se muestra en la Figura 2.3 [38]. El núcleo está compuesto por partículas cargadas positivamente llamadas protones y partículas sin carga llamadas neutrones. Las partículas elementales que tiene carga negativa se llaman electrones [38].

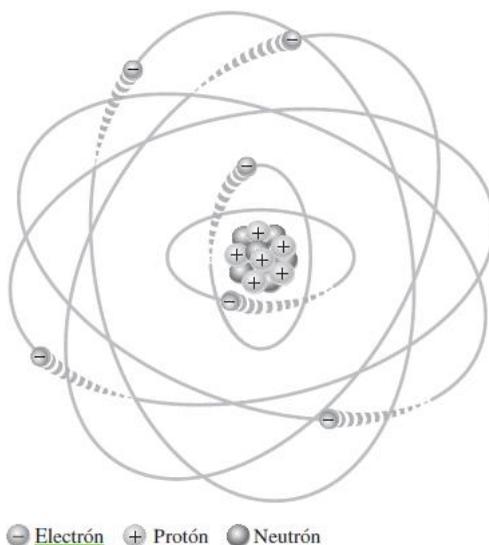
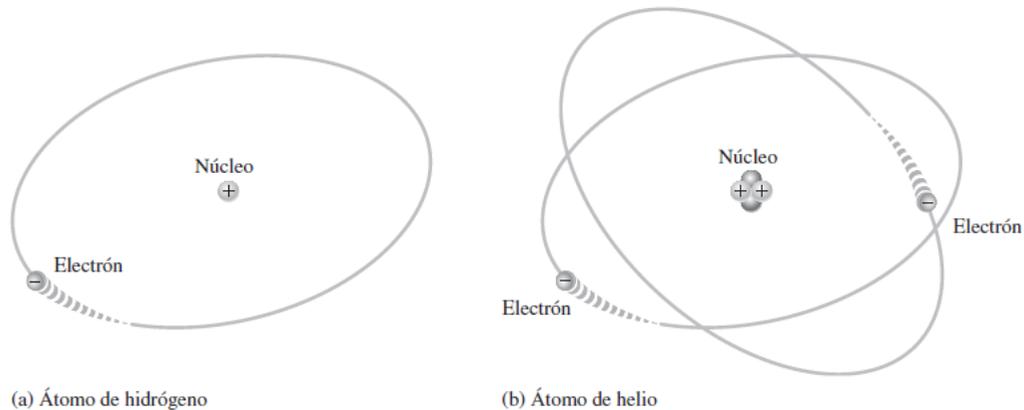


Figura 2.3 Modelo de Bohr que muestra electrones en órbitas alrededor del núcleo, se compone de protones y neutrones. Las "colas" en los electrones indican movimiento.

Cada tipo de átomo tiene una cierta cantidad de electrones y protones para distinguirlos. Átomos de los todos los demás elementos. Por ejemplo, el átomo más simple es el hidrógeno y que tiene un protón y un electrón, como se muestra en la Figura 2.4 (a). El átomo helio, como se muestra en la Figura 2.4 (b), tiene dos protones y dos neutrones en el núcleo, y dos electrones orbitando el núcleo.



(a) Átomo de hidrógeno

(b) Átomo de helio

Figura 2.4 Muestra de dos átomos simples como el hidrógeno (a) y el helio (b).

Según sus características eléctricas, los materiales se pueden dividir en tres categorías: conductores, semiconductores y aislantes. Cuando los átomos se combinan para formar un material cristalino sólido, se disponen en una estructura simétrica. Los átomos de la estructura cristalina se mantienen unidos por enlaces covalentes, que se producen por la interacción de los electrones de valencia de los átomos. El silicio es un material cristalino. Todos los materiales están hechos de átomos; estos contribuyen a las propiedades eléctricas del material, incluida su capacidad para conducir corriente eléctrica. Para analizar las propiedades eléctricas, un átomo se puede representar mediante una capa de valencia y una parte central compuesta por todas las capas internas y núcleos atómicos. La Figura 2.5 ilustra este concepto utilizando átomos de carbono (el carbono se utiliza en algunos tipos de resistencias). Tenga en cuenta que un átomo de carbono tiene cuatro electrones en la capa de valencia y dos electrones en la capa interna. El núcleo está compuesto por seis protones y seis neutrones, por lo que +6 representa la carga positiva de los seis protones. La carga neta de la parte central es +4 (+6 para el núcleo y -2 para los dos electrones de la capa interna).

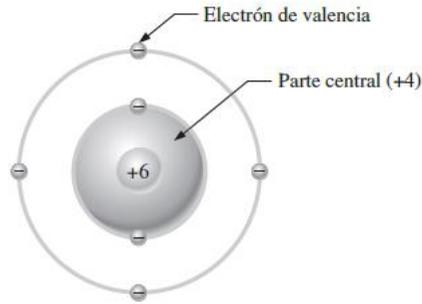


Figura 2.5 Diagrama de un átomo de carbono.

Un aislante es un material que no conduce electricidad en condiciones normales. La mayoría de los buenos aislantes son materiales compuestos, es decir, no están compuestos por un solo elemento. Los electrones de valencia están estrechamente unidos a los átomos; por lo tanto, hay muy pocos electrones libres en un aislante. Algunos ejemplos de aisladores son caucho, plástico, vidrio, mica y cuarzo. Un conductor es un material que conduce fácilmente la corriente eléctrica. La gran mayoría de los metales son muy buenos conductores. Los mejores conductores son los materiales de un solo elemento, como el cobre, la plata, el oro y el Aluminio, cuya característica es que los átomos tienen un solo electrón de valencia y están muy débilmente unidos a los átomos. Estos electrones de valencia débilmente ligados se convierten en electrones libres. Por lo tanto, en materiales conductores, los electrones libres son electrones de valencia y en términos de su capacidad para conducir corriente, un semiconductor es un material entre un conductor y un aislante. Un semiconductor en su estado puro (intrínseco) no tiene buena conducción y por lo tanto tampoco es un buen aislante. Los semiconductores de un solo elemento más comunes son el silicio, el germanio y el carbono. Los semiconductores compuestos como el arseniuro de galio y el fosfuro de indio también se utilizan ampliamente. Los semiconductores de un solo elemento se caracterizan por tener átomos con cuatro electrones de valencia.

2.4.1. Bandas de energía

Recuerde que la capa de valencia de un átomo muestra una banda de niveles de energía dentro de la cual están limitados los electrones de valencia. Cuando el electrón gana suficiente energía extra, puede dejar la capa de valencia, convertirse en un electrón libre y existir en la denominada banda de conducción. La discrepancia de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción se le llama banda prohibida. Esta es la energía necesaria para que el electrón de valencia pase de la banda de valencia a la banda de conducción. Una vez en la banda de conducción, los electrones pueden moverse libremente por todo el material y no están unidos por ningún átomo dado. La Figura 2.6 muestra los diagramas de energía de aisladores, semiconductores y conductores: La parte (a) muestra que los aisladores tienen una banda prohibida muy amplia. Los electrones de valencia no saltarán a la banda de conducción, excepto bajo las condiciones de ruptura donde se aplican voltajes extremadamente altos a través del material. La parte (b) explica cómo los semiconductores tienen una banda prohibida más estrecha, lo que permite que algunos átomos de valencia salten a la banda de conducción y se conviertan en electrones libres. Por el contrario, como se muestra en la parte (c), las bandas de energía en el conductor se superponen. En los materiales conductores de metales, siempre hay más electrones de valencia que electrones libres.

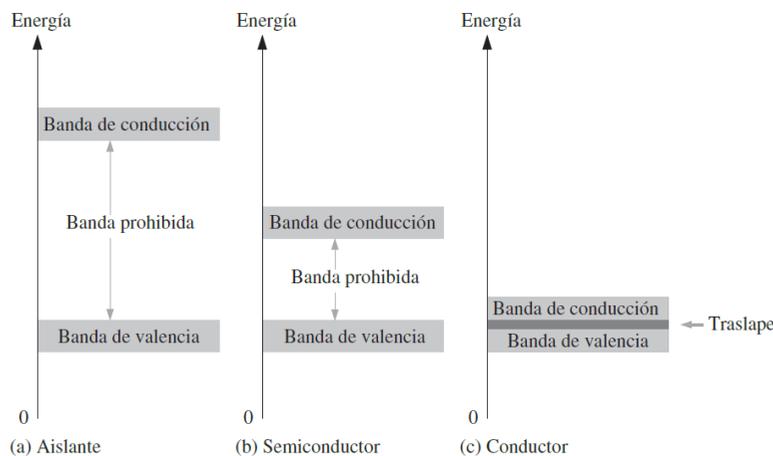


Figura 2.6 Diagrama de energía para los tres tipos de materiales.

2.4.2. Corriente en semiconductores

La forma en que un material conduce la corriente es importante para comprender cómo conducir la corriente. Trabajos de equipos electrónicos. Realmente no puedes entender el funcionamiento de uno Dispositivos que no saben nada de corriente, como diodos o transistores. Los electrones del átomo solo pueden existir en la banda de energía especificada. Cada capa alrededor del núcleo corresponde a una banda de energía específica, y está separada de la banda de energía adyacente por la banda prohibida No puede haber electrones en la banda prohibida. La Figura 2.7 indica el diagrama de bandas de energía de átomos no excitados (sin energía externa como el calor) en un cristal de silicio puro. Esta situación solo ocurre cuando la temperatura absoluta en Kelvin es cero.

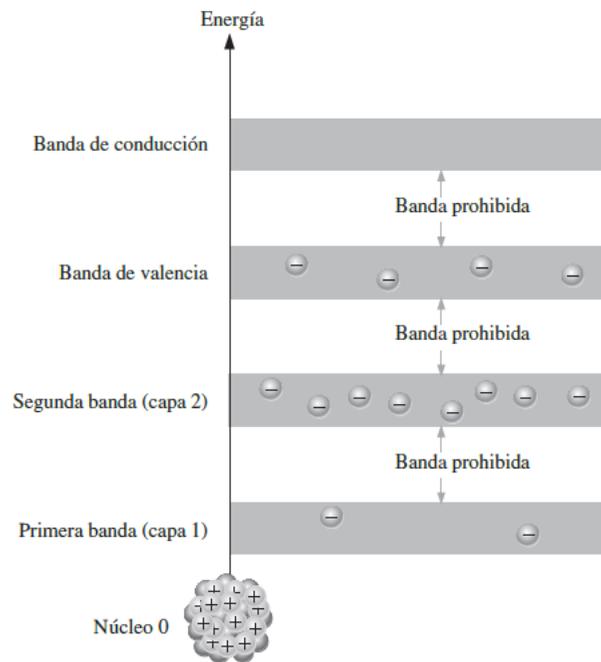


Figura 2.7 Diagrama de bandas de energía de un átomo excitado en un cristal de silicio puro (intrínseco).

2.4.3. Electrones de conducción y huecos

El cristal de silicio intrínseco (puro) a temperatura ambiente tiene suficiente energía térmica (térmica) para hacer que algunos electrones de valencia pasen de la banda de valencia a la banda de conducción, convirtiéndose así en electrones libres, también conocidos como electrones de conducción. Esto se ilustra en el diagrama de energía de la Figura 2.8 (a) y el diagrama de enlace de la Figura 2.8 (b).

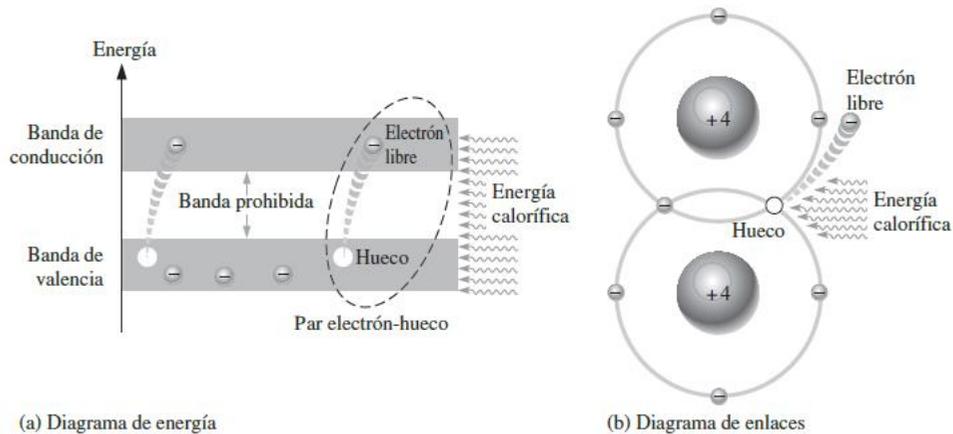


Figura 2.8 Desarrollo de pares electrón-hueco en un cristal de silicio. Los electrones en la banda de conducción son electrones libres.

Cuando un electrón salta a la banda de conducción, deja un espacio en blanco en la banda de valencia dentro del cristal. Este espacio vacío se llama agujero. Por cada electrón que es promovido a la banda de conducción por energía externa, se retiene un agujero en la banda de valencia y se genera un llamado par, electrón-agujero; cuando el electrón de la banda de conducción pierde energía y regresa al agujero en la banda de valencia, se producirá un agravamiento. En resumen, una pieza de silicio intrínseco a temperatura ambiente tiene varios electrones de banda de conducción (libres) en cualquier momento, estos electrones no están unidos a ningún átomo y básicamente se desplazan por todo el material. Cuando estos electrones saltan a la banda de conducción, se producirá el mismo número de huecos en la banda de valencia (ver Figura 2.9).

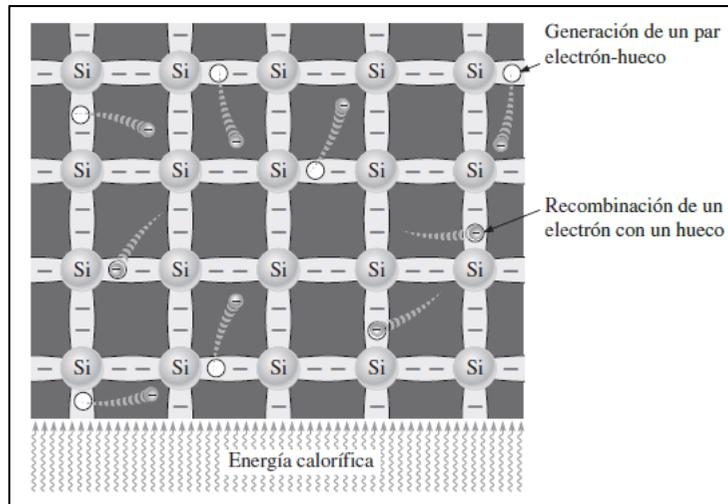


Figura 2.9 Pares de electrón-hueco en un cristal de silicio.

2.4.4. Semiconductores tipo N y P

Los materiales semiconductores en su estado intrínseco no pueden llevar bien la corriente y su valor es limitado. Esto se debe al número señalado de electrones libres en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia. El silicio intrínseco (o germanio) debe modificarse aumentando el número de electrones libres o huecos para aumentar su conductividad y hacerlo útil en dispositivos electrónicos. Esto se logra agregando impurezas al material intrínseco. Dos materiales semiconductores externos (impuros), tipo n y tipo p, son los componentes básicos de la mayoría de los tipos de dispositivos electrónicos.

Para aumentar el número de electrones de banda de conducción en el silicio intrínseco, se agregan átomos de impurezas pentavalentes. Estos átomos son cinco electrones de valencia, como arsénico (As), fósforo (P), bismuto (Bi) y antimonio (Sb). Como se muestra en la Figura 2.10, cada átomo pentavalente (antimonio en este caso) forma un enlace covalente con cuatro átomos de silicio adyacentes. Los cuatro electrones de valencia del átomo de antimonio se utilizan para formar un enlace covalente con el átomo de silicio, dejando un electrón extra. Este electrón extra se convierte en un electrón de conducción porque no participa en el enlace. Dado que un átomo pentavalente cede un electrón, se le llama átomo donante. El número de electrones de conducción puede controlarse cuidadosamente mediante el número de átomos de impureza añadidos al silicio. Los

electrones de conducción producidos por este proceso de dopaje no dejarán huecos en la banda de valencia porque exceden el número requerido.

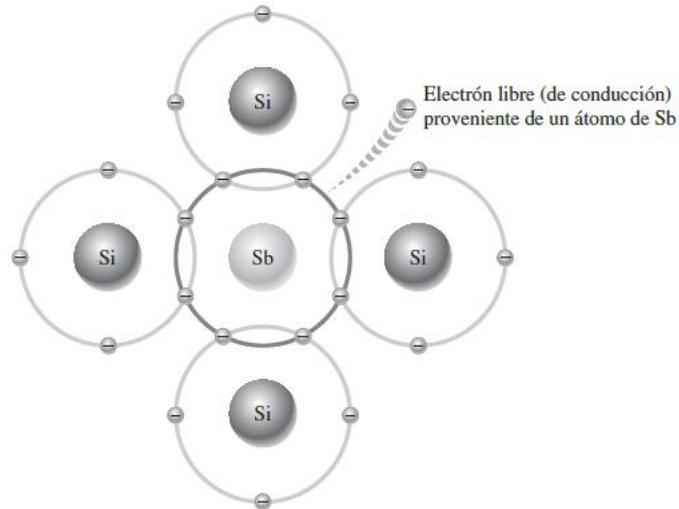


Figura 2.10 Átomo de impureza de antimonio (Sb) en el centro. El electrón extra proviene del átomo de Sb se convierte en electrón libre.

Portadores mayoritarios y minoritarios Dado que la mayoría de los portadores son electrones, el silicio (o germanio) dopado con átomos pentavalentes es un semiconductor de tipo n (n representa la carga negativa de los electrones). Los electrones se denominan portadores mayoritarios en materiales de tipo n. Aunque la mayoría de los portadores en los materiales de tipo n son electrones, algunos huecos son generados por pares de electrones y huecos que generan calor (estos huecos no se generan agregando átomos de impurezas pentavalentes). Los agujeros en los materiales de tipo n se denominan portadores minoritarios.

Para aumentar el número de huecos en el silicio intrínseco, se agregan átomos de impurezas trivalentes: átomos con tres electrones de valencia, como boro (B), indio (In) y galio (Ga). Como se muestra en la Figura 2.11, cada átomo trivalente (en este caso, boro) forma un enlace covalente con cuatro átomos de silicio adyacentes. Los tres electrones de valencia del átomo de boro se utilizan para el enlace covalente Dado que se requieren

cuatro electrones, se genera un agujero cuando se agrega cada átomo trivalente. Dado que un átomo trivalente puede transportar un electrón, generalmente se le llama átomo aceptor. El número de agujeros se controla cuidadosamente por el número de átomos de impurezas trivalentes añadidos al silicio. Los huecos generados por este proceso de dopaje no van acompañados de electrones conductores (libres).

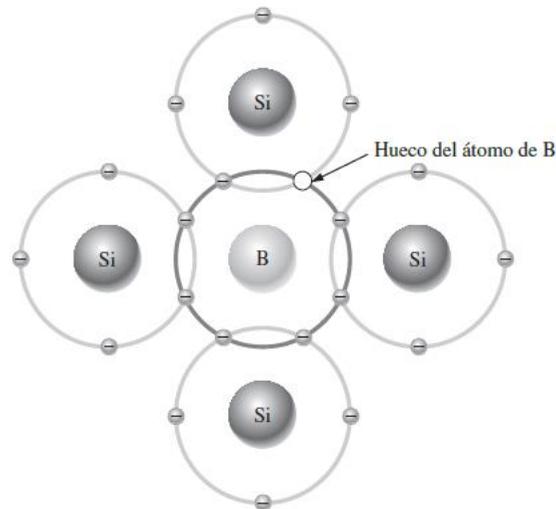


Figura 2.11 Átomo de impureza trivalente en una estructura de cristal de silicio. Un átomo de impureza de boro (B) se muestra en el centro.

