



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Investigación en Física
Maestría en Ciencias en Electrónica

Simulación de una estructura pseudo-MOSFET a base de ZnO

T E S I S

Presentada en cumplimiento de los requisitos para obtener el grado de
Maestría en Ciencias en Electrónica
presenta:

Ing. Ángel Martín Martínez Moreno

Director: **Dr. Roberto Gomez Fuentes**

Co-Director: **Dr. Dainet Berman Mendoza**

Hermosillo, Sonora, México, 31 de agosto de 2022

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

Índice general

Agradecimientos	2
Dedicación	2
1. Antecedentes	6
1.1. Justificación	8
1.2. Hipótesis	8
1.3. Objetivos	8
1.3.1. Objetivo general	8
1.3.2. Objetivos particulares	8
1.4. Metas	8
1.5. Metodología	8
1.6. Contenido de esta tesis	11
2. Marco teórico	12
2.1. Fundamentos	12
2.2. Materiales eléctricos	12
2.2.1. Materiales aislantes	12
2.2.2. Materiales conductores	13
2.2.3. Materiales semiconductores	13
2.3. Teoría de bandas de energía	14
2.3.1. Semiconductores de banda directa e indirecta.	15
2.3.2. Transiciones directas entre las bandas de energía.	15
2.3.3. Transiciones indirectas entre las bandas de energía	16
2.3.4. Nivel de Fermi	17
2.3.5. Teoría unión P-N de un Semiconductor	17
2.4. Transistores de efecto de campo (FET)	18
2.4.1. Transistores de efecto de campo de unión (JFET)	19
2.4.2. Transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET).	20
2.4.3. Transistores de efecto de campo metal-semiconductor (MESFET).	21
2.4.4. Pseudo transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (Pseudo-MOSFET).	21
2.5. Funcionamiento de transistor MOSFET	21
2.6. Semiconductores utilizados en transistores FET.	23
2.6.1. Óxido de zinc.	23
2.6.2. Estructura cristalina del ZnO	23
3. Herramienta de simulación COMSOL: Diseño pseudo-MOSFET	25
3.1. Introducción	25
3.2. Ambiente de simulación	25
3.3. Parámetros del dispositivo	26
3.4. Geometría del dispositivo	26
3.5. Materiales en el dispositivo	27
3.6. Mallado	28
3.7. Módulo semiconductor	29
3.7.1. Recombinación de trampa asistida	30
3.7.2. Dopaje de materiales semiconductores	31
3.8. Estudio	33

4. Metodología experimental	35
4.1. Introducción	35
4.1.1. Teoría módulo Electroestático	35
4.1.2. Teoría módulo Semiconductor	36
4.1.3. Teoría multifísica corriente eléctrica y transferencia de calor en sólidos	37
4.1.4. Simulación dispositivo pseudo-MOSFET	37
5. Análisis de resultados	41
5.1. Introducción	41
5.2. Diseño de dispositivos de simulación	41
5.3. Concentración de electrones	44
5.4. Potencial eléctrico	46
5.5. Densidad de corriente	49
5.6. Transferencia de calor en sólidos	51
5.7. Curvas de respuesta I_d vs V_{ds} y I_d vs V_{gs}	55
6. Conclusiones	59
6.1. Trabajo futuro	59
Apéndice	60
A. Materiales	60

Agradecimientos

A mi director y co-director de tesis: Dr. Roberto Gómez Fuentes y Dr. Dainet Berman Mendoza por haberme apoyado en cada momento, por brindarme su opinión profesional y abrirme sus puertas no solo como una relación de profesor - alumno, sino como un amigo.

A mis amigos y consejeros: Dr. Antonio Ramos y M.C. Gerardo Valenzuela por apoyarme y dedicado su tiempo en cada momento importante de este trabajo.

A mis amigos y compañeros de licenciatura y maestría, Juan Martínez, Roberto Ramírez y Víctor López, por su valiosa compañía y apoyo en todo este proyecto profesional.

A la Universidad de Sonora por ser una institución de primer nivel donde se me brindo el apoyo necesario.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACYT, por su apoyo económico, el cual hizo posible mi estadía durante el tiempo de maestría.

Dedicatoria

Quiero dedicar mi tesis a:

Mis sobrinas, Emma Martínez y Janelly Martínez, sin ellas este trabajo jamás se habría iniciado. Por lo tanto, dedico en su totalidad cada resultado que pueda obtener este documento.

Resumen

En este proyecto de tesis, se presenta la simulación de un transistor pseudo-MOSFET de película delgada (TFT por sus siglas en inglés). Utilizando como capa activa óxido de zinc, empleando el software COMSOL MULTIPHYSICS en 2D y 3D. Con una estructura de transistor de contactos superiores y compuerta inferior (Bottom- Gate Top-Contact). Los materiales utilizados fueron, sustrato de silicio, contactos de aluminio y como dieléctrico de compuerta se utilizó el óxido de hafnio, óxido de aluminio y óxido de silicio. A través de la simulación se obtuvo el variante más óptimo de transistor con el fin de ahorrar recursos y tiempo del laboratorio.

Capítulo 1

Antecedentes

En los años de 1940, John Bardeen y Walter Brattain inventaron el transistor. En la actualidad el desarrollo de transistores con propiedades optoelectrónicas es un área de oportunidad con constante innovación debido a las limitaciones del silicio, como su banda prohibida indirecta y la dificultad de depositarlo sobre sustratos flexibles [1].

El transistor de punta de contacto fue el primer dispositivo electrónico fabricado con la capacidad de obtener ganancia. Gracias a los experimentos realizados por este grupo de científicos fue posible el surgimiento del transistor de unión bipolar (BJT), este transistor es un dispositivo de estado sólido que es fabricado sobre un monocristal semiconductor como son: silicio (Si), germanio (Ge) y arseniuro de galio (GaAs), posteriormente se hace una contaminación en el sustrato de forma controlada con el fin de obtener zona n y p. La zona n con donantes de electrones mientras que la zona p con donantes de aceptores (huecos), esto permite determinar el tipo de transistor ya sea npn o pnp [2].

Posteriormente, aparecieron los transistores unipolares, o transistores de efecto de campo FET de los cuales su primera propuesta data de los años 20. Sin embargo, su desarrollo no fue posible, sino hasta 1953 debido a dificultades de obtención de materiales semiconductores o aplicación de las técnicas requeridas. Los FET al igual que los BJT, son transistores de estado sólido de dos uniones en los cuales un campo eléctrico controla el flujo de los portadores mayoritarios en un canal de conducción [3].

Los transistores de efecto campo de unión (JFET) fueron primero propuestos por Shockley en los años 1950 y su funcionamiento se basa en el control del paso de corriente por el campo aplicado a la compuerta, constituida por una o varias uniones p-n. A continuación, surgieron los transistores de efecto de campo de unión los cuales tiene un funcionamiento muy similar a JFET con la diferencia que para este caso propuesto el control del flujo de corriente se realiza mediante una unión metal-semiconductor. Y en épocas más recientes surge un nuevo tipo de transistor denominado MOSFET (metal-óxido-semiconductor) el cual su control de la corriente a través del semiconductor se realiza mediante contactos separados del semiconductor por una capa aislante, estos tipos de transistores son de gran utilización en circuitos integrados [4].

La necesidad de una electrónica de bajo costo para aplicaciones de gran superficie motiva a los científicos a pensar en alternativas al silicio cristalino a principios de 1970. Esto hace que la tecnología TFT sea un precursor en este escenario [5].

En 1975, Spear y Lecomber de la universidad de Dundee en Escocia, demostraron que los canales n y p de un semiconductor de película delgada se podían controlar, esto indicó que las características eléctricas del semiconductor silicio amorfo (a-Si) puede controlarse siendo dopado por fósforo (P) o boro (B). [6].

Tiempo después, en 1979 los tres científicos Spear, Ghaith y LeComber utilizaron el silicio amorfo hidratado (a-Si:H) como material semiconductor para desarrollar los TFT. Posteriormente, la tecnología sufre varias modificaciones en el uso de material de la capa de canal activo para lograr una movilidad de portadores y la relación de conmutación. Desde mediados de la década de 1980, los TFT basados en Silicio han influido con éxito en la tecnología de las pantallas de cristal líquido (LCD) de gran superficie y se han convertido en los dispositivos más importantes para la matriz activa de cristal líquido y aplicaciones en diodos emisores de luz. Los TFT basados en capas de canales de semiconductores orgánicos se introdujeron en la década de 1990 con una movilidad de electrones equivalente a la del a-Si:H. Esta clase de TFT resulta ser un candidato potencial para la incorporación

de sustratos flexibles. Sin embargo, también sufren de una movilidad de portadores reducida que limita sus aplicaciones en circuitos que requieren una corriente elevada y operaciones de alta velocidad. Más recientemente, el concepto de TFT se fusiona con óxidos semiconductores transparentes para la creación de transistores transparentes de película delgada (TTFT) con potenciales aplicaciones en electrónica flexible como en pantallas ultra delgadas [7].

Los MOSFET se pueden dividir en dos grupos por la manera en que se forma el canal conductor. (1) Tipo de inversión con conducción de portadores minoritarios (empobrecimiento). (2) Tipo de agotamiento profundo con conducción de portadores mayoritarios (enriquecimiento) [8].

Los MOSFET tipo empobrecimiento se forma a partir de una base semiconductor (sustrato). Se tienen dos regiones del mismo tipo de semiconductor conforman una tercera región del mismo tipo que sirve como canal de conexión, estas tres regiones se conocen como compuerta, drenaje y fuente. Además, en el sustrato se conecta una cuarta terminal llamada SS (terminal de sustrato), como se muestra en la Figura 1.1. Es posible polarizar la compuerta para que ejerza una presión en los portadores mayoritarios del material del canal, además de atraer los mayoritarios del sustrato al canal. Lo que generara entre los portadores del canal y el sustrato una cantidad de portadores libres disponibles para la conducción [9].

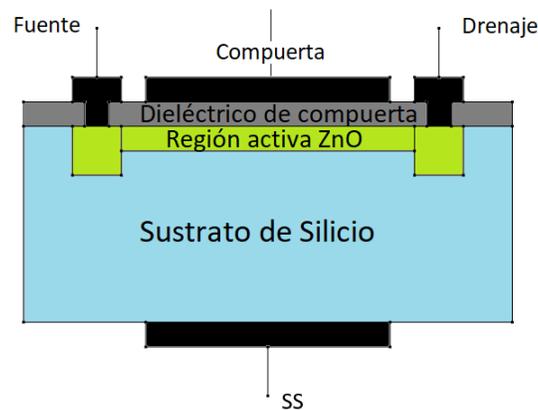


Figura 1.1: MOSFET del tipo empobrecimiento de canal N.

En los MOSFET del tipo enriquecimiento, el sustrato se conecta de manera interna a la terminal de fuente. La fuente y drenaje están conectadas al material mediante un contacto metálico. Sin embargo, en este caso no se tiene un canal que conecte estas terminales. La compuerta está conectada a una placa metálica, separada del sustrato por un óxido de silicio, como se muestra en la Figura 1.2.

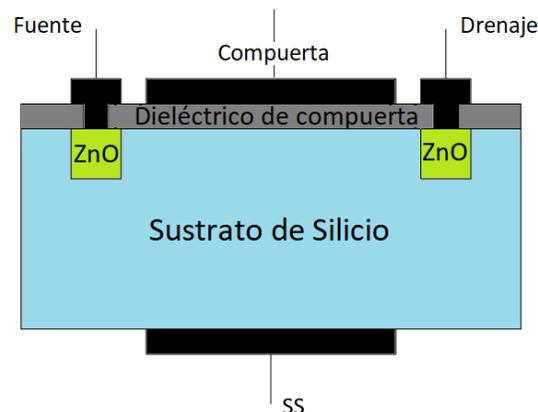


Figura 1.2: MOSFET del tipo enriquecimiento de canal N.

Los transistores MOSFET a base de ZnO han sido manipulados para la búsqueda de diversas aplicaciones y/o soluciones. En la aplicación de sensores optoelectrónicos con el fin de conseguir detección de distintas condiciones,

como oscuridad, iluminación, luz blanca, luz amarilla y luz de láser rojo [10]. En este trabajo se propone una estructura semitransparente con contactos superiores y compuerta interior el cual será diseñado y simulado en software COMSOL MULTIPHYSICS teniendo ZnO como capa activa y Al_2O_3 como dieléctrico, con el objetivo de lograr transistores de bajo costo y mayor optimización. Además, se busca obtener modelos óptimos de transistores para su futura replicación de forma experimental.

1.1. Justificación

La simulación permite determinar las variables ideales para transistores de película delgada usando como capa activa ZnO y una variación de dieléctrico de compuerta. Obteniendo los resultados con una mejora de desempeño en sus propiedades eléctricas. Además, de reducir tiempo de experimentación y gastos de insumos.

1.2. Hipótesis

A través del software COMSOL MULTIPHYSICS es posible obtener el comportamiento de un transistor de película delgada con ZnO como capa activa del dispositivo, logrando así una futura gama de posibles variables a modificar y obtener mejores resultados.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y simular películas delgadas de ZnO como capa activa y una variación de dieléctrico de compuerta en transistores de película delgada.

1.3.2. Objetivos particulares

- Diseñar transistores de película delgada a base de ZnO y una variación de dieléctrico de compuerta.
- Simulación de transistor a diseñar a 2D.
- Simulación de transistor a diseñar a 3D.
- Obtener las características principales y eléctricas, del TFT y optimizar las características del TFT.
- Validar los resultados de la simulación mediante comprobación de transistores fabricados con anterioridad en el laboratorio nanoFAB.

1.4. Metas

- Realizar el diseño de transistor de película delgada basado en ZnO con un dieléctrico de compuerta con mejor salida de respuesta.
- Obtención de las respuestas de salidas eléctricas principales del semiconductor.
- Establecer las bases del modelado de transistores mediante simulación 2D y 3D para realizar su optimización de forma metodológica.

1.5. Metodología

En este trabajo se estudió el comportamiento y las características de un transistor MOSFET de película delgada con un espesor de 100nm a 200nm para cada una de las películas que lo conforman. Con el fin de obtener resultados de transistores MOSFET a menor tamaño y mayor optimización.

El método de elementos finitos se utiliza para modelar con precisión productos y procesos determinando integridad estructural, rendimiento y confiabilidad; además de predecir fallas estructurales. El método de elementos finitos propone que un número infinito de variables desconocidas sean sustituidas por un número limitado de elementos de comportamiento bien definido. Estas divisiones pueden tener formas diferentes, como pueden ser triangular, cuadrangular, pentagonal, entre otros, esto es dependiendo del tipo y tamaño del diseño [11]. A través de la herramienta COMSOL MULTIPHYSICS y gracias al módulo de Semiconductores es que es posible el estudio del comportamiento de dispositivos semiconductores de películas delgadas, en la Figura 1.3 se puede observar el módulo principal para esta tesis de simulación [12].

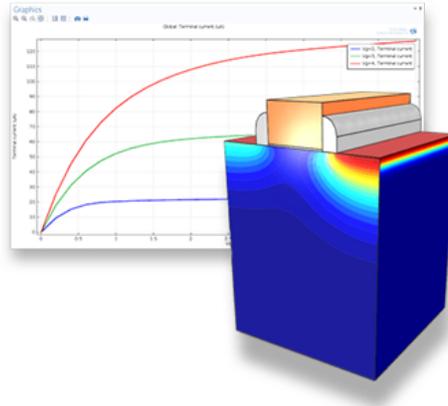


Figura 1.3: Módulo a semiconductor [13]

El módulo semiconductor permite modelar el rendimiento estacionario y dinámico de los dispositivos en una, dos y tres dimensiones, junto con el modelado basado en circuitos de dispositivos activos y pasivos [13].

A su vez, el módulo semiconductor permite hacer modelados a nivel de dispositivo gracias a su ayuda en la creación de simulaciones personalizadas que involucran múltiples efectos [14].

Haciendo uso del módulo semiconductor es posible obtener diferentes parámetros de medición como son:

- Potencial eléctrico (Figura 1.5)
- Concentración de huecos (Figura 1.6)
- Concentración de electrones (Figura 1.7)
- Curvas $I_d vs V_{ds}$ (Figura 1.8)
- Curvas $I_d vs V_{gs}$ (Figura 1.9)

Al hacer uso de un transistor MOSFET de prueba con parámetros de mallado fino como se muestra en la Figura 1.4, temperatura de 293.15K y propiedades propias del silicio proporcionados por el software COMSOL fue posible obtener los siguientes resultados de prueba.

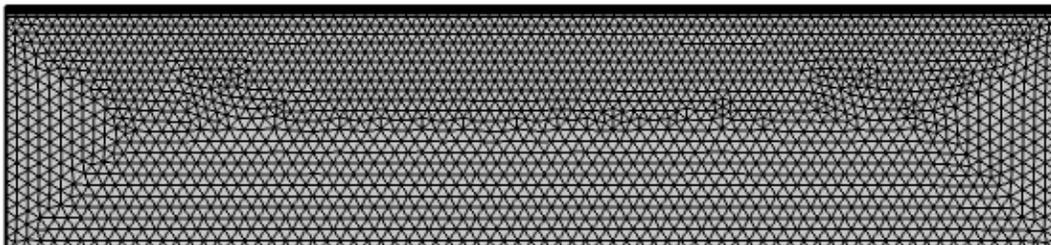


Figura 1.4: Mallado de transistor MOSFET

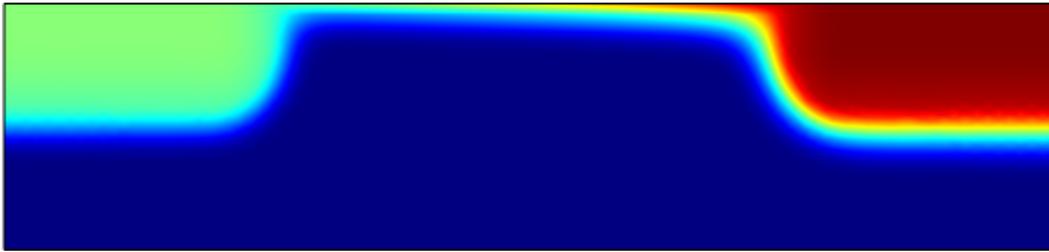


Figura 1.5: Potencial eléctrico de transistor MOSFET.

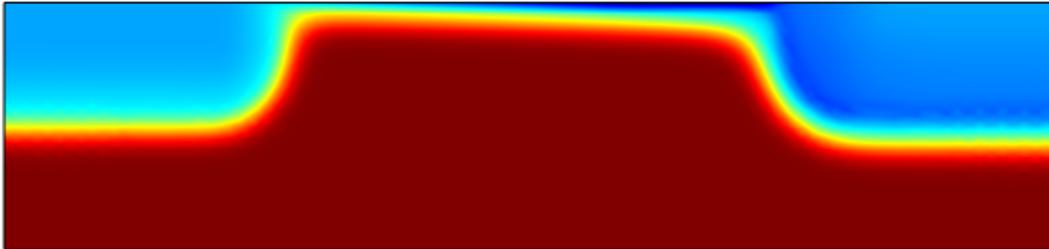


Figura 1.6: Concentración de huecos de transistor MOSFET.

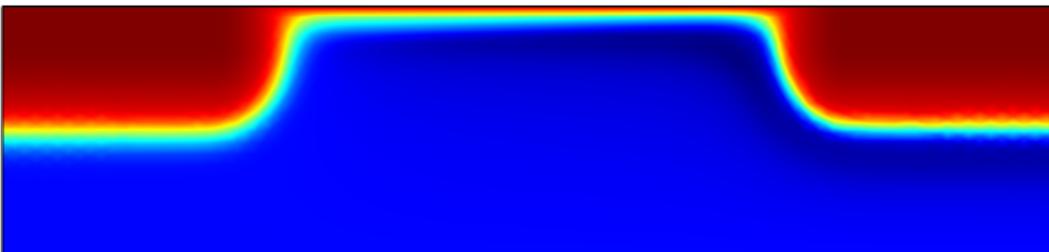


Figura 1.7: Concentración de electrones de transistor MOSFET.

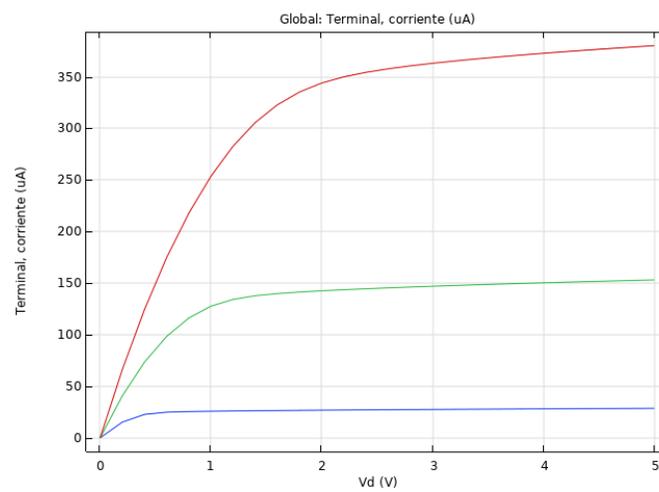


Figura 1.8: Curva I_d vs V_{ds} a 293.15K de transistor MOSFET

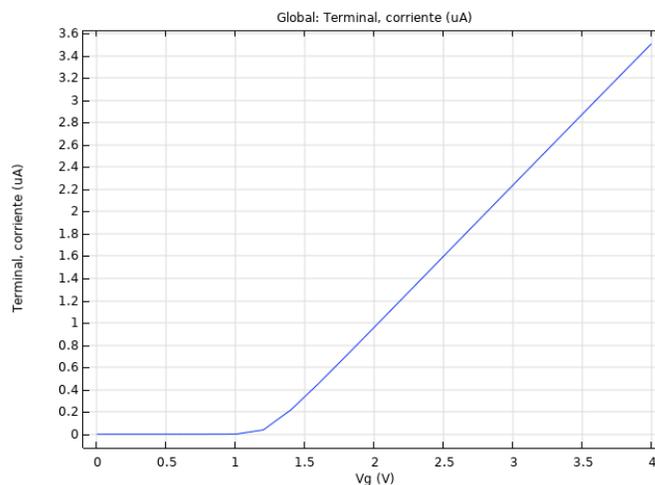


Figura 1.9: Curva I_d vs V_{gs} a 293.15K de transistor MOSFET

1.6. Contenido de esta tesis

Los capítulos de esta tesis están organizados de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Introduce las bases de la simulación y el interés por realizarlo.
- Capítulo 2: Es dedicado a materiales eléctricos, dispositivos MOS y semiconductor a utilizar como capa activa. Explicando las diferentes categorías de materiales eléctricos, desarrollando funcionamiento de dispositivos MOS y características principales de semiconductor ZnO.
- Capítulo 3: Presenta el funcionamiento del software COMSOL MULTIPHYSICS y su escalamiento de simulación.
- Capítulo 4: Muestra el funcionamiento de los módulos de simulación. A su vez, presenta las diferentes estructuras del modelo pseudo-MOSFET.
- Capítulo 5: Realiza un análisis y discusión de resultados obtenidos durante este estudio.
- Capítulo 6: Expone las conclusiones finales del trabajo y el trabajo a futuro.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Fundamentos

Con el fin de facilitar la comprensión del presente trabajo, es necesario contar con conocimientos previos sobre los principios básicos de cada capa de la estructura del transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor de película delgada para posteriormente introducir las principales propiedades del semiconductor ZnO.

2.2. Materiales eléctricos

Los materiales eléctricos se pueden clasificar en tres tipos según su comportamiento eléctrico, estos son: Aislantes, Conductores y Semiconductores. Además de tener comportamiento distinto, también presentan diferencias notables en su estructura y enlace.