2.5. Películas delgadas

Las películas delgadas consisten en materiales que resultan de la condensación o reacción de compuestos (en forma atómica, iónica o molecular) sobre un sustrato a través de procesos aleatorios de crecimiento y/o nucleación. Las propiedades estructurales, químicas, metalúrgicas y físicas de las películas delgadas dependen de una serie de parámetros de deposición y de su espesor. Bajo el nombre de películas delgadas englobamos dispositivos con espesores que van desde unos pocos nanómetros hasta decenas de nanómetros, por lo que es mejor definirlos en función del proceso que permite crearlos que del espesor final obtenido. Son estos procesos aleatorios de crecimiento y nucleación los que otorgan a las películas nuevas propiedades que difieren de las capas

delgadas obtenidas mediante técnicas más tradicionales (por ejemplo, adelgazamiento de capas gruesas mediante serigrafía, aerosoles, etc.) [39].

2.6. Métodos de depósito para la obtención de películas delgadas

Las técnicas de depósito utilizadas para películas delgadas son el depósito por ablación láser [40], el depósito químico en fase de vapor (CVD) [], depósito de capas atómicas (ALD), pulverización catódica (Sputtering), depósito por baño químico (CBD) y el depósito sol-gel utilizando spin-on-glass.

Para el trabajo a continuación se disponía con la infraestructura de un cuarto limpio también conocido como *clean room* ubicado en las instalaciones del **Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial** (CIDESI) así como también un equipo de depósito de pulverización catódica (Sputtering).

2.6.1. Depósito por láser

Primero, la ablación con láser pulsado (PLA) y la deposición de láser pulsado (PLD) son dos técnicas relacionadas que utilizan la energía del láser para manipular la materia en superficies sólidas. El término ablación con láser generalmente se usa para describir la interacción explosiva entre un rayo láser y la materia, que se refiere a la eliminación de material sólido usando pulsos de un rayo láser [40]. Los primeros experimentos de deposición de pulsos láser se llevaron a cabo en 1960, y otros intentos continuaron entre 1970 y 1980. A fines de la década de 1980, la deposición de pulsos láser se hizo popular como técnica para el crecimiento de películas delgadas de varios óxidos [41].

Por lo tanto, la ablación con láser es una de las técnicas útiles para producir nuevos materiales. Se ha informado que las soluciones coloidales de nanopartículas se preparan mediante ablación de targets metálicos en solventes. Debido a las propiedades foto químicas y foto físicas únicas de las nanopartículas, que son diferentes de las que se

encuentran a granel, se espera que las nanopartículas metálicas se utilicen como materiales funcionales [42]. Así pues, la ablación de láser pulsada la cuál es simple pero versátil, ha evolucionado en muchas direcciones como es la ciencia, la medicina y la ingeniería contemporáneas. Esta gama ha sido impulsada en parte por los avances tecnológicos, en particular las mejoras incrementales en la generación de radiación láser pulsada confiable y de alta intensidad. Los métodos de ablación con láser también se utilizan ampliamente para la micro estructuración y el modelado de polímeros y materiales de banda ancha como el silicio y la sílice fundida [43].

Por el contrario, la deposición por láser pulsado (PLD) es una técnica que permite el crecimiento de películas delgadas en una variedad de sustratos. Las películas delgadas basadas en PLD se han utilizado en diversas aplicaciones, como electrónica, medios de almacenamiento masivo, sensores, actuadores, entro otros. Recientemente, la posibilidad de hacer crecer películas delgadas magnéticas sobre sustratos aislantes como el vidrio o los plásticos comerciales ha atraído un gran interés para fabricar dispositivos o componentes de bajo costo para muchas aplicaciones modernas. Debido a las excelentes propiedades magnéticas intrínsecas, como la magnetización de saturación moderada (M_s), la gran anisotropía magnética y la alta temperatura de Curie (T_c) [44]. Un esquema del sistema utilizado para este tipo de depósito (ver Figura 2.12).

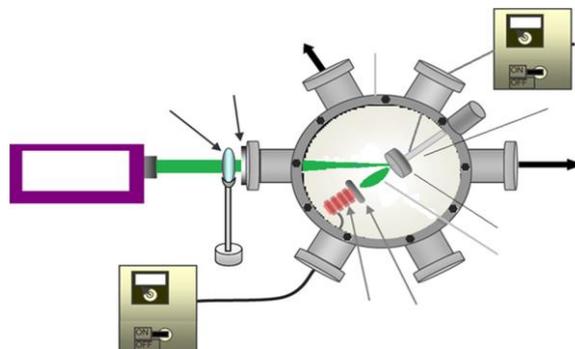


Figura 2.12 Esquema del sistema de deposición láser pulsado.

2.6.2. Depósito químico en fase de vapor (CVD)

Las películas sólidas se forman sobre sustratos a través de la deposición química de vapor, que implica la reacción de los componentes químicos en fase de vapor. Este proceso introduce gases reactivos en una cámara de reacción donde se descomponen al llegar a una superficie caliente, formando finalmente una película delgada. Si el sustrato se calienta a una temperatura lo suficientemente alta, los compuestos gaseosos se descompondrán por pirólisis, lo que permitirá que se produzcan reacciones químicas. El resultado final es la deposición de compuestos no volátiles sobre el sustrato. El silano (SiH_4), un hidruro metálico o un haluro metálico, se usa comúnmente en el proceso de deposición. Alternativamente, la reducción con hidrógeno implica una reacción de reducción a alta temperatura en presencia de gas [45].

La deposición dieléctrica de alta k mediante CVD es un proceso químico que se realiza a altas temperaturas. Durante este proceso, los precursores metálicos se descomponen en la superficie caliente, lo que da como resultado una deposición dieléctrica de alta k . La tasa de deposición y la composición de la película depositada dependen en gran medida de la geometría del reactor, la temperatura y el gradiente de flujo. Las películas high- k depositadas por CVD normalmente contienen impurezas de carbono y tienen capas interfaciales de baja densidad. Además, tienen constantes dieléctricas relativamente altas y propiedades eléctricas deseables, como baja densidad de estados en la interfaz, baja densidad de corriente de fuga y baja histéresis. Aun así, es menos costoso que otros métodos como la pulverización catódica y la deposición de capas atómicas [46]. La presión y la temperatura en la cámara son críticas en este proceso [47].

2.6.3. Depósito de capas atómicas (ALD)

El depósito de capas atómicas (ALD por sus siglas en inglés) es un método químico utilizado para depositar capas delgadas en fase gaseosa, al igual que CVD. Sin embargo, a diferencia de CVD, ALD se distingue por el hecho de que la película se crea a través de reacciones

saturadas en la superficie, que siguen una secuencia específica. Este proceso implica la introducción de dos o más precursores dentro de la cámara de deposición alternadamente, uno a la vez, separados por pasos de purga o evacuación [48].

El depósito de capas atómicas (ALD por sus siglas en inglés) es un método químico utilizado para depositar capas delgadas en fase gaseosa, al igual que CVD. Sin embargo, a diferencia de CVD, ALD se distingue por el hecho de que la película se crea a través de reacciones saturadas en la superficie, que siguen una secuencia específica. Este proceso implica la introducción de dos o más precursores dentro de la cámara de deposición alternadamente, uno a la vez, separados por pasos de purga o evacuación [46].

2.6.4. Pulverización catódica (Sputtering)

La técnica de deposición conocida como “sputtering” o erosión catódica es uno de los métodos más nobles para la obtención de materiales con propiedades específicas debido a su reproducibilidad, escalabilidad y versatilidad de procesos que se pueden realizar en este sistema [49]. La deposición por pulverización consiste en bombardear un objetivo con iones energéticos. Por lo general, los iones se forman a partir de gas argón. El objetivo en el sistema es un disco sólido que actúa como fuente del material a depositar y se conecta a tierra eléctricamente cuando se introduce gas argón en la cámara y se ioniza a una carga positiva. Estos iones cargados positivamente son atraídos por el objetivo conectado a tierra, lo que hace que se aceleren hacia el blanco hasta que finalmente chocan con el target. Cuando los iones golpean el target, la transferencia de impulso hace que los átomos del mismo se desplacen y se dispersen por toda la cámara, formando algunos depósitos en la oblea dentro de la cámara. Las propiedades de la película delgada se pueden controlar fácilmente durante el proceso de pulverización mediante el ajuste de los parámetros de deposición, como la presión, la potencia y la temperatura del sustrato [50].

El nitruro de silicio o el óxido de silicio se pueden depositar con un cátodo de silicio si se introduce un gas reactivo como nitrógeno u oxígeno. En este caso, se dice que ocurre la pulverización catódica reactiva, un proceso de deposición en el que dominan los efectos físicos de la corrosión del cátodo, aunque en combinación con la reacción del material liberado del cátodo con el gas introducido en la cámara. Una de las desventajas es la necesidad de preparar el cátodo para el material a depositar, con suficiente pureza y diámetro para garantizar la uniformidad de la capa sobre toda la oblea, además, el equipo utilizado para la pulverización es muy costoso [51].

Se basa en tener una cámara de vacío que contiene dos electrodos, un ánodo y un cátodo, entre los cuales se establece una descarga en un ambiente de baja presión controlado por un suministro de gas residual, (ver Figura 2.13). Debido a la influencia de la diferencia de potencial, los átomos del gas residual se ionizan. Los iones de gas residuales golpean el cátodo, donde se coloca el objetivo o la tarjeta de algún material, y las moléculas ionizadas lo descomponen. Los átomos expulsados del objetivo crean una nube que son depositadas en las superficies circundantes. Este fenómeno se denomina pulverización catódica [52].

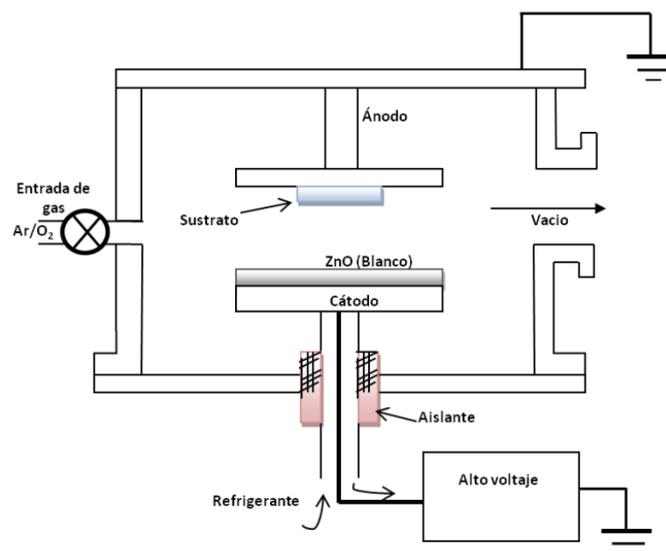


Figura 2.13 Esquema de un sistema de pulverización catódica (Sputtering).

2.6.5. Depósito por baño químico (CBD)

Vale la pena señalar que el número de materiales depositados por baño químico se expandió gradualmente, especialmente en la década de 1980, para incluir sulfuros y seleniuros de varios metales, algunos óxidos y algunos compuestos ternarios. En 1991, Chu y otros utilizaron CdS para fabricar células solares de alta eficiencia (13,14 %) a partir de películas delgadas de CdTe/CdS. Después de la película de CdS, se promovió aún más la deposición. La deposición de CdTe y CuInSe₂ mostró que las células fotovoltaicas obtenidas eran superiores a las fabricadas con CdS. Dado el interés actual en las nanopartículas, la deposición química es una excelente técnica para depositar películas delgadas nano cristalinas. La deposición química se refiere a la deposición de películas delgadas sobre sustratos sólidos, que es el resultado de reacciones en soluciones. Por ejemplo, el CdS se puede obtener usando una solución de Cd. La adición de iones S^{2-} reaccionará con los iones de cadmio para formar CdS en forma de precipitación [53].

Por lo tanto, el aspecto más destacable en la deposición química es controlar la velocidad de las reacciones de precipitación para que suceda lo suficientemente lento como para que el semiconductor se forme gradualmente y se adhiera al sustrato, formando una película delgada [54].

2.6.6. Depósito sol-gel utilizando spin-on-glass

La deposición sol-gel es una técnica sencilla y eficaz para formar películas finas y revestimientos sobre sustratos metálicos, plásticos o cerámicos. El proceso utiliza una solución que contiene el óxido deseado, que se aplica al sustrato mediante revestimiento giratorio, inmersión o pulverización. Los recubrimientos se pueden aplicar a temperatura ambiente, pero la mayoría requiere recocido y densificación por temperatura. La tecnología sol-gel se utiliza en muchas aplicaciones útiles, como óptica y electrónica,

sensores, desgaste, barreras y protección. Aunque los recubrimientos obtenidos son de calidad limitada en comparación con otras técnicas como la oxidación, la evaporación o la pulverización catódica. En la industria de los semiconductores, las técnicas de sol-gel se utilizan comúnmente para depositar dióxido de silicio mediante el método spin-on-glass (SOG), que se ha utilizado ampliamente como fuente de difusión de impurezas y como dieléctrico planarizante para la metalización [55].

El proceso sol-gel es una técnica para producir una masa rígida y porosa a partir de una solución o dispersión coloidal. Esta técnica se utiliza para la producción de materiales como spin-on-glass. Para ello, se utiliza un centrifugador para depositar una solución en el sustrato, que suele ser una oblea de silicio. El sustrato se limpia antes del proceso y se coloca sobre el centrifugador, donde se aplica la solución y se hace girar a alta velocidad para depositar la película (ver Figura 2.14). El espesor de la película se puede controlar variando la velocidad del centrifugador o la viscosidad de la solución. Después del depósito, la película se seca para eliminar el solvente y se somete a un tratamiento a alta temperatura para densificarla y eliminar la porosidad. La microporosidad no se elimina por completo hasta temperaturas muy altas, pero puede utilizarse como barrera para portadores de carga en aplicaciones como dieléctrico intermetal o pasivación [55].

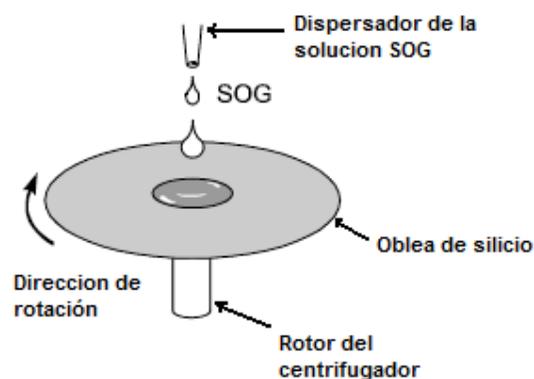


Figura 2.14 Esquema del método sol-gel para el depósito de spin-on-glass.

2.7. Transistores de película delgada

Un transistor de película delgada (TFT) es un transistor de efecto de campo cuya capa activa, o capa portadora de corriente, es una película delgada que se forma depositando una capa semiconductor activa y una capa dieléctrica sobre un sustrato no conductor. Generalmente, los TFT se fabrican a bajos costos de material y se procesan a bajas temperaturas. Además, el tiempo de fabricación de los TFT es más corto que el de los MOSFET convencionales. TFT ha sido probado en una variedad de aplicaciones que incluyen pantallas de cristal líquido (LCD) de matriz activa, pantallas de emisión de luz orgánica de matriz activa, equipos de foto detección y biosensores. Una pantalla contiene una matriz de elementos direccionables más pequeños llamados píxeles. La imagen en la pantalla consta de miles (millones) de píxeles dispuestos en filas y columnas. El TFT actúa como un interruptor y puede encender y apagar los píxeles con mucha facilidad [56].

TFT tiene 4 tipos de estructuras, dependiendo de la ubicación de la puerta, la fuente y el drenaje. Como referencia, a veces se dice que tiene un canal escalonado entre el drenaje de la fuente y el aislante; es coplanar con el drenaje de la fuente y el aislante, pero al final solo tenemos 4 estructuras de transistores de película delgada como se puede ver en la Figura 2.15.

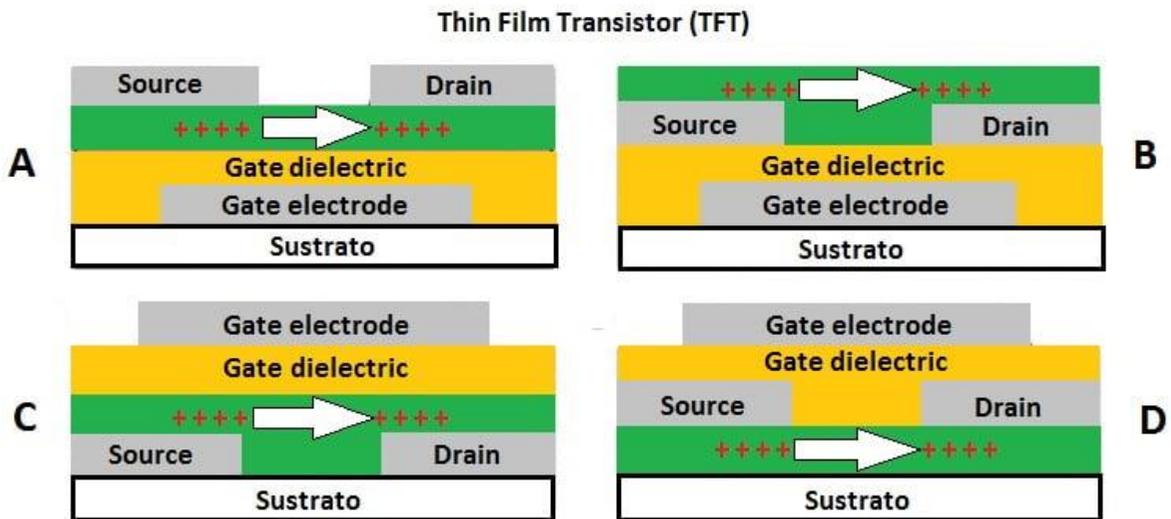


Figura 2.15 Diagrama del transistor de película fina.

La Figura anterior muestra las 4 estructuras mencionadas anteriormente. Hay A y C o hay escalones. Tenemos canales para drenar el agua alrededor de la fuente, por lo tanto, aunque el canal sea delgado, la entrada de la fuente y el drenaje por donde pasan los electrones también es muy amplia. Por otro lado, es el caso de la forma B, D o Coplanar en la imagen; si el canal es muy fino, la entrada también será muy fina. Esto conduce a diferencias en la velocidad de los electrones.

Para la fabricación y materiales del transistor de película delgada (TFT) se dispone de un sustrato flexible: compuesto por vidrio o metal de unas micras de espesor y polímero, como el PET (polietileno tereftalato). Ésta es la base de la fabricación actual de equipos electrónicos. También es importante el aislamiento; esta capa es muy importante porque evitará cortocircuitos eléctricos entre la capa semiconductor y el electrodo de puerta. La función del electrodo puerta (Gate) es dar una señal a la película delgada del semiconductor para así activar el contacto que existen, siendo así entre la fuente (*Source*) y el drenaje (*Drain*). Normalmente se fabrica de cromo, Aluminio u oro, esto ya dependerá del fin al que se desea llegar. Hay otras capas de electrodos: utilice conductores depositados en la superficie del semiconductor, como oro, plata y Aluminio-cromo. Incluso se utiliza ITO (óxido de indio y estaño) como revestimiento conductor para los electrodos en la fuente y el drenaje. Los componentes de TFT están completamente encapsulados en un polímero o material cerámico [57].