2.2.1. Materiales aislantes

Estos materiales presentan poca conductividad eléctrica, por lo cual la corriente que pasa a través de ellos es despreciable. A esta corriente se le llama corriente de fuga. Los materiales aislantes son utilizados entre conductores con el objetivo de evitar un flujo de corriente y posibles cortos circuitos. Existe un conjunto de propiedades que debe cumplir un aislante para su clasificación, las cuales son:

- Propiedades eléctricas.
- Propiedades mecánicas.
- Propiedades físico-químico.

En este tipo de materiales es muy importante considerar la temperatura máxima en la cual pueden trabajar, ya que al superar este límite ocasionaría que sus propiedades eléctricas se vean afectadas y esto incrementaría la corriente de fuga [15]. Algunos ejemplos de materiales aislantes se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Ejemplos de materiales dieléctricos [16–19].

Material	Permitividad (ϵ_r)
<i>SiO₂</i>	3.9
<i>Al₂O₃</i>	7.2
<i>HfO₂</i>	25
Vidrio	5.6 - 10
Aire	1.0056
Cerámica	10 - 50,000
Papel	1.5

2.2.2. Materiales conductores

Estos materiales presentan una conductividad elevada, lo que permite un flujo abundante de corriente eléctrica. Este tipo de materiales usualmente son metálicos, los cuales tienen resistividad menor, lo que le permite una muy buena conducción de calor y electricidad. Respecto a la teoría de bandas, estos presentan una banda de valencia y conducción muy aproximadas entre sí y en algunos casos estas bandas pueden encontrarse sobrepuestas. Los electrones de valencia en un átomo son aquellos que se encuentran en un nivel energético más externo y permiten los enlaces. Por otra parte, los electrones de conducción son aquellos que se han trasladado a niveles energéticos vacíos, lo que permite una mayor movilidad y eventualmente el flujo de corriente eléctrica [20]. Algunos ejemplos de materiales conductores se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Ejemplos de materiales conductores [21–23].

Material	Conductividad (σ)
Cobre	58.7
Oro	44.2
Plata	62.1
Aluminio	36.9
Platino	9.3
Titanio	2.4
Litio	10.8
Niquel	14.3
Tungsteno	8.9

2.2.3. Materiales semiconductores

Los materiales semiconductores se encuentran ubicados en una posición intermedia entre los materiales conductores y aislantes, ya que a temperaturas muy bajas difícilmente conducen corriente eléctrica y se comportan como aislantes, pero al elevar su temperatura o ser sometidos a una tensión externa, su comportamiento se asemeja a los conductores. Estos semiconductores son conocidos como intrínsecos y en ellos las bandas de conducción y de valencia se encuentran separadas por una barrera de energía (banda prohibida) más pequeña.

En este tipo de materiales, cuando se transfiere un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, se crea un hueco que actúa como un transportador de carga positiva, fenómeno que eventualmente puede crear una corriente positiva.

En los semiconductores intrínsecos, el número de electrones disponibles para la conducción y los correspondientes huecos formados, se encuentran en igual número y los materiales de este tipo son de poca utilidad para la electrónica. Sin embargo, cuando se agregan ciertos átomos (impurezas) a estos materiales, sus propiedades eléctricas cambian notablemente. Así, cuando se agrega una impureza “donadora de electrones”, la proporción de electrones será mayor que la de huecos, y el material se comportará como un “portador de carga negativa” (electrónica), aunque los huecos estarán presentes en menor proporción. De la misma forma, cuando se agrega una impureza “acceptora de electrones”, el material semiconductor se convertirá en un semiconductor “portador de carga positiva” (huecos), con electrones presentes en menor proporción. Al proceso de controlar la calidad y la cantidad de impurezas, de una clase o de otra, se denomina “dopaje”. A los materiales semiconductores con impurezas de un tipo u otro, se le conocen como semiconductores extrínsecos.

Entre los semiconductores existen algunas clasificaciones, como pueden ser los semiconductores intrínsecos, como se muestra en la Figura 2.1. En la cual sus bandas de conducción y valencia se encuentra separada por una banda de energía prohibida (band gap) en el orden de 1eV.

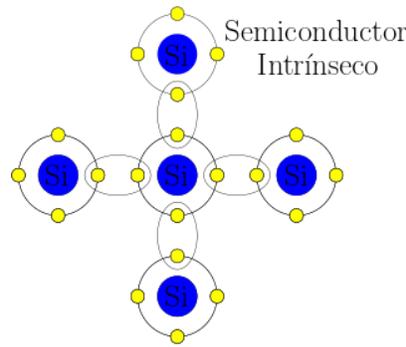


Figura 2.1: Semiconductor intrínseco (ejemplo: Silicio.)

Un semiconductor se denomina como intrínseco cuando se transporta un electrón de la banda de valencia hacia la banda de conducción, creando así un hueco que actuará como transportador de carga positiva con el objetivo de crear una corriente positiva en el material [20].

En los semiconductores intrínsecos, el número de electrones y huecos se encuentran en igualdad numérica, pero al agregar átomos (dopaje de impurezas) es cuando se encuentra un cambio en ellos, formando semiconductores de tipo N o tipo P a lo cual se les considera como semiconductores extrínsecos. Al ser dopados por elementos pentavalentes (Fósforo o Arsénico) se le denomina semiconductor donador, ya que esta entrega electrones y es cuando se denomina semiconductor tipo N (cargas negativas). Y al ser dopado por elementos trivalentes (Boro o Indio) se le denomina semiconductor aceptor, debido a que este tendrá un electrón faltante y se denomina semiconductor tipo P (cargas positivas), en la Figura 2.2 se aprecia la diferencia entre materiales semiconductores extrínsecos del tipo N y P.

Aunque el semiconductor haya sido dopado, el material aún es eléctricamente neutro. Lo que quiere decir que la generación de pares electrón/hueco ocurre de la misma manera para semiconductores intrínsecos o extrínsecos. En un semiconductor tipo N, decrece la cantidad de huecos (portadores minoritarios) y los electrones son los portadores mayoritarios de corriente. A su vez, para semiconductores tipo P, decrece la cantidad de electrones libres (portadores minoritarios) y los huecos son los portadores mayoritarios de corriente [24] [25].

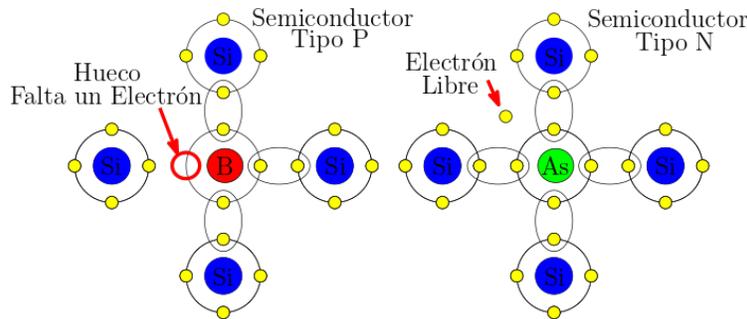


Figura 2.2: Semiconductor extrínseco (ejemplo: Silicio dopado con Arsénico o Boro).

2.3. Teoría de bandas de energía

Cuando los átomos se unen en un cristal, cada uno de los estados cuánticos individuales de los átomos se unen con los estados correspondientes en otros átomos en el cristal para formar las diversas bandas de energía dentro del material. Si hay un total de N átomos idénticos en el material, entonces hay N estados cuánticos dentro de cada banda. Los electrones en los átomos llenan los estados disponibles dentro de cada banda. Así, si hay N estados en una sola banda, puede haber hasta $2N$ electrones en cada banda.

Cuando se aplica un voltaje al material, un electrón puede responder al campo solo si puede moverse hacia un estado ligeramente más alto, ya que este tendría más energía al ser afectado por el campo. Esto solo es posible si

hay algunos estados libres cercanos a los electrones con posibilidades de saltar hacia la siguiente banda. Este es el caso para los materiales conductores, ya que sus electrones se llenan en los estados disponibles, de modo que la banda más alta está llena solo parcialmente. Los electrones en esta banda, la cual tiene como nombre banda de conducción, son libres de ser conducidos por el material, ya que hay estados cuánticos vacíos cercanos en su banda de energía. Pero los electrones en la banda inferior conocida como banda de valencia no pueden moverse porque no hay estados libres cerca.

Por otro lado, si las bandas de energía se llenan de manera que se ocupa exactamente el límite superior de una banda, entonces los electrones no pueden responder al voltaje suministrado, ya que existe una brecha de energía, lo que impide llegar a un estado cuántico en el que puedan moverse libremente, a estos materiales se les conoce como materiales aislantes. Y si estamos ante un caso como el de los materiales aislantes, pero la brecha de energía en la banda de conducción no es demasiado grande, puede resultar que la energía sea suficiente como para que algunos electrones salten a ella, a estos materiales se les conoce como materiales semiconductores [26]. En la Figura 2.3 se puede apreciar el espaciamiento entre las bandas de energía para diferentes tipos de materiales eléctricos.

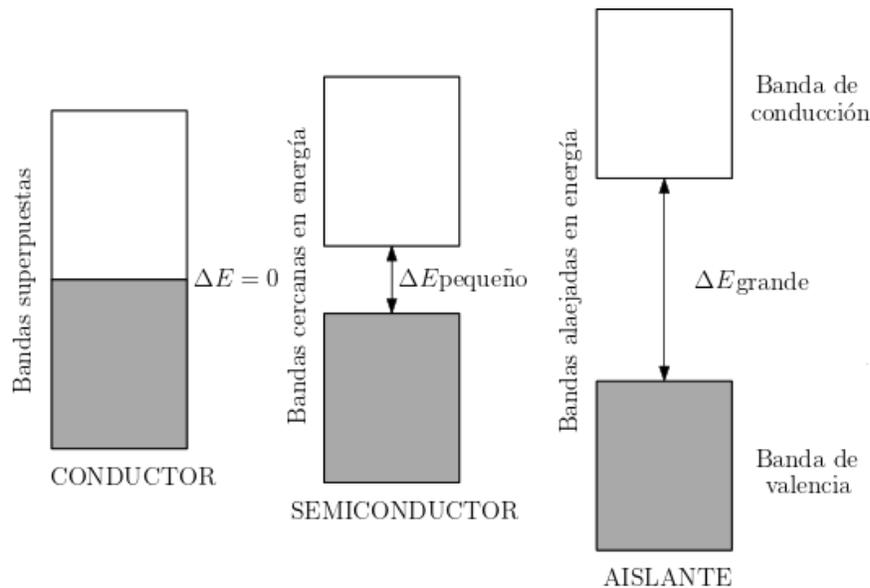


Figura 2.3: Diagramas esquemáticos de las bandas de energía para diferentes materiales.

2.3.1. Semiconductores de banda directa e indirecta.

Los semiconductores también se les caracteriza por el alineamiento de sus bandas de energía, a las cuales se les llama semiconductores de banda prohibida directa e indirecta. Por ejemplo, el arseniuro de galio es de gap directa al igual que el germanio y el silicio es de gap indirecto.

Esta propiedad de gap directo e indirecto es otra manera de modular las propiedades electrónicas y así tener diversas aplicaciones. La diferencia fundamental entre estos dos tipos de semiconductores es la manera en la que los electrones viajan de la banda de valencia hacia la banda de conducción; para el caso de gap directo, el electrón solo necesita ganar energía igual al ancho de la banda prohibida para cruzar hacia la banda de conducción, mientras que en el caso del gap indirecto, además del proceso anterior, también es necesario cambiar el vector de onda del electrón [27].

2.3.2. Transiciones directas entre las bandas de energía.

La energía mínima de la banda de conducción, caracterizada por el vector de onda $K_{\text{mín}}$, y la energía máxima de la banda de valencia, determinada por el vector de onda $K_{\text{máx}}$, están dispuestas en un mismo punto de la zona de Brillouin, generalmente en el punto $K = 0$, es decir, $K_{\text{mín}} = K_{\text{máx}}$. Por ejemplo, el ZnO es un semiconductor con este tipo de transiciones, llamadas transiciones directas permitidas. A continuación, podemos observar en la Figura

2.4 la representación de este proceso de absorción y la estructura de las bandas de energía calculadas [28,29].

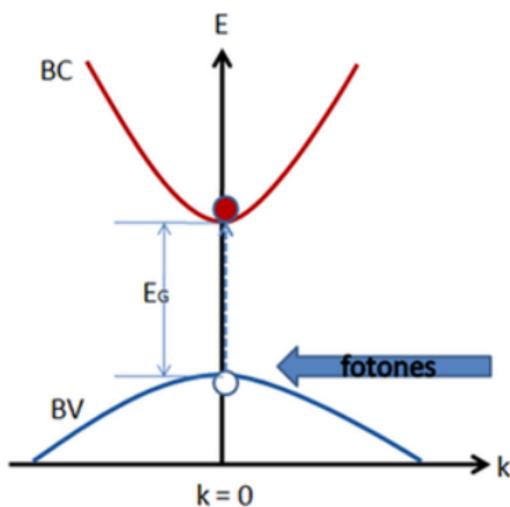


Figura 2.4: Absorción óptica fundamental para transiciones directas permitidas entre bandas [28,29].

2.3.3. Transiciones indirectas entre las bandas de energía

En el caso de los materiales semiconductores en que los extremos de la banda de conducción y de valencia se encuentran en distintos valores de K , de manera que en este caso $K_{mín}$ es diferente de $K_{máx}$. Por ejemplo, el Si es un semiconductor con este tipo de transición óptica, llamada transición indirecta. A continuación, se presenta en la Figura 2.5 un esquema para las transiciones indirectas entre bandas [28,29].

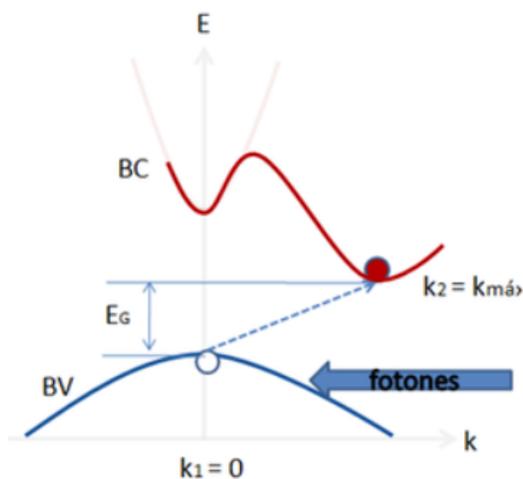


Figura 2.5: Absorción óptica fundamental para transiciones indirectas permitidas entre bandas [28,29].

2.3.4. Nivel de Fermi

El nivel de Fermi es de vital importancia en la teoría de los dispositivos semiconductores, dependiendo de su posición en un cristal semiconductor, este condicionará sus propiedades de conducción.

Para un semiconductor en equilibrio térmico, la operación del nivel de energía se describe mediante la función de distribución de Fermi-Dirac.

La probabilidad $P(E)$ de que un electrón gane la energía térmica suficiente a una temperatura absoluta tal que se encuentre ocupando un nivel de energía particular E , viene dada por la distribución de Fermi-Dirac. La energía de nivel de Fermi es el nivel de energía por encima del cual la probabilidad de encontrar un electrón a $0K$ es 0.

$$P(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E-E_f}{K_B T}}} \quad (2.1)$$

Donde tenemos que E es la energía del electrón, E_f la energía de Fermi, K_B es la constante de Boltzmann y T la temperatura en Kelvin. Todos los electrones tienen una energía menor que la energía del nivel de Fermi a $0K$. Por lo que ningún electrón existe sobre el nivel de Fermi a $0K$, al tener un aumento en la temperatura, la probabilidad de encontrar un electrón por encima del nivel de Fermi aumenta.

El nivel de Fermi es aquel nivel de energía que se encuentra ubicado en algún lugar entre las bandas de valencia y conducción y su posición depende del dopado del cristal, es decir, si es de tipo N o P.

En los semiconductores dopados de tipo N, la energía del nivel de Fermi se encuentra cerca de las bandas de conducción y en el semiconductor del tipo P se encuentra cerca de la banda de valencia. Esto es debido a que el semiconductor del tipo N se utilizan los átomos donadores, los cuales se encargan de ceder electrones al semiconductor y estos mismos se encuentran muy próximos a la banda de conducción, así que a temperatura ambiente requiere poca energía para que los electrones donadores crucen hacia la banda de conducción. Esto aumenta la energía de la banda de conducción y los semiconductores dopados de tipo P se emplea un método parecido con excepción de que se emplean átomos aceptores, concluyendo en un aumento de energía en la banda de valencia [30,31].

2.3.5. Teoría unión P-N de un Semiconductor

Gran parte de los dispositivos semiconductores empleados en la electrónica, en su estructura contienen regiones del tipo P y del tipo N al emplearlos juntos forman la unión PN.

Cuando un cristal dopado del tipo P se coloca en contacto con uno dopado del tipo N con las intenciones de formar una sola pieza, el cual lleva como nombre unión PN o diodo de cristal, como se presenta en la Figura 2.6. La superficie de contacto de los cristales del tipo P y del tipo N se lo conoce con el nombre de empalme. En la sección P, los huecos son los portadores mayoritarios, mientras que en la sección N los electrones son los portadores mayoritarios.

En el caso de estas uniones, cuando están formadas por el mismo material semiconductor se le conoce como una homounión y al tratarse de materiales diferentes se le conoce como una heterounión. Debido a la alta concentración de diferentes tipos de portadores de carga en las dos secciones, los huecos de la región P se difunden en la región N y los electrones de la región N se difunden de la región P. En ambos casos, cuando un electrón se encuentra con un hueco, uno cancela el efecto del otro y como resultado tenemos una capa delgada en la unión que se vuelve carente de portadores de carga. A esto denominamos región de agotamiento o zona de carga espacial.

Al llevarse a cabo la unión de ambos cristales se crea una difusión de los electrones libres que se desplazan desde la zona N hacia la zona P y los huecos van desde la zona P hacia la N para recombinarse entre ellos. En esta zona llamada de difusión desaparecen las cargas móviles de ambos signos. La carga neta de cada lado de la unión es igual, pero de sentido opuesto. Si el dopaje de un lado es menor, como es típicamente el caso, la región de agotamiento se

extiende más profundamente en ese lado. La carga total en cada lado permanece igual y opuesta.

A medida que van disminuyendo las cargas móviles en la zona próxima a la unión va a presentarse una carga negativa en el cristal tipo P y una positiva en el tipo N. Al alcanzar estas cargas un valor definido se detiene el proceso de recombinación, debido a que la carga de tipo negativa de los electrones móviles del cristal N y la carga positiva de los huecos del cristal P, esta carga que se manifiesta es una barrera de potencial que tiene un valor aproximado de un voltio.

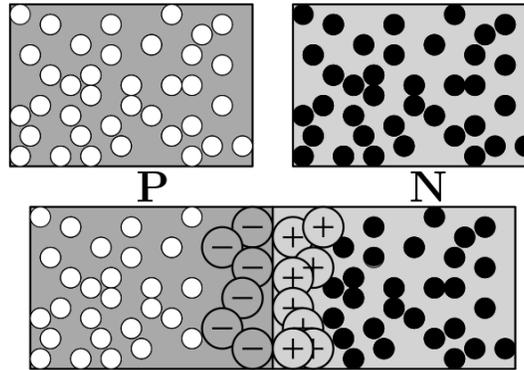


Figura 2.6: Unión entre un semiconductor del tipo N y P.

La magnitud de la barrera de potencial depende de la magnitud del dopaje del cristal semiconductor, es importante señalar que al tener la unión PN se genera un campo eléctrico el cual se establece debido a la diferencia de potencial desarrollado a través de ella.

Además, se cuenta con algunas propiedades fundamentales para la unión PN de los semiconductores, las cuales son:

- **Función trabajo Φ :** Es la cantidad mínima de energía requerida para inducir fotoemisión de electrones de la superficie de un metal, y el valor de Φ depende del metal [32].
- **Afinidad electrónica:** Es la propiedad periódica que nos da información sobre el comportamiento químico de los elementos [33]. Viene dada por la distancia entre el nivel de vacío E_0 y el fondo de la banda de conducción E_c y se designa por x y es la energía que necesita adquirir un electrón de conducción para ser emitido del semiconductor [34].
- **Contacto metal-semiconductor:** El contacto schottky presenta un comportamiento rectificante, actuando de una forma similar a las uniones P-N, mientras que el contacto óhmico se caracteriza por presentar un comportamiento lineal y una resistencia despreciable en comparación con el resto del dispositivo, de forma que la existencia de este contacto no interfiere en las características eléctricas del dispositivo [34].

2.4. Transistores de efecto de campo (FET)

Los transistores de efecto de campo son ampliamente utilizados en la electrónica debido a su uso en los circuitos integrados y circuitos de alta frecuencia, este tipo de transistores presenta algunas ventajas respecto a otro tipo de transistores (como son los transistores de unión bipolar). De esta clase existen diferentes categorías, como son:

- Transistor de efecto de campo de unión (JFET)
- Transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET)
- Transistor de efecto de campo metal-semiconductor (MESFET)

Los transistores de efecto de campo tienen una estructura entre materiales del tipo N y P de tres terminales, en donde la región N será el canal, el cual consta de su sección superior e inferior, en la sección superior se encuentra la

terminal de drenaje, mientras que la terminal de fuente se encuentra en la sección inferior. A su vez, tendremos dos capas de material tipo P formando así la terminal de compuerta, las cuales se encuentran interconectadas entre sí, como se presenta en la Figura 2.7 [35]. Estos transistores son dispositivos semiconductores en los cuales el control de corrientes es mediante un campo eléctrico, además de que cumplen con las siguientes características [36]:

- Dispositivos unipolares
- Es necesario un menor número de espacio (a comparación de los transistores bipolares)
- Su impedancia de entrada es en el orden de $M\Omega$

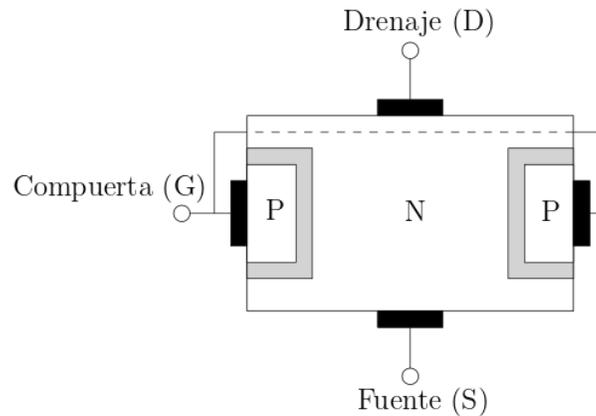


Figura 2.7: Transistor de efecto de campo (FET)

2.4.1. Transistores de efecto de campo de unión (JFET)

Los JFET son dispositivos electrónicos de tres terminales (drenaje (D), compuerta (G) y fuente (S)), los cuales son utilizados como interruptores controlados electrónicamente, amplificadores o resistencia controlada por tensión. A diferencia de otros dispositivos electrónicos, este en particular no necesita una corriente de polarización debido a que es controlado por tensión eléctrica. La carga eléctrica fluye a través de un canal semiconductor que se encuentra ubicado en la sección de drenaje y fuente.

Los transistores JFET se pueden clasificar en dos grupos, como se muestra en la Figura 2.8:

- JFET tipo n
- JFET tipo p

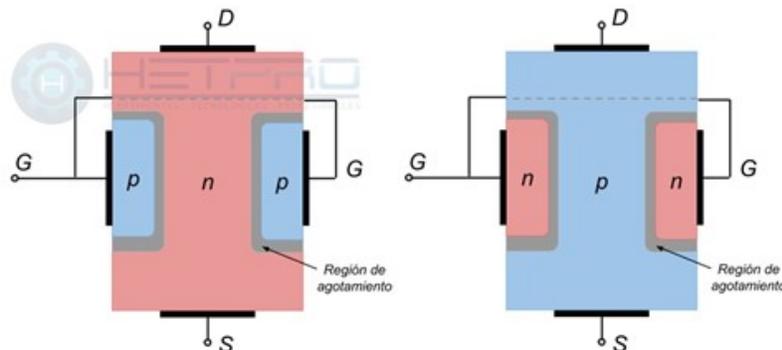


Figura 2.8: Transistores de efecto de campo de unión del tipo N y P [37].