2.8. Materiales amorfos

Los materiales amorfos se conocen desde hace cientos de años, cuando el vidrio, un material compuesto principalmente de sílice, fue creado y utilizado en las civilizaciones de

Egipto y Mesopotamia. La misión Apolo, que ha entrado en la era contemporánea, recuperó un material amorfo en la superficie lunar que se remonta a millones de años. Al igual que el estado cristalino, los materiales amorfos se caracterizan por su resistencia a la fluencia (transición de la deformación elástica a la deformación plástica), pero debido a que tienen poca o ninguna estructura, no muestran una tendencia a organizarse en geometría cristalina. Dependiendo del proceso de solidificación, el mismo compuesto puede formar una red cristalina o así mismo puede ser un sólido amorfo. Por ejemplo, dependiendo de la disposición espacial de las moléculas de dióxido de silicio (SiO_2), se puede obtener una estructura cristalina (cuarzo) o un sólido amorfo (vidrio). Otra forma común de nombrar materiales amorfos (o amorfos) son los materiales de vidrio. En otras palabras, para el vidrio, no solo podemos referirnos a los clásicos materiales específicos basados en SiO_2 , sino también a toda la categoría de Material. Muchos de ellos son mecánicamente fuertes, resistentes y muy Resistente a los efectos de agentes químicos y físicos, y tiene una elasticidad valiosa. En cuanto al magnetismo, los metales amorfos pueden presentar las propiedades magnéticas más significativas, comportándose como materiales ferromagnéticos (materiales que están ordenados magnéticamente). Todos los momentos magnéticos en la misma dirección y dirección) [58].

2.9. Aluminio y sus aleaciones

El Aluminio (Al) es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre, dentro del grupo de los metales no ferrosos, es el material más utilizado en muchas otras aplicaciones en la industria y la vida diaria. Su peso ligero (2.70 g / cm^3), buen comportamiento en la resistencia mecánica de muchas aleaciones, alta conductividad térmica y eléctrica, durabilidad (el Aluminio es estable en el aire) y resistencia a la corrosión (a través de la superficie correcta El tratamiento es resistente al agua de mar, así como muchas soluciones acuosas y otros reactivos químicos), haciendo de este material una opción ideal para innumerables soluciones, incluyendo estructura, decoración u otros aspectos. Por otro lado, una característica de la energía actual es que el Aluminio se puede reciclar mucho después de su vida útil. De hecho, el uso de materiales reciclados en la fábrica para producir

nuevas aleaciones de Aluminio puede reducir en gran medida la energía requerida (hasta un 90%) en comparación con la energía requerida para convertir los materiales de Aluminio en uso. También se recomienda consultar la tabla adjunta incluida en este tutorial para comprender los nombres, las composiciones químicas, las propiedades mecánicas y las principales aplicaciones de las diferentes aleaciones de Aluminio en el mercado.

Por un lado, no se utiliza Aluminio puro porque es un material blando con poca resistencia mecánica. No obstante, la aleación con otros elementos puede aumentar su resistencia y así obtener otras cualidades, dependiendo de la naturaleza del agente de aleación utilizado. Los elementos más utilizados para formar aleaciones con Aluminio son el cobre (Cu), el silicio (Si), el magnesio (Mg), el zinc (Zn) y el manganeso (Mn). En menor medida, el hierro (Fe), el cromo (Cr) y el titanio (Ti) se utilizan como aditivos o posiblemente como impurezas en las aleaciones. Normalmente se agregan níquel (Ni), cobalto (Co), plata (Ag), litio (Li), vanadio (V), circonio (Zr), estaño (Sn), plomo (Pb) para conseguir otras aleaciones especiales. (Cd) y Bismuto (Bi) [59].

2.10. Caracterización de materiales

Los semiconductores son materiales cuyas propiedades son extremadamente sensibles a los defectos del material. La simple introducción de impurezas en el orden de un mil millonésimo rango puede implicar cambios en la resistividad de varios órdenes de magnitud. Los defectos de los cristales y los límites de los granos cambian la movilidad y la vida útil de los transportadores. La compensación eléctrica de materiales tendrá un impacto negativo en la frecuencia máxima de funcionamiento de los equipos o el ruido que generan. Los materiales de pureza adecuada que se utilicen para fabricar dispositivos deben tener "pureza electrónica", que se aplica tanto al vidrio semiconductor como a los reactivos utilizados y a los materiales utilizados como precursores.

El "silicio de grado electrónico" (EGS: silicio de grado electrónico) solo puede tener impurezas activas de unas pocas partes por billón o ppb (partes por billón) ($1 \text{ ppb} = 1/10^9$),

y las impurezas inactivas no deben exceder las partes por billón Varios. millón. La determinación de la perfección de un material generalmente no se hace directamente, porque el sistema para hacerlo es costoso y requiere mucho tiempo, sino que se realiza a través de mediciones de resistividad y movilidad. Un sistema con muchas impurezas activas tendrá baja resistividad. Además, la movilidad de los portadores también se ve afectada por impurezas inactivas y otros centros de dispersión.

2.10.1. Síntesis de silicio

El primer transistor comercial se fabricó con germanio. Sin embargo, una vez que sea posible obtener un material monocristalino de alta calidad, este material será reemplazado por silicio. Su principal ventaja radica en un mayor ancho de banda, que conduce a un diodo con menor corriente de fuga, y las características del óxido de silicio, como material básico para el desarrollo de la tecnología plana. Hay una gran cantidad de silicio en la corteza terrestre y su peso es solo superado por el oxígeno. Suele existir en forma de silicato, es decir, sílice combinada con otros materiales. Los silicatos tienen muchos usos, como la fabricación de vidrio, el uso de dieléctricos (mica), joyas (jade, zirconia, cuarzo) o cristales de cuarzo para la relojería y como osciladores de frecuencia estables.

El primer paso para lograr obleas de alta calidad es obtener silicio metalúrgico (MGS), porque, aunque hay abundancia de silicio puro, el silicio puro no se encuentra en la naturaleza, sino en forma de óxidos. Generalmente, se selecciona arena de sílice con la menor cantidad de impurezas como materia prima sintética. Para separar el oxígeno de la molécula, el enlace debe romperse. Para ello, la arena se derrite en presencia de carbón o partículas de madera, mientras se le aplica un fuerte campo eléctrico para formar una descarga (la sílice es un aislante). El arco eléctrico disocia las moléculas y el oxígeno liberado puede reaccionar nuevamente con el silicio o el carbono. En este último caso, el monóxido de carbono se escapa al exterior, por lo que la mezcla pierde oxígeno. El silicio puro pesa un 70% y se deposita en el fondo del crisol. Este último se descarga para obtener silicio metalúrgico (MGS), (ver Figura 2.16).

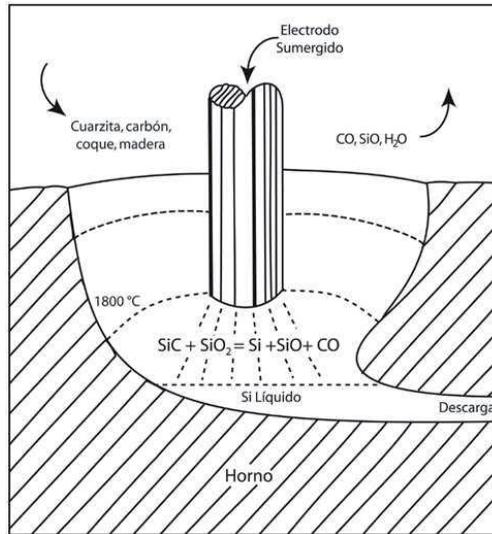


Figura 2.16 Sistema para producción de silicio metalúrgico.

Capítulo 3: Detalles experimentales y simulaciones

3.1. Simulación del transistor de película delgada en TCAD Silvaco

Para simular diferentes tipos de estructuras de transistores de película delgada en el simulador Atlas de Silvaco, los resultados experimentales del trabajo descrito en el punto 1.4 sensores de pH, TFT's, a-IGZO informado anteriormente utilizando un semiconductor a-IGZO como capa activa se basaron en la obtención de una sensibilidad de pH de ~160 mV/pH [21]. Además de eliminar los problemas asociados con la alta resistencia de contacto, el uso de la operación de compuerta doble también elimina la necesidad de usar un dieléctrico de alta K adicional [21]. Por lo tanto, en el simulador se usaron las siguientes declaraciones como se muestra en la tabla 1 [60].

Tabla 1. Comandos del simulador Silvaco-ATLAS

Grupo	Declaración
Especificación de la estructura	Mesh (malla)
	Region (Región)

	Electrode (Electrodo)
	Doping (Dopaje)
Especificación del material y modelos	Material (material)
	Models (modelos)
	Contact (contacto)
Selección de método numérico	Interface (Interfaz)
	Method (método)
Especificación de la solución	Log (logaritmo)
	Solve (Resolver)
	Load (cargar)
	Save (guardar)
Análisis de resultados	Extract (extraer)
	Tonyplot

3.1.1 Parámetros extraídos de la literatura

Los parámetros ideales para la estructura del transistor de película delgada que se muestran en la tabla 2, fueron basados en el trabajo reportado por Fung *et al.*, 2009 [15], quienes realizaron simulaciones numéricas bidimensionales de transistores de película delgada In-Ga-Zn-O amorfos por radiofrecuencia.

Tabla 2. Parámetros clave de simulación y propiedades del TFT a-IGZO [15]

Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
N_c	5×10^{18}	cm^{-3}	Banda de conducción efectiva DOS
N_v	5×10^{18}	cm^{-3}	Banda de valencia efectiva DOS
g_{ta}	1.55×10^{20}	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$	Densidad de estados de cola en $E=E_c$
g_{td}	1.55×10^{20}	$\text{cm}^{-3} \text{eV}^{-1}$	Densidad de estados de cola en $E=E_v$
E_a	13	meV	Pendiente de la cola de la banda de conducción
E_d	120	meV	Pendiente de la cola de la banda de valencia
E_g	3.05	eV	Brecha de banda

χ	4.16	eV	Afinidad electrónica
ϵ	10		Permitividad
μ_n	15	cm ² /V s	Movilidad de banda (electrón)
μ_p	0.1	cm ² /V s	Movilidad de banda (hueco)
m_c	0.34	m_e	Masa efectiva de la banda de conducción
g_d	6.5×10^{16}	cm ⁻³ eV ⁻¹	Pico de estados OV
λ	2.9	eV	Energía media de los estados OV
σ	0.1	eV	Desviación estándar de los estados OV

Propiedades del TFT a-IGZO

μ_{eff}	12	cm ² /V s	Movilidad efecto de campo
V_{th}	1.15	V	Voltaje de umbral
S	0.13	V/dec	Oscilación sub-umbral
I_{off}	$<10^{-14}$	A	Corriente de apagado
	10^{10}		Relación de corriente de encendido/apagado

La técnica de simulación numérica 2D descrita se usó como una herramienta útil para comprender mejor el funcionamiento del dispositivo y optimizar el rendimiento eléctrico del TFT a-IGZO. Las tablas 3 y 4 muestran algunos parámetros basados en un nuevo método de extracción de estados trampa en transistores amorfos de películas delgadas de InGaZnO.

Tabla 3. Parámetros usados en simulaciones 2-D [17]

Espesor de la capa a-IGZO	t_{IGZO}	50nm
Espesor del aislante	t_{ox}	100nm
Constante dieléctrica del aislante	ϵ_{ox}	3.9
Constante dieléctrica del a-IGZO	ϵ_{IGZO}	10
Tensión de banda ancha	V_{fb}	0.5V
Longitud del cañal	L	30 μ m

Ancho del cañal	W	200 μm
Longitud de superposición de puerta a fuente/drenador	L_{ov}	5 μm
Frecuencia	f	2 KHz
Temperatura de funcionamiento	T	300 K

Tabla 4. Conjunto de parámetros de defectos profundos y de cola [17]

Densidad de estados profundos en E_c	N_{da}	$5.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$
Densidad de estados de cola en E_c	N_{ta}	$2.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$
Energía característica de los estados profundos	kT_{da}	0.68 eV
Energía característica de los estados de cola	kT_{ta}	0.03 eV

3.1.2 Suscitar diferentes tipos de estructuras del TFT

El resultado de la simulación tiene varios puntos como las gráficas características y entre ellas se encuentra una estructura visual para tener una mejor representación del transistor de película delgada, ya que desde el plano 2-D viéndolo desde la parte frontal se puede diferenciar primero el espesor de cada capa a utilizar, después dentro de algunas herramientas que el software Silvaco facilita se puede analizar los puntos de mayor contacto con la opción de malla así como también revisar los electrodos en la fuente y el drenador cómo se muestran en la figura 3.1.

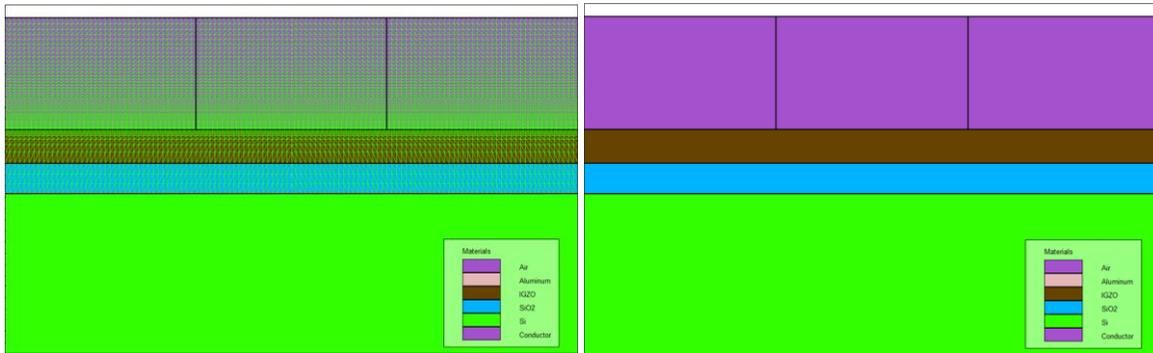


Figura 3.1 Estructura del TFT con el semiconductor α -IGZO, el SiO_2 y el Si.

3.2. Diseño del dispositivo TFT

Se requiere conocer el método de escritura directa del proceso de litografía, ya que esto ayudará a identificar los pasos de limpieza, deposición de resina, recocido y revelado, así como el ataque químico del material grabado. Por lo tanto, esto permite mostrar cómo el método de escritura directa realiza la transferencia y alineación. En la fabricación de dispositivos microelectrónicos, los procesos fotolitográficos son la forma en que los materiales adquieren dimensiones micrométricas (desde una micra hasta cientos de micras). En términos simples, podemos dividir el proceso de litografía en dos etapas: transferencia de patrones y grabado de patrones [61]. Para poder llevar a cabo dicho proceso es importante el uso del software KLayout (Editor) utilizando la técnica de depósito sputtering por magnetrón RF, los depósitos de los contactos sobre la película delgada del semiconductor se realizaron con la técnica conocida como máscara de sombra que por sus siglas en inglés (*shadow mask*), la estructura del transistor solo tiene lo que es la compuerta inferior (*Bottom gate*), esto se debe a que el sustrato también funciona como contacto por debajo del dieléctrico que es el óxido de silicio.

Primero, se usa un sustrato de silicio tipo P altamente dopado con Boro porque los TFT requieren un contacto de puerta común, la parte inferior del sustrato. Además, para asegurar el contacto entre el dispositivo caracterizado y el sustrato conductor, se depositó una capa de Aluminio con un espesor de 100 nm para los contactos de fuente y drenador.

Por otro lado, los terminales de fuente y drenador ubicados en la película semiconductor son un par de contactos rectangulares con las siguientes dimensiones, (ver Figura 3.2). Es importante tener en cuenta que el largo de los contactos representa la medida del ancho del canal creado en el semiconductor, y el espacio entre los contactos se conoce como la longitud del canal.

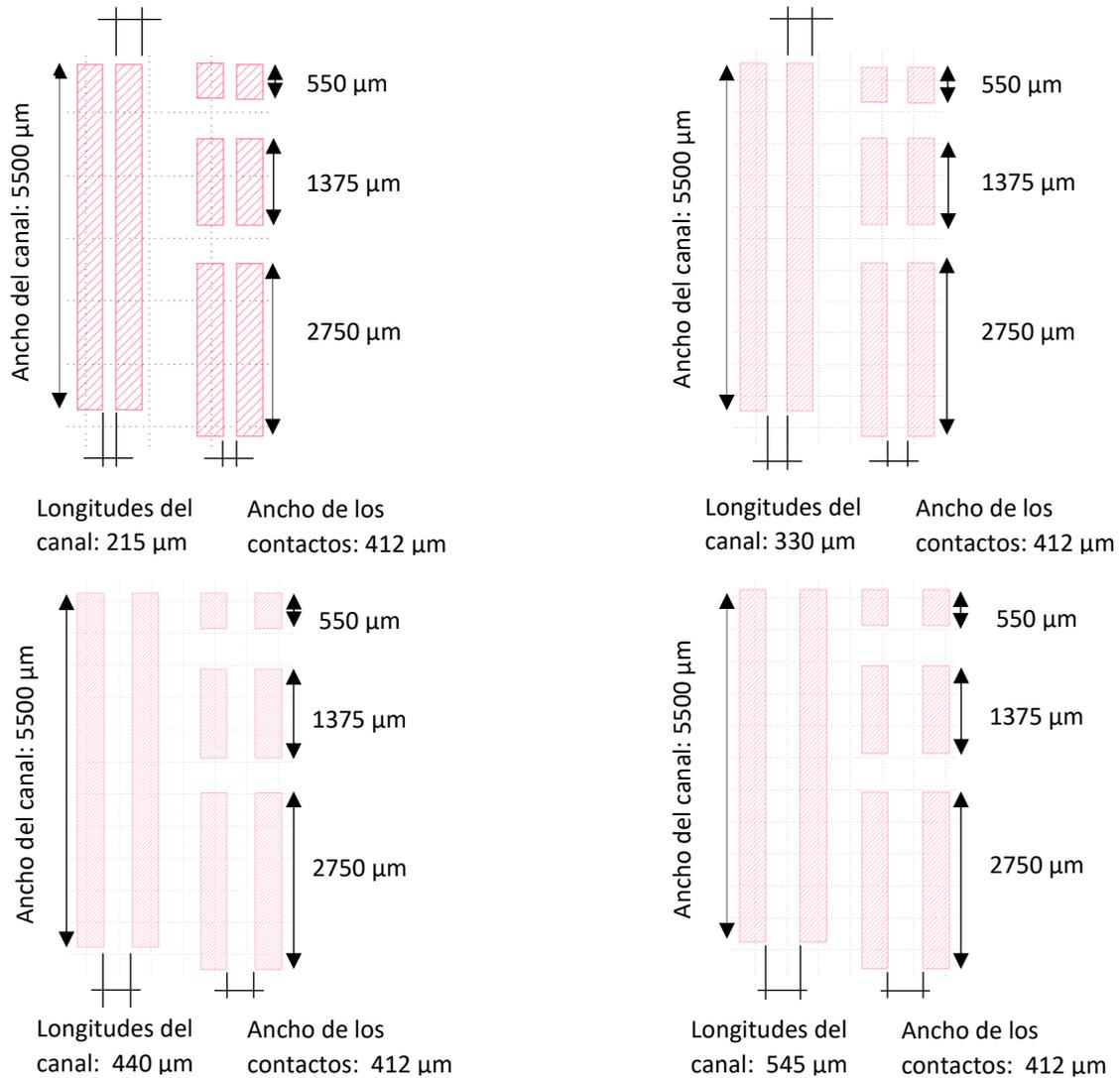


Figura 3.2 Patrón de los contactos superiores de TFTs

3.3. Limpieza de sustratos

Antes de su uso, la oblea de silicio pasó por una etapa de limpieza para eliminar las partículas contaminantes de la superficie, ya que pueden degradar el rendimiento del dispositivo. El proceso de limpieza aplicado al sustrato se denomina RCA (*Radio Cooperation Association of America*), y fue propuesto por Werner Kern en 1965 para sustratos de silicio siendo actualmente usado en el proceso de limpieza estándar en la tecnología MOS [62,63], y el cual aplicamos para tres obleas de silicio y diversos sustratos.