Los transistores con canal N o P dopados ligeramente por los extremos, formando de esta manera contactos óhmicos en las terminales de drenaje y fuente. Este canal se encuentra en medio de dos regiones de compuerta del

tipo opuesto, en las cuales se ubican las terminales para la compuerta que a su vez se encuentran cortocircuitadas y así formar un dispositivo de tres terminales [37].

2.4.2. Transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (MOSFET).

Los transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor no tienen una estructura de unión PN como otros transistores de esta categoría, en cambio, la terminal de compuerta está aislada gracias a un material dieléctrico colocado en medio de la terminal y el canal. Los MOSFET cuentan con dos categorías, las cuales son llamadas de enriquecimiento (E) y empobrecimiento (D) [38].

La estructura de los transistores MOS está formada por cuatro capas: una capa de conductor (usualmente metales), seguida de una capa de aislante (comúnmente SiO_2), en el uso de la capa activa se emplea de algún semiconductor y por último una segunda capa de material conductor, como se muestra en la Figura 2.9. Las capas conductoras funcionan como electrodos conectados a la alimentación del dispositivo, gracias al acomodo de las capas del dispositivo, es que este se comporta como un capacitor como se describe en la ecuación 2.2 :

$$C = \varepsilon_{ox} \frac{A}{l} \quad (2.2)$$

Donde C sería la capacitancia, ε_{ox} la permitividad del dieléctrico, A el área del electrodo superior y l el espesor de la capa del dieléctrico. A su vez, para determinar la permitividad del dieléctrico, es necesaria la ecuación 2.3:

$$\varepsilon_{ox} = \varepsilon_0 K_{ox} \quad (2.3)$$

Donde ε_0 es la permitividad del vacío y K_{ox} es la constante dieléctrica.

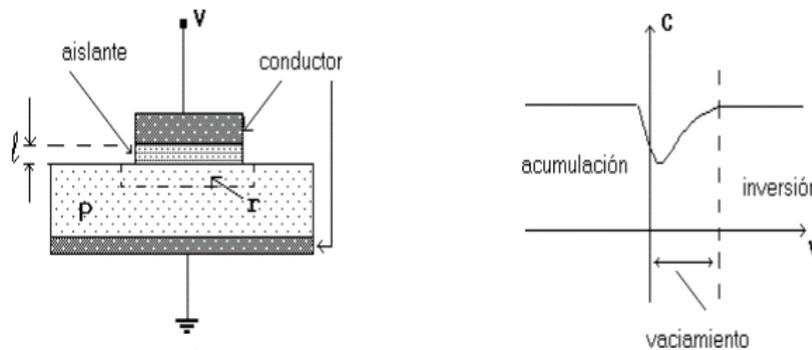


Figura 2.9: Estructura de transistor MOS [39]

Cuando V sea un voltaje inverso, el campo eléctrico a través del dieléctrico atraerá a los huecos hacia la región r (debajo de la terminal superior) lo cual produce un almacenamiento de cargas negativas bajo la terminal superior y cargas positivas en la región r. Y cuando V sea un voltaje positivo, el campo eléctrico repele los huecos y la zona r queda libre, lo cual produce una carga espacial negativa en la zona de vaciamiento, comportándose como un capacitor. Mientras el voltaje vaya en aumento, esta zona de vaciamiento se vuelve más grande y así incrementando el valor de l, mientras que disminuye el valor de la capacitancia.

Al aumentar más el valor del voltaje, al punto de que el campo eléctrico creado sea lo suficientemente fuerte como para atraer electrones generados por efecto térmico hacia la zona r, se producirá una acumulación de cargas negativas en esa zona. Provocando así que el valor del espesor del dieléctrico vuelva a su valor original y la capacitancia regrese a su valor constante (previamente obtenido al aplicar un voltaje inverso) [39].

2.4.3. Transistores de efecto de campo metal-semiconductor (MESFET).

El funcionamiento de este tipo de transistores es muy similar a los JFET, pero con la diferencia que este dispositivo puede operar a frecuencias en el rango de las microondas, la terminal de compuerta está formada por una unión metal-semiconductor del tipo Schottky. La estructura es con tres electrodos metálicos (compuerta, drenaje y fuente) depositados sobre la superficie del semiconductor, formando un contacto óhmico con el semiconductor, donde este es principalmente utilizado de arseniuro de galio debido a tener un mejor rango de operación útil. En la Figura 2.10 se puede comprender mejor la estructura de un dispositivo MESFET.

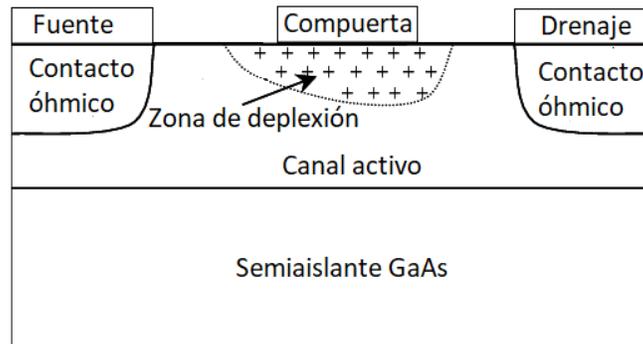


Figura 2.10: Estructura de transistor MESFET.

La capa semiconductor actúa como canal efectivo para los portadores y en la sección inferior es colocado el sustrato semiaislante. Al tener el canal semiconductor del tipo n, la terminal de compuerta es polarizada negativamente, lo que ocasiona una región de carga espacial en el semiconductor nula de portadores, que controla el ancho efectivo del canal [4].

2.4.4. Pseudo transistores de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (Pseudo-MOSFET).

El pseudo MOSFET es una etapa experimental de los transistores MOSFET convencionales, la cual se sitúa en una configuración invertida del mismo Silicon-On-Insulator (SOI por sus siglas en inglés). La estructura de un pseudo MOSFET carece de procesos necesarios de un MOSFET, como puede ser el proceso de litografía para un trazado de contactos o uniones de diferentes materiales [40]. A pesar de carecer de este proceso, el modelo pseudo MOSFET presenta las características principales de un MOSFET como son: movilidad, tiempo de vida de portadores, densidad de trampas de interfaz y cargas de óxido, dopaje, etc. Gracias a esto es posible obtener un modelo más económico y funcional para su futura correcta manufactura [41].

2.5. Funcionamiento de transistor MOSFET

Para que un transistor de efecto de campo funcione, no es necesario el suministro de corriente al terminal de compuerta. Teniendo esto en cuenta, se puede mantener aislada la estructura de la compuerta respecto al canal. Con esta disposición se busca conseguir eliminar la mayor cantidad de corriente de fuga que pueda aparecer en diferentes tipos de transistores FET. En la figura 2.11 se muestra un transistor MOSFET de empobrecimiento de canal N, el cual también se le denomina MOSFET de depleción. La forma de trabajo de un transistor MOSFET de empobrecimiento se explica debido a que los electrones de la fuente de poder pueden circular desde la fuente hasta el drenaje a través del canal inducido y estrecho de material semiconductor tipo N.

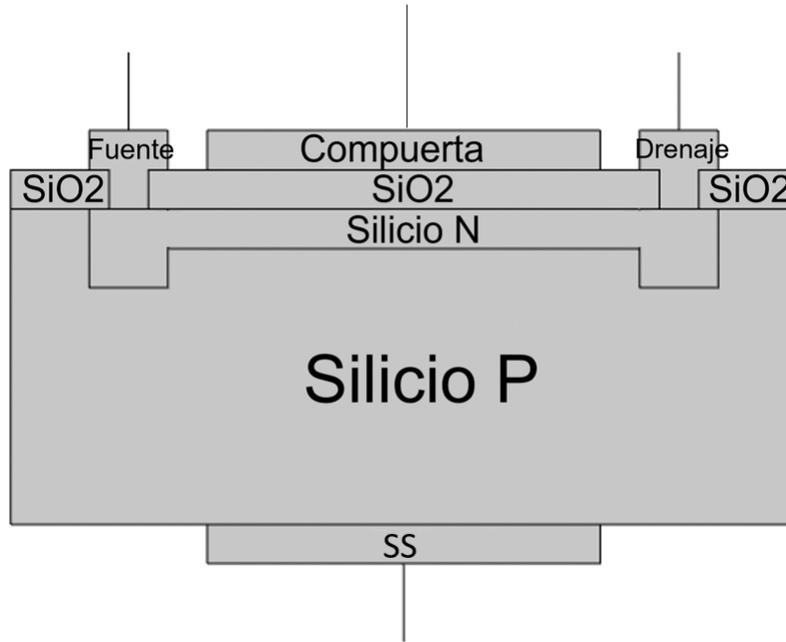


Figura 2.11: MOSFET de tipo empobrecimiento

En la figura 2.12 se muestra la familia de curvas típicas de un transistor MOSFET de empobrecimiento de canal N. Es importante observar como en estas curvas aparecen tanto tensiones negativas de V_{GS} como positivas. La corriente más elevada se consigue con la tensión mas positiva de V_{GS} y el corte se consigue con tensión negativa de V_{GS} .

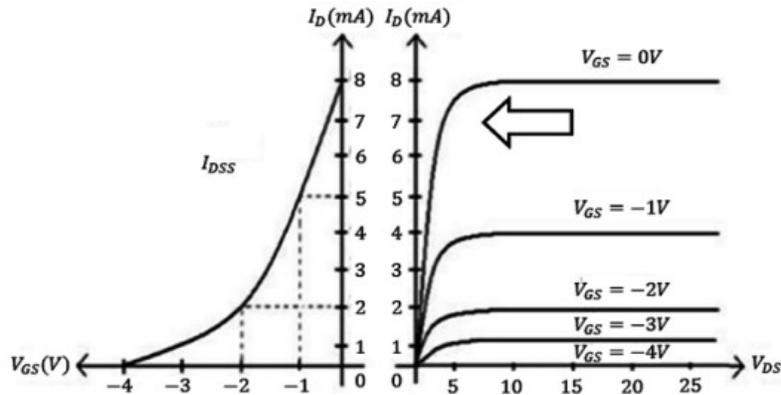


Figura 2.12: Curvas características para MOSFET de tipo empobrecimiento

En esta familia de curvas se puede obtener la curva de transconductancia, que nos indica la relación que existe entre V_{GS} e I_D . Debido a que este transistor puede operar tanto en tensiones positivas como negativas, es que la corriente I_{DSS} correspondiente a la intersección de la curva en el eje I_D , ya no es la de saturación. Como ocurriría en el caso del transistor JFET, esta curva de transconductancia es parabólica y la ecuación que la define es:

$$I_D = I_{DSS} \left[1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(apag)}} \right]^2 \quad (2.4)$$

Por lo que este tipo de transistor es muy fácil de polarizar, ya que se puede escoger el punto correspondiente a $V_{GS} = 0v, I_D = I_{DSS}$. Cuando este queda polarizado así, el transistor está normalmente encendido.

2.6. Semiconductores utilizados en transistores FET.

Los semiconductores utilizados en el diseño y fabricación de transistores de efecto de campo son principalmente el Silicio (Si), Germanio (Ge) y Arseniuro de Galio (GaAs). Esto es gracias a su abundancia y características eléctricas del material, además de abrir posibilidades de dopar el material y así obtener como resultado tipo n o p. El uso de semiconductores en transistores de efecto de campo es principalmente para la capa de región activa, la cual consiste en la región de operación del transistor.

Actualmente, se ha trabajado con transistores con región activa de semiconductor ZnO, demostrando tener excelentes propiedades físicas para el desarrollo de dispositivos electrónicos.

2.6.1. Óxido de zinc.

El óxido de zinc es un material semiconductor que pertenece a la familia II-IV con una banda prohibida de 3.37eV y una gran banda de enlace de excitones de 60 meV a temperatura ambiente, este material produce un alto grado de ionicidad entre sus enlaces, lo cual lo convierte en uno de los compuestos más iónicos perteneciente a la familia II-IV [42].

Las propiedades del ZnO lo hacen un excelente candidato para distintas aplicaciones en la electrónica, como pueden ser dispositivos electrónicos, optoelectrónicos, transductores, sensores de gas, conductores transparentes, por mencionar algunos [43]. A continuación se presenta la tabla 2.3 donde es posible conocer algunos parámetros de este semiconductor.

Propiedades	Valor
Permitividad relativa	8.6 - 10.2
Banda prohibida	3.37v
Afinidad electrónica	4.5v
Densidad efectiva de estados, banda de valencia	$1.8e18[1/cm^3]$
Densidad efectiva de estados, banda de conducción	$3e18[1/cm^3]$
Movilidad de electrones	$115[cm^2/(V * s)]$
Movilidad de huecos	$60[cm^2/(V * s)]$

Tabla 2.3: Valores de propiedades del ZnO [44]

2.6.2. Estructura cristalina del ZnO

La estructura más estable para el ZnO es el tipo hexagonal wurtzita, ya que en esta estructura podemos encontrar los átomos suficientemente alejados y así compensar la repulsión provocada por su alto grado de ionicidad en sus enlaces. Cada átomo de zinc se encuentra rodeado por un tetraedro de 4 átomos de oxígeno y viceversa, en la Figura 2.13 es posible comprender mejor esta estructura cristalina [45].

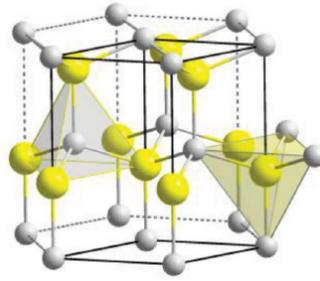


Figura 2.13: Estructura cristalina ZnO (átomos de oxígeno \rightarrow gris y átomos de zinc \rightarrow amarillo) [46]

Esta estructura cristalina pertenece al grupo espacial C_{6v}^4 en la notación Schoenflies o $P6_3mc$ en la notación Hermann-Mauguin [47] y es una combinación alternada de planos de átomos de oxígeno y zinc aplicados a lo largo del eje c , con una distancia entre ellos de $0,38c$, donde c es un parámetro de la red en dirección vertical. Los valores de los parámetros de red para el ZnO son $a = 3,253\text{\AA}$ y $c = 5,213\text{\AA}$ donde a y c , están en razón de $\frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}} = 1,633$ que corresponde a la estructura ideal wurtzita [48].

Capítulo 3

Herramienta de simulación COMSOL: Diseño pseudo-MOSFET

3.1. Introducción

COMSOL Multiphysics es un software de simulación interactivo que es utilizado para modelar y resolver problemas de ciencia e ingeniería. La herramienta de simulación permite el uso de varios enfoques físicos en un mismo modelo o tener la opción de analizar el diseño por secciones. En este capítulo, con el objetivo de tener la comprensión necesaria, se presentan los elementos necesarios para el modelado y simulación a través de este software, empleando los módulos semiconductor, electrostática, corrientes eléctricas y transferencia de calor en sólidos, con el fin de se tenga la comprensión necesaria en la interpretación de las simulaciones realizadas y los factores que inciden en su comportamiento.

3.2. Ambiente de simulación

Alguna de las ventajas que ofrece el software COMSOL Multiphysics es la interfaz de trabajo y su capacidad de integrarse a otras secciones de este mismo. Definir las cantidades físicas relevantes, como las propiedades de los materiales, cargas y restricciones. Favorece a que el desarrollador no pierda tiempo en la descripción de las ecuaciones necesarias debido a que el software las describe. Además, el software permite la integración de estas ecuaciones físicas con los métodos numéricos utilizados. A continuación, se muestra en la Figura 3.1 la pantalla principal de COMSOL donde es posible ver como se compone esta misma.

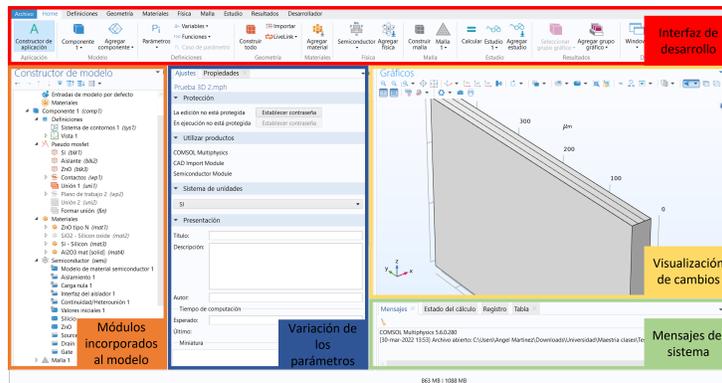


Figura 3.1: Ventana principal ambiente de simulación COMSOL.

Al resolver los modelos, el software COMSOL Multiphysics ensambla y resuelve el problema utilizando un conjunto de herramientas avanzadas de análisis numéricos. También es capaz de crear secuencias para registrar todos los pasos que crean los parámetros, geometría, materiales, malla, física, estudio, configuración del solucionador,

visualización y presentación de resultados. Recomendando trabajar el software en este mismo orden.

3.3. Parámetros del dispositivo

Como se indica en el apartado anterior, la principal sección para trabajar, es la que incluye los parámetros y a su vez se puede ir modificando, dependiendo de las necesidades que tenga el desarrollador en el diseño del dispositivo a simular. Como es posible apreciar en la Figura 3.2, necesitamos declarar las dimensiones del dispositivo, las tensiones suministradas, valores de materiales, entre otras constantes que necesitaremos.

▼ Parámetros			
» Nombre	Expresión	Valor	Descripción
Vd	1[V]	1 V	Voltaje de drenaje
Vg	1[V]	1 V	Voltaje de compuerta
M_cont	10[um]	1E-5 m	Largo del canal
H_SiO2	200[nm]	2E-7 m	Espesor del dielectrico de compuerta
H_ZnO	200[nm]	2E-7 m	Espesor de la capa activa
Largo	21[um] + M_cont	3.1E-5 m	Largo del dispositivo
H_Si	280[um]	2.8E-4 m	Espesor del sustrato de Silicio
T	300[K]	300 K	Temperatura sometida

Figura 3.2: Parámetros de simulación.

Es posible cambiar estos valores para modificar las condiciones del dispositivo o las dimensiones de este. A su vez, en el caso del suministro de tensiones (voltaje de compuerta y drenaje) es posible introducir sus condiciones en la sección de estudio, por comodidad solo se suministra 1v en la sección de parámetros.

3.4. Geometría del dispositivo

En esta sección se presenta el dispositivo, donde relacionaremos el largo y alto de este en su diseño 2D. Para el diseño 3D también se considera el ancho del dispositivo. Teniendo esto en cuenta es necesario implementar las diferentes secciones, tales como el sustrato, dieléctrico de compuerta, región activa y los contactos del dispositivo. También el software de COMSOL nos pide indicar la unidad de longitud y la unidad angular que se necesitaría para el diseño presentado en este trabajo. Para este caso haremos uso de la unidad de longitud de μm y como unidad angular los grados, como se muestra en la Figura 3.3.

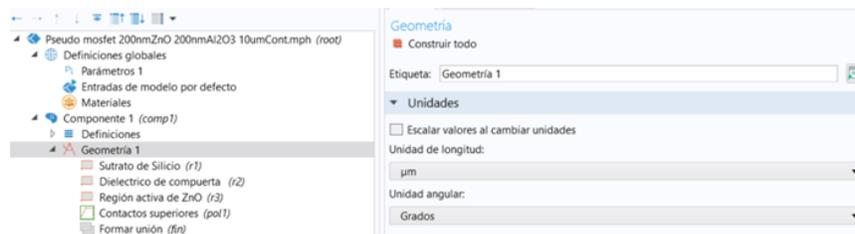


Figura 3.3: Geometría del dispositivo.

Teniendo como resultado la visualización del dispositivo desarrollado en este trabajo, con las dimensiones mostradas en la sección de parámetros en la Figura 3.4. La cual cuenta con contactos superiores para drenaje y fuente, contacto inferior de compuerta y un apilamiento de las capas del dispositivo de sustrato, dieléctrico y capa activa.

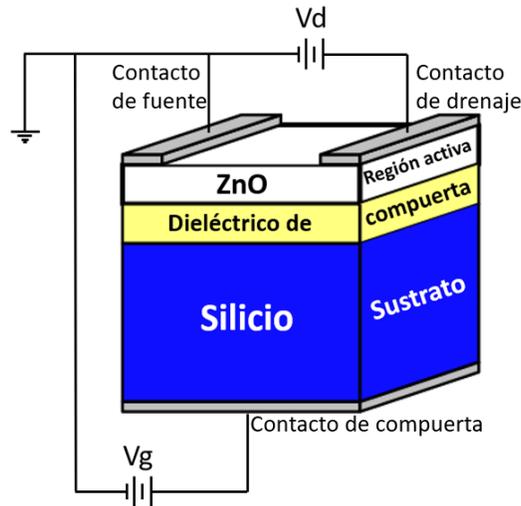


Figura 3.4: Capas del dispositivo.

3.5. Materiales en el dispositivo

El software COMSOL Multiphysics posibilita utilizar un grupo de materiales que se encuentran en sus librerías o existe la alternativa de crearlos. Existe un grupo de propiedades que se requieren para poder simular materiales semiconductores con estos módulos, los cuales son los siguientes:

- Permitividad relativa (ϵ_r)
- Energía de la banda prohibida (E_g)
- Afinidad electrónica
- Densidad efectiva de estados, banda de conducción y valencia ($N_v N_c$)
- Movilidad electrónica ($\mu_n \mu_p$)

En la tabla 3.1 encontramos estos valores para los 5 materiales que fueron sometidos a simulación. Además, en la Figura 3.5 se puede observar el campo de declaración para estos valores de materiales.

Tabla 3.1: Constantes de material.

Parámetros	Semiconductor	Sustrato	Dieléctrico			Unidades en S.I.
	<i>ZnO</i>	<i>Si</i>	<i>SiO₂</i>	<i>HfO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	
Permitividad relativa	8.6	11.7	3.9	25	7.8	1
Banda prohibida	3.37	1.12	9	5.3 - 5.7	6.5 - 9.5	eV
Afinidad electrónica	4.5	4.05	0.3 - 0.5	0.11	0.5 - 10	V
Banda de Valencia	$1,8 \times 10^{18}$	$1,04 \times 10^{19}$	4	4	4	$\frac{1}{\text{cm}^3}$
Banda de Conducción	3×10^{18}	$2,8 \times 10^{19}$	10	10	10	$\frac{1}{\text{cm}^3}$
Movilidad de electrones	0.0115	0.145	0.0029	180	1012	$\frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$
Movilidad de huecos	0.006	0.05	$1,66529 \times 10^{-9}$	135	73	$\frac{\text{m}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$

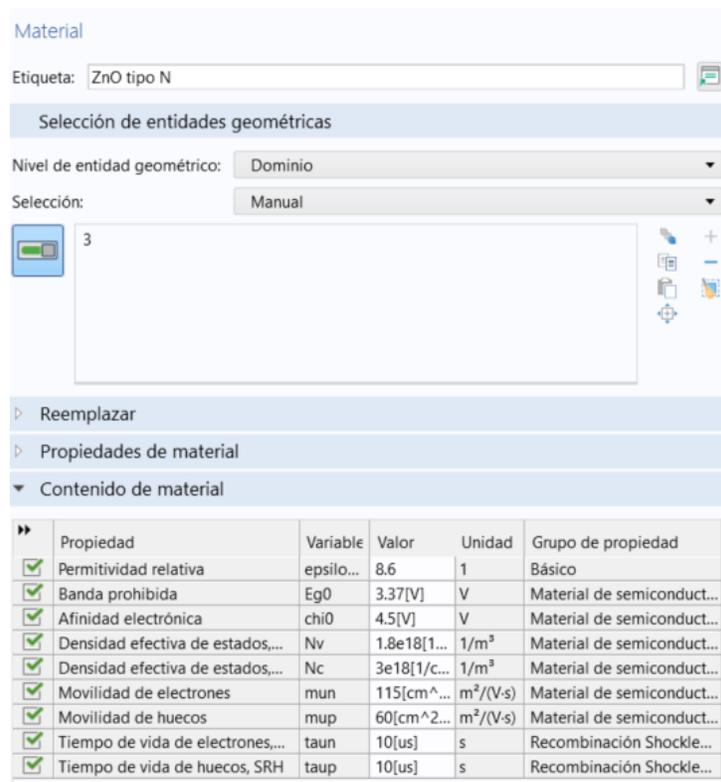


Figura 3.5: Ventana de configuración de los materiales y sus dominios.

3.6. Mallado

Las ecuaciones diferenciales que se utilizan para la resolución de los diferentes fenómenos físicos son complejos de resolver, de ahí que se usen métodos numéricos para aproximar los resultados finales. En el caso de COMSOL se emplea los métodos de elementos finitos, los cuales ofrecen una solución numérica aproximada sobre una estructura o dominio sobre el que están definidas las ecuaciones físicas bajo estudio. Para ello se divide el cálculo en subdominios no-interceptados entre sí denominados elementos finitos. Las mallas no son más que conjuntos donde realizan esas operaciones, son la clave de discretización del análisis. A continuación, en la Figura 3.6 y 3.7 podemos apreciar el mallado del dispositivo completo y con un zoom en las secciones de interés (región activa).

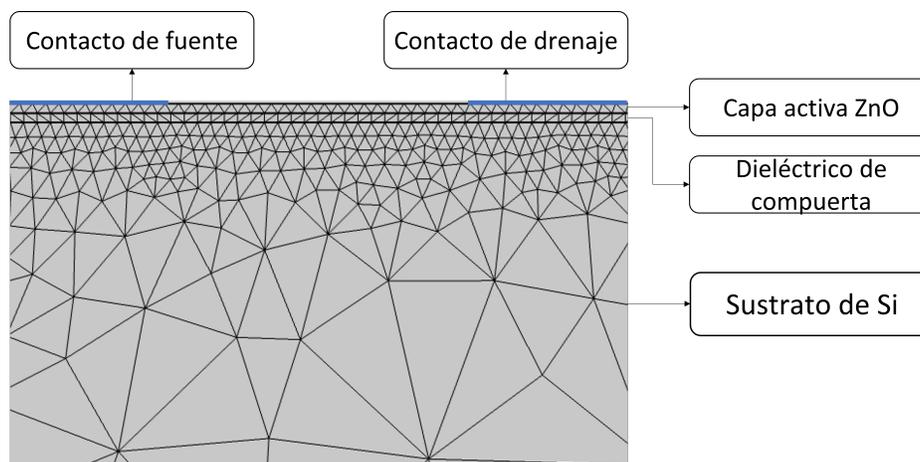


Figura 3.6: Malla en la región activa del dispositivo.

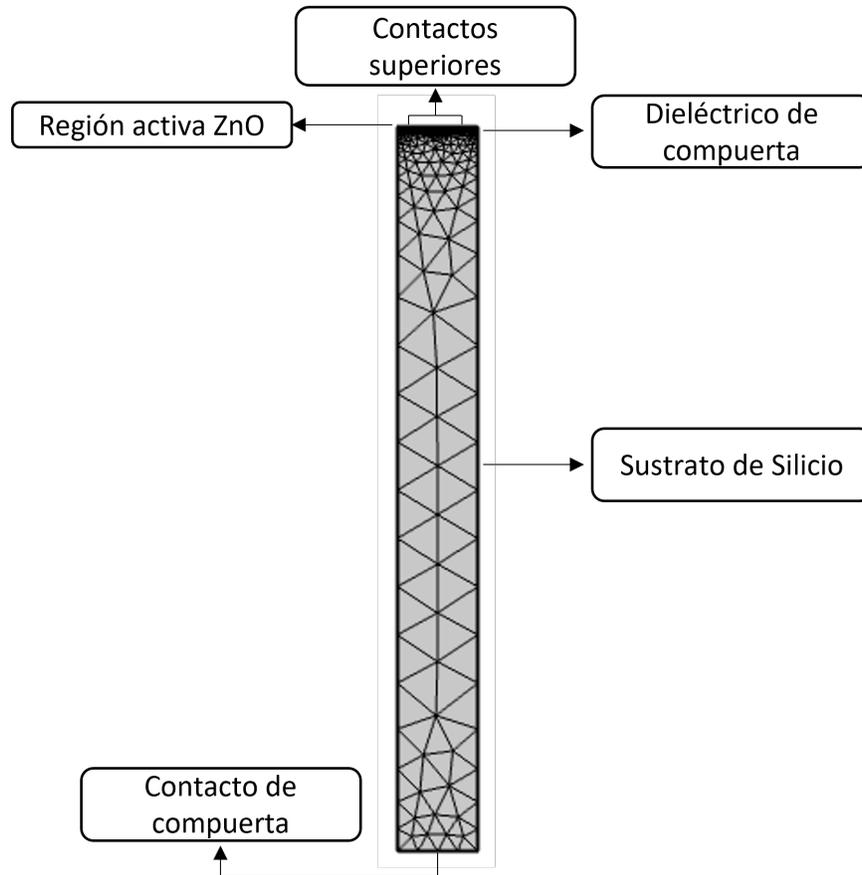


Figura 3.7: Malla completa del dispositivo.

3.7. Módulo semiconductor

El módulo semiconductor es una colección de interfaces y modelos predefinidos para COMSOL Multiphysics, que se puede utilizar para modelar dispositivos semiconductores. Incluye una interfaz de física dedicada para modelar dispositivos semiconductores con ecuaciones de deriva-difusión, capacidades mejoradas para modelar electrostática y una interfaz de circuitos eléctricos del cual es posible hacer un acoplamiento a los modelos de nivel de dispositivo. Este módulo está relacionado con el tipo de semiconductor que se está trabajando. Para el caso de no degenerativos se asume una distribución Maxwell-Boltzmann lo que reduce la no linealidad de las ecuaciones. En caso de ser degenerativos, que como se ha visto sucede cuando los semiconductores están altamente dopados, se emplea la estadística Fermi-Dirac. Como se aprecia en la Figura 3.8 al seleccionar “módulo semiconductor” entre sus propiedades puede ser modificable, también es posible denotar las variables que se utilizaran para el cálculo de las ecuaciones, así como el tipo de solución y condiciones iniciales que se configuran en los estudios iniciales.

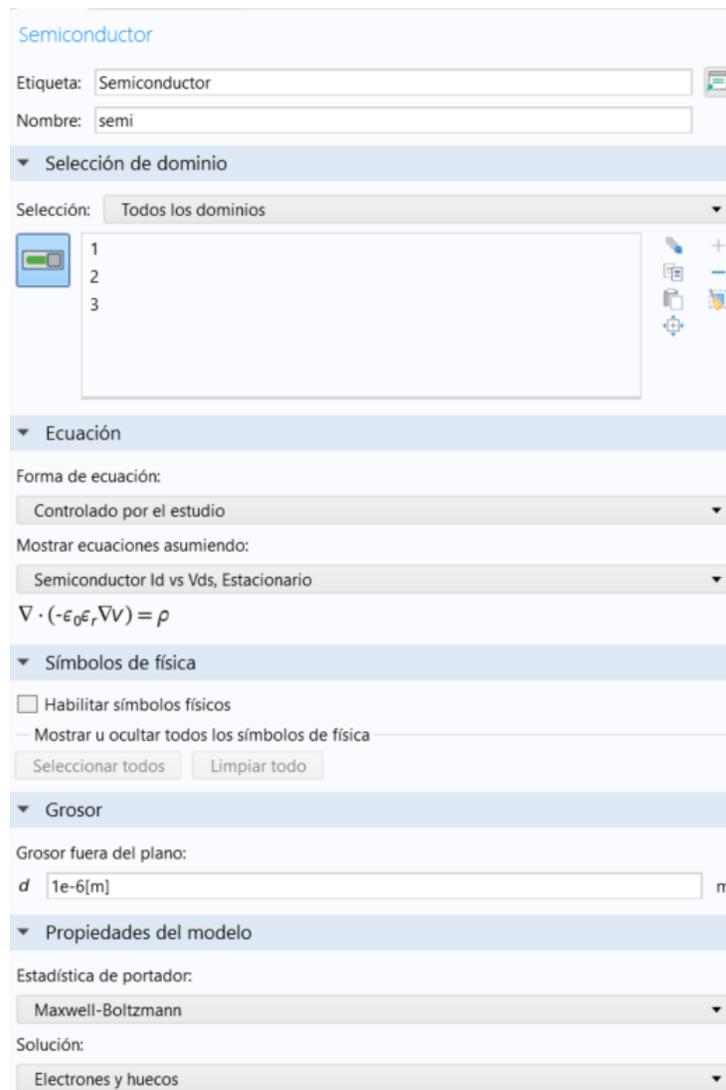


Figura 3.8: Ventana principal configuración del módulo semiconductor.

Dentro del mismo módulo semiconductor tenemos que declarar algunas secciones como son: Recombinación de trampa asistida, dopaje en los materiales semiconductores, contactos a utilizar y algunas otras pequeñas secciones.

3.7.1. Recombinación de trampa asistida

En la recombinación de trampa asistida o también conocido como recombinación de Shockley-Read-Hall (SRH por sus siglas en inglés), el electrón en transición entre bandas pasa a través de un nuevo estado de energía (estado localizado) creando dentro del espacio de banda un dopante o un defecto en la red cristalina; tales estados de energía se les llaman trampas. La recombinación no radiativa ocurre principalmente en tales sitios. La energía se intercambia en forma de vibración de red, un fonón que intercambia energía térmica con el material.

Dado que las trampas pueden absorber las diferencias de momento entre los portadores, SRH es el proceso de recombinación en el silicio y otros materiales de banda prohibida indirecta. Sin embargo, la recombinación asistida también puede dominar en materiales de banda prohibida directa en condiciones de densidad de portador muy bajas o en materiales con alta densidad de trampa. En la Figura 3.9 se encuentra la declaración de la recombinación de trampas asistida en el módulo semiconductor.

La razón de recombinación definida a través de la siguiente ecuación 3.1:

$$R_n = R_p = \frac{n \cdot p - n_{i\text{mod}}^2}{\tau_p(n + n_1) + \tau_n(p + p_1)} \quad (3.1)$$

Donde τ_p y τ_n son los tiempos de vida de los portadores. Este módulo normalmente se utiliza para semiconductores de banda indirecta porque en estos tipos de estructura se favorece la formación de las trampas profundas. Al final, el dopaje de cualquier semiconductor genera trampas, las cuales modifican el nivel de fermi cerca de cada borde de banda, por lo que los valores energéticos que deben vencer los electrones para pasar de una banda a otra se modifican. Para el caso de los semiconductores de banda directa, este proceso no es tan acentuado, pero aun así son afectados por este proceso.

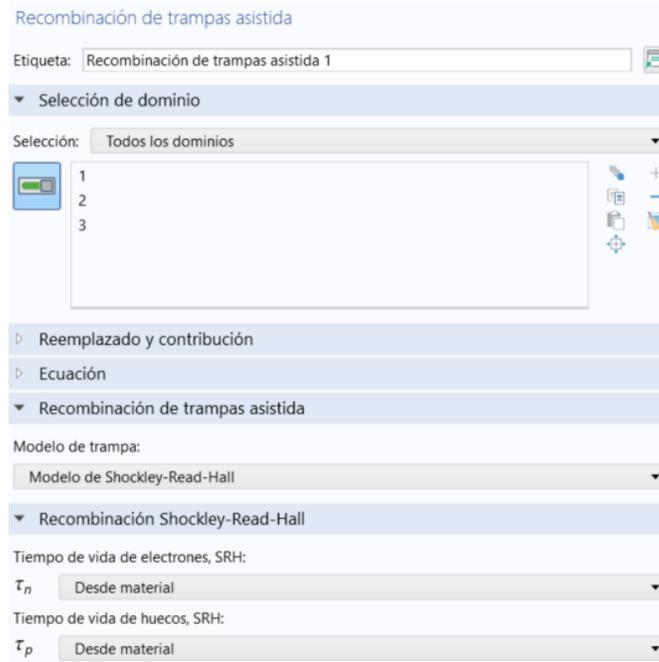


Figura 3.9: Recombinación de trampa asistida.

3.7.2. Dopaje de materiales semiconductores

En aplicaciones prácticas, es común modificar las propiedades del semiconductor para agregar átomos de impurezas o dopantes de manera controlada. Dentro del COMSOL es posible cambiar la distribución de los dopantes en cada capa del semiconductor. Para ello se puede especificar mediante las funciones: Modelo de dopaje analítico y Modelo de dopaje geométrico. El Modelo Analítico permite definir distribuciones en términos del sistema de coordenadas.

Para este trabajo se implementó el uso del dopaje analítico, el cual permite a través de la opción “dopaje de caja” la cual puede definir una región en forma de bloque de dopaje constante, junto con un perfil de desintegración fuera de esta región. Esto es útil para aproximar algunas técnicas de dopaje físico, como los procesos de difusión, que distribuyen los dopantes lejos de las regiones de alta concentración, dando como resultado perfiles de desintegración característicos. La ubicación de la región se define especificando la esquina o la coordenada central utilizando el sistema de coordenadas global. La ecuación utilizada para esto es:

$$N_{d,a} = N_0 * \exp \left[\left(\frac{r_x^-}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{r_x^+}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{r_y^-}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{r_y^+}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{r_z^-}{l_z} \right)^2 + \left(\frac{r_z^+}{l_z} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

Donde N_0 es la concentración configurada por el usuario, r_{xyz} son las funciones rampa y l_{xyz} son las longitudes de degradación en unidades de volumen. Es decir, define la zona donde comienza la disminución de dopantes en la

estructura. Para esto se emplea una escala de colores donde la diferencia entre las concentraciones de dopaje tipo N se pueden ver representadas. A continuación, podemos observar la degradación de la concentración de electrones en los modelos de 2D y 3D (Figuras 3.10 y 3.11). Como estos van cambiando su dopaje mientras más se aproximen a sus extremos. En las secciones de dieléctrico de compuerta puede apreciarse una menor concentración de electrones, mientras que la sección de capa activa tiene un intervalo aproximado de $1,5 \sim 1,75 \times 10^{17}$, a su vez, la concentración dentro del sustrato es aún mayor, superando $2,5 \times 10^{17}$.

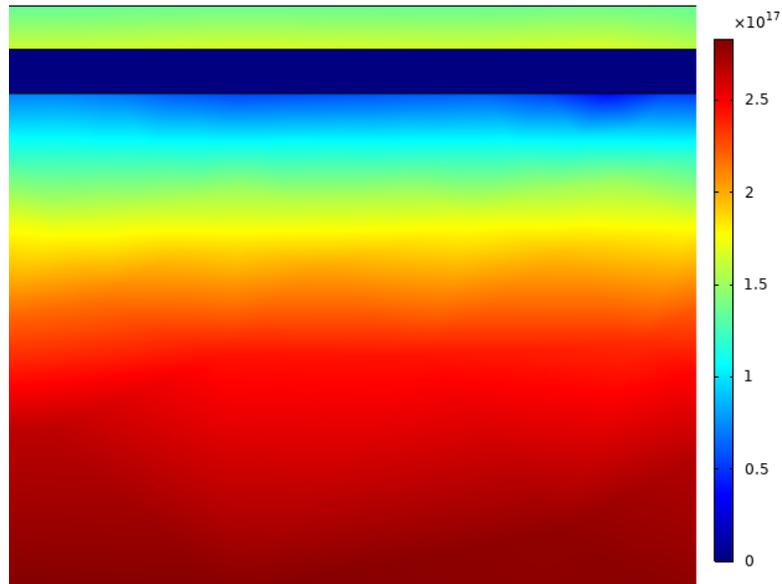


Figura 3.10: Concentración de electrones diseño 2D.

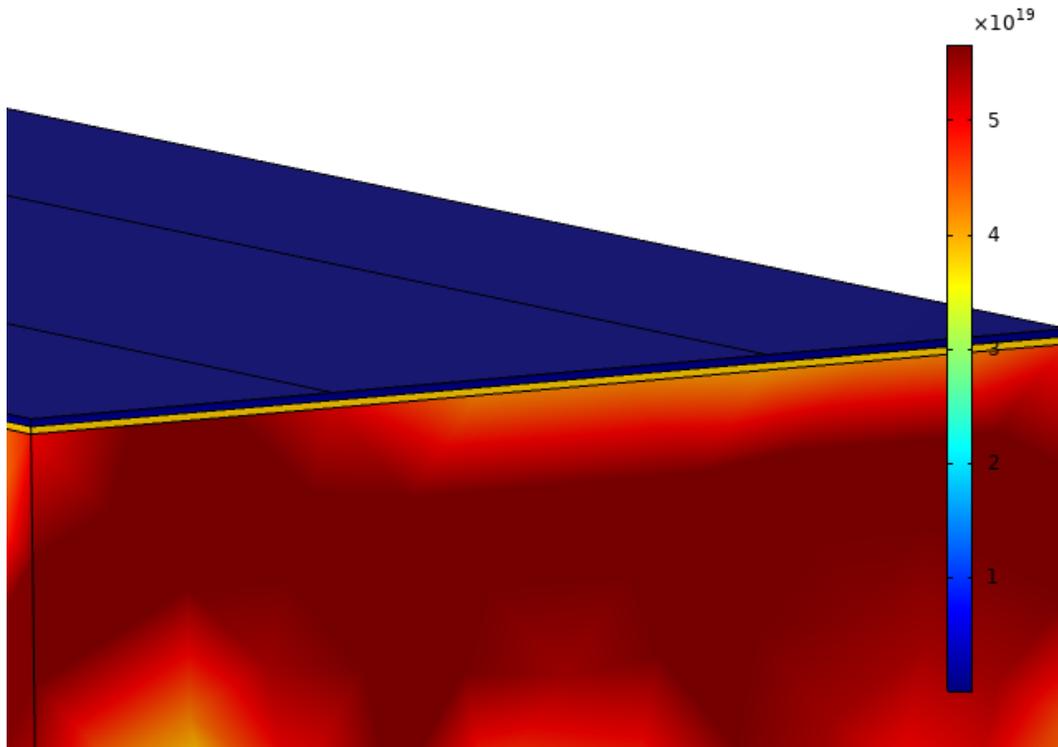


Figura 3.11: Concentración de electrones diseño 3D.

3.8. Estudio

Existe una amplia variedad de estudios a utilizar dependiendo del módulo, para este caso que necesitamos de los módulos semiconductor, electroestática, corrientes eléctricas y transferencia de calor es favorable hacer uso del estudio estacionario y gracias a él, poder analizar las curvas características del dispositivo simulado. A continuación, se muestran los diferentes estudios con los cuales se trabajó en las físicas semiconductor, electroestático, corrientes eléctricas y transferencia de calor en sólidos en la Figura 3.12.

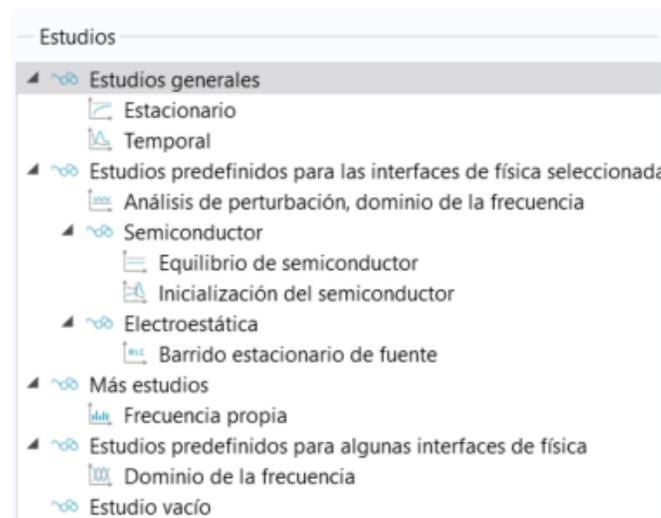


Figura 3.12: Estudios para los módulos semiconductor, electroestático, corrientes eléctricas y transferencia de calor en sólidos.

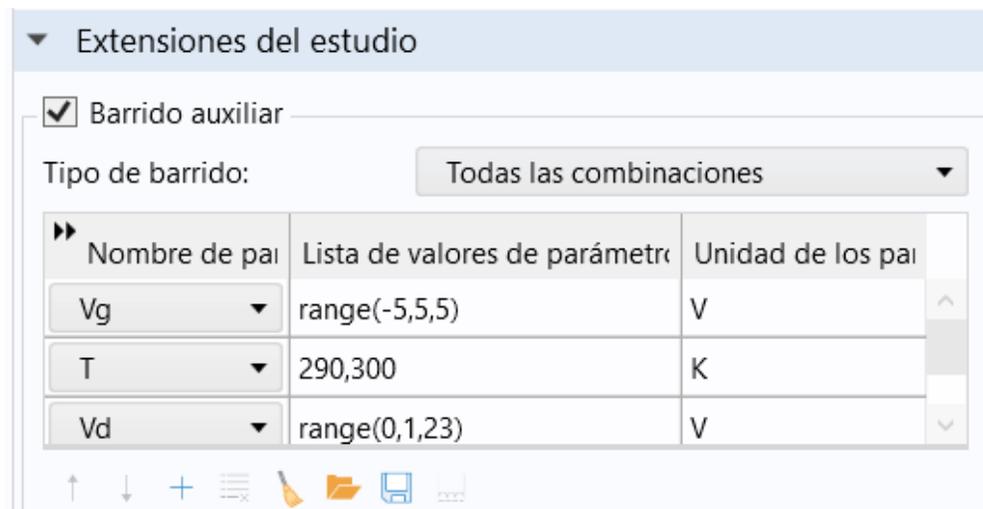


Figura 3.13: Barrido auxiliar en el dispositivo.

Capítulo 4

Metodología experimental

4.1. Introducción

El software COMSOL Multiphysics es un programa de simulación interactivo que es utilizado para el modelado de todo tipo de problemas científicos y de ingeniería. El cual proporciona un fuerte entorno de construcción de modelos que brinda una descripción general y más completa del trabajo.

La multifísica que proporciona, puede ampliar fácilmente los modelos convencionales para un tipo de física en modelos multifísicos que resuelven fenómenos físicos acoplados y que lo hacen de forma simultánea [49].

Para la elaboración de este trabajo se utilizaron 4 módulos: semiconductor, electrostática, corrientes eléctricas y transferencia de calor en sólidos. Ya que estos nos permiten obtener el comportamiento de los electrones y huecos en el dispositivo diseñado, también nos permite ver el flujo eléctrico en el dispositivo. Y tener una asimilación del comportamiento térmico dentro del dispositivo, debido a esta combinación de módulos es que es necesario la implementación de la multifísica y así obtener simulaciones con mayor exactitud a un dispositivo fabricado de manera experimental.

4.1.1. Teoría módulo Electroestático

La electrostática es el subcampo del electromagnetismo que describe un campo eléctrico causado por cargas estáticas (no móviles). Comenzando con el espacio libre, asumiendo una densidad de carga espacial ρ , la relación con el campo eléctrico, E , es:

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4.1)$$

Donde ϵ_0 es la constante universal llamada permitividad del espacio libre. Esta relación significa que, en electrostática, la densidad de carga espacial actúa como una fuente de volumen. La relación carga-campo no es suficiente, pero las ecuaciones de Maxwell implican el requisito adicional de que el campo eléctrico sea irrotacional (sin rizo):

$$\nabla \times E = 0 \quad (4.2)$$

La cual es la versión estática de la ley de Faraday.