Asimismo, el procedimiento RCA se hizo para este proyecto, en tres obleas de silicio, pero también es utilizado para diversos sustratos.

1. Es importante destacar que se emplea un cristizador de tamaño adecuado para que la oblea pueda encajar completamente en él. Luego, con gran precaución, se vierten aproximadamente 30 ml de tricloroetileno (C_2HCl_3) en el cristizador, evitando derrames en la superficie de trabajo. Este proceso se realiza específicamente en la zona de Ataque Húmedo y Limpieza, designada para sustancias alcalinas. Sin embargo, es esencial tomar precauciones en relación con la inhalación prolongada del tricloroetileno (C_2HCl_3) debido a sus efectos perjudiciales para la salud. Por lo tanto, se recomienda encarecidamente tomar todas las medidas necesarias para prevenir la exposición a este compuesto químico tóxico, incluyendo el uso del equipo adecuado, que se muestra en la Figura 3.3



Figura 3.3 a) Tricloroetileno (C_2HCl_3), b) cristizador de 20 cm de diámetro

2. Se retiró la oblea de silicio de su caja usando una pinza, que permitió colocar la oblea con sumo cuidado dentro del cristalizador que con tricloroetileno (C_2HCl_3). Una vez dentro del cristalizador, se movió ligeramente la oblea de lado a lado para asegurar su correcta limpieza. Es importante tener en cuenta que este proceso de manipulación de la oblea de silicio debe realizarse con la debida precisión y atención, para garantizar el éxito del proceso (ver Figura 3.4).

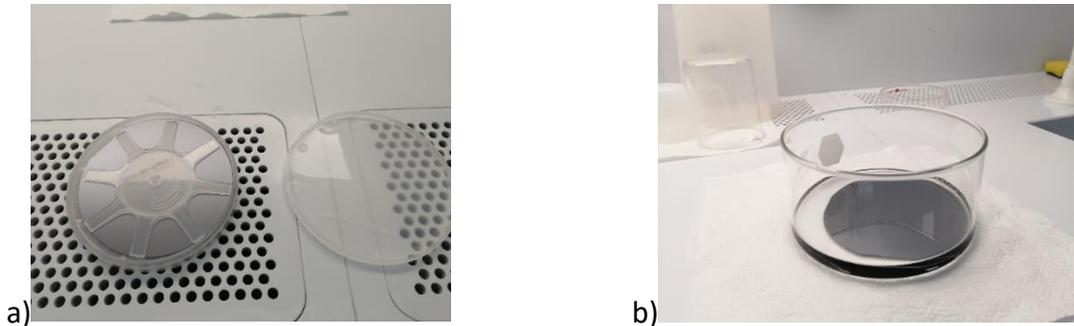


Figura 3.4 a) Oblea nueva de silicio tipo P dopado con Boro), b) Oblea con la solución de Tricloroetileno.

3. Una vez que la oblea se encuentra dentro del cristalizador, se procede a someterla a un proceso ultrasónico durante 10 minutos. Este procedimiento tiene como objetivo la eliminación de cualquier partícula minúscula presente en la superficie de la oblea, lo que resulta fundamental para asegurar la calidad del producto final. Cabe destacar que este proceso ultrasónico es una técnica altamente efectiva para remover impurezas y partículas diminutas, lo que garantiza la pureza y uniformidad de la oblea de silicio durante todo el proceso de cristalización. En definitiva, la utilización del proceso ultrasónico se convierte en una etapa clave dentro del proceso de fabricación de obleas de silicio, en virtud de su capacidad para remover cualquier partícula que pudiera afectar la calidad del producto final (ver Figura 3.5).



Figura 3.5 Oblea de silicio en el ultrasonido

- Una vez finalizado el proceso de cristalización de la oblea, se procede a retirarla cuidadosamente de la mesa de trabajo. Es importante destacar que durante este proceso se recomienda utilizar guantes y otros elementos de protección personal para evitar cualquier tipo de contaminación de la oblea. Acto seguido, se procede a lavar la oblea con agua desionizada (ver Figura 3.6) para eliminar cualquier residuo de tricloroetileno que pudiera quedar en la superficie. Luego del lavado, se debe secar la oblea de silicio con mucho cuidado utilizando una pistola de nitrógeno (N_2).



Figura 3.6 Limpieza de residuos del Tricloroetileno, con ayuda del agua desionizada

- Continuando con el proceso de limpieza de la oblea de silicio, se procede a colocar en el cristizador aproximadamente 30 ml de acetona. Este proceso es de suma importancia para remover grasas y sustancias orgánicas que pudieran estar presentes en la superficie de la oblea.



Figura 3.7 Oblea de silicio con la acetona

6. Una vez realizada la limpieza con acetona, se procede a llevar la oblea de silicio nuevamente al ultrasónico por 10 minutos en la bahía de fotolitografía a temperatura ambiente. Este proceso es fundamental para remover cualquier residuo o impureza que pueda quedar en la superficie de la oblea. Posterior a esto, se realiza el mismo proceso de lavado con agua desionizada y secado con la pistola de oxígeno, tal y como se había mencionado anteriormente. Este proceso es de vital importancia para asegurar la calidad y limpieza de la oblea de silicio, ya que la presencia de cualquier tipo de residuo o impureza podría afectar negativamente su desempeño en la producción de componentes electrónicos, todos estos pasos se hicieron a temperatura ambiente (25° C).

7. Una vez concluidos los procesos de limpieza y remoción de impurezas de la oblea de silicio, se lleva a cabo una inspección minuciosa para detectar la posible presencia de partículas, manchas, grasas u otros elementos que pudieran afectar su calidad y desempeño en la producción de componentes electrónicos (ver Figura 3.8)



Figura 3.8 Inspección visual de la oblea de silicio

8. En este punto del proceso de limpieza de la oblea de silicio, se hace necesario utilizar un equipo especializado en el manejo de ácidos, puesto que dentro de la solución que se utilizará se encuentra el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), pero el ácido sulfúrico (H_2SO_4) es el componente más peligroso.
9. Una vez que se ha hecho la mezcla de la solución "Piraña", en la cual consiste 1 parte de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y 3 partes de ácido sulfúrico (H_2SO_4), se debe tener sumo cuidado en su manejo ya que esta solución es altamente peligrosa y corrosiva (Ver figura 3.9). Además, es importante tener en cuenta que su uso solo debe ser en un ambiente controlado y con medidas de seguridad adecuadas. Por lo tanto, se debe trabajar en un área aislada y equipada con los elementos de protección personal necesarios. En esta etapa del proceso, se sumerge la oblea en la solución de "Piraña" por un tiempo de 10 minutos a una temperatura de $70^\circ C$ esto con la ayuda de una plancha, el cual dependerá del grado de suciedad que tenga la oblea. Luego, se retira la oblea de la solución y se lava 2 veces con agua desionizada (H_2O) con un tiempo de 2 minutos, seguido de un secado cuidadoso con la pistola de nitrógeno.

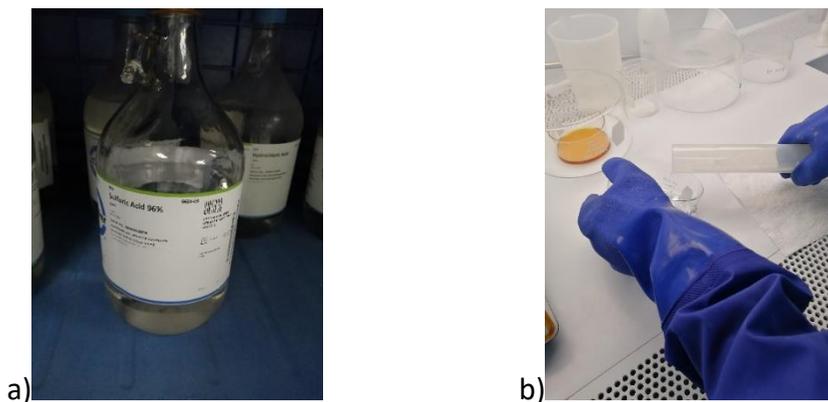


Figura 3.9 a) Ácido sulfúrico (H_2SO_4) b) Mezcla del ácido con el peróxido de hidrógeno (H_2O_2)

El Tricloroetileno (C_2HCl_3) se utiliza para eliminar sustancias orgánicas de la superficie del sustrato. La acetona tiene la misma función que el C_2HCl_3 , pero tiene una presión de vapor más baja y elimina los contaminantes que pueden quedar en las superficies después de la

limpieza en C_2HCl_3 [63]. El uso de compuestos de piraña es altamente corrosivo para los metales y los agentes oxidantes, lo que hace que los materiales orgánicos se enciendan y posiblemente los carbonicen. Uno de los propósitos principales del peróxido de hidrógeno es formar una capa de óxido de silicio del orden de 2 nm para evitar la oxidación del silicio durante la exposición al medio ambiente. Previamente, la oblea se limpiaba con HF para eliminar cualquier residuo de óxido nativo presente en su superficie debido a la exposición al medio ambiente [64].

3.4. Fabricación detallada para el transistor de película delgada basado en a-IGZO tipo N.

3.3.1. Estructura del TFT

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la estructura donde el semiconductor a-IGZO ofrece muchas ventajas en comparación con las demás estructuras de TFTs al utilizarlo como una capa activa. En consecuencia, se optó por utilizarla para el TFT de a-IGZO (ver Figura 3.10). Para dar una idea clara de cada una de las películas que componen al dispositivo, a continuación, se desglosa detalladamente cada una de ellas.



Figura 3.10 Sección frontal del TFT de a-IGZO

	<p>La fuente y el drenador con Aluminio (Al): Tras depositar la película de IGZO, se aplica aluminio mediante evaporación por e-beam a altas temperaturas. Para definir los patrones de los contactos, se emplea una cortadora láser de alta precisión, el Laser Engraving System IPG Photonics 523 20W/30W.</p>
	<p>Semiconductor óxido de indio, galio y zinc amorfo (a-IGZO): Su uso en transistores de película delgada y sensores se ha incrementado desde los años 2000, gracias a su alta movilidad, transparencia y eficiencia energética. La deposición de IGZO4 con ciertas características se realizó mediante la técnica de sputtering magnetrón RF, utilizando gas argón y un target de alta calidad de la empresa Kurt J. Lesker Company.</p>
	<p>Óxido de silicio crecido térmicamente (SiO₂): resulta esencial destacar que la interfaz dieléctrico-semiconductor en las TFT desempeña un papel crucial en la formación del canal. Se utiliza comúnmente SiO₂ debido a su calidad dieléctrica y estabilidad inherente. Sin embargo, se presenta un dilema en la elección de SiO₂, ya que el SiO₂ crecido térmicamente se prefiere ampliamente debido a su alta calidad y la capacidad de controlar rigurosamente su proceso</p>
	<p>Silicio tipo P dopado con Boro (Si): el silicio tipo P dopado con boro es la elección preferida para transistores de película delgada debido a su alta movilidad, estabilidad y capacidad de formar una capa de óxido estable. Las especificaciones de la oblea incluyen diámetro, orientación, dopante, espesor, resistividad y medidas de piso primario y secundario</p>

3.3.2. Sustrato de silicio tipo P dopado con Boro

El silicio tipo P dopado con boro es un sustrato popular para la fabricación de transistores de película delgada debido a su alta movilidad de huecos y estabilidad en la fabricación. En comparación con otros materiales comunes utilizados como sustratos en TFTs, el silicio tipo P dopado con boro tiene una movilidad de huecos significativamente mayor. Además, la estabilidad del dopado de boro en el silicio tipo P permite la fabricación de TFTs con una alta uniformidad y reproducibilidad, lo que es esencial para la producción en masa de dispositivos electrónicos. Por otra parte, el sustrato de silicio tipo P dopado con boro es

capaz de formar una capa de óxido estable en su superficie, lo que permite el control del flujo de carga a través del canal del transistor. En resumen, el sustrato de silicio tipo P dopado con boro es una opción popular para la fabricación de transistores de película delgada debido a su alta movilidad de huecos, estabilidad en la fabricación y capacidad de formar una capa de óxido estable en su superficie [65].

En función de las características obtenidas en la literatura, se muestran las características de la oblea de silicio tipo P dopado con Boro, oblea pulida de un solo lado, diámetro (mm): 100 ± 0.2 , Tipo/Orientación: P/1-0-0, Dopante: Boro, Espesor (μm): 500 ± 10 , Resistividad (ohm-cm): 0.001-0.005, Piso primario (mm): 30-35, Piso secundario (mm): 16-20. Por ende, los tipos de orientación de una oblea se muestra más adelante (ver Figura 3.11) [66].

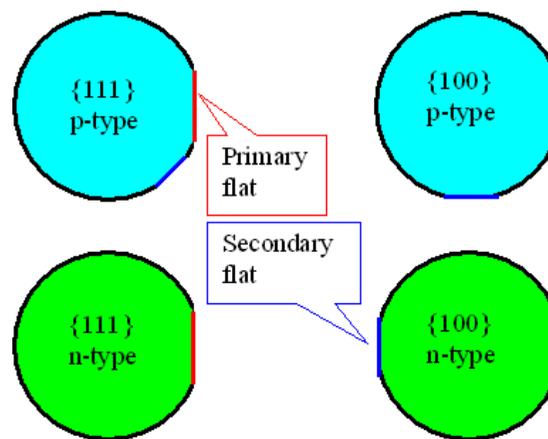


Figura 3.11 Orientación de la oblea de Silicio.

Por las características mencionadas anteriormente, se puede adquirir las obleas a través de la página oficial. Además, en dicha página se encuentra disponible información sobre el precio y las cantidades en existencia. Para acceder directamente a la página de compra, se puede seguir el siguiente enlace: *Silicon Wafers & Other Semiconductor Substrates in stock* (universitywafer.com).

3.3.3. Dieléctrico de Compuerta óxido de silicio (SiO_2)

Como ya hemos mencionado, la interfaz dieléctrico-semiconductor es muy importante porque en ella se forma el canal. El canal de la TFT está formado por electrones libres inducidos en la banda de conducción del a-IGZO cerca de la interfase como resultado del voltaje de puerta aplicado. El dieléctrico óxido de silicio (SiO_2) se utiliza comúnmente como material aislante en dispositivos semiconductores debido a su alta calidad dieléctrica, estabilidad térmica y capacidad para formar interfases de alta calidad con el silicio. Sin embargo, existen diferentes opciones para su producción y utilización.

Por un lado, el óxido de silicio crecido térmicamente se considera la opción preferida como dieléctrico en la fabricación de dispositivos semiconductores debido a su alta calidad, uniformidad y capacidad de formar interfases de alta calidad con el silicio. Además, el proceso de crecimiento térmico es altamente controlable y puede producir capas muy finas con alta calidad dieléctrica. Por consiguiente, el óxido de silicio depositado puede ser una opción adecuada en algunos casos, especialmente cuando se requiere una mayor flexibilidad en términos de diseño y control de calidad, o cuando el proceso de crecimiento térmico no es factible debido a restricciones de equipo o proceso. A pesar de ello, la calidad del dieléctrico depositado es inferior a la del dieléctrico crecido térmicamente [67].

Desde esta perspectiva, se indican los pasos para poder llevar a cabo el crecimiento térmico del dieléctrico que cómo ya se mencionó con anterioridad, es el óxido de silicio (SiO_2), se utilizan técnicas de tratamiento térmico para el crecimiento de películas de óxido de silicio en la industria de microelectrónica. En el tratamiento térmico húmedo se utiliza un horno con vapor de agua, el cual, en combinación con un flujo de gas inerte y una presión específica, promueve el crecimiento de la película de óxido de silicio. Por otro lado, el método seco de crecimiento de óxido de silicio es muy similar al método húmedo, con la excepción de que, en lugar de utilizar vapor de agua, se utilizan moléculas de oxígeno. Este método se basa en un flujo específico de gas y una presión determinada para promover el crecimiento de la película de óxido de silicio. En la industria de microelectrónica, se utilizan comúnmente técnicas de tratamiento térmico para el crecimiento de películas de óxido de

silicio, y la elección del método específico depende de las necesidades y requerimientos de la aplicación [68].

1. Para el proceso se utilizará un horno tubular modelo PT-1200T – Ø127mm – 3W, con una potencia de AC 220-240 V, 60 Hz, su máxima potencia es de 8KW (ver Figura 3.12). Además, antes de comenzar se tiene bien sabido que la(s) oblea(s) tuvieron que haber llevado el proceso de limpieza RCA 1.



Figura 3.12 Horno tubular para el crecimiento térmico del silicio

2. Continuando con el proceso, se procede al ajuste del oxígeno debidamente conectado al horno. Es importante mencionar que existen dos vías para un crecimiento del dieléctrico como anteriormente ya se mencionó. Para mejores resultados y un mejor control con las temperaturas y tiempo, es recomendable la vía seca, la desventaja podría ser el tiempo ya que es más prolongado. El flujo del oxígeno se utilizó de 3 cc/min y se abre el ducto del oxígeno (ver Figura 3.13).

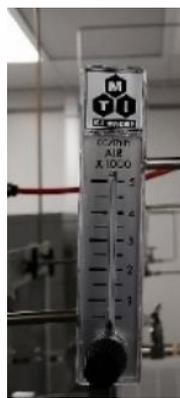


Figura 3.13 Ajuste manual de 3cc/min al flujo del oxígeno

3. Se configura el horno con los parámetros de tiempo y temperatura. Estos harán que se pueda obtener el crecimiento del óxido de silicio deseado. Para ello, se programa en base a los parámetros de la tabla (ver Tabla 5), utilizando dos variables que son el tiempo (**T**) medido en minutos y la temperatura medida en centígrados (**C**).

Tabla 5. Parámetros utilizados para el crecimiento térmico del óxido de silicio (SiO_2)

T01	C02	T02	C03	T03	C04	T04	C05	T05	C06	T06	C07	T07
38	600	5	600	7	700	5	700	40	850	120	850	5
C08	T08	C09	T09	C10	T10	C11	T11	C12	T12	T13		
870	10	870	30	700	30	500	30	100	100	-175		

4. En este sentido, en base a la programación donde el tiempo 01 se mantenga por 38 minutos encendido. Posteriormente, se le indica que llegue a una temperatura de 600 °C en un tiempo de 5 minutos. Luego, que en dicha temperatura se mantenga por lo menos 7 minutos, así sucesivamente, hasta alcanzar la temperatura deseada para el crecimiento del dieléctrico (SiO_2), que es 870 °C y que ahí se mantenga 30 minutos. Para finalizar, ya depende del usuario qué programación quiera agregar, pero en este caso, se optó por utilizar 2 tiempos para ir enfriando poco a poco el horno. Como último, se le pone un tiempo de -175, que es un código que detecta el PLC para que el horno se apague automáticamente.
5. Es proceder a colocar las obleas en una base de cristal resistente a altas temperaturas con sumo cuidado (ver Figura 3.14). Posteriormente, se deben introducir en el horno tubular, utilizando las herramientas adecuadas para este proceso. Es importante tener en cuenta que, al inicio del proceso, se recomienda utilizar una oblea de baja calidad y colocarla en la parte frontal. Esto se debe a que esta es la que recibe todo el flujo de oxígeno, lo que podría alterar el espesor del óxido de silicio. Asimismo, es necesario revisar nuevamente que el flujo de oxígeno

sea de 3 cc/min y que la programación se encuentre adecuadamente configurada en los hornos para garantizar un proceso de calidad y eficiente.

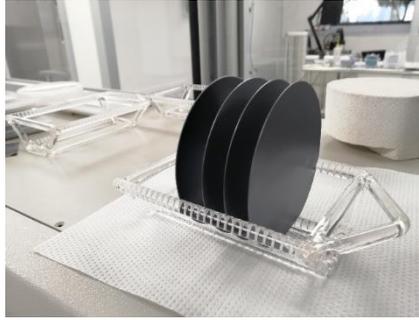


Figura 3.14 Colocación de las obleas de silicio en la base de cristal

6. El proceso del crecimiento del óxido de silicio se inicia al desbloquear un seguro en el horno (ver Figura 3.15), seguidamente se oprime el botón de encendido (*Turn-on*). Para asegurarse de que todo está en orden, se realiza una revisión visual de las 3 zonas de calor, la derecha, a la izquierda y la de en medio. Es importante que estas zonas de calor estén de acuerdo con la configuración previamente mencionada.



Figura 3.15 Distribución de los botones de seguridad del horno tubular

7. Es importante destacar que, al iniciar el proceso con la ayuda del manómetro, es necesario realizar un monitoreo constante para asegurarse de que la presión del fluido no supere los 0.02 MPa (ver Figura 3.16). Si esto ocurriera, la tapa que protege el horno tubular saldría disparada y se escaparía el flujo de oxígeno, lo cual es un resultado indeseado. En caso de que la presión del oxígeno suba, se puede girar el sentido de las manecillas del reloj para abrir la salida del flujo y mantenerlo en la presión ya antes mencionada.



Figura 3.16 Manómetro con un valor de 0.02 MPa

- Una vez iniciado el proceso, es crucial permanecer en la bahía de **Procesamiento térmico** para asegurarnos de que todo esté funcionando correctamente (ver Figura 3.17). Se debe tener en cuenta que las resistencias dentro del horno deben ir aumentando su temperatura de manera progresiva y constante para lograr una correcta producción del óxido de silicio. Además, es importante llenar la bitácora para tener un registro completo del proceso y poder analizarlo en un futuro. Finalmente, al culminar el proceso, las resistencias deben ir disminuyendo su temperatura gradualmente para evitar daños en la estructura del horno.

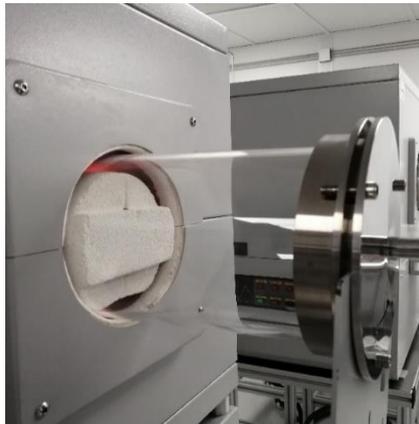


Figura 3.17 Calentamiento de las resistencias en el horno tubular

- Tras el proceso de crecimiento térmico, se recomienda esperar a que el horno se enfríe completamente antes de retirar las obleas. Una vez que el horno esté frío, es importante retirar las obleas con cuidado para evitar cualquier tipo de daño (Ver Figura 3.18). Es recomendable realizar una inspección visual detallada para

asegurarse de que las obleas tengan un buen crecimiento térmico. Además, es posible verificar que las obleas tengan un buen crecimiento térmico mediante las imágenes que se tomaron previamente durante el proceso.

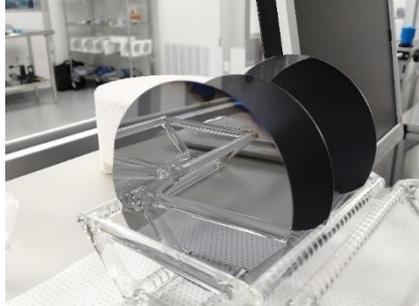


Figura 3.18 Obleas de silicio con crecimiento térmico

10. Finalmente, se utilizará un elipsómetro de la marca Angstrom PHE-102 (ver Figura 3.19) para comprobar el espesor del dióxido de silicio. Es importante destacar que existen otros métodos como el perfilómetro, el SEM, entre otros. Sin embargo, se optó por este debido a la exactitud que ofrece en los resultados. Una vez elegido el método, se procede a ajustar el equipo para obtener mediciones precisas. Los resultados obtenidos fueron de 25, 26 y 27 nm (ver Tabla 6), el espesor del óxido de silicio con crecimiento térmico puede variar típicamente desde unos pocos nanómetros (nm) hasta decenas de nanómetros. Los espesores más comunes pueden estar en el rango de 10 nm a 100 nm, dependiendo de la sensibilidad deseada y las condiciones de operación.



Figura 3.19 Elipsómetro Angstrom

Tabla 6. a) Resultados del espesor de 25 nm, **b)** de 26 nm y **c)** de 27 nm

<i>a) Primer resultado</i>			
Layer	Material	Thickness	Component
1	SiO ₂	24.63 nm	SiO ₂ DATA
<i>b) Segundo resultado</i>			
Layer	Material	Thickness	Component
1	SiO ₂	25.50 nm	SiO ₂ DATA
<i>c) Tercer resultado</i>			
Layer	Material	Thickness	Component
1	SiO ₂	26.47 nm	SiO ₂ DATA

3.3.4. Semiconductor óxido de indio, galio y zinc (IGZO)

En primer lugar, se puede afirmar que la tecnología del óxido de indio, galio y zinc (IGZO) es un material semiconductor altamente prometedor para su uso en pantallas flexibles debido a su alta movilidad de portadores de carga y alta transparencia [69]. Además, el IGZO se puede depositar mediante diferentes métodos, como la pulverización catódica y la deposición por haz de electrones, lo que lo hace adecuado para su uso en dispositivos de pantalla de alta calidad, el depósito por pulverización catódica (sputtering) es el método utilizado para fabricar pantallas LCD debido al aumento de la movilidad y mejora de la fiabilidad [70]. El IGZO también tiene propiedades como su estabilidad y resistencia a la fatiga mecánica, lo que lo convierte en un material semiconductor ideal para su uso en pantallas flexibles [71]. En este sentido, es importante considerar el uso de IGZO en dispositivos de pantalla flexibles, como pantallas OLED o pantallas de tinta electrónica [72]. Desde los años 2000 comenzó a utilizarse para transistores de película delgada y aplicaciones en sensores, los primeros informes presentados sobre los transistores de película delgada de IGZO se publicaron en 2003, y desde entonces ha habido un creciente interés en esta tecnología debido a alta movilidad de electrónica, a la transparencia óptica y bajo consumo de energía [73].

En relación a la literatura encontrada, es importante destacar que el depósito de IGZO₄ con una concentración de 1:1:1:4 se llevó a cabo mediante la técnica de sputtering magnetrón RF. Esto se debe a que, al tratarse de un compuesto semiconductor, es fundamental trabajar con una densidad adecuada, en este caso de 6.50 g/cm³, y un Z-Ratio de 1. Además, para la erosión del target sinterizado de IGZO₄ se utilizó gas argón como medio ionizado. Cabe destacar que el target utilizado fue de alta calidad, ya que se trata de un producto comercial sin dopar de la reconocida empresa Kurt J. Lesker Company, con un diámetro de 3" y un espesor de 0.125", y una pureza del 99.9%. La sucesión de pasos para poder realizar correctamente el depósito del IGZO se muestran a continuación:

1. En primer lugar, es importante destacar que para nuestro proceso se utilizó el sistema de magnetron sputtering (ver Figura 3.20). Este sistema consiste en una cámara principal donde se llevará a cabo el depósito del material. Para asegurar una deposición de alta calidad, es esencial que la cámara sea evacuada hasta alcanzar un alto vacío. En este sentido, se debe mencionar que la presión dentro de la cámara debe ser reducida hasta alcanzar un valor de 5.03×10^{-6} Torr (*Chamber Pressure*). Al lograr un alto vacío dentro de la cámara, se pueden reducir las presiones parciales de gases y elementos no deseables que potencialmente puedan contaminar los materiales que se están depositando. Por lo tanto, alcanzar un alto vacío es esencial para asegurar la calidad de la deposición del material y prevenir la contaminación de los mismos. Con esto en mente, se procedió a la evacuación de la cámara hasta alcanzar la presión deseada antes de iniciar el proceso de deposición mediante el sistema de *magnetron sputtering*.



Figura 3.20 Magnetron sputtering Angstrom Engineering

2. Asimismo, es importante destacar que en la ventana de **Materials** se debe seleccionar la receta previamente creada para el IGZO₄. Al mencionar la palabra "receta", nos referimos a un programa ya predefinido con configuraciones ideales para lograr un buen depósito.

3. Posteriormente, se verifican los parámetros necesarios para llevar a cabo el depósito como la potencia de depósito, la cual debe ser de un 8.3%. Es crucial no exceder este valor para evitar dañar o quebrar el target utilizado en el proceso. Además, es fundamental considerar la temperatura ambiente durante el proceso, la cual debe ser adecuada para garantizar un depósito de calidad. Asimismo, es necesario verificar el flujo de argón utilizado en el proceso, el cual debe ser de 20 centímetros cúbicos estándar por minuto (sccm) y 0 de oxígeno. Por otro lado, es importante mencionar que se debe utilizar un factor de herramienta de 35% (tooling factor) para ajustar la diferencia en el material depositado en el sensor de cuarzo frente al sustrato. Cabe destacar que la fórmula para calcular el tooling factor es la siguiente:

$$Tooling_{ACTUAL} = (Tooling_{APPROX}) \left(\frac{Tooling_{ACTUAL}}{Tooling_{QCM}} \right) \quad (3.1)$$

4. Igualmente, el *rate* de depósito se mantuvo de 0.30 A/s, el tiempo total transcurrido para el depósito fue de 65 minutos, el voltaje incidente se mantuvo con un valor de 49 kV y la corriente reflectante con un valor de 0.02 mA. La presión de depósito es de 3 mTorr (ver Figura 3.21), la creación de la receta y modificación de parámetros deseados que ya se mencionaron fue para encontrar un espesor de la película de 100 nm.

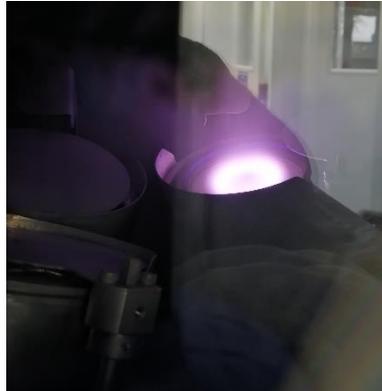


Figura 3.21 Plasma de iones de argón en el magnetrón sputtering

5. No obstante, todos los depósitos se registran para poder utilizar algunos parámetros para futuros trabajos o investigaciones, así como también se realizaron depósitos de prueba para encontrar las características deseadas de un buen semiconductor, en la tabla 7 se puede encontrar un resumen de los parámetros utilizados para el IGZO.

Tabla 7. Condiciones de depósito de la película de IGZO₄

Número de deposito	1
“Target” material	IGZO ₄
Presión de depósito (mTorr)	3
Fuente (DC o RF)	RF
Voltaje (kV)	Incidente 49
Corriente (mA)	Reflectante 0.02
Potencia (%)	8.3
Tiempo de depósito (min)	65
Espesor (nm)	90
Temperatura (°C)	Temperatura ambiente (25°C)
Flujo (sccm)	20
Tooling Factor (%)	35

6. Finalmente, después de haber llevado a cabo el depósito del IGZO (ver Figura 3.22), se procedió a realizar una ventilación en la cámara (*Chamber Vent Sequence*) para poder retirar la muestra de la misma. Durante este proceso, es importante estar atentos a la disminución gradual de la presión en la cámara y monitorear la velocidad de turbo (*Turbo speed (%)*) para identificar cuándo es seguro retirar la muestra. Una vez que la presión de la cámara haya disminuido progresivamente hasta alcanzar un nivel seguro para poder abrir la puerta sin poner en riesgo a las personas que manipulen el equipo, dicho fenómeno conocido como descenso gradual de presión es parte de la programación del equipo. En este punto, es fundamental tener cuidado al retirar el depósito del IGZO del holder para evitar rayaduras, manchas o contaminación con partículas. Para ello, se debe utilizar el material adecuado para manipular la oblea con el depósito. Después de realizar una visualización de la muestra, es recomendable guardarla en un portador de obleas de silicio para su posterior análisis. En conclusión, la ventilación de la cámara y la manipulación cuidadosa de la muestra son pasos cruciales para garantizar un depósito de calidad y evitar posibles errores o daños en el proceso.



Figura 3.22 Depósito del óxido de indio, galio y zinc en un cuarto de oblea de Si/SiO_2

3.3.4 Metalización de contactos

Una vez completado el depósito de la película de IGZO, se procede a la aplicación de un depósito de Aluminio mediante la técnica de máscara de sombra. Para este fin, se utiliza el sistema de evaporación por e-beam, el cual tiene la capacidad de alcanzar altas

temperaturas para fundir el material deseado. Con el objetivo de definir los patrones de los contactos (ver Figura 3.23), se utilizó una cortadora láser, específicamente el Laser Engraving System IPG Photonics 523 20W/30W. Esta herramienta proporciona una alta precisión y calidad en la elaboración de los patrones de los contactos.



Figura 3.23 Depósito del Aluminio en un cuarto de oblea de $Si/SiO_2/IGZO$

3.3.5 Fabricación del Dispositivo TFTs de a-IGZO tipo N

En la fabricación del dispositivo, existen algunos procesos clave que determinan la estructura final del mismo. Es importante caracterizar los tiempos de deposición y grabado de la película para que, incluso si no tenemos una vista transversal real del dispositivo, podamos estar seguros de que tenemos el espesor y la estructura esperados.

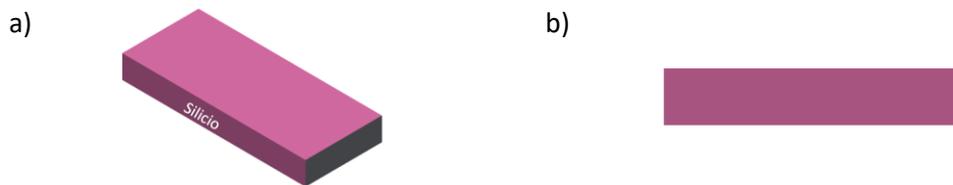
1. **Limpieza de las obleas**, primero, se debió haber pasado por el proceso de limpieza RCA cómo se menciona en el *apartado 3.3* a detalle, en este proceso también se utilizan peróxido de hidrógeno y una base o ácido. Se divide en dos pasos, primero elimina los residuos orgánicos e inorgánicos de la oblea y luego logra una limpieza efectiva [52], de igual manera se encuentra una tabla resumida de dicho proceso que debe seguir al momento de realizar la fabricación del dispositivo.

Tabla 8. Etapas del proceso RCA para la limpieza de las obleas de silicio

Líquidos/Ácidos	Tiempo	Temperatura	Procedimiento final
Tricloroetileno (C_2HCl_3)	10 minutos	25° C	Lavar con agua ionizada (H_2O) y secar con pistola

Acetona	10 minutos	25°C	Lavar con agua ionizada (H ₂ O) y secar con pistola
Pirafña: 1 parte de peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) con 3 partes de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	10 minutos	70°C	2 enjuagues con agua ionizada (H ₂ O), secar con pistola.

2. Compuerta, el dispositivo TFT se fabricó sobre una oblea de silicio tipo P dopado con Boro el cuál actuará como sustrato (ver Figura 3.24), para mayor detalle de dicho proceso se puede encontrar en el apartado (3.3.2. *Sustrato de silicio tipo P dopado con Boro*).



■ **Sustrato (Silicio tipo P dopado con Boro), configuración de 100**
Figura 3.24 a) Esquema de la oblea del silicio en 3D, b) vista frontal del silicio

3. **Proceso de oxidación**, 27 nm espesor de óxido de silicio (SiO₂) crecido térmicamente como dieléctrico empleando vía seca, el método de oxidación preferido para óxidos de puerta debido a la elevada calidad de la superficie, la gran reproducibilidad y el preciso control del espesor [74]. Una limitación importante del SiO₂ es que pierde su condición de aislante eléctrico cuando el espesor de la película se reduce al orden de unos pocos Angstrom [75]. Para poder llevar a cabo este proceso, es importante seguir las condiciones y recomendaciones que se especifican en el apartado 3.3.3. *Dieléctrico de Compuerta*, donde se puede encontrar una explicación más detallada del procedimiento.

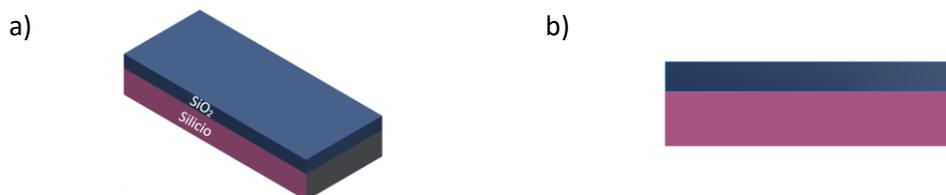


Figura 3.25 a) Esquema del proceso de fabricación del silicio con el crecimiento del óxido de silicio, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio

4. **Semiconductor tipo N**, se depositó una película de 90 nm de espesor de a-IGZO mediante sputtering por magnetrón RF a 3 mTorr en atmosfera de plasma de Ar con 20 sccm. Los parámetros utilizados se muestran en la tabla 7 del depósito del semiconductor óxido de indio, galio y zinc (IGZO).

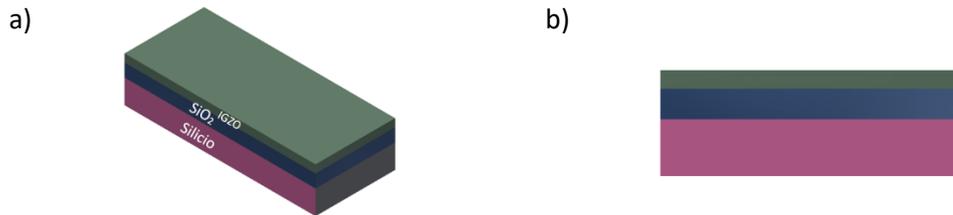


Figura 3.26 a) Esquema del proceso de fabricación. Depósito de la capa activa del IGZO, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio/óxido de indio, galio y zinc

5. **Shadow Mask**, se realiza la colocación de la máscara de sombra para la formación de la fuente y el drenador.

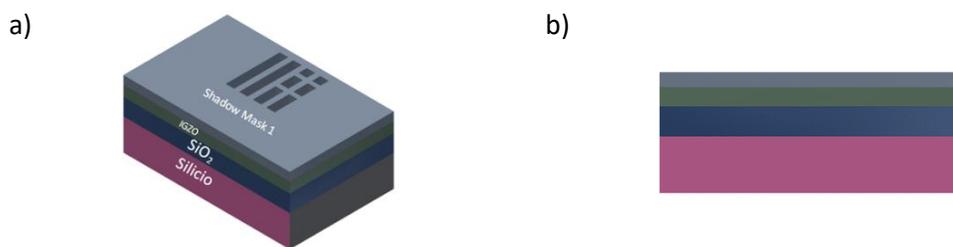


Figura 3.27 a) Esquema del proceso de fabricación. Si/SiO₂/IGZO con la shadow mask, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio/óxido de indio, galio y zinc/SM

6. **Metalización de contactos**, se hizo un depósito de Aluminio con 100 nm de espesor sobre la película de IGZO, usando un sistema de evaporación por e-beam.