Para un campo irrotacional, existe un potencial escalar, que conduce a la definición del potencial eléctrico, V :

$$-\nabla V = E \quad (4.3)$$

La identidad vectorial:

$$\nabla \times \nabla V = 0 \quad (4.4)$$

Esto se aplica a cualquier campo escalar que sea lo suficientemente suave para garantizar que el campo no gire. El signo negativo del potencial eléctrico es una práctica antigua. Al combinar lo anterior, la información contenida en las ecuaciones de Maxwell para electrostática se puede codificar en una sola ecuación:

$$-\nabla \cdot \nabla V = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4.5)$$

La utilidad de esta ecuación en aplicaciones de ingeniería es limitada debido a su incapacidad para representar materiales dieléctricos, por lo que la energía electrostática contenida en un campo se puede expresar de muchas maneras diferentes. Para un medio dieléctrico, la energía electrostática en volumen, V , expresada en cantidades de campo es:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V D \cdot E dV \quad (4.6)$$

Donde la densidad de energía electrostática se define como:

$$W_e = \frac{1}{2} D \cdot E \quad (4.7)$$

Donde tenemos que la localización de la densidad de carga electrostática tiene una justificación física limitada, por lo que podemos tener esta expresión en términos de la densidad ρ de carga volumétrica y el potencial V_p eléctrico local es:

$$W_e = \frac{1}{2} \int_V \rho V_p dV \quad (4.8)$$

Y se puede demostrar que las dos expresiones de energía son equivalentes. [50, 51]

4.1.2. Teoría módulo Semiconductor

El módulo semiconductor proporciona herramientas dedicadas para el análisis del funcionamiento del dispositivo semiconductor a nivel de física fundamental. El módulo se basa en las ecuaciones de deriva-difusión, utilizando modelos de transporte isotérmico o no isotérmico. Los efectos multifísicos a menudo juegan un papel importante en el rendimiento de los dispositivos semiconductores. El módulo semiconductor le permite crear fácilmente modelos que involucren múltiples efectos físicos.

El módulo semiconductor se utiliza para modelar dispositivos semiconductores con el enfoque convencional de deriva-difusión, la formulación de gradiente de densidad, la ecuación de Schrodinger o la ecuación de Schrodinger-Poisson. Dentro del producto, hay una serie de interfaces físicas: herramientas para recibir entradas de modelos para describir un conjunto de ecuaciones físicas y condiciones de contorno. Estos incluyen interfaces para modelar el transporte de electrones y huecos en dispositivos semiconductores, el comportamiento electrostático de tales y una interfaz para acoplar simulaciones de semiconductores a una simulación de circuito SPICE.

La interfaz semiconductor resuelve la ecuación de Poisson junto con las ecuaciones de continuidad para los portadores de carga. Resuelve las concentraciones de electrones y huecos explícitamente. Puede elegir entre resolver el modelo con el método de volumen finito o el método de elementos finitos. La interfaz de semiconductores incluye modelos de materiales para materiales semiconductores y aislantes, además de condiciones de contorno para contactos óhmicos, contactos Schottky y una amplia gama de condiciones de contorno electrostáticas.

Las características dentro de la interfaz semiconductor describen la propiedad de movilidad, ya que está limitada por la dispersión de portadores dentro del material. El módulo semiconductor incluye varios modelos de movilidad

predefinidos y la opción de crear modelos de movilidad personalizados y definidos por el usuario. Ambos tipos de modelos se pueden combinar de manera arbitraria. Cada modelo de movilidad define un electrón de salida y una movilidad de huecos. La movilidad de salida se puede utilizar como entrada a otros modelos de movilidad, mientras que las ecuaciones se pueden utilizar para combinar movilidades, por ejemplo, utilizando la regla de Matthiessen. La interfaz semiconductor también contiene características para agregar recombinación De Auger, Direct y Shockley-Read Hall a un dominio semiconductor, o puede especificar su propia tasa de recombinación.

Especificar la distribución del dopaje es fundamental para el modelado de dispositivos semiconductores. El módulo semiconductor proporciona una función de modelo de dopaje para hacer esto. Se pueden especificar perfiles de dopaje constantes y definidos por el usuario, o se puede utilizar un perfil de dopaje Gaussiano aproximado. [14,52]

4.1.3. Teoría multifísica corriente eléctrica y transferencia de calor en sólidos

En física la transferencia de calor se basa en un intercambio de energía en forma de calor entre distintos cuerpos o diferentes secciones de un mismo cuerpo cuando este se encuentre a distintas temperaturas. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Estos tres procesos de transferencia de calor es dirigido a un estado específico, como sería la conducción para sólidos, convección para líquidos y gases y por último la radiación, el cual no necesita un contacto físico para poder transferir este calor.

Por lo anteriormente mencionado, es el motivo que enfocamos la transferencia de calor en su proceso de conducción debido a que esta afecta a los sólidos. La transferencia de calor por conducción es debido al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. La ley de Fourier nos menciona que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo. Este factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales metálicos como son el oro, plata y cobre tienen estas conductividades térmicas elevadas, por lo que son buenos conductores térmicos, mientras que materiales aislantes como el vidrio no presentan esta característica [53]. A continuación, en la Figura 4.1 es posible comprender mejor como es el comportamiento de la transferencia de calor en sólidos.

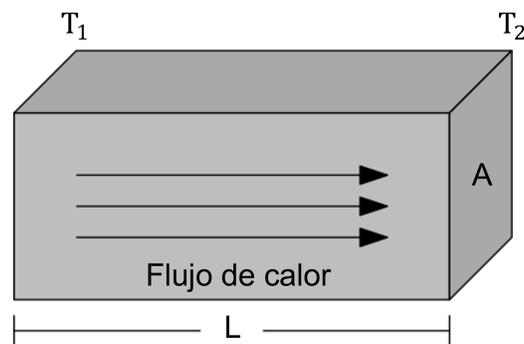


Figura 4.1: Transferencia de calor en sólidos.

La razón de calor se ve representada por la ecuación 4.9.

$$H = \frac{\lambda A(T_1 - T_2)}{L} \quad (4.9)$$

Donde H es la razón de calor, λ el coeficiente de conductividad térmica, A el área de las caras del sólido a temperaturas T_1 y T_2 y L la distancia entre las caras a estas temperaturas [54].

4.1.4. Simulación dispositivo pseudo-MOSFET

El diseño del dispositivo pseudo-MOSFET con base a una mascarilla con patrones geométricos (Figura 4.2), con el fin de realizar una simulación próxima a un dispositivo replicable de manera experimental. Por lo que dicha mascarilla cuenta con un ancho de dispositivo de $450\mu m$ y un largo de canal de $10\mu m$, $20\mu m$, $40\mu m$ y $80\mu m$.

Además de considerar el espesor de la oblea de silicio de $280\mu m$, con una variación entre las capas del dieléctrico de compuerta y capa activa, como se muestra en la Tabla 4.1

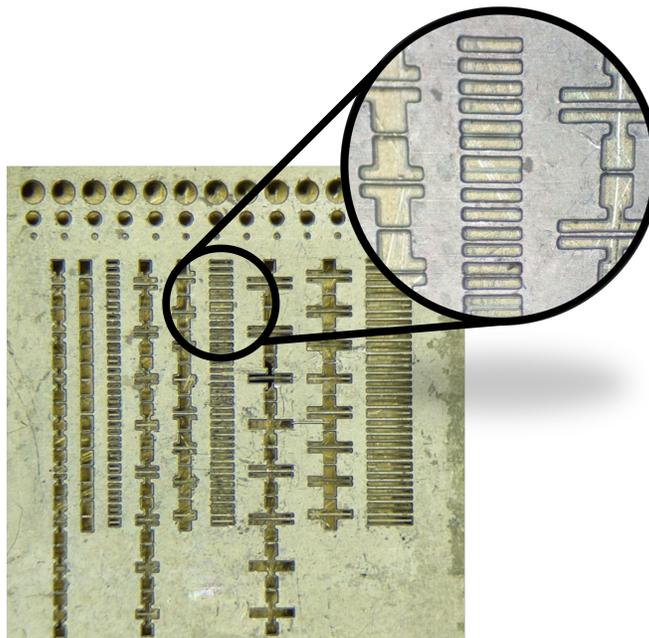


Figura 4.2: Mascarilla con patrones geométricos para diseño de transistor FET de ZnO.

Tabla 4.1: Parámetros de pseudo-MOSFET propuesto.

Capa	Material	Ancho (μm)	Largo del dispositivo (μm)	Espesor (μm)
Dieléctrico	Óxido de hafnio	450	30, 40, 60 y 100	0.1, 0.2
Dieléctrico	Dióxido de silicio	450	30, 40, 60 y 100	0.1, 0.2
Dieléctrico	Alúmina	450	30, 40, 60 y 100	0.1, 0.2
Sustrato	Silicio tipo N	450	30, 40, 60 y 100	280
Capa activa	Óxido de Zinc	450	30, 40, 60 y 100	0.1, 0.2

Una vez establecidos los parámetros geométricos del dispositivo pseudo-MOSFET (Figura 4.3), donde L_{canal} es el largo del canal, $L_{Dispositivo}$ es el largo del dispositivo, W es el ancho del dispositivo, T_{ZnO} es el espesor de la región activa de ZnO, $T_{Dieléctrico}$ es el espesor del dieléctrico de compuerta y T_{Si} el espesor del sustrato de silicio, dando como resultado la conclusión de la sección geométrica y se implementan los módulos electrostático, semiconductor, corrientes eléctricas y transferencia de calor en sólidos para su obtención de resultados.

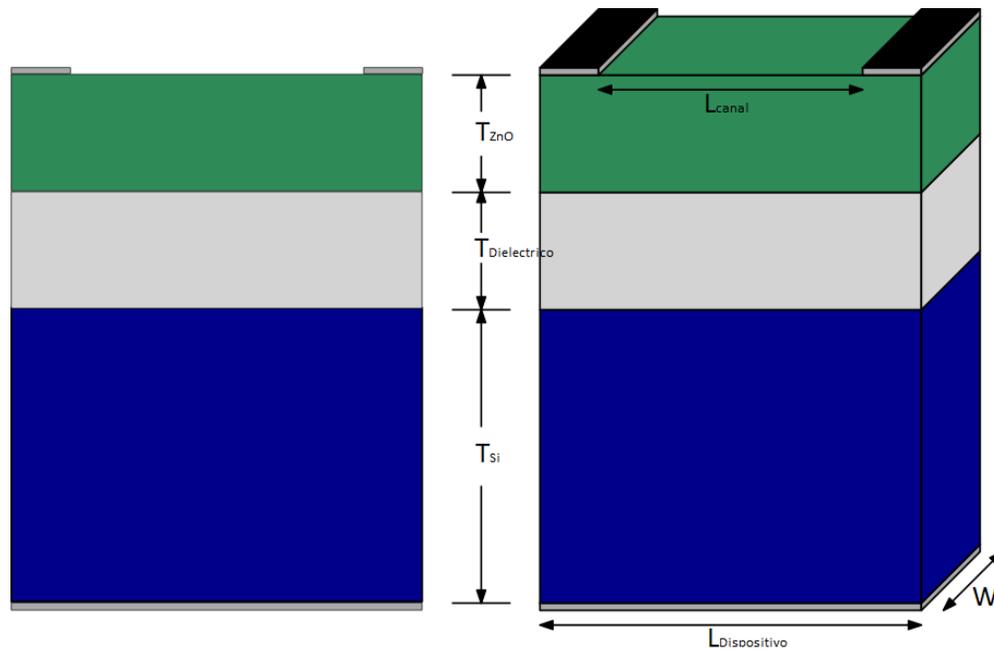


Figura 4.3: Estructura del dispositivo pseudo-MOSFET.

Gracias a la mascarilla con patrones geométricos mostrada en la Figura 4.2 se determinó la geometría del dispositivo a simular en 2D y 3D, a su vez es necesario declarar la concentración de electrones para ambos materiales semiconductores por lo que tenemos una concentración de electrones para el Si de $2,8327 \times 10^{17} N_{D,Si}$ [55] y una concentración de electrones para nuestra capa activa de ZnO en el orden de $\sim 1 \times 10^{17} N_{D,ZnO}$ [56]. Además de utilizar la función de trabajo del Al siendo declarado como contactos Schottky ideal (Figura 4.4), esto es debido a su fuerte compatibilidad con el ZnO y Si, ya que el ZnO tiene un valor intermedio entre $4,82 \sim 5eV$ [57], el Si tiene un valor de $4,92eV$ [58], mientras que el aluminio tiene $4,08eV$ [59].

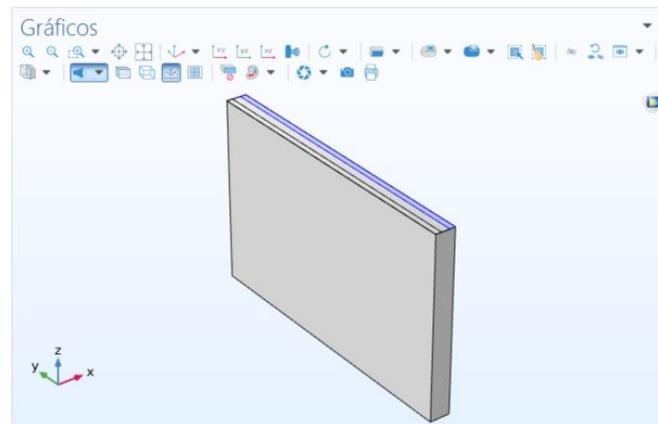


Figura 4.4: Contactos Schottky ideal.

La estructura del dispositivo consta de 3 secciones, sustrato, dieléctrico de compuerta y capa activa. En temas de mallado del dispositivo es necesario dividir estas secciones con el fin de lograr un arreglo acorde con las dimensiones, puesto que la sección de sustrato de Si es $1400 \sim 2800$ mayor que las secciones de dieléctrico de compuerta y capa activa. Para el caso de la simulación en 2D tenemos la siguiente configuración (Figura 4.5), la cual consta de 3 triangulaciones libres con un tamaño fino para las capas activa y dieléctrica, mientras que el sustrato de silicio cuenta únicamente con una triangulación libre con puntos alejados y un mallado grueso, esto es debido a que la interacción en el sustrato no es de mayor importancia. A su vez, en la simulación 3D tenemos una ligera variante, a pesar de contar con una geometría muy parecida, su mallado consta de barridos homogéneos en la capa activa y

dieléctrica, mientras que en la sección del sustrato cuenta con un tetraédrico libre de mallado grueso y con puntos alejados. Además, es importante recalcar que en las capas superiores suministramos una distribución de mallado con 5 capas de por medio y con un generador de prismas (forma triangular) con el fin de darle continuidad a la sección del sustrato (Figura 4.6).

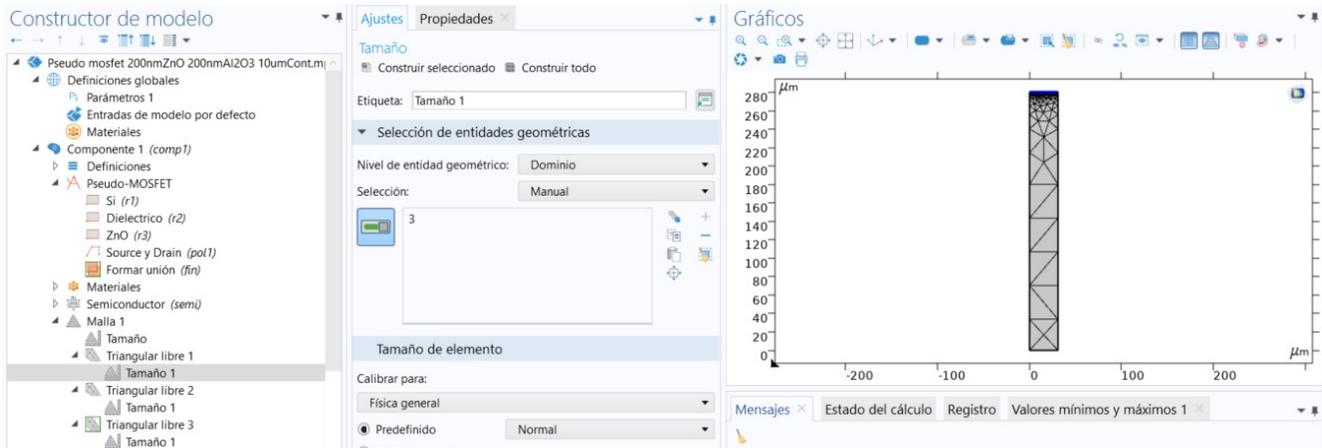


Figura 4.5: Mallado en la estructura en 2D.

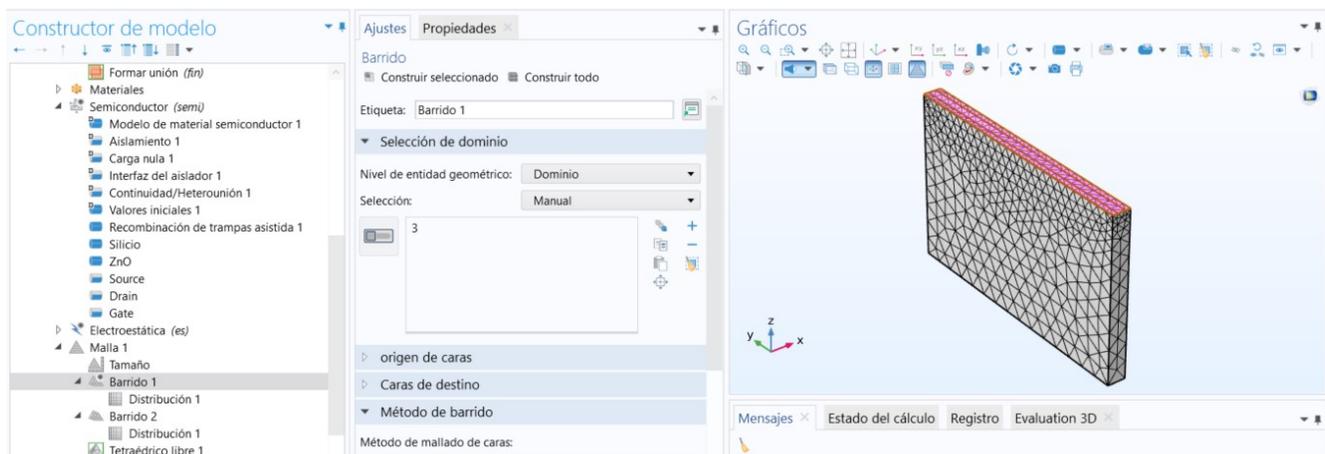


Figura 4.6: Mallado en la estructura en 3D.

Para este trabajo de simulación se implementan 5 estudios, con el fin de obtener la mayor cantidad de resultados posible. Para todos los estudios se utiliza de un barrido auxiliar utilizando diferentes estudios para seccionar el uso de cada uno de los módulos, además, tenemos un quinto estudio el cual representa una mejora del dispositivo. Para estudio 1 la física semiconductor y así obtener la familia de curvas para la gráfica I_d vs V_{ds} . En el caso del estudio 2 tenemos el mismo barrido auxiliar, solo cambiando el orden de contactos de compuerta y drenaje y así obtener la familia de curvas I_d vs V_{gs} . Para el estudio 3 se hace uso de la física electrostática, el cual es necesario para obtener la visualización del flujo eléctrico dentro del dispositivo, buscando las tendencias de este flujo y así optimizar las condiciones de este. En el estudio 4 tenemos un arreglo para dos módulos de simulación, corrientes eléctricas y transferencia de calor en sólidos. Obteniendo un arreglo de multifísica con la finalidad de obtener un resultado en contornos isotérmicos al hacer una variación de temperatura en Kelvin. Por último, el estudio 5 es una variante de los estudios 1 y 2, con la diferencia que bajo los contactos superiores (Drenaje y Fuente) tenemos una concentración más alta de electrones y así tener un mayor flujo de corriente en el dispositivo, en esta sección tenemos ZnO altamente dopado y se justifica con la oportunidad de obtener un dispositivo con mejores características de salida.

Capítulo 5

Análisis de resultados

5.1. Introducción

Durante la comprensión de los capítulos anteriores se han valorado las variables de simulación, entre el uso de diferentes dieléctricos de compuerta, comprensión de la teoría del dispositivo y conceptualización de los modelos simulados. Por lo que en este capítulo se muestran los valores obtenidos al hacer cambios de simulación, a su vez se busca conocer el dispositivo con las mejores características al hacer cambio de variables y buscar como trabajo a futuro la manufactura y fabricación de este.

5.2. Diseño de dispositivos de simulación

El diseño del dispositivo pseudo-MOSFET es una estructura “top - contact bottom - gate”, en el cual se utiliza como sustrato del dispositivo una oblea de Si tipo N, dieléctrico de compuerta variable por Al_2O_3 , SiO_2 , HfO_2 y como capa activa ZnO, además, consideramos el espesor de estas películas delgadas en el orden de $100nm - 200nm$ teniendo como resultado las Figuras 5.1 y 5.2.

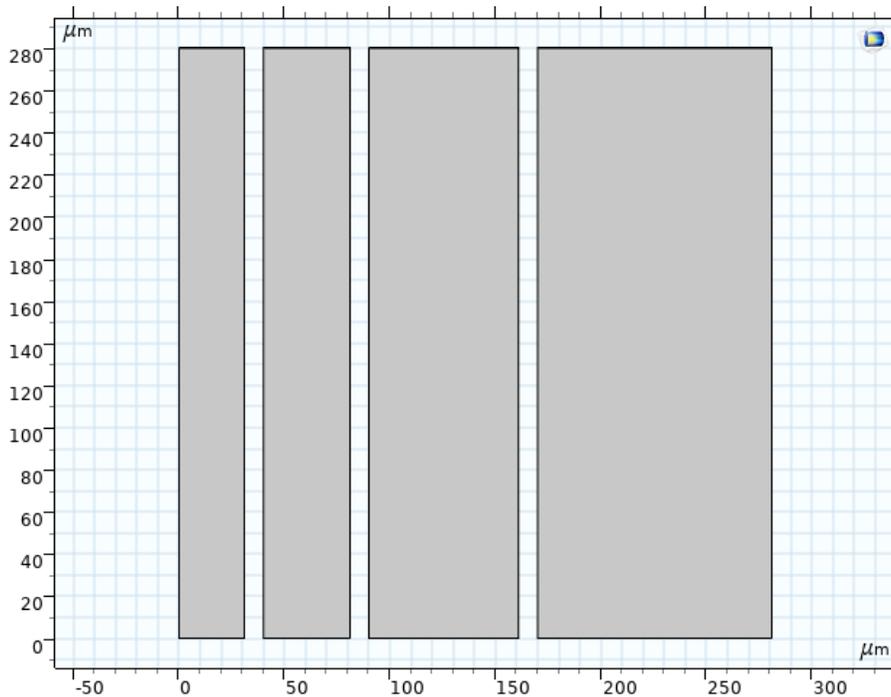


Figura 5.1: Cuatro dispositivos con diferente largo de canal con visualización frontal en simulación 2D.

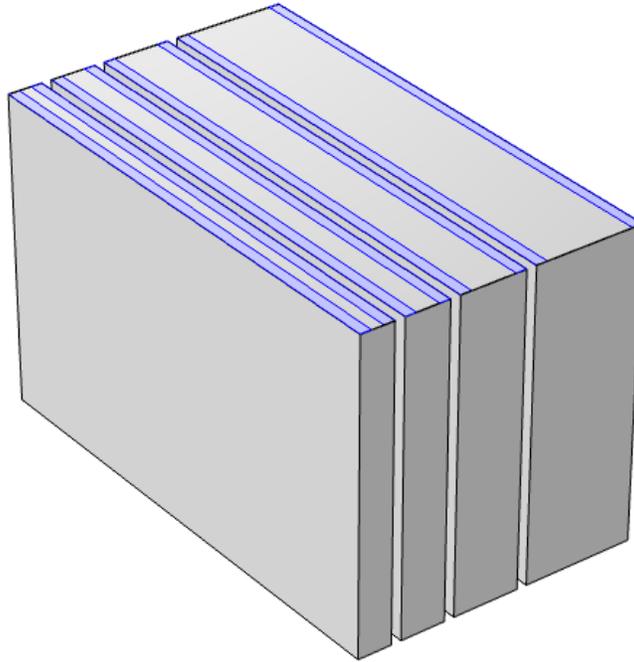


Figura 5.2: Cuatro dispositivos con diferente largo de canal en simulación 3D.