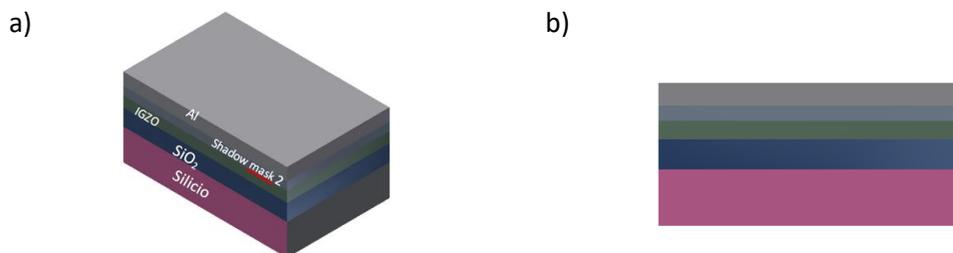


Figura 3.28 a) Esquema del proceso de fabricación. Depósito del Al, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio/óxido de indio, galio y zinc/Aluminio

7. Posterior al depósito del Aluminio, se retira la máscara de sombra que se colocó con anterioridad, se revisa el holder visualmente y así quedará definido lo que es la fuente y el drenador.

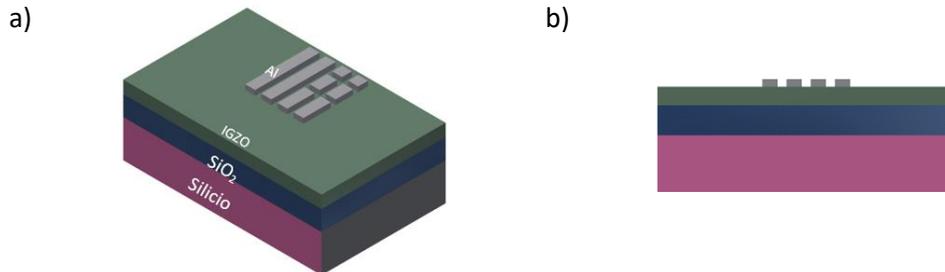


Figura 3.29 a) Esquema del proceso de fabricación. Colocación de los contactos de drenaje, fuente, b) vista frontal del silicio/óxido de silicio

3.3.6. Dificultades durante el proceso de fabricación del dispositivo

Inicialmente, se decidió implementar la técnica de fabricación del transistor de película delgada mediante fotolitografía, ya que se consideraba una técnica altamente precisa, aunque más extensa debido a los diversos equipos necesarios para los grabados y la revelación. Sin embargo, surgieron algunos inconvenientes en cuanto al grabado de las máscaras a utilizar, lo que llevó a optar por la técnica de máscaras de sombras. No obstante, al realizar este cambio, surgieron problemas en la longitud del canal debido a la menor precisión y dimensiones de la técnica de máscaras de sombras. Para solucionar este problema, se realizaron numerosas pruebas de corte (ver Figura 3.30) y se verificaron con un microscopio especializado Keyence VHX-5000 para llevar a cabo una inspección óptica. Finalmente, se logró fabricar la máscara de sombra necesaria para los contactos de la fuente y el drenaje del transistor de película delgada, esto nos ayudó para encontrar y diferenciar los parámetros para cortes con las obleas de silicio y diversos materiales.



Figura 3.30 Cortadora láser generando los patrones de la fuente y el drenaje

En segundo lugar, nos enfrentamos a una complicación con la receta del semiconductor IGZO. El sistema de magnetron sputtering, el cual es el único que cuenta con el target de dicho material, no había sido configurado previamente para su uso en depósitos. Se había utilizado el target tomando la receta de algunos otros óxidos, debido a que el IGZO es un óxido y tomar como referencia los parámetros de depósito. Por lo tanto, procedimos a configurar con la ayuda de la colaboración del CIDESI cada uno de los parámetros que se necesitan. Para ello, se tuvieron que realizar diversas lecturas en artículos en relación a lo que buscábamos, de manera similar, el resumen de los parámetros iniciales encontrados ayudó notablemente para conocer el comportamiento del semiconductor IGZO en cada condición diferente que ya han usado (ver Tabla 9), el enfoque principal fue encontrar los datos necesarios para utilizar el IGZO cómo un buen semiconductor. Además, se realizaron 3 pruebas de depósito (ver Figura 3.31). Es aquí donde radica la importancia de comprender bien qué se obtiene al tener los parámetros que se mencionan y bajo qué condiciones.

Tabla 9. Resumen de parámetros iniciales para los depósitos del IGZO

Título	Parámetros utilizados	Observaciones
<i>Transporte electrónico a baja temperatura en películas a-IGZO depositada por pulverización catódica [76].</i>	<i>Flujo de oxígeno: 0.0, 0.1, 0.2, 0.4 sccm. Temperatura: ambiente. Espesor: 400 ± 10 nm. Fuente: RF. Potencia: 70 W</i>	<i>Posteriormente, las películas fueron recocidas en gas de nitrógeno durante 5 minutos a 150° C.</i>

<p><i>Efecto de películas delgadas IGZO fabricadas por pulverización catódica de DC pulsada y RF en las características de TFT [77].</i></p>	<p><i>Flujo de argón: 19 sccm. Flujo de oxígeno: 1 sccm. Temperatura: ambiente. Espesor: 30 nm. Fuente: RF. Potencia: 120 W</i></p>	<p><i>Posteriormente, el recocido se realizó durante 1 hora en atmósfera de aire a 450° C.</i></p>
<p><i>Películas α-IGZO depositadas por pulverización RF para la aplicación de capas de alineación de LCD [78].</i></p>	<p><i>Flujo de argón: 20 sccm. Flujo de oxígeno: ~40 sccm. Temperatura: ambiente. Espesor: 30 nm. Fuente: RF. Potencia: 60 W.</i></p>	<p><i>El ángulo inclinado del target al porta muestras se fijó a 60°</i></p>
<p><i>Inversor complementario híbrido basado en nanotubos de carbono y transistores de película delgada IGZO con condiciones [79].</i></p>	<p><i>Flujo de argón: 3 sccm. Flujo de oxígeno: 0.1 a 0.7 sccm. Temperatura: ambiente. Espesor: 35 nm. Fuente: RF. Potencia: 150 W.</i></p>	<p><i>A medida que el flujo de oxígeno aumentaba, se degradaba las propiedades eléctricas como la corriente de encendido y apagado.</i></p>

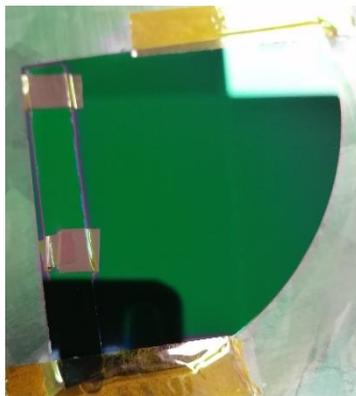


Figura 3.31 Depósito del IGZO en una oblea de Si/SiO₂

3.5. Caracterización del dispositivo

Para la caracterización eléctrica de los dispositivos, se utilizó el *Parameter Analyzer 4200A-SCS* en combinación con la *probstation modelo MST-4000A* (ver Figura 3.32). En contraste con otros trabajos, en el presente estudio se midió la muestra utilizando la luz proporcionada por el equipo. Esta técnica permitió una identificación más precisa de los patrones de la fuente y el drenaje, así como la prevención del daño o rotura de las puntas.

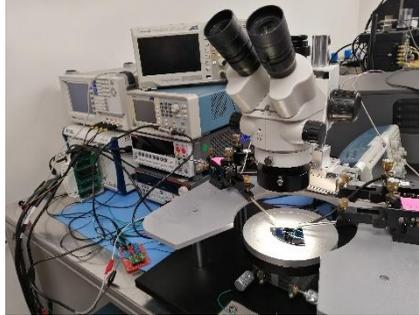


Figura 3.32 Caracterización eléctrica del dispositivo en la estación de prueba MST-4000A

3.5.2. Método de Línea de Transferencia Circular (CTLM)

La técnica de Método de Línea de Transferencia Circular, por sus siglas en inglés *Circular Transfer Line Method* (CTLM), es una técnica muy útil para la caracterización de películas delgadas de semiconductores. Por un lado, esta técnica permite obtener información precisa sobre la resistencia de contacto específica de estas películas. Por otro lado, también permite medir la resistencia de hoja de la película. La técnica CTLM consiste en depositar contactos circulares (ver Figura 3.33) sobre una delgada película semiconductor y medir su resistencia en función de la distancia entre el contacto circular central y los contactos que lo rodean. Es importante destacar que, al hacer que el contacto central tenga el mismo diámetro y aumentar el diámetro del anillo que lo rodea, se pueden lograr diferentes distancias entre los contactos y, por lo tanto, diferentes medidas de resistencia. En resumen, la técnica CTLM es una técnica muy útil para la caracterización de películas delgadas de semiconductores, ya que permite obtener información precisa sobre su resistencia de contacto específica y su resistencia de hoja, Además, esta técnica es muy

flexible, ya que permite variar las distancias entre los contactos y, por lo tanto, obtener una amplia gama de medidas de resistencia [80].

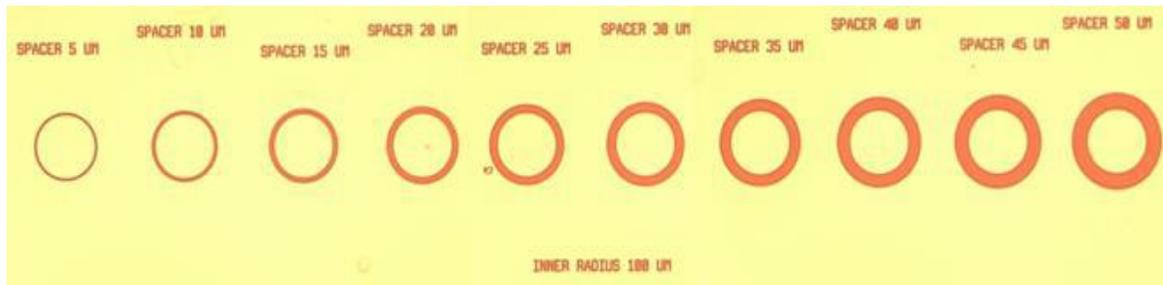


Figura 3.33 Distribución de los contactos circulares para las mediciones CTLM en un semiconductor

Para establecer los procedimientos necesarios para depositar el óxido de indio, galio y zinc (IGZO) por primera vez con el sistema de magnetrón sputtering, se implementó la técnica CTLM con el fin de obtener una respuesta óhmica baja debido a la importancia en el semiconductor lo que permite una transferencia de corriente eficiente entre metales y semiconductores, también, su resistencia es independiente del voltaje, lo que significa que la corriente es proporcional al voltaje aplicado, lo que facilita el diseño y la operación de dispositivos electrónicos [81]. Además, se buscó producir un semiconductor de alta calidad que tenga aplicaciones en sensores, por instancia, las propiedades importantes son el tener una alta sensibilidad, un amplio rango de detección, buena estabilidad, alta conductividad y movilidad de portadores, para nuestro caso, es el diseño de un sensor de pH. Para lograr este objetivo, se midió la brecha de cada círculo utilizado, que fueron 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, y 45 μm , tal como se muestra en la Figura 3.34 a) y b). Todo este proceso se llevó a cabo utilizando el proceso de *Lift Off* y una máscara proporcionada por el CIDESI. Es importante destacar que la técnica CTLM es esencial para obtener información precisa sobre las características eléctricas de un nuevo material depositado.



Figura 3.34 a) Medición en el círculo de $5\ \mu\text{m}$ y b) medición en el círculo mayor de $50\ \mu\text{m}$

Haciendo contacto con dos puntas de la “*Probestation*” se grafica Voltaje contra Corriente, de -1 a +1 Volts en pasos de +0.5 Volts, el contacto óhmico es bueno cuando presenta una respuesta lineal, y la característica corriente-voltaje debe tener una resistencia muy pequeña, la cual es despreciable en comparación con la resistencia de la región activa del dispositivo semiconductor [82] (ver Figura 3.35). La medición del próximo círculo se realizará con una mayor separación entre los contactos, lo que significa aumentar el espesor en la separación entre los contactos circulares internos y los contactos externos. El propósito de este análisis es evaluar el efecto del espaciamiento en la resistencia del círculo y por lo tanto en la pendiente de la línea resultante.

Para la metodología de medición se tomaron en cuenta los siguientes pasos para obtener los mejores resultados posibles:

1. Se enciende el equipo, se abre el ducto de aire comprimido, el mismo que sirve para operar las mesas anti vibratorias, así como también se preparan las 2 puntas en la estación de prueba.
2. Se asegura la muestra en la base del equipo, por medio de succión de vacío.
3. Se cierran las tapas para evitar la entrada de luz ambiental a la zona de medición, se enciende una lámpara y se ubican los contactos por medio del microscopio de éste mismo equipo, es importante saber que la conexión de las puntas corresponde a las que uno trabajará, debido a que en ocasiones pasa que no se tiene ningún dato obtenido por esos detalles.
4. Se hace contacto con la punta No. 1 en el centro del contacto circular interno, ésta punta es la que cambiará de -1 a +1 Volts durante la medición. **IMPORTANTE:** Es

fundamental tomar el tiempo necesario para trasladar y colocar la pieza en su ubicación adecuada. Un mal manejo de la misma podría ocasionar diversos daños, tales como fracturas o pandeo. Por lo tanto, es imperativo ser cuidadoso durante el proceso de manipulación para evitar posibles consecuencias negativas.

5. Se hace contacto con la punta No. 2 en el contacto circundante del círculo interno, ésta punta será la referencia o tierra durante la medición, tomas las mismas medidas de precaución del punto pasado.
6. Se ajusta la cámara para tener una muy buena visualización en la medición de la prueba.
7. Con la ayuda del *Analizador de parámetros 4200A-SCS* obtener las gráficas correspondientes que más adelante se presentarán.

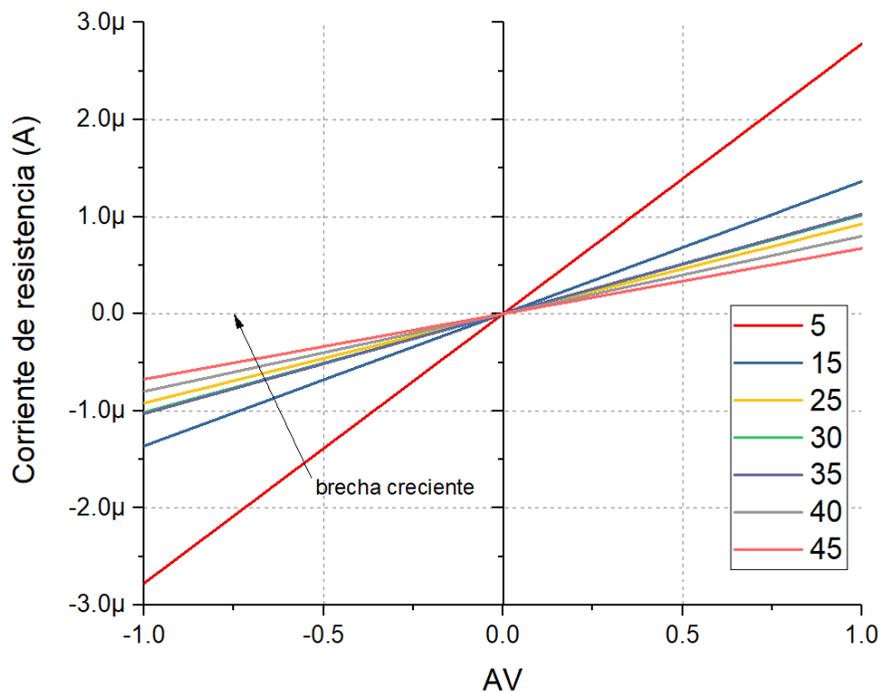


Figura 3.35 Voltage – corriente del IGZO

Asimismo, de la pendiente de cada gráfico se extrae la resistencia, con la ayuda del software de Origin y con los valores de la brecha (*gap*) se grafica para encontrar el valor de la pendiente, hay dos maneras de obtenerlo, de manera automática en base a una función del software o manual, se recomienda que sea por la primera opción ya que es más exacta. No obstante, otro dato importante que se tiene que saber es el radio de los círculos de la

técnica CTLM, para nuestro caso es con un valor de 300 μm . En base a los datos ya mencionados se calculan los factores de corrección de la brecha y de las resistencias (ver Tabla 10). Por lo consecuente, ahora se procede a realizar un ajuste lineal de la gráfica (ver Figura 3.36). Es indispensable tener esta gráfica para conocer el valor de la pendiente del ajuste lineal para obtener los valores de la resistencia de la hoja, la resistividad, la resistencia del contacto, la resistencia de contacto específico y la longitud de transferencia que más adelante se muestran.

Tabla 10. Factores de corrección para nueve diferentes espacios de la brecha (*gap*)

GAP SPACING	RESISTENCIA	FACTOR DE CORRECCIÓN EN EL GAP	FACTOR DE CORRECCIÓN EN LA RESISTENCIA
5.00E-06	353.0645E+3	9.92E-01	355.9986E+3
1.00E-05	15.8389E+0	9.84E-01	16.1015E+0
1.50E-05	719.9543E+3	9.76E-01	737.8068E+3
2.00E-05	12.2456E+0	9.68E-01	12.6494E+0
2.50E-05	1.0637E+6	9.61E-01	1.1074E+6
3.00E-05	967.1433E+3	9.53E-01	1.0147E+6
3.50E-05	954.3814E+3	9.46E-01	1.0090E+6
4.00E-05	1.2259E+6	9.39E-01	1.3059E+6
4.50E-05	1.4564E+6	9.32E-01	1.5631E+6

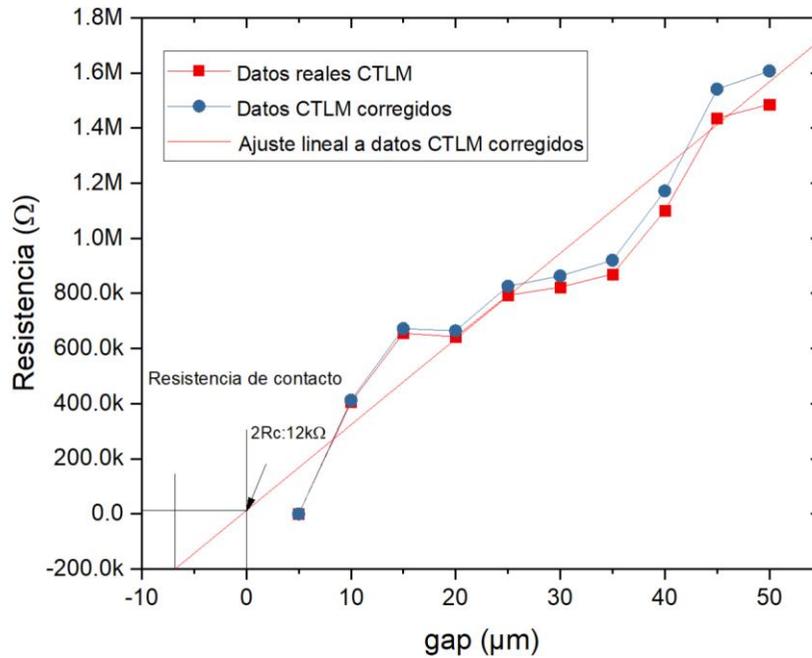


Figura 3.36 Resistencia total graficada vs espacio de la brecha IGZO. El mejoramiento con ajuste lineal al factor de corrección es evidente

De la pendiente “m”, del ajuste lineal se obtendrá la resistencia de la hoja como se muestra a continuación:

$$R_{sh} = (2\pi R_1)(Slope) \tag{3.2}$$

R_{sh} : resistencia de la hoja

R_1 : Radio de los círculos

Slope (m): Pendiente del ajuste lineal

La resistividad se puede calcular conociendo el espesor, "t" en nanómetros con el que fue depositado el material, es muy importante considerar y verificar el espesor para tener los datos más precisos posible, para este caso fue el depósito del IGZO con 20 nm. La fórmula para calcular la resistividad es la siguiente:

$$\rho = (R_{sh})(T)(1 \times 10^{-7}) \tag{3.3}$$

ρ : Resistividad

R_{sh} : resistencia de la hoja

T: espesor

Constante: 1×10^{-7}

Y de la intersección, “b”, y la pendiente, “m” se puede extraer la resistencia de contacto, R_c , y la resistencia de contacto específica, ρ_c , con la siguientes formulas:

$$R_c = \frac{b}{2} \quad (3.4)$$

$$\rho_c = (L_T)^2 * R_{sh} \quad (3.5)$$

R_c : resistencia de contacto

B: intersección con la recta lineal en los puntos (0,0)

ρ_c : resistencia de contacto especifica

Ahora, para poder resolver la ecuación anterior se necesita la longitud de transferencia la cual es la siguiente:

$$L_T = \left(\frac{\rho_c}{R_{sh}}\right)^{1/2} \quad (3.6)$$

Las variables que aparecen en la fórmula son datos que ya se mencionaron con anterioridad y ya se calcularon cada uno de ellos. En la tabla 11 se puede apreciar un resumen de los valores obtenidos al realizar la técnica del CTLM.