A continuación se presentan las Tablas 5.1 y 5.2 en las cuales tenemos valores constantes para el voltaje de compuerta de $0v$, $2v$ y $4v$ con el fin de hacer un comparativo con las mismas condiciones para cada uno de los dispositivos. Obteniendo un voltaje de saturación para cada uno de los modelos, representado por el voltaje de drenaje (V_d) y su respectivo valor para la corriente máxima (I_d) en cada uno de los suministros de voltaje de compuerta. Como resultado tenemos una mayor corriente de salida en los dispositivos con dieléctrico de compuerta de SiO_2 , pero al mismo tiempo es necesario aplicar una mayor tensión eléctrica para el funcionamiento de este modelo.

Los dispositivos con dieléctrico de HfO_2 presentan una corriente de salida menor en comparación a las otras opciones que se encuentran a analizar, es necesario una tensión promedio para los tres modelos, pero con el inconveniente de que la corriente máxima alcanzada es incluso menor las tres variantes.

Mientras que el Al_2O_3 presenta una corriente ligeramente menor al SiO_2 y mayor al HfO_2 , al mismo tiempo es necesario una menor tensión suministrada en la terminal de drenaje para obtener estos valores, por lo al tener este arreglo de respuesta y suministro es que se considera como el dieléctrico de compuertas más óptimo respecto a las características presentadas y debido a esto, en que se continúa trabajando bajo su modelo de simulación 3D.

Tabla 5.1: Corrientes de saturación obtenidas con voltajes de compuerta de 0v, 2v y 4v y haciendo un barrido de tensión para el voltaje de drenaje.

Modelo 2D 100nm espesor		$V_g = 0v$	$V_g = 2v$	$V_g = 4v$
SiO_2	10 μm largo de canal	$V_d = 4v$ $I_{DSS} = 4,563\mu A$	$V_d = 6,5v$ $I_d = 8,813\mu A$	$V_d = 8v$ $I_d = 13,632\mu A$
	20 μm largo de canal	$V_d = 1,5v$ $I_{DSS} = 0,762\mu A$	$V_d = 3,5v$ $I_d = 2,073\mu A$	$V_d = 6v$ $I_d = 3,724\mu A$
	40 μm largo de canal	$V_d = 1,5v$ $I_{DSS} = 0,416\mu A$	$V_d = 3,5v$ $I_d = 1,040\mu A$	$V_d = 6v$ $I_d = 1,892\mu A$
	80 μm largo de canal	$V_d = 1,5v$ $I_{DSS} = 0,193\mu A$	$V_d = 3,5v$ $I_d = 0,501\mu A$	$V_d = 6v$ $I_d = 0,894\mu A$
Al_2O_3	10 μm largo de canal	$V_d = 2v$ $I_{DSS} = 3,590\mu A$	$V_d = 4v$ $I_d = 7,492\mu A$	$V_d = 6,5v$ $I_d = 13,394\mu A$
	20 μm largo de canal	$V_d = 1v$ $I_{DSS} = 0,563\mu A$	$V_d = 3,5v$ $I_d = 1,451\mu A$	$V_d = 6v$ $I_d = 2,892\mu A$
	40 μm largo de canal	$V_d = 1v$ $I_{DSS} = 0,348\mu A$	$V_d = 3v$ $I_d = 1,073\mu A$	$V_d = 4v$ $I_d = 1,548\mu A$
	80 μm largo de canal	$V_d = 1,5v$ $I_{DSS} = 0,236\mu A$	$V_d = 3v$ $I_d = 0,599\mu A$	$V_d = 4,5v$ $I_d = 0,975\mu A$
HfO_2	10 μm largo de canal	$V_d = 3v$ $I_{DSS} = 3,236\mu A$	$V_d = 5v$ $I_d = 7,841\mu A$	$V_d = 6,5v$ $I_d = 13,405\mu A$
	20 μm largo de canal	$V_d = 2v$ $I_{DSS} = 0,563\mu A$	$V_d = 4v$ $I_d = 1,991\mu A$	$V_d = 7v$ $I_d = 2,892\mu A$
	40 μm largo de canal	$V_d = 2v$ $I_{DSS} = 0,303\mu A$	$V_d = 4v$ $I_d = 0,999\mu A$	$V_d = 6v$ $I_d = 1,497\mu A$
	80 μm largo de canal	$V_d = 2v$ $I_{DSS} = 0,150\mu A$	$V_d = 4v$ $I_d = 0,506\mu A$	$V_d = 5,5v$ $I_d = 1,014\mu A$

Tabla 5.2: Corrientes de saturación obtenidas con voltajes de compuerta de 0v, 2v y 4v y haciendo un barrido de tensión para el voltaje de drenaje.

Modelo 2D 200nm espesor		$V_g = 0v$	$V_g = 2v$	$V_g = 4v$
SiO_2	10 μm largo de canal	$V_d = 16v$ $I_{DSS} = 35,437\mu A$	$V_d = 22v$ $I_d = 44,462\mu A$	$V_d = 26v$ $I_d = 54,224\mu A$
	20 μm largo de canal	$V_d = 8,5v$ $I_{DSS} = 4,397\mu A$	$V_d = 12v$ $I_d = 6,705\mu A$	$V_d = 17,5v$ $I_d = 8,771\mu A$
	40 μm largo de canal	$V_d = 8,5v$ $I_{DSS} = 2,497\mu A$	$V_d = 12,5v$ $I_d = 3,59\mu A$	$V_d = 16v$ $I_d = 5,098\mu A$
	80 μm largo de canal	$V_d = 6v$ $I_{DSS} = 0,978077\mu A$	$V_d = 8,5v$ $I_d = 1,539241\mu A$	$V_d = 12v$ $I_d = 2,153322\mu A$
Al_2O_3	10 μm largo de canal	$V_d = 8v$ $I_{DSS} = 20,088\mu A$	$V_d = 12v$ $I_d = 30,288\mu A$	$V_d = 16v$ $I_d = 42,831\mu A$
	20 μm largo de canal	$V_d = 5,5v$ $I_{DSS} = 3,002\mu A$	$V_d = 10v$ $I_d = 5,518\mu A$	$V_d = 16v$ $I_d = 8,467\mu A$
	40 μm largo de canal	$V_d = 5,5v$ $I_{DSS} = 1,644\mu A$	$V_d = 9v$ $I_d = 2,898\mu A$	$V_d = 12v$ $I_d = 4,367\mu A$
	80 μm largo de canal	$V_d = 4v$ $I_{DSS} = 0,669\mu A$	$V_d = 6,5v$ $I_d = 1,259\mu A$	$V_d = 8,5v$ $I_d = 1,939\mu A$
HfO_2	10 μm largo de canal	$V_d = 8,5v$ $I_{DSS} = 20,090\mu A$	$V_d = 13v$ $I_d = 31,711\mu A$	$V_d = 17,5v$ $I_d = 42,497\mu A$
	20 μm largo de canal	$V_d = 6v$ $I_{DSS} = 3,040\mu A$	$V_d = 9,5v$ $I_d = 5,518\mu A$	$V_d = 15v$ $I_d = 8,435\mu A$
	40 μm largo de canal	$V_d = 6,5v$ $I_{DSS} = 1,644\mu A$	$V_d = 10,5v$ $I_d = 2,898\mu A$	$V_d = 15v$ $I_d = 4,384\mu A$
	80 μm largo de canal	$V_d = 5v$ $I_{DSS} = 0,688\mu A$	$V_d = 7v$ $I_d = 1,256\mu A$	$V_d = 9,5v$ $I_d = 1,925\mu A$

5.3. Concentración de electrones

Para la obtención de valores y gráficas en el módulo semiconductor, se establecieron algunas propiedades del modelo, forma de análisis, estadística de portador y tipo de solución. Para el caso de Estadística del portador se utilizó la variante Maxwell-Boltzmann la cual consiste en la distribución de probabilidad de la velocidad de las partículas. Para la distribución de Maxwell-Boltzmann tenemos una variable aleatoria escalar:

$$X = \sqrt{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2} \quad (5.1)$$

Combinación de otras tres variables aleatorias X_i^2 (X_1^2, X_2^2, X_3^2) cada una de las cuales se distribuye según una distribución normal $X_i \sim N(0, a^2)$. Físicamente, el módulo de la velocidad de una molécula v es igual a la raíz de la

suma de los cuadrados de las velocidades coordenadas de la partícula $v = \sqrt{(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}$, y como cada una de ellas sigue distribuciones gaussianas, entonces v debe seguir una distribución de Maxwell-Boltzmann explícitamente:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} \quad (5.2)$$

Donde m es la masa de la partícula y kT viene dada por el producto de la constante de Boltzmann y la temperatura en Kelvin.

A continuación es posible observar esta concentración de electrones para dispositivos con $100nm$ de espesor en las películas delgadas, mostrado en las Figuras 5.3 y 5.4 sección a y b. Y dispositivos con $200nm$ de espesor en las secciones c y d.

En las secciones a) y c) para ambas Figuras se muestra bajo la terminal de fuente, se presenta una mayor concentración de electrones en esta región para simulación 2D y 3D a comparación de su contraparte bajo la terminal de drenaje, secciones b) y d), donde se presenta una concentración menor. Al aplicar una tensión eléctrica en la terminal de drenaje es que los electrones buscan la manera de circular a través del dispositivo, por lo que se produce una saturación de estos en la terminal de salida (fuente).

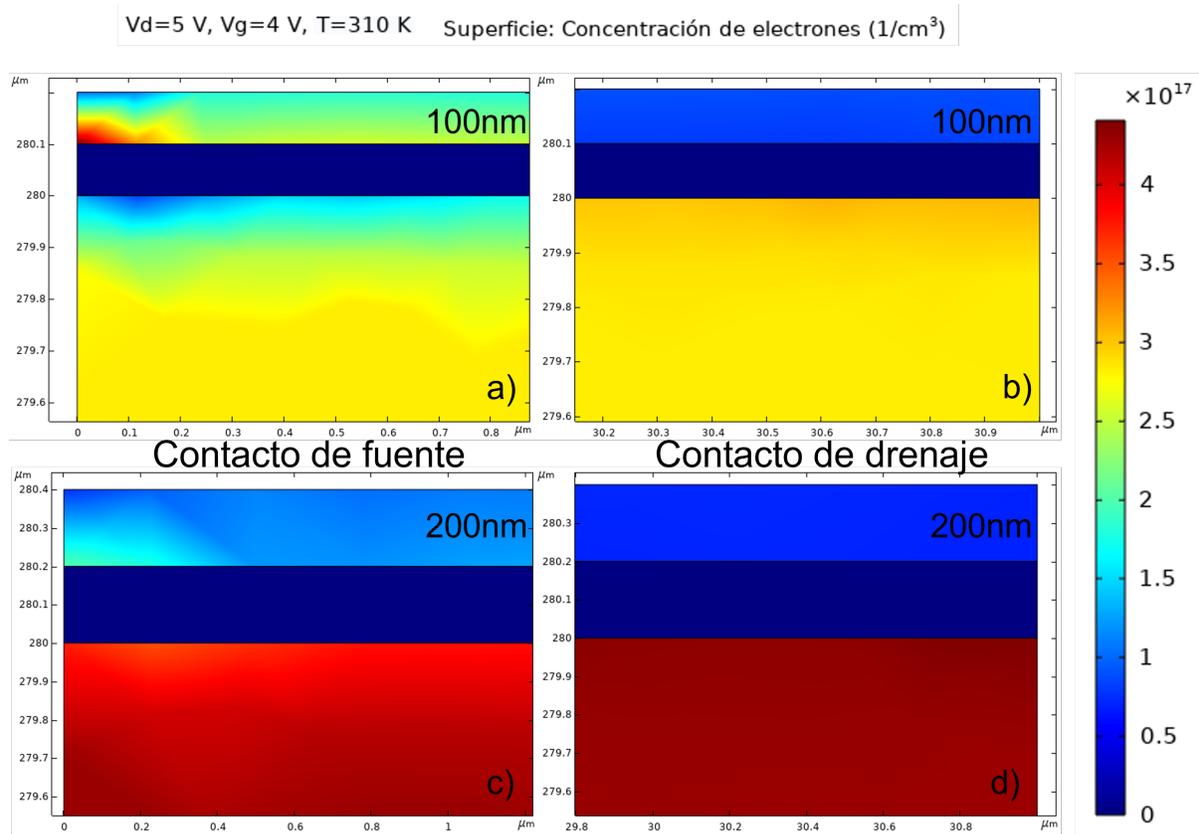


Figura 5.3: Concentración de electrones en las capas sustrato, aislante y capa activa con un espesor de $100nm$ y $200nm$, con un largo de canal de $10\mu m$, $5V$ en el contacto de drenaje, $4V$ en la compuerta y $310K$ de temperatura para simulación 2D

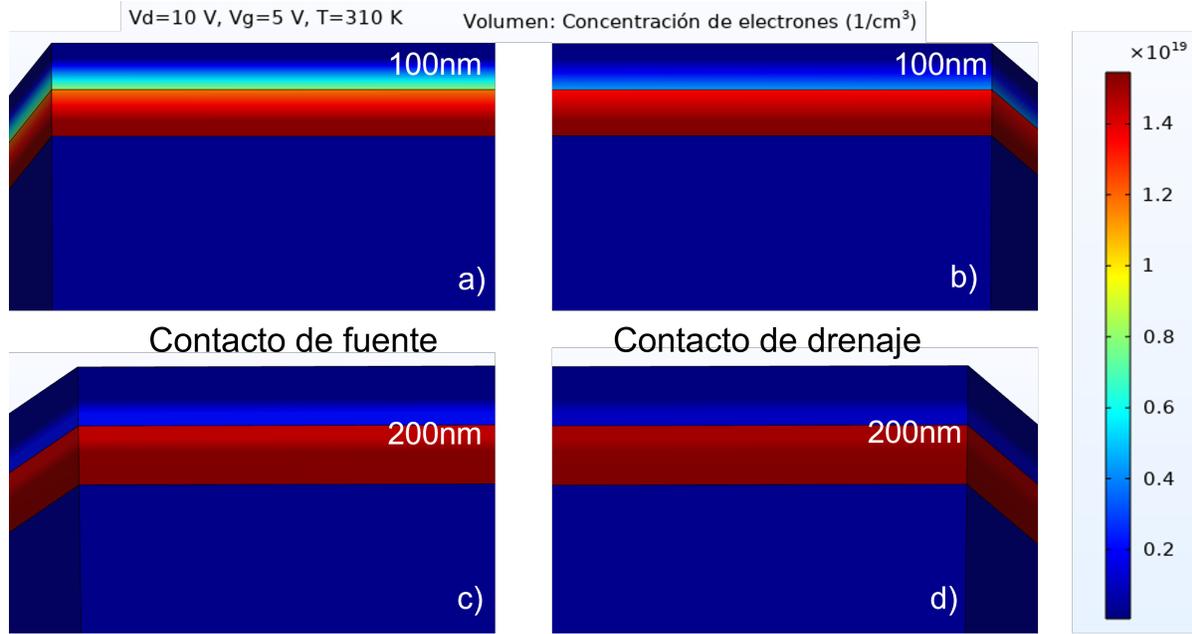


Figura 5.4: Concentración de electrones en las capas sustrato, aislante y capa activa con un espesor de $100nm$ y $200nm$, con un largo de canal de $10\mu m$, $5V$ en el contacto de drenaje, $5V$ en la compuerta y $310K$ de temperatura para simulación 3D

En la Figura 5.4 se obtiene una concentración de electrones de manera más homogénea que su equivalente en simulación 2D, pero respeta el mismo comportamiento de disminución de concentración bajo la terminal de drenaje al aumentar una tensión desde esta terminal.

5.4. Potencial eléctrico

El uso del módulo electrostático es necesario para la obtención de la gráfica del flujo eléctrico en el dispositivo, para esta sección se implementó el uso de un valor inicial igual a $0v$, con el fin de obtener resultados dependientes de la respuesta de las terminales de compuerta y drenaje. Teniendo esto en cuenta podemos concluir que el potencial eléctrico en un campo eléctrico adquiere una unidad de carga positiva representada por 5.3

$$V = \frac{E_p}{q'} \quad (5.3)$$

Donde V es el potencial eléctrico en un punto del campo eléctrico. E_p la energía potencial eléctrica que adquiere una carga testigo positiva q' al situarla en ese punto.

Todas las magnitudes son escalares, lo que facilita el estudio del campo eléctrico. Dicho de esta manera, si conocemos el valor del potencial eléctrico V en un punto, podemos determinar la energía potencial eléctrica de una carga q situada en la siguiente expresión 5.4

$$E_p = V \cdot q \quad (5.4)$$

Una única carga q es capaz de crear un campo eléctrico a su alrededor. Si en dicho campo introducimos una carga testigo q' entonces tenemos la ecuación 5.5:

$$V = \frac{E_p}{q'} = \frac{K \cdot \left(\frac{q \cdot q'}{r}\right)}{q'} \rightarrow V = K \cdot \frac{q}{r} \tag{5.5}$$

Donde:

- V es el potencial eléctrico en un punto.
- K es la constante de la ley de Coulomb.
- q es la carga puntual que crea el campo eléctrico.
- r es la distancia entre la carga y el punto donde medimos este potencial.

Si el campo eléctrico es creado por varias cargas puntuales, el potencial eléctrico en un punto sigue el principio de superposición, el cual puede comprenderse como el potencial eléctrico originado por n cargas puntuales en un punto de un campo eléctrico es la suma escalar de los potenciales eléctricos en dicho punto creados por cada una de las cargas por separado 5.6, 5.7.

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \int_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i} \tag{5.6}$$

O que es lo mismo:

$$V = K \cdot \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \dots + \frac{q_n}{r_n}\right) = K \cdot \int_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i} \tag{5.7}$$

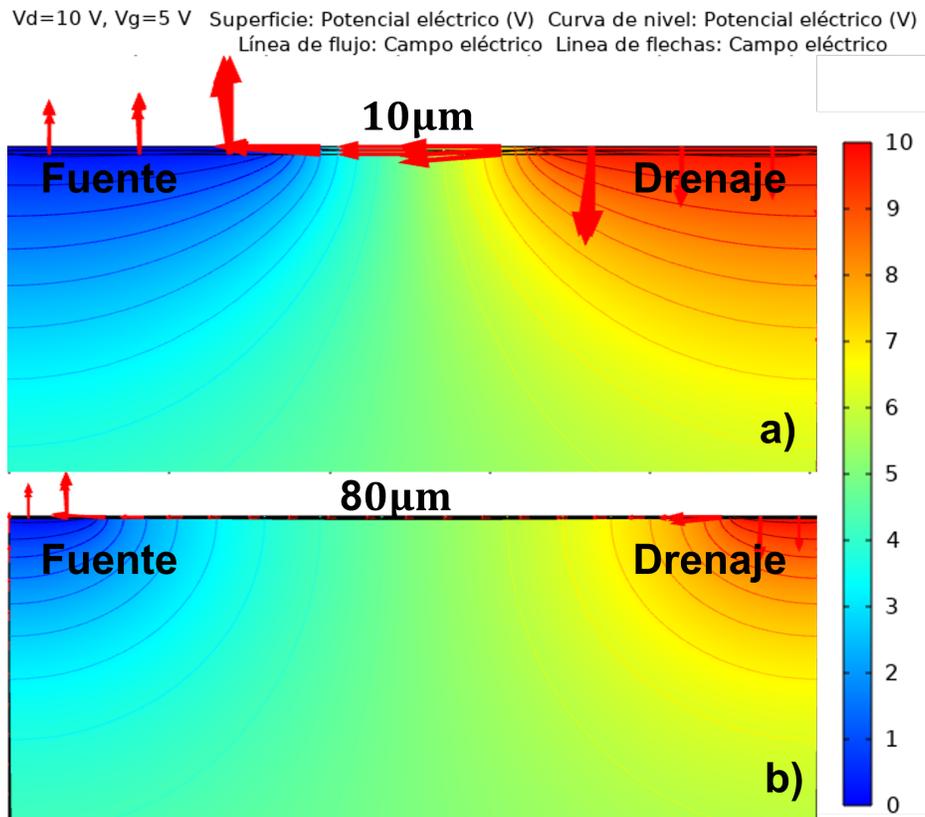


Figura 5.5: Flujo eléctrico en dispositivo con espesor de 200nm, largo de canal de 10µm y 80µm, 5v en el contacto de compuerta, 10v en el drenaje para simulación 2D

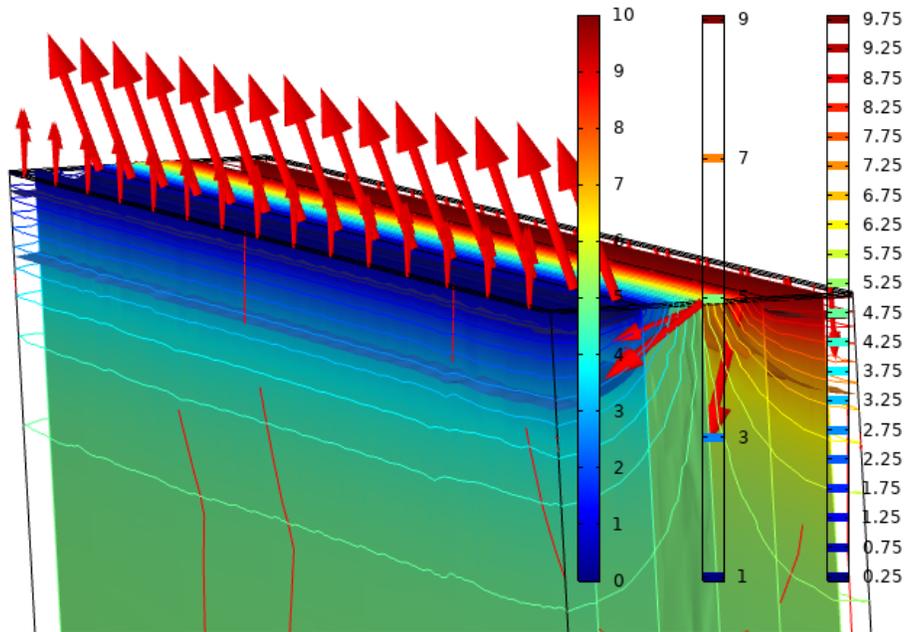


Figura 5.6: Flujo eléctrico en dispositivo con espesor de 200nm y $10\mu\text{m}$ de separación entre contactos, 5v en el contacto de compuerta, 10v en el drenaje para simulación 3D

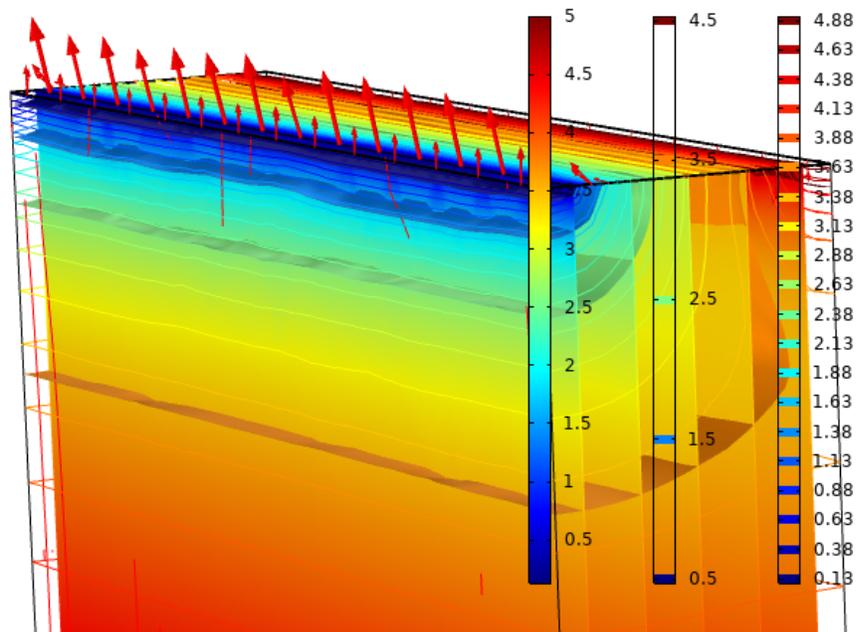


Figura 5.7: Flujo eléctrico en dispositivo con espesor de 200nm y $80\mu\text{m}$ de separación entre contactos, 5v en el contacto de compuerta, 10v en el drenaje para simulación 3D

Podemos observar en las Figuras 5.5, (modelo 2D), 5.6 y 5.7 (modelo 3D) para como el flujo eléctrico dentro del dispositivo es dirigido hacia la terminal de tierra, mostrando una interacción entre los suministros de tensiones y obteniendo una visualización esperada. A su vez, es posible observar como a medida que el largo de canal se vuelve más grande, este flujo disminuye, debido a la necesidad de obtener una mayor tensión para igualar la salida del

dispositivo de $10\mu m$.

5.5. Densidad de corriente

La densidad de corriente eléctrica se define como una magnitud vectorial, la cual cuenta con unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie, en otras palabras, intensidad por unidad de área. La expresión matemática se muestra en la ecuación 5.8.

$$I = \int_S j \cdot dS \quad (5.8)$$

Donde:

- I es la corriente eléctrica (A)
- j es la densidad de corriente ($A \cdot m^2$)
- S es la superficie de estudio (m^2)

La densidad de corriente está relacionada con los portadores de carga (electrones, huecos y iones en un electrolito), por lo que se expresa con la ecuación 5.9

$$j = \sum_i n_i \cdot q_i \cdot v_i \quad (5.9)$$

Donde tenemos que:

- n_i es la concentración del portador i
- q_i es la carga eléctrica del portador i
- v_i es la velocidad media del portador i en volumen.

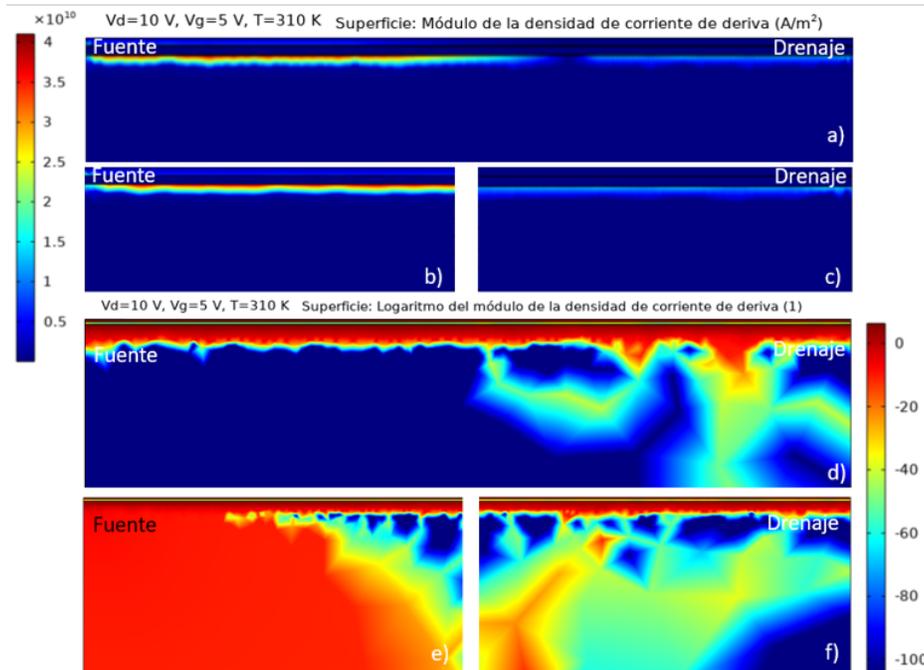


Figura 5.8: Densidad de corriente en dispositivo con espesor de $100nm$, largo de canal de $10\mu m$ en los incisos a) y d), largo de canal de $80\mu m$ en los incisos b), c), e) y f). Con un suministro en las terminales de compuerta y drenaje de $5v$ y $10v$, respectivamente. Y una temperatura de $310K$ para simulación 2D.

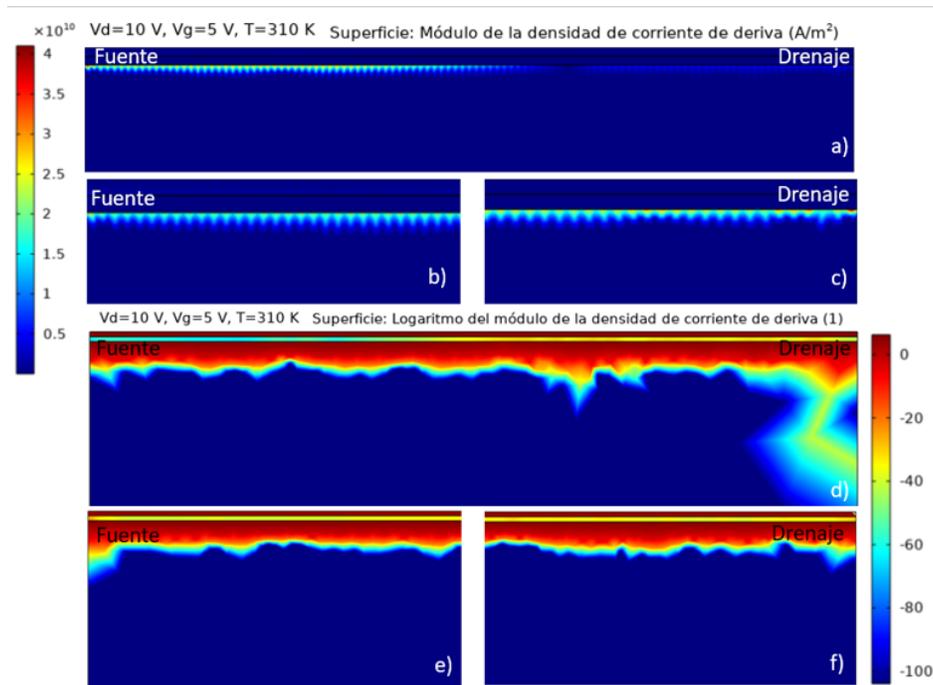


Figura 5.9: Densidad de corriente en dispositivo con espesor de $200nm$, largo de canal de $10\mu m$ en los incisos a) y d), largo de canal de $80\mu m$ en los incisos b), c), e) y f). Con un suministro en las terminales de compuerta y drenaje de $5v$ y $10v$, respectivamente. Y una temperatura de $310K$ para simulación 2D.

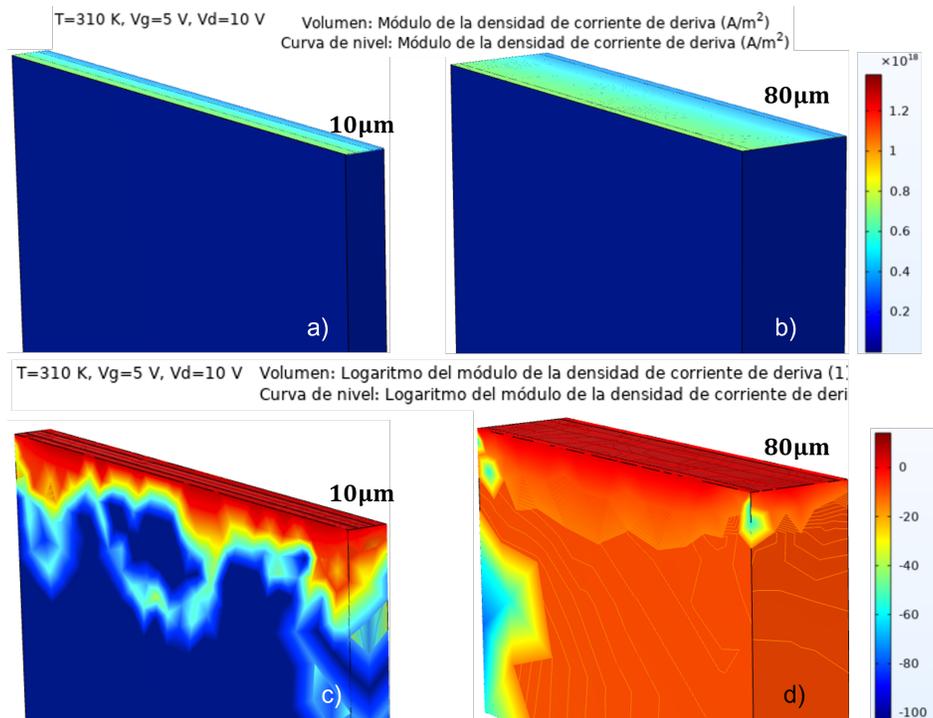


Figura 5.10: Densidad de corriente en dispositivo con espesor de $100nm$, largo de canal de $10\mu m$ en los incisos a) y c), largo de canal de $80\mu m$ en los incisos b) y d). Con un suministro en las terminales de compuerta y drenaje de $5v$ y $10v$, respectivamente. Y una temperatura de $310K$ para simulación 3D.

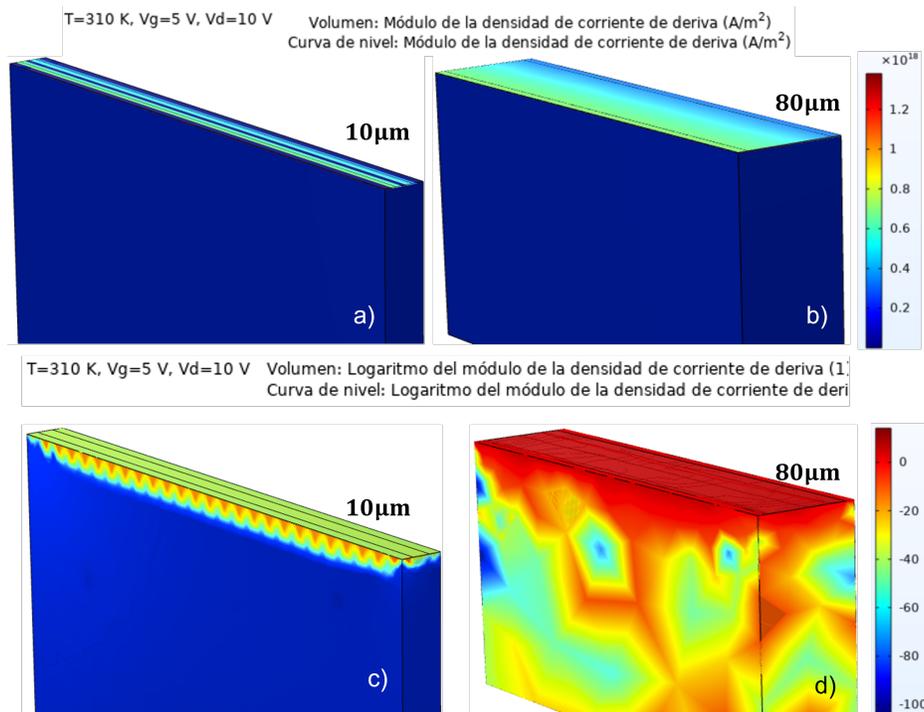


Figura 5.11: Densidad de corriente en dispositivo con espesor de $200nm$, largo de canal de $10\mu m$ en los incisos a) y c), largo de canal de $80\mu m$ en los incisos b) y d). Con un suministro en las terminales de compuerta y drenaje de $5v$ y $10v$, respectivamente. Y una temperatura de $310K$ para simulación 3D.

Para las Figuras 5.8 y 5.9 tenemos simulaciones en 2 dimensiones para un dispositivo con $100nm$ y $200nm$ de espesor en las películas delgadas de Al_2O_3 y ZnO . Presentando en los incisos a), b) y c) la densidad de corriente de deriva, la cual se encuentra en la sección inferior de las películas delgadas del dispositivo, con una mayor concentración bajo la terminal de fuente, mientras que en los incisos d), e) y f) obtenemos su escala logarítmica con el fin de observar de manera sencilla como es esta densidad de corriente debajo de las películas delgadas.

En las Figuras 5.10 y 5.11 tenemos lo mismo presentado en la sección anterior pero para simulación 3D. Es posible observar en ambas Figuras en los incisos a) y b) un dispositivo con $100nm$ y $200nm$ de espesor en las películas delgadas, donde se observa un comportamiento muy similar entre ambos modelos, pero al hacer una escala logarítmica de estas secciones en los incisos c) y d) es donde encontramos una concentración mejor distribuida de densidad de corriente a lo ancho y largo del dispositivo, contemplando como las curvas de nivel se concentran en mayor medida mientras más aproximado se encuentre de la capa activa para el modelo de $200nm$ con $10\mu m$ de largo de canal.

5.6. Transferencia de calor en sólidos

El modelo de transferencia de calor se basa en el estudio del balance de energía en el sistema. La conducción, la convección y la radiación, así como el calor latente, el calentamiento Joule, las fuentes de calor y la disipación de calor, contribuyen a este balance energético. Las propiedades físicas y las fuentes de calor (o disipador) pueden ser descritas como expresiones arbitrarias contenidas en las variables dependientes en un modelo (por ejemplo, temperatura y campo eléctrico).

Para el caso de las simulaciones 2D tenemos una diferencia muy notoria en la concentración de calor en la sección de capas delgadas en la zona superior del dispositivo, para el caso de $10\mu m$ de largo de canal tenemos que en la Figura 5.12 inciso a) existe una mayor concentración de calor que su equivalente con $200nm$ en el inciso b), pero al cambiar el largo de canal a $80\mu m$ observamos el comportamiento contrario, teniendo para el diseño de $100nm$ indicado en el inciso c) una concentración mucho menor de calor que su contraparte de $200nm$ en el inciso d) siendo este último el dispositivo con mayor concentración de calor en las capas superiores del dispositivo.

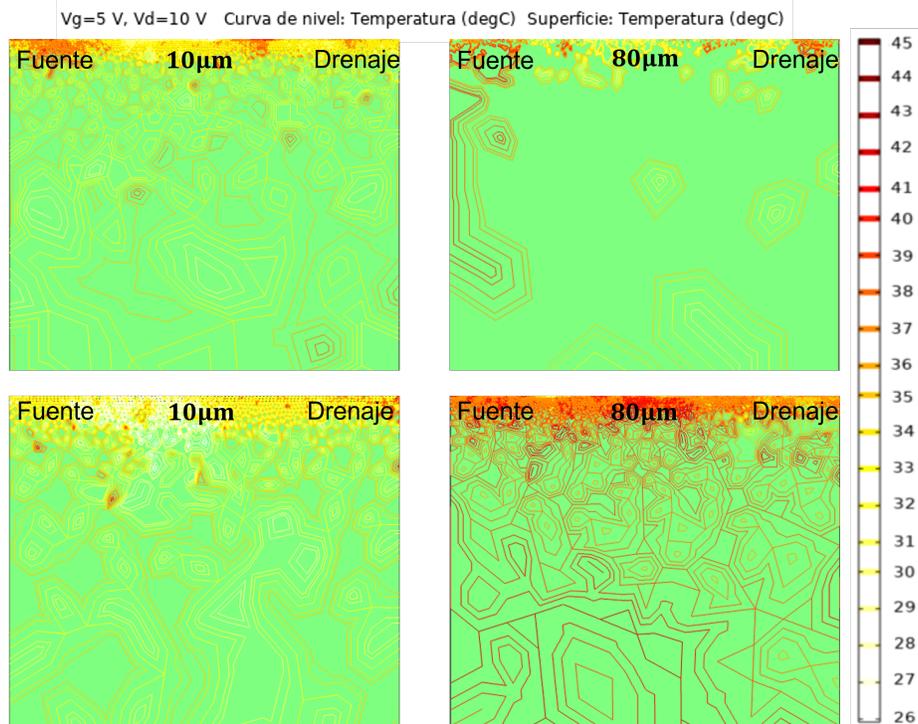


Figura 5.12: Temperatura en el dispositivo con espesor de 100nm y 200nm. Separación entre contactos de $10\mu m$ y $80\mu m$ con un suministro de 5v en el contacto de compuerta y 10v en el contacto de drenaje sometido a una temperatura de 310K para simulación 2D.

Vg=5 V, Vd=10 V Isosuperficie: Temperatura (degC) Volumen: Temperatura (degC)

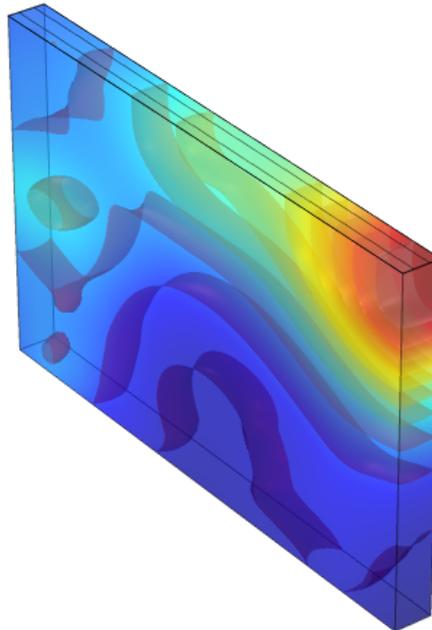


Figura 5.13: Temperatura en dispositivo con espesor de 100nm y $10\mu m$ de separación entre contactos, suministro de 5v en el contacto de compuerta, 10v en el contacto de drenaje y sometido a una temperatura de 310K para simulación 3D.

Vg=5 V, Vd=10 V Isosuperficie: Temperatura (degC) Volumen: Temperatura (degC)

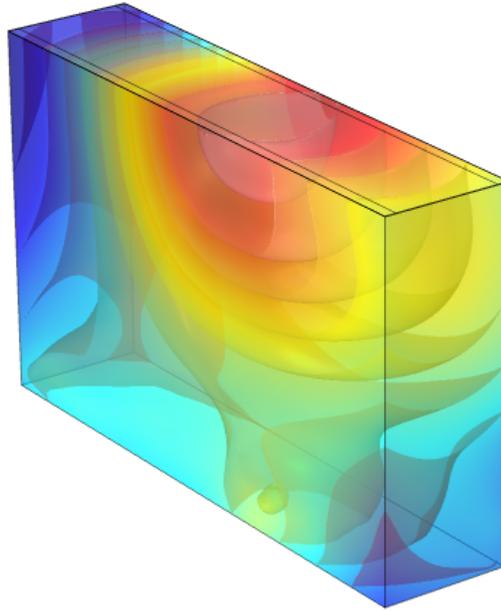


Figura 5.14: Temperatura en dispositivo con espesor de 100nm y $80\mu\text{m}$ de separación entre contactos, suministro de 5v en el contacto de compuerta, 10v en el contacto de drenaje y sometido a una temperatura de 310K para simulación 3D.

En el caso de las simulaciones 3D tenemos otro comportamiento, siendo así los modelos de 100nm los que presentan una mayor concentración de calor en la sección superior del dispositivo, para el caso de $10\mu\text{m}$ de largo de canal, tenemos dos secciones a resaltar. La primera y más importante es en la sección superior y frontal, siendo esta la que presenta una mayor concentración de calor y otra en la sección trasera y de manera centrada en la Figura 5.13. Y, por otra parte, tenemos el caso del dispositivo con $80\mu\text{m}$ de largo de canal, también dos secciones a resaltar, la primera en la sección superior del dispositivo y otra un poco menos agravada en la sección inferior del mismo, esto mostrado en la Figura 5.14. Al tener esta concentración de calor en una sección intermedia del dispositivo, nos indica que la distribución del calor se encuentra de manera homogénea, al tener estas concentraciones de calor en las secciones frontales o traseras es importante mencionar que el dispositivo se encuentra en un punto próximo a su ruptura.

Vg=5 V, Vd=10 V Isosuperficie: Temperatura (degC) Volumen: Temperatura (degC)

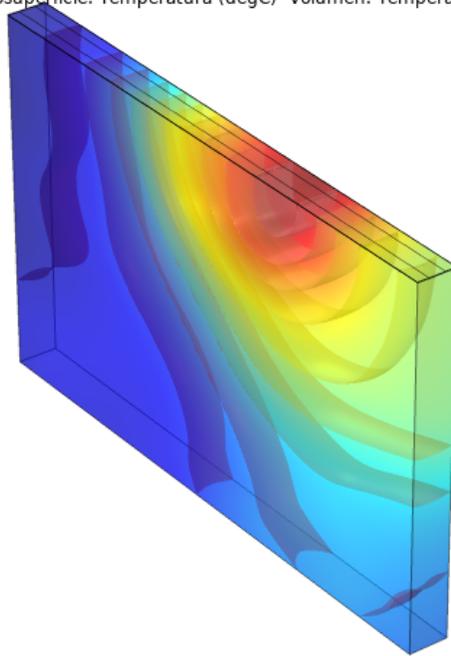


Figura 5.15: Temperatura en dispositivo con espesor de 200nm y $10\mu\text{m}$ de separación entre contactos, suministro de 5v en el contacto de compuerta, 10v en el contacto de drenaje y sometido a una temperatura de 310K para simulación 3D.

Vg=5 V, Vd=10 V Isosuperficie: Temperatura (degC) Volumen: Temperatura (degC)

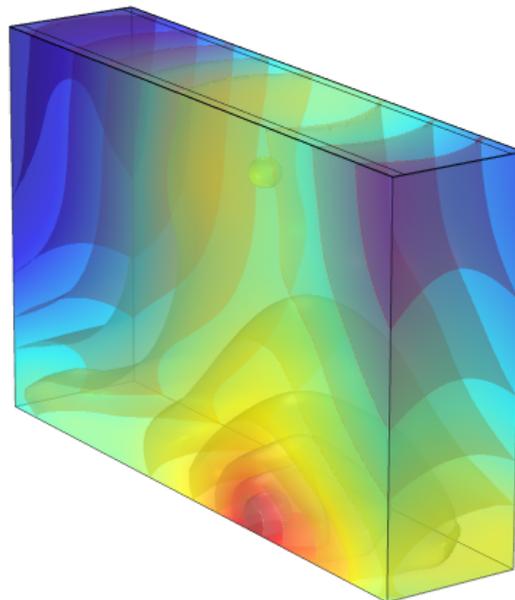


Figura 5.16: Temperatura en dispositivo con espesor de 200nm y $80\mu\text{m}$ de separación entre contactos, suministro de 5v en el contacto de compuerta, 10v en el contacto de drenaje y sometido a una temperatura de 310K para simulación 3D.

Mientras que los dispositivos con 200nm de espesor en las capas superiores presentan una mejor distribución de calor, para el caso de $10\mu\text{m}$ de largo de canal solo un punto a resaltar en la sección superior del dispositivo,

mostrado en la Figura 5.15, mientras que el modelo con $80\mu\text{m}$ de largo de canal se presentan dos puntos relevantes en la sección superior e inferior del dispositivo, mostrando estos una mejor distribución de temperatura dentro del dispositivo mostrado en la Figura 5.16.

5.7. Curvas de respuesta I_d vs V_{ds} y I_d vs V_{gs}

A continuación se presentan las curvas obtenidas para dispositivos de 100nm a 200nm de espesor con un largo de canal de $10\mu\text{m}$ y $80\mu\text{m}$, utilizando como dieléctrico de compuerta el material aislante Al_2O_3 . Esta presentación de resultados muestra tanto las curvas de I_d vs V_{ds} como las de I_d vs V_{gs} utilizando simulaciones en 3D.

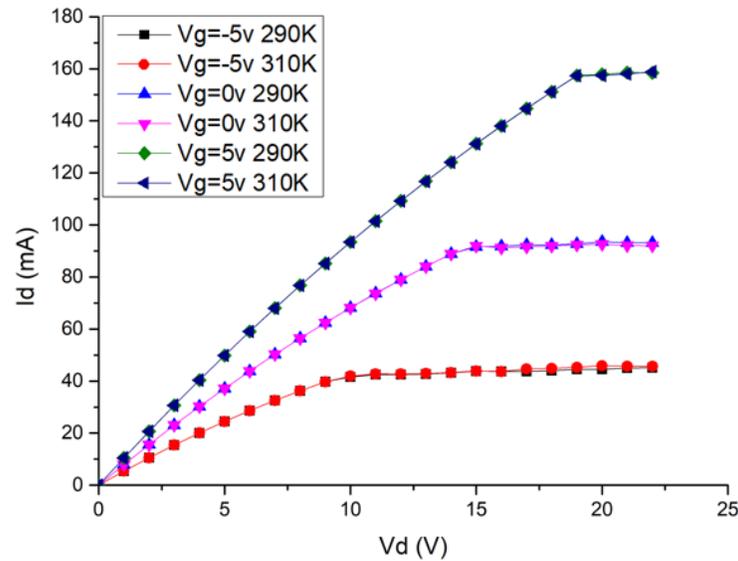


Figura 5.17: Curva característica para dispositivo con 100nm de espesor en películas delgadas, $10\mu\text{m}$ de largo de canal y utilizando un dieléctrico de compuerta de Al_2O_3 .

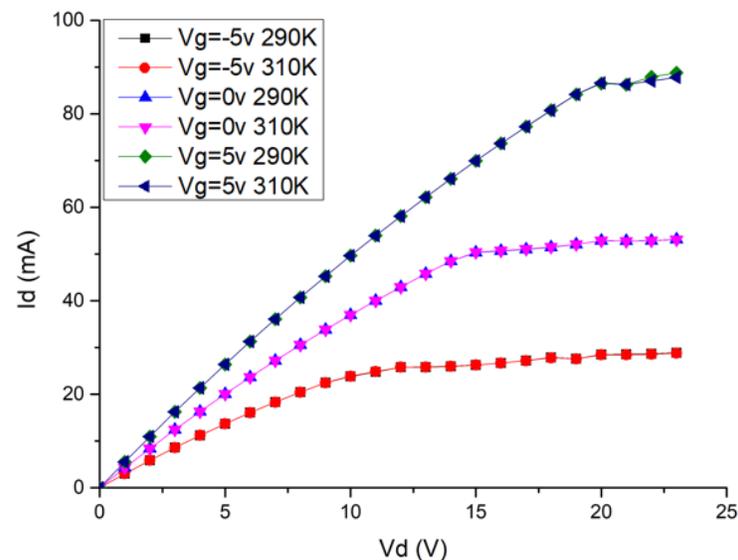


Figura 5.18: Curva característica para dispositivo con 200nm de espesor en películas delgadas, $10\mu\text{m}$ de largo de canal y utilizando un dieléctrico de compuerta de Al_2O_3 .

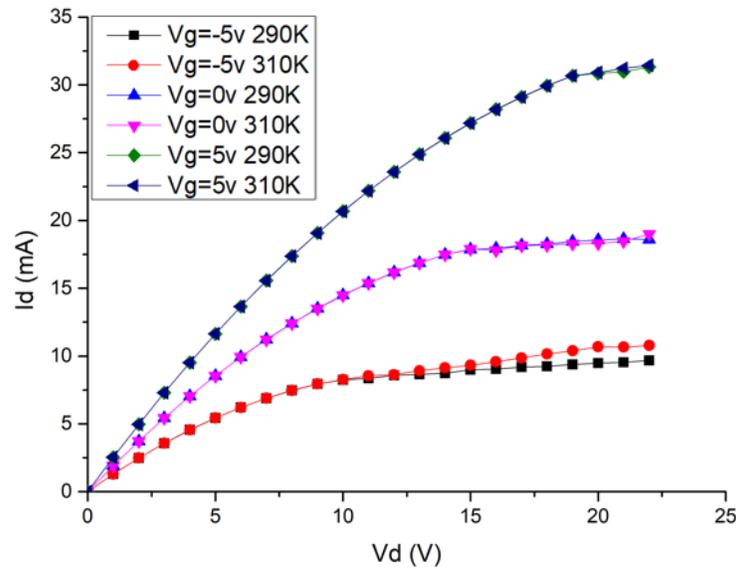


Figura 5.19: Curva característica para dispositivo con $100nm$ de espesor en películas delgadas, $80\mu m$ de largo de canal y utilizando un dieléctrico de compuerta de Al_2O_3 .

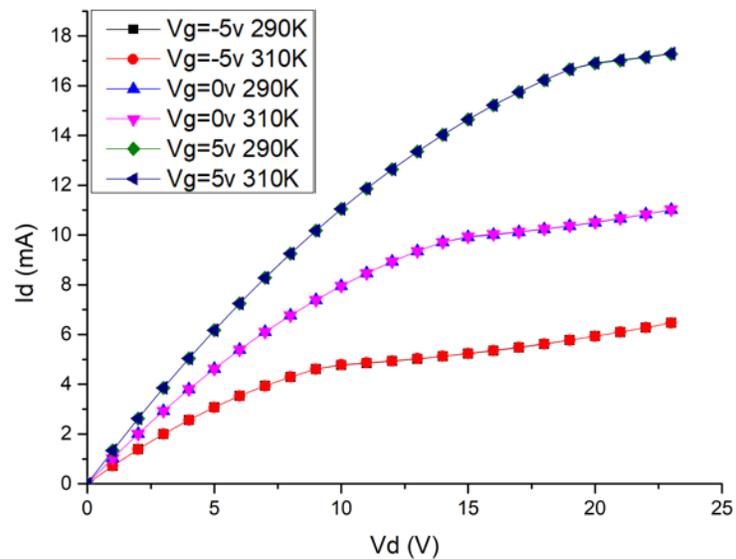


Figura 5.20: Curva característica para dispositivo con $200nm$ de espesor en películas delgadas, $80\mu m$ de largo de canal y utilizando un dieléctrico de compuerta de Al_2O_3 .

En las Figuras 5.17 y 5.18 se tienen las curvas características para los dispositivos con $100nm$ y $200nm$ con un largo de canal de $10\mu m$ en el cual se obtiene un voltaje de saturación muy aproximado en ambos dispositivos, la diferencia más notable entre estos es la corriente máxima obtenida, logrando una corriente mayor en el dispositivo con $100nm$ esto es debido a la disminución de pérdida de energía al tener una película más delgada a comparación del modelo con $200nm$. Para un dispositivo de las Figuras 5.19 y 5.20 con un largo de canal de $80\mu m$ se obtienen el mismo comportamiento anterior, pero con una disminución de corriente máxima. Esto es debido a que ahora la corriente de entrada tiene un mayor recorrido dentro del dispositivo y existe cierta pérdida de energía en forma de calor.

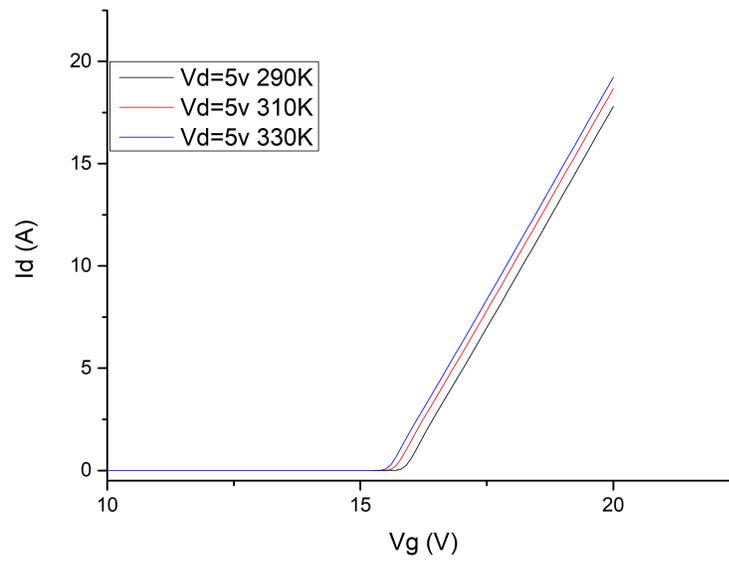


Figura 5.21: Curva característica para dispositivo con 100nm de espesor en películas delgadas, $10\mu\text{m}$ de largo de canal y utilizando un dieléctrico de compuerta de Al_2O_3 .

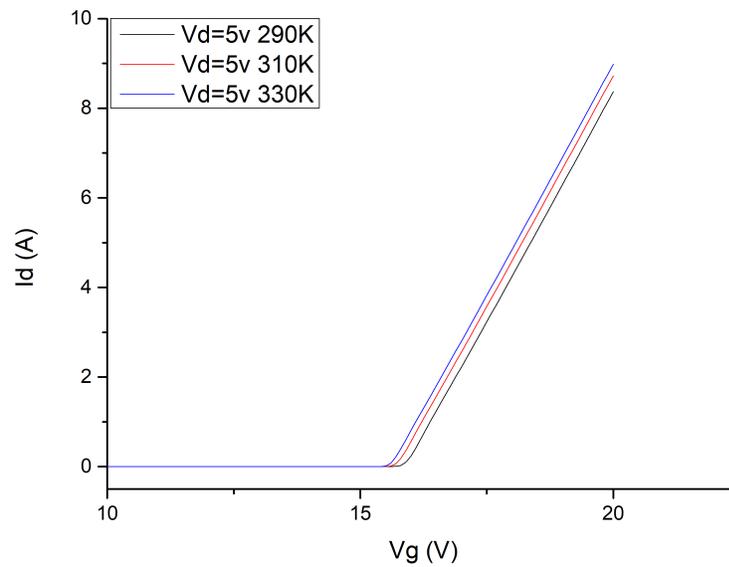


Figura 5.22: Curva característica para dispositivo con 200nm de espesor en películas delgadas, $10\mu\text{m}$ de largo de canal y utilizando un dieléctrico de compuerta de Al_2O_3 .

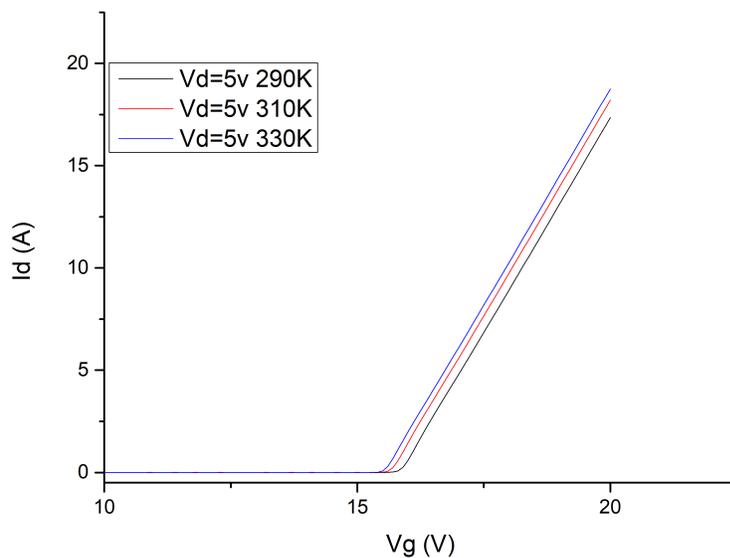


Figura 5.23: Curva característica para dispositivo con 100nm de espesor en películas delgadas, $80\mu\text{m}$ de largo de canal y utilizando un dieléctrico de compuerta de Al_2O_3 .

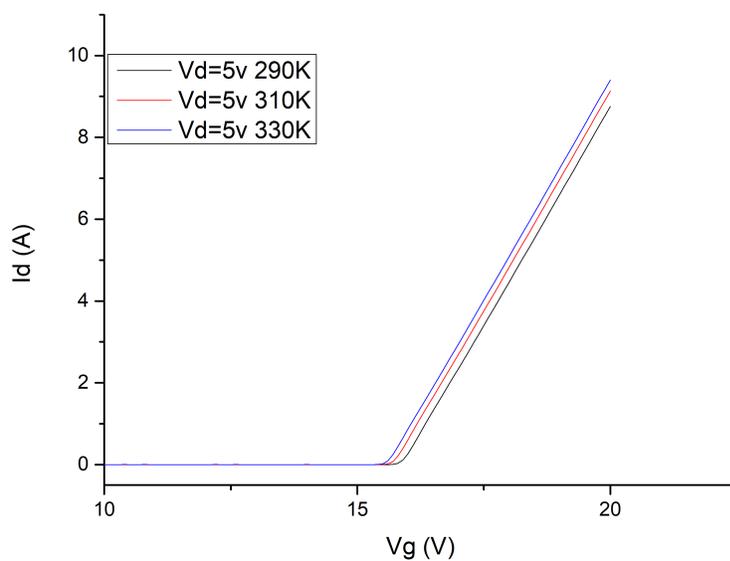


Figura 5.24: Curva característica para dispositivo con 200nm de espesor en películas delgadas, $80\mu\text{m}$ de largo de canal y utilizando un dieléctrico de compuerta de Al_2O_3 .

Las gráficas de I_{ds} vs V_{gs} presentan la información respecto al voltaje de disparo en los dispositivos anteriores, los cuales obtenemos un voltaje de disparo muy similar entre las variantes de espesor en las películas delgadas y largo de canal, esto se muestra en las Figuras 5.21, 5.22, 5.23 y 5.24. Con un voltaje pasando los 15V en la terminal de compuerta, el cual fue sometido con tres temperaturas de 290K , 310K y 330K , teniendo una respuesta más rápida a mayor temperatura.

Capítulo 6

Conclusiones

Este trabajo de tesis permitió comparar los resultados de simulaciones, con datos recopilados a través de la literatura, y conformar los modelos en dos y tres dimensiones que predicen el comportamiento del dispositivo. Además, gracias a las simulaciones previamente mostradas fue posible la reducción de costos de producción y tiempo de fabricación en el laboratorio, que permiten obtener el modelo del transistor óptimo entre variantes de espesor, largo de canal y diferente dieléctrico de compuerta. Este trabajo de simulación establece las bases para modelar y simular dispositivos similares con distintos materiales con posibilidad de fabricación en el nanoFAB. A continuación, se presenta los resultados obtenidos, logrando así cumplir con los objetivos generales y particulares de este trabajo y concluyendo con una hipótesis adecuada para este.

- Las simulaciones permitieron observar el comportamiento de diferentes modelos de transistores con dieléctricos de SiO_2 , HfO_2 y Al_2O_3 obteniendo como resultado un voltaje de disparo menor en transistores a base de Al_2O_3
- Los dispositivos con un largo de canal de $10\mu m$ presentaron una mejor respuesta de salida y un menor suministro de tensión eléctrica para su óptima operación, además de contener dimensiones menores, hecho fundamental en el diseño de dispositivos electrónicos.
- Los dispositivos con espesor de $100nm$ en las capas superiores (Capa activa y dieléctrico de compuerta) del modelo presentan una mayor concentración de temperatura al ser sometidos a una tensión eléctrica externa. Mientras que los dispositivos con $200nm$ disipan de mejor manera este calor producido en el dispositivo. Además de contener una mejor distribución en la densidad de corriente en la sección de trabajo.

6.1. Trabajo futuro

- Obtener simulaciones de dispositivos con estructura FinFET (Fin Field Effect Transistor por sus siglas en inglés.) Y así obtener una mejora respecto a disminución de tamaño y respuesta del dispositivo.
- Búsqueda de información respecto a los coeficientes de Richardson con el fin de utilizar en física semiconductor y así sustituir el uso de contactos Schockley ideal por contactos más aproximados de manera experimental.
- Obtener pseudo-MOSFET de $200nm$ de película delgada con largo de canal de $10\mu m$ de manera experimental y comparar resultados obtenidos en simulación.
- Evaluar la sección de "Constructor de aplicación" incorporado al software COMSOL MULTIPHYSICS con el objetivo de obtener aplicaciones compatibles con dispositivos móviles y así lograr simulaciones sin necesidad de un desarrollador del software.

Apéndice A

Materiales

A continuación, se incorporan las referencias principales en la incorporación de materiales dentro del software COMSOL MULTIPHYSICS.

Propiedades	Referencias
Permitividad relativa	[60–68]
Banda prohibida	[69–79]
Afinidad electrónica	[80–88]
Bandas de energía	[89–92]
Movilidad de electrones y huecos	[93–101]

Tabla A.1: Referencias materiales.

Bibliografía

- [1] W. F. Brinkman, D. E. Haggan, and W. W. Troutman, "A history of the invention of the transistor and where it will lead us," *IEEE journal of solid-state circuits*, vol. 32, no. 12, pp. 1858–1865, 1997.
- [2] F. Najmabadi, "Bipolar Junction Transistor (BJT) A BJT consists of three regions NPN transistor," pp. 1–22, 2012.
- [3] "3. Evolución de la metodología de diseño y la tecnología."
- [4] J. M. Albella and J. M. Martínez-Duart, "8 Transistores de Efecto Campo.pdf," pp. 225–256, 1996.
- [5] A. Sharma, C. Madhu, and J. Singh, "Performance Evaluation of Thin Film Transistors: History, Technology Development and Comparison: A Review," *International Journal of Computer Applications*, vol. 89, no. 15, pp. 36–40, 2014.
- [6] Y. Yamamoto, "Technological innovation of thin-film transistors: Technology development, history, and future," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 6 PART 1, 2012.
- [7] K. Kandpal and N. Gupta, "Zinc Oxide Thin Film Transistors: Advances, Challenges and Future Trends," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 5, no. 2, 2016.
- [8] T. Mimura and M. Fukuta, "Status of the GaAs Metal-Oxide-Semiconductor Technology," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 27, no. 6, pp. 1147–1155, 1980.
- [9] E. Significativas, *Electrónica : teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*.
- [10] A. K. Saikumar, G. Skaria, and K. B. Sundaram, "ZnO Gate Based MOSFETs for Sensor Applications," *ECS Transactions*, vol. 61, no. 26, pp. 65–69, 2014.
- [11] "Método de los elementos finitos: ¿qué es?" [Online]. Available: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>
- [12] C. Nan, "Numerical Modeling of Flexible ZnO Thin-Film Transistors Using COMSOL Multiphysics by," 2013.
- [13] COMSOL Multiphysics® , "Introduction to the Semiconductor Module," 2017.
- [14] C. S. L. Agreement, "Semiconductor Module," pp. 1–308, 2018.
- [15] M. A. Pozueta Rodríguez, "Aislantes y conductores utilizados en las Máquinas Eléctricas," pp. 9–11, 2015. [Online]. Available: <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>
- [16] "Dieléctrico - Construmatica." [Online]. Available: <https://www.construmatica.com/construpedia/Dieléctrico>
- [17] L. G. Hector and H. L. Schultz, "The dielectric constant of air at radiofrequencies," *Journal of Applied Physics*, vol. 7, no. 4, pp. 133–136, 1936.
- [18] J. Calderon, "Permitividad," p. 3, 2011.
- [19] M. Zahn, "Book 1 electromagnetics fields," *Interactions*, p. 203, 1987.
- [20] I. Constantin, "SEMICONDUCTORES Y AISLANTES," no. 1.

- [21] S. D. Pawar, P. Murugavel, and D. M. Lal, "Effect of relative humidity and sea level pressure on electrical conductivity of air over Indian Ocean," *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 114, no. 2, jan 2009.
- [22] "Table of Electrical Resistivity and Conductivity." [Online]. Available: <https://www.thoughtco.com/table-of-electrical-resistivity-conductivity-608499>
- [23] "TIBTECH innovations: Metal properties comparison: electric conductivity, thermal conductivity, density, melting temperature." [Online]. Available: <https://www.tibtech.com/conductivite.php?lang=en-US>
- [24] F. Farandato, "Materiales semiconductores y diodos," no. C. [Online]. Available: <https://www.academia.edu/33576894/Materiales-semiconductores-y-diodos-pdf>
- [25] "Semiconductores intrínsecos y extrínsecos." [Online]. Available: <http://pelandintecno.blogspot.com/2014/04/semiconductores-intrinsecos-y.html>
- [26] E. C. Theory, *Electrical circuit theory and technology*, 2001, vol. 39, no. 02.
- [27] "La física de los semiconductores - Tachas 024 - Es Lo Cotidiano." [Online]. Available: <http://www.eslocotidiano.com/articulo/tachas-024/fisica-semiconductores/20131116051246006334.html>
- [28] "¿Cómo determinar la brecha de energía en un semiconductor? — Steemit." [Online]. Available: <https://steemit.com/stem-espanol/@iamphysical/como-determinar-la-brecha-de-energia-en-un-semiconductor>
- [29] U. Valle and Á. B. N, "Física de Semiconductores y Dispositivos Electrónicos."
- [30] R. J. Candal and S. A. Bilmes, "4 Semiconductores Con Actividad Fotocatalítica."
- [31] M. Encalada and C. Javier, "Modelación y simulación en matlab de la operación de un diodo de unión PN de silicio basada en teoría de semiconductores," 2017.
- [32] "Efecto fotoeléctrico (artículo) — Khan Academy." [Online]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry/electronic-structure-of-atoms-ap/bohr-model-hydrogen-ap/a/photoelectric-effect>
- [33] R. Chang, *No Title* .
- [34] C. Ohmico, "Contacto Metal-Semiconductor," pp. 1–5.
- [35] D. Bugg, "The Field-Effect Transistor (FET)," *Electronics*, pp. 149–170, 2006.
- [36] A. . Dispositivos and D. Tecnologia Electronica, "TEMA 7 TRANSISTORES DE EFECTO CAMPO (Guia de Clases)."
- [37] R. De and F. De, "Ransistores de," pp. 182–209.
- [38] D. Electr, *Dispositivos*.
- [39] FACULTAD REGIONAL ROSARIO, "Transistores De Efecto De Campo," *Universidad Tecnologica Nacional*, p. 33, 2002. [Online]. Available: <https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/electrica/3-anio/electronica-1/apuntes/Transistor de Efecto de Campo. - fets-2002.pdf>
- [40] Y. G. Morales, "Universidad de sonora," 2009.
- [41] D. L. Fay, "No Title No Title No Title," *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., vol. 50, no. 5, pp. 249–258, 1967.
- [42] A. Filippetti and A. Bosin, "Anomalous relaxations and chemical trends at III-V semiconductor nitride nonpolar surfaces," vol. 59, no. 12, pp. 8026–8031, 1999.
- [43] J. Perez Taborda, H. Riascos Landazuri, J. Gallego Cano, and W. Steven Roman, "Películas nano estructuradas de óxido de zinc(ZnO)." *Scientia et Technica*, vol. 2, no. 39, pp. 416–421, 2008.
- [44] V. Valdez, "Óxido de Zinc, Propiedades," *Catarina*, pp. 13–39, 2015.

- [45] T. Zaera, *El óxido de zinc: crecimiento cristalino mediante transporte en fase gaseosa y caracterización de propiedades físicas.*, 2004. [Online]. Available: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/9872/tena.pdf?sequence=1>
- [46] M. Khaksar, M. Amini, and D. M. Boghaei, “Efficient and green oxidative degradation of methylene blue using Mn-doped ZnO nanoparticles ($Zn_{1-x}Mn_xO$),” *Journal of Experimental Nanoscience*, vol. 10, no. 16, pp. 1256–1268, 2015.
- [47] H. Morkoc, and Ümit Özgür, *Zinc Oxide Fundamentals, Materials