Tabla 11. Parámetros encontrados en el IGZO utilizando el método del CTLM

	Resistencia de la hoja (R_{sh})	Resistividad (ρ)	Resistencia de contacto (R_c)	Resistencia de contacto específico (ρ_c)	Longitud de transferencia (L_T)
CTLM	58.6486 M Ω	117.2972 Ω .cm	6 K Ω	0.02180 Ω .cm ²	0.1928 μ m

3.5.3. Familia de curvas de salida

Se obtuvieron las familias de curvas de salida para los mismos TFTs seleccionados. Para obtener estas curvas V_{DS} vs I_{DS} , se hicieron barridos de voltaje V_{DS} con diferentes voltajes aplicados a V_{GS} .

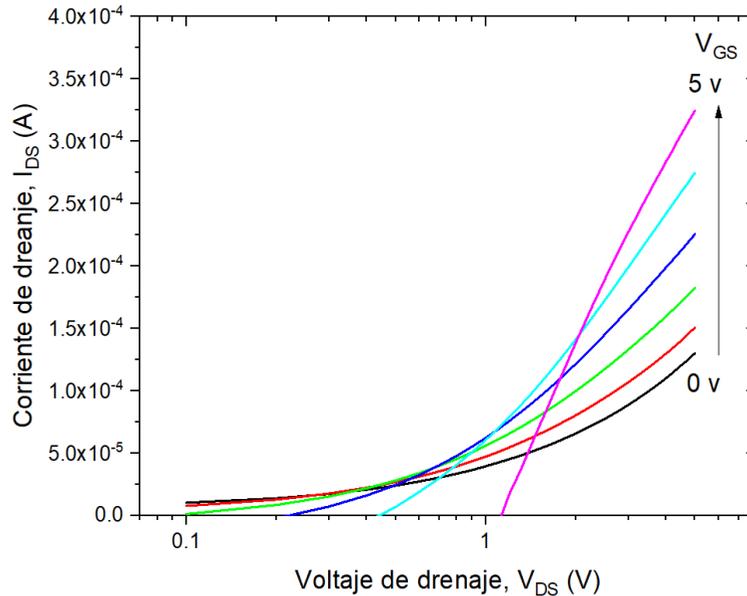


Figura 3.37 Curva logarítmica V_{DS} vs I_{DS} del TFT de a-IGZO de 90 nm

El IGZO TFT presenta características de salida interesantes sobre una oblea de Silicio tipo P dopado con Boro utilizando los valores del voltaje de drenaje de forma algorítmica, se utiliza una escala logarítmica en las curvas características de transferencia de los transistores de película delgada para mostrar el cambio en la corriente de drenaje en una amplia gama de voltajes de compuerta. La razón para esto es que la corriente de drenaje puede variar en órdenes de magnitud en respuestas a pequeños cambios en el voltaje de la compuerta. Una razón importante para usar una escala logarítmica es que permite que esta variación se muestre de una manera más clara y fácil de interpretar. Además, las escalas logarítmicas se usan a menudo en electrónica para demostrar relaciones exponenciales entre variables, como la relación entre corriente y voltaje de un diodo (ver Figura 3.37).

Por otra parte, es importante destacar que la familia de curvas de salida muestra la corriente de drenaje (I_{DS}) en función de un barrido de voltaje de drenaje (V_{DS}) y a diferentes voltajes de compuerta (V_{GS}), la diferencia de potencial fue de 0 a 5 volts, cada voltaje tomó un color diferente. Además, cuando se aplican valores bajos de voltaje de V_{DS} , la concentración de portadores en el canal es menor, lo que se traduce en un incremento lineal de la corriente I_{DS} , lo que se conoce como régimen lineal. En contraste, a altos voltajes de V_{DS} la concentración de portadores aumenta y la corriente es mayor, lo que se conoce como régimen de saturación. Por otro lado, los resultados obtenidos (ver Figura 3.38) sugieren una alta resistencia de contacto teniendo un valor de $6\text{ k}\Omega$ cómo se puede ver en la tabla 11, lo que puede tener implicaciones importantes en la implementación de esta tecnología en aplicaciones prácticas.

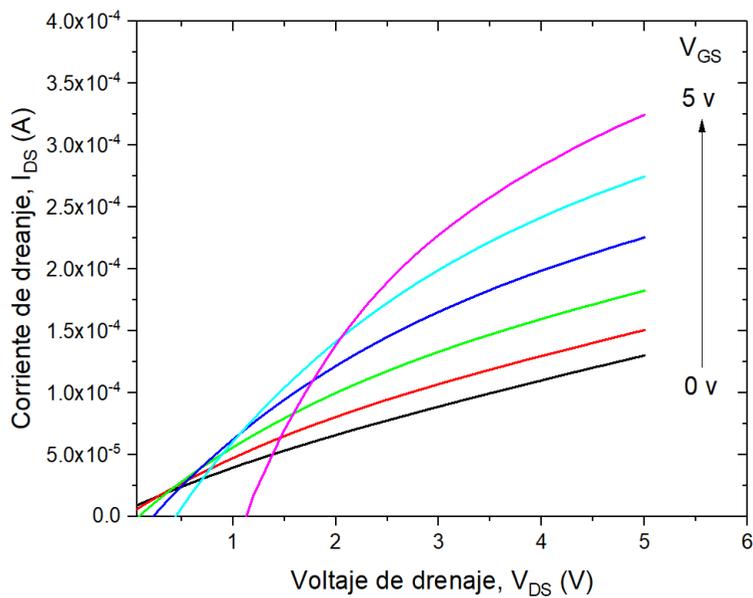


Figura 3.38 Curva característica de salida del IGZO TFT. Hay una modulación en la corriente I_{DS} en función del voltaje de compuerta V_{GS}

3.5.5. Voltaje de umbral V_T

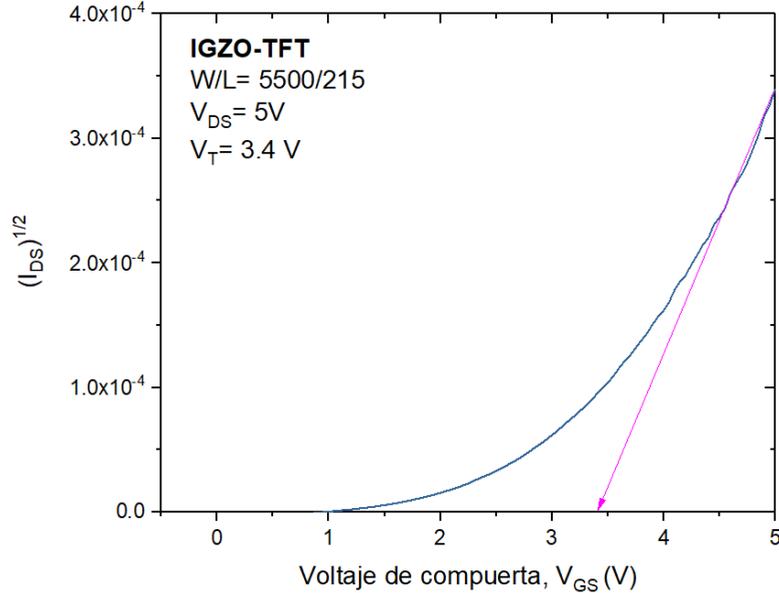


Figura 3.39 Ajuste de normalización $(I_{DS})^{1/2}$ de la curva de transferencia del IGZO-TFT

En el presente estudio, se ha analizado la relación $(I_{DS})^{1/2}$ vs V_{GS} para obtener los parámetros eléctricos característicos de los TFTs. Es importante destacar que uno de los parámetros más relevantes es el voltaje de umbral (V_T), el cual se define como el voltaje de compuerta al cual los electrones de conducción comienzan a aparecer en el canal (ver Figura 3.39). En este sentido, se ha utilizado un método de extracción de voltaje umbral muy popular, que consiste en encontrar la intersección del eje del voltaje de compuerta de la extrapolación lineal de la curva $(I_{DS})^{1/2}$ vs V_{GS} en su punto máximo de la derivada (pendiente). Con este método se puede obtener el valor de V_T de manera precisa y confiable. En nuestro caso, al realizar dicha extrapolación, se obtuvo una intersección del eje de voltaje de compuerta de 2.5 V, lo que indica que ese es el valor de V_T para los TFTs analizados en este trabajo de investigación.

Capítulo 4: Resultados y discusión

4.1. Comportamiento del dispositivo modificando los defectos del a-IGZO

La figura 4.1 muestra la curva transferencial del voltaje de la compuerta contra la corriente de drenaje realizadas mediante simulaciones Silvaco-ATLAS del transistor de película delgada. Estas muestran un desplazamiento vertical aumentando la densidad de estados similares a donantes, siendo estos algunos defectos del semiconductor IGZO. También se observó una enorme diferencia en el desplazamiento de la curva al hacer una variación de la densidad de los estados similares a aceptores, mientras que, si los valores son muy grandes, la curva presenta menos corriente de drenaje.

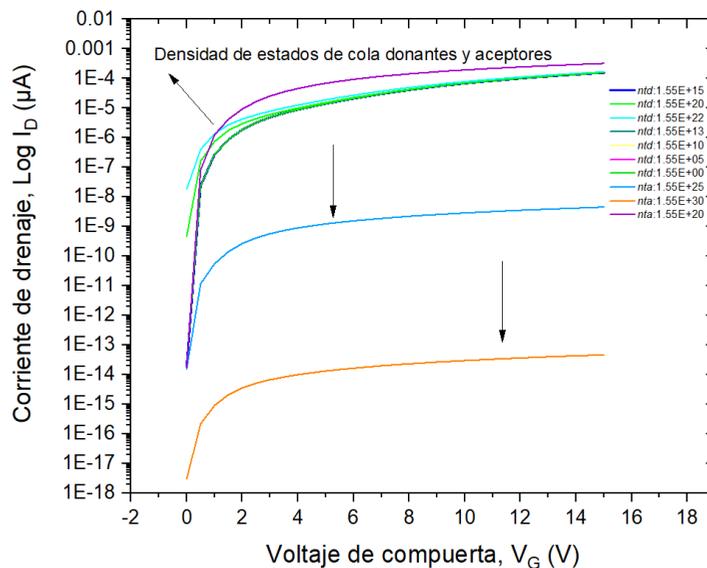


Figura 4.1 Curva transferencial I-V del cambio de parámetros en la densidad de estados similares a donantes.

Ahora bien, el comportamiento al aumentar la movilidad de electrones es mayor y tiene sentido. Si aumentamos dicho valor se tiene una mejor conexión con la fuente y el drenador, ya que ambos muestran una buena comunicación. Esto también dependerá si se trabaja con un semiconductor tipo N o P, ya que estos pueden ser mayoritariamente

huecos o electrones. También tenemos un comportamiento muy ligero al cambiar valores en la densidad de estados similares a aceptores como se muestra en la figura 4.2.

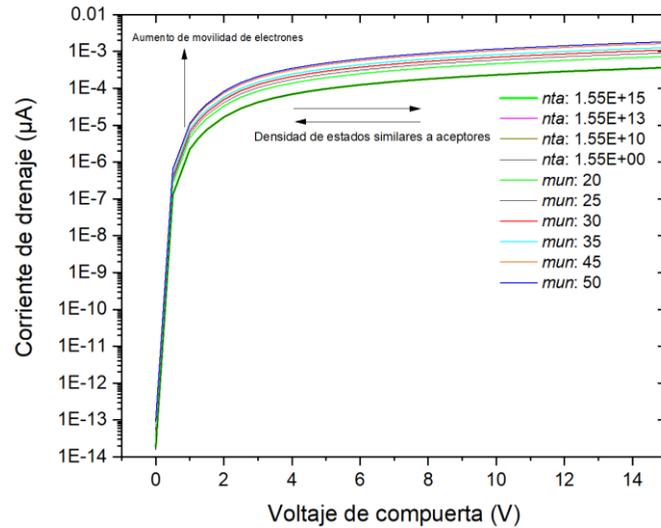


Figura 4.2 Curva I-V del cambio de parámetros en la movilidad de electrones y densidad de estados similares a aceptores

Por último, tenemos la disminución en la movilidad de electrones y la modificación de movilidad de huecos y concentración uniforme de dopaje, lo que se pudo observar es la corriente del drenaje disminuyendo y esto se debe a que la disminución en la movilidad de electrones y la modificación de la movilidad de huecos, así como la concentración uniforme de dopaje, están relacionados con la conducción en dispositivos electrónicos (ver Figura 4.3), y definitivamente tuvimos cambios muy mínimos en la movilidad de huecos y concentración de dopaje. Cómo ya se mencionó con anterioridad, estos resultados obtenidos son para poder identificar, analizar y observar cada comportamiento de los defectos del semiconductor IGZO. La relevancia de la simulación permite un análisis detallado y una comprensión profunda del comportamiento del transistor bajo diferentes condiciones y configuraciones. Esto brinda una base sólida para el diseño previo a la fabricación y la optimización del dispositivo. También, la gran relación entre la simulación y la parte experimental nos permite mejorar el diseño, optimizar el rendimiento y asegurar la fiabilidad de estos dispositivos.

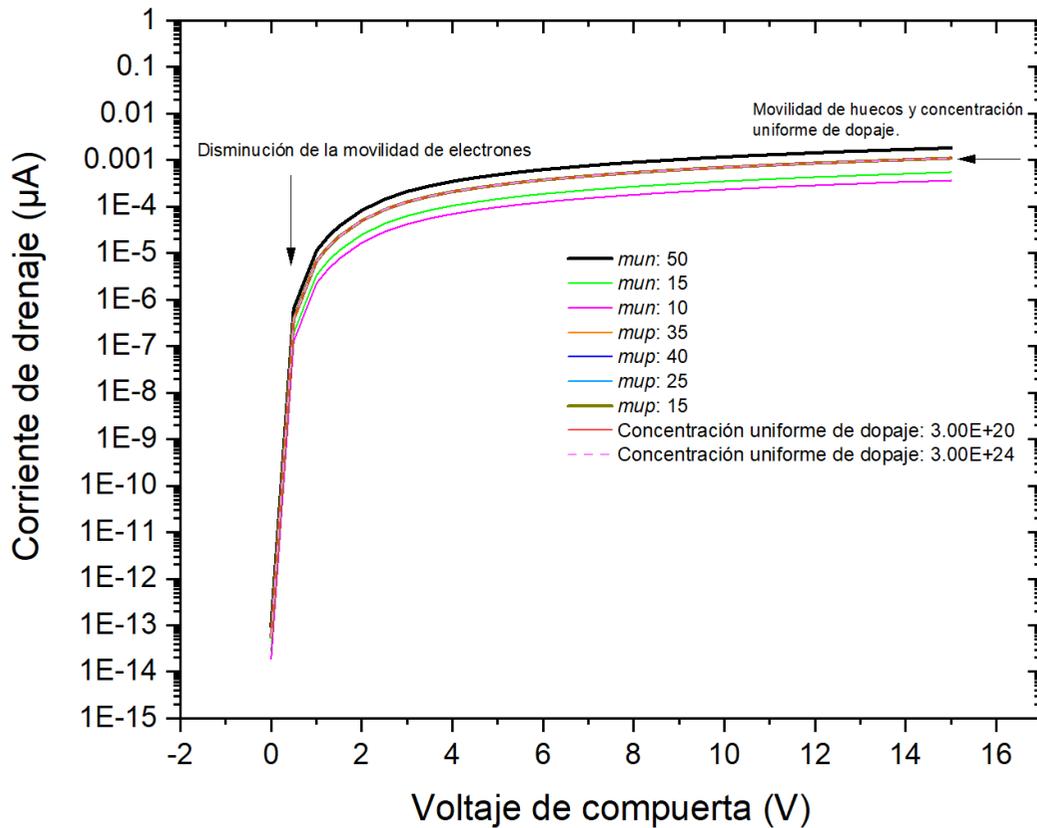


Figura 4.3 Curva I-V del cambio de parámetros de la movilidad de electrones y huecos.

4.2. Parámetros mejorados en la simulación

Después de realizar diferentes simulaciones con la modificación de variables en los defectos del semiconductor IGZO encontramos los parámetros más ideales a usar para el diseño y fabricación del sensor de pH, esto por varias razones, cómo tener una buena movilidad de electrones, un voltaje de umbral correcto, una corriente de apagado y encendido tolerable en los aspectos que para el proyecto se manipulará con electrolitos por lo que aquí se midió fueron los hidronios. Dichos parámetros podemos encontrarlos en la tabla 12 y 13 respectivamente. Dentro de los datos obtenidos en la parte experimental, sugiere que el dispositivo fabricado tiene potencial de funcionar como un sensor de pH eficiente y confiable, sin embargo, para una evaluación más precisa, se deben considerar otros factores, como los requerimientos específicos del sensor, el rango de detección necesario, la respuesta a cambios de pH y la precisión requerida, que podría ser en algunos trabajos a futuro.

Tabla 12. Parámetros del IGZO utilizados en la simulación

Código	Parámetros	IGZO
Pemittivity	Permitividad dieléctrica (F/cm)	12.31
MUN	Movilidad de electrones ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	30
MUP	Movilidad de huecos ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	30
EG300	La breca de banda (eV)	2.05
NC300	Densidad efectiva de estados en la banda de conducción (cm^{-3})	4.80E+18
NV300	Densidad efectiva de estados en la banda de valencia (cm^{-3})	4.80E+18
Affinity	Afinidad electrónica (eV)	4.16
	Espesor (nm)	100
TAUN	Tiempo de vida de electrones (s)	1.00E-07
TAUP	Tiempo de vida de huecos (s)	1.00E-07
	Concentración uniforme de dopaje (cm^{-3})	3.00E+16

Tabla 13. Parámetros de cola y defectos profundos usados en la simulación de Silvaco-ATLAS

Código	Parámetro	IGZO
NTA	(cm^{-3}/eV)	1.55E+15
NTD	(cm^{-3}/eV)	2.55E+15
WTA	(eV)	0.013
WTD	(eV)	0.12
NGA	(cm^{-3}/eV)	0
NGD	(cm^{-3}/eV)	6.5E+16
EGD	(eV)	2.9
WGD	(eV)	0.1
SIGTAE	(cm^2)	1.00E-15
SIGTAH	(cm^2)	1.00E-15
SIGTDE	(cm^2)	1.00E-15
SIGTDH	(cm^2)	1.00E-15
SIGGAE	(cm^2)	1.00E-15
SIGGAH	(cm^2)	1.00E-15
SIGGDE	(cm^2)	1.00E-15
SIGGDH	(cm^2)	1.00E-15

4.3. Conclusiones

En este estudio, se fabricó y caracterizó el transistor de película delgada (TFT) de óxido de indio, galio y zinc amorfo (a-IGZO) con un espesor de 90 nm, utilizando la técnica de la medición de transferencia circular (CTLM) y la técnica de fotolitografía con máscaras ya diseñadas. Además, se utilizó una oblea completa de silicio tipo P dopado con Boro y un crecimiento térmico de óxido de silicio como dieléctrico. En resumen, si bien inicialmente el espesor no se consideró un factor determinante, se pudo observar visualmente que el depósito resultaba transparente en las muestras de IGZO. Sin embargo, para una medición precisa del espesor, se eligió utilizar un elipsómetro. En consecuencia, se optó por la técnica de la máscara de sombra desde la perspectiva de la estrategia de MicroFabricación. En este sentido, la elección de esta técnica se basa en la necesidad de obtener mediciones precisas y confiables del espesor del depósito, lo que es crucial para el éxito del proceso de MicroFabricación. Además, esta decisión permite garantizar la transparencia deseada en el material, cumpliendo así con los requisitos específicos del proyecto.

A lo largo de esta investigación, nos enfrentamos al desafío de desarrollar una receta precisa para depositar el semiconductor IGZO utilizando el sistema de magnetron sputtering, con el objetivo de optimizar su utilidad en la fabricación de transistores de película delgada. A pesar de la falta de precedentes en la deposición de este semiconductor, conseguimos superar este obstáculo aprovechando la disponibilidad del target correspondiente, lo que finalmente nos permitió producir con éxito transistores de película delgada a base de a-IGZO. Este logro representa un avance significativo en la aplicación de esta tecnología y sienta las bases para futuras investigaciones en el campo de los dispositivos electrónicos de última generación.

Además, mediante simulaciones en Silvaco se pudo entender el funcionamiento de un transistor de película delgada y cómo interactúa con su entorno, en este caso, los voltajes. Lo más satisfactorio fue poder visualizar con el analizador de parámetros que el transistor de película delgada presentó un buen rendimiento, lo que sugiere que el depósito de IGZO creado con la receta específica fue de gran ayuda para poder seguir avanzando en los siguientes depósitos. Cabe mencionar que se encontró ruido y muestras de fuga en los TFT

de a-IGZO, lo que indica que aún faltan aún más pruebas experimentales para tener un mejor dominio en las características eléctricas del TFT. No obstante, este estudio proporciona un comienzo sólido para futuras investigaciones en relación al uso de los TFT de a-IGZO como sensores de pH y otras aplicaciones.

Referencias

[1] (S/f). Calameo.com. Recuperado el 13 de julio de 2023, de <https://www.calameo.com/read/0068029065021ddca78>

[2] Sánchez-Pérez H., Vargas-Morales M. y Méndez-Sánchez J. (2000). Calidad bacteriológica del agua para consumo humano en zonas de alta marginación de Chiapas. *Salud Pública México* 42 (5), 397-406.

[3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (s/f). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Org.mx. Recuperado el 13 de julio de 2023, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>

[4] Gómez Rocha, A. I. (2016). *Desarrollo de un pH-metro óptico para medidas "in-situ"* (Ingeniería). CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

[5] Lufadeju, Y., & Osseiran, N. (18 de junio de 2019). El Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. Obtenido de UNICEF: <https://www.unicef.org/es/comunicados-prensa/1-decada-3-personas-en-el-mundo-no-tiene-acceso-a-agua-potable>

[6] *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial*. (s.f.). Obtenido de CIDESI: <https://cuartoslimpiosmexico.com/cidesi/water-quality-monitoring-probe/#CONTACTO>

[7] Jiménez B. (2001). *La Contaminación Ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa, 926 pp. ISBN: 968-18-6042-X (Distribución en Latinoamérica).

[8] Imran Khan, M., Mukherjee, K., Shoukat, R., & Dong, H. A review on pH sensitive materials for sensors and detection. *Microsyst Technol*, 23(10), 4391-4404, (2017).

[9] S. R. Jino Ramson, D. Bhavanam, S. Draksharam, a. Kumar, D. Jackuline Moni & A. Alfred Kirubaraj. Sensor Networks based Water Quality Monitoring System for Intensive Fish Culture - A Review. *Fourth International Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS)*, 54-57, (2018).

-
- [10] Ian J. Echols, Hyosung An, Xiaofei Zhao, Evan M. Prehn, Zeyi Tan, Miladin Radovic, Micah J. Green and Jodie L. Lutkenhaus. pH-Response of polycation/Ti₃C₂T_x MXene layer-by-layer assemblies for use as resistive sensors. *Molecular Systems Design & Engineering*, 5(1), 366-375, 2019.
- [11] F. Vivaldi, D. Santalucia, N. Poma, A. Bonini, P. Salvo, L. Del Noce, B. Melai, A. Kirchhain, V. Kolivoska, R. Sokolová, M. Hromadová & F. Di Francesco. A voltammetric pH sensor for food and biological matrices. *Elsevier*, 322, 128650, 2020.
- [12] Hai Q. Chiang, Brian R. McFarlane, David Hong, Rick E. Presley, John F. Wager. Processing effects on the stability of amorphous indium gallium zinc oxide thin-film transistors. *Elsevier*, 354(19-25), 2826-2830, 2008.
- [13] Han Jeong, J., Won Yang, H., Jin-Seong, P., Kyeong Jeong, J., Mo, Y.-G., Dong Kim, H. & Seong Hwang, C. Origin of Subthreshold Swing Improvement in Amorphous Indium Gallium Zinc Oxide Transistors. *Electrochemical Society*, 11(6), H157-H159, 2008.
- [14] Yeon-Keon, M., Byung-Woo, K., Kwon, T.-S., Kim, K.-T., Park, J.-W., & Sih, L. Copper source/drain electrode contact resistance effects in amorphous indium-gallium-zinc-oxide thin film transistors. *Physica Status Solidi*, 3(7-8), 239-241, 2009.
- [15] Tze-Ching Fung, C.-S. C. Two-dimensional numerical simulation of radio frequency sputter amorphous In-Ga-Zn-O thin film transistors. *Journal of Applied Physics*, 106(8), 084511, 2009.
- [16] Jonathan W. Hennek, Y & X. Reduced Contact Resistance in Inkjet Printed High-Performance Amorphous Indium Gallium Zinc Oxide Transistors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 4(3), 1614-1619, 2012.
- [17] Hyun-June Jang, J.-G & G.-J. Sensitivity enhancement of amorphous InGaZnO thin film transistor based extended gate field-effect transistors with dual-gate operation. *Elsevier*, 181, 880-884. 2013.
- [18] Minkyung Bae, Kyung Min Lee, Eou-Sik Cho, Hyuck-In Kwon, Dong Myong Kim & Dae Hwan Kim. Analytical Current and Capacitance Models for Amorphous Indium-Gallium-Zinc-Oxide Thin-Film Transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 60(10), 3465-3473. 2013.
- [19] Joseph T. Smith, Sahil S. Shah, Michael Goryll, John R. Stowell & David R. Allee. Flexible ISFET Biosensor Using IGZO Metal Oxide TFTs and an ITO Sensing Layer. *IEEE SENSORS JOURNAL*, 14(4), 937-938, 2014.

[20] Lei Qiang & Ruo-He Yao. A new extraction method of trap states in amorphous InGaZnO thin film transistors. *Journal of Display Technology*, 11(4), 325-329, 2015.

[21] Ki-Woong Park & Won-Ju Cho. Thermal Damage-Free Microwave Annealing with Efficient Energy Conversion for Fabricating of High-Performance a-IGZO Thin-Film Transistors on Flexible Substrates. *MDPI*, 14(10), 2630, 2021.

[22] Li-Chen Yen, Ming-Tsyng Tang, Fang-Yu Chang, Tung-Ming Pan, Tien-Sheng Chao & Chiang-Hsuan Lee. Improvement in pH Sensitivity of Low-Temperature Polycrystalline-Silicon Thin-Film Transistors Sensors Using H₂ Sintering. *sensors*, 3825-3832. 2014.

[23] Kazushige Takechi, Shinnosuke Iwamatsu, Toru Yahagi, Yutaka Abe, Seiya Kobayashi & Hiroshi Tanabe. Bottom-gate amorphous InGaZnO₄ thin-film transistor pH sensors utilizing top-gate effects. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53(7), 076702, 2014.

[24] Narendra Kumar, Jitendra Kumar & Siddhartha Panda. Back-Channel Electrolyte-Gated a-IGZO Dual-Gate Thin-Film Transistor for Enhancement of pH Sensitivity Over Nernst Limit. *IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS*, 37(4), 500-503, 2016.

[25] Ju-Young Pyo & Won-Ju Cho. In-plane-gate a-IGZO thin-film transistor for high-sensitivity pH sensor applications. *Elsevier*, 276, 101-106, 2018.

[26] Narendra Kumar, Deepa Bhatt, Moitri Sutradhar & Siddhartha Panda. Interface mechanisms involved in a-IGZO based dual gate ISFET pH sensor using Al₂O₃ as the top gate dielectric. *Elsevier*, 119, 105239, 2020.

[27] Suarez, A. R. (2019). Caracterización y simulación eléctrica de hetero-estructuras p-n de GaN para su aplicación en celdas solares. [*Tesis de maestría*]. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez.

[28] *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. (s.f.). Obtenido de UNESCO: <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/escasez-calidad>

[29] Ki-moon, B. (22 de 10 de 2014). Obtenido de <https://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>

[30] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016). Estadísticas del Agua en México. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-CONAGUA. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf

[31] *El agua en Chiapas*. (s.f.). Obtenido de <https://www.aguas.org.mx/sitio/publicaciones/el-agua-en-chiapas/el-agua-en-chiapas.pdf>

-
- [32] Cuéntame de México. (s.f.). Obtenido de INEGI:
<http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- [33] Gómez, M. F. (22 de Marzo de 2021). Obtenido de Sin embargo:
<https://www.sinembargo.mx/22-03-2021/3954360>
- [34] Cacho, L. M. (2012). *StuDocu*. Obtenido de
<https://www.studocu.com/es/document/universidad-pablo-de-olavide/bioquimica-biomoleculas/tema-4-ionizacion-de-agua/4019366>
- [35] Khan, M. I., Mukherjee, K., Shoukat, R., & Dong, H. A review on pH sensitive materials for sensors and detection methods. In *Microsystem Technologies* (Vol. 23, Issue 10, pp. 4391–4404). Springer Verlag, 2017.
- [36] Vázquez Contreras, E., & Rojas Pérez, T. (2016). *pH: Teoría y 232 problemas*. México D.F.: UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA.
- [37] Ondarse Álvarez, D. (15 de Julio de 2021). *Concepto.de*. Obtenido de
<https://concepto.de/ph/>
- [38] Floyd, T. L. (2008). *DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS* (Octava ed.). México: PEARSON Educación
- [39] Ruiz, A. (2019). *Caracterización y simulación eléctrica de hetero-estructuras p-n de GaN para su aplicación en celdas solares* [Tesis de Maestría, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas]. Repositorio Académico de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
<https://repositorio.unicach.mx/handle/20.500.12753/721>.
- [40] Russo, R.E. Laser Ablation. *Applied spectroscopy*, 49(9), 14A-28A, 1995.
- [41] Eason R. (2007). *Pulsed Laser Deposition of Thin Films: Applications-Led Growth of Functional Materials*, (R. Eason, Ed, 1a ed.). John Wiley & Sons.
- [42] Tsuji, T., Iryo, K., Nishimura, Y., & Tsuji, M. Preparation of metal colloids by a laser ablation technique in solution: influence of laser wavelength on the ablation efficiency (II). *Journal of Photochemistry and Photobiology. A, Chemistry*, 145(3), 201–207, 2001.
- [43] Ashfold, M. N. R., Claeysens, F., Fuge, G. M., & Henley, S. J. Pulsed laser ablation and deposition of thin films. *Chemical Society Reviews*, 33(1), 23–31, 2004.
- [44] Baig, M. K., Atiq, S., Bashir, S., Riaz, S., Naseem, S., Soleimani, H., & Yahya, N. Pulsed laser deposition of SmCo thin films for MEMS applications. *Journal of Applied Research and Technology*, 14(5), 287–292, 2016.

[45] F.H. Salas, C. Falcony, "Generación de estados de superficie y atrapamiento de carga en películas de SiO₂", Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, 1985.

[46] S. Wolf & R.N. Tauber, "Silicon Processing for the VLSI era", Volume 1, Lattice press, pp.149-223.

[47] Y. Xiu-Tian & X. Yongdong, Chemical Vapour Deposition: An Integred Engineering Desing for Advance Materials, Londres: *Springer*, 2010.

[48] M. Houssa, Series in Materials Science and Engineering-High-K Gate Dielectrics, *Institute of Physics Publishing*, pp.5-29, 2004.

[49] Guzman, D. (2021, 2 diciembre). *Depósitos con magnetron Sputtering, la técnica de depósito de materiales más utilizada en la industria de dispositivos semiconductores - Red de MicroFabricación de Dispositivos Electrónicos - % % % %*. Red de MicroFabricación de Dispositivos Electrónicos. <https://cuartoslimpiosmexico.com/magnetron-sputtering-la-tecnica-de-deposito-de-materiales-mas-utilizada-en-la-industria-semiconductora/>

[50] Muñoz Rosas, Ana Luz (2010). *CARACTERIZACIÓN DE SPIN-ON-GLASS COMO DIELECTRICO DE COMPUERTA EN DISPOSITIVOS MOS Y COMO MATERIAL VEHÍCULO PARA EL DEPÓSITO DE HfO₂* (Ingeniero). Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

[51] D.J. Jaeger, Investigation of Sputtered Hafnium Oxides for Gate Dielectric Applications in Integrated Circuits, Master Thesis, *Rochester Institute of Technology*, 2006.

[52] Reynoso, Temístocles (2010). *FABRICACIÓN DE TRANSISTORES FET A BASE DE UNA PELICULA DELGADA DE ÓXIDO DE ZINC* (Ingeniero). Universidad de Sonora.

[53] Castillo Plata, Fredy Josealdo (2017). *CRECIMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DELGADAS DEL SEMICONDUCTOR TERNARIO CdS_{1-1Sex} MEDIANTE ABLACIÓN LÁSER Y DEPÓSITO EN BAÑO QUÍMICO* (Ingeniero). Instituto Politécnico Nacional.

[54] G. Hodes, Chemical Solution Deposition of Semiconductor Films, Estados Unidos: Marcel Dekker Inc., 2003.

[55] N. Nhu Toan, "Spin-on glass Materials and Applications in Advanced IC Technologies", PhD Thesis, *Twente University*, 1999.

[56] Ray-Hua Horng. Thin Film Transistor. *MDPI*, 9(8), 415, 2019.

[57] Erick, R. (29 de Diciembre de 2020). *Transistores*. Obtenido de <https://transistores.info/thin-film-transistor-transistor-de-pelicula-delgada-o-tft/>

[58] Elkan, S. (2009). Los vidrios metálicos y su aplicación en la aeronáutica. [Tesis de licenciatura]. Universidad Politécnica de Catalunya.

[59] Galbarro, H. R. (s.f.). *Divulgación de los procesos tecnológicos en el campo de la ingeniería y arquitectura*. Obtenido de ingemecánica: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>

[60] SILVACO, Atlas User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE, Santa Clara, 2018.

[61] D. N. Hernández, «Cuarto limpios de México,» Centro de Nanociencias y Micro y Nanotecnologías del IPN, 27 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://cuartoslimpiosmexico.com/proceso-de-fotolitografia-por-el-metodo-de-escritura-directa/>.

[62] W. Kern, D A. & Puotinen. Cleaning solutions based on hydrogen peroxide for use in silicon semiconductor technology. *RCA rev.* 31:187-206, 1970.

[63] Werner Kern. Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology. Noyes Publications. Park Ridge NJ. 1993.

[64] Werner Kern. The Evolution of Silicon Wafer Cleaning Technology.

[65] Brotherton & S. D. *Introduction to Thin Film Transistors: Physics and Technology of TFTs*, 2013.

[66] *Primary flat silicon wafers*. (2018, octubre 1). Universitywafer.com. <https://www.universitywafer.com/primary-flat-silicon-wafer.html>

[67] Cullis, A. G., & Canham, L. T. Visible light emission due to quantum size effects in highly porous crystalline silicon. *Nature*, 353(6342), 335–338, 1991.

[68] Velarde, D. (2020, June 3). *Proceso de oxidación de silicio*. Red de MicroFabricación de Dispositivos Electrónicos. <https://cuartoslimpiosmexico.com/proceso-de-oxidacion-de-silicio/>

[69] Shin, Y., Kim, S., Kim, K., Kim, M., Oh, S., & Jeong, J. M. The mobility enhancement of indium gallium zinc oxide transistors via low-temperature crystallization using a tantalum catalytic layer. *Scientific Reports*, 7(1), 2017.

[70] Hara, Y., Kikuchi, T., Kitagawa, H., Morinaga, J., Ohgami, H., Imai, H., Daitoh, T., & Matsuo, T. IGZO-TFT technology for large-screen 8K display. *Journal of the Society for Information Display*, 26(3), 169–177, 2018.

[71] Sheng, J., Jeong, H., Han, K., Hong, T., & Park, J. Review of recent advances in flexible oxide semiconductor thin-film transistors. *Journal of Information Display*, 18(4), 159–172, 2017.

[72] Choi, M.-C., Kim, Y., & Ha, C.-S. Polymers for flexible displays: From material selection to device applications. *Progress in Polymer Science*, 33(6), 581–630, 2008.

[73] Nomura, K., Ohta, H., Takagi, A., Kamiya, T., Hirano, M., & Hosono, H. Room-temperature fabrication of transparent flexible thin-film transistors using amorphous oxide semiconductors. *Nature*, 432(7016), 488–492, 2004.

[74] Garrido Fernández, Blas (1993). *Modificaciones estructurales en el óxido de silicio térmico inducidas por los procesos tecnológicos en microelectrónica: aplicación de la espectroscopía infrarroja* (Maestro en Ciencias Físicas). Facultad de Física de la Universidad de Barcelona.

[75] Compeán Jasso, M. E. (2004). *Estructura de bandas del Si y del SiO₂* (Ingeniero). CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL UNIDAD QUERETARO.

[76] Martin, N., Nyberg, T., & Kapaklis, V. Low temperature electronic transport in sputter deposited a-IGZO films. *Current Applied Physics*, 14(11), 1481–1485, 2014.

[77] Kim, J., Park, J., Yoon, G., Khushabu, A., Kim, J. S., Pae, S., Cho, E. C., & Yi, J. Effect of IGZO thin films fabricated by Pulsed-DC and RF sputtering on TFT characteristics. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 120, 105264, 2020.

[78] Wu, G. M., Liu, C. Y., & Sahoo, A. K. RF sputtering deposited a-IGZO films for LCD alignment layer application. *Applied Surface Science*, 354, 48–54, 2015.

[79] Yoon, J., Jung, H., Jang, J. T., Lee, J., Lee, Y., Lim, M., Kim, D. M., Kim, D. H., & Choi, S. J. Hybrid complementary inverter based on carbon nanotube and IGZO thin-film transistors with controlled process conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 762, 456–462, 2018.

[80] Mizquez Corona, Rolando (2013). CdS dopado con Cu por medio de la técnica Depósito por Láser Pulsado (PLD) (Ingeniero). Universidad de Sonora.

[81] Herrera Bernal, Martín Gonzalo (2015). *Extensión del método de Shockley para la caracterización de contactos óhmicos* (Ingeniero). CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.

[82] Galván Arellano, Miguel (2005). *DESARROLLO DE CONTACTOS OHMICOS PARA SEMICONDUCTORES III-V CON BARRERA DE DIFUSIÓN* (Ingeniero). CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL UNIDAD LEGARIA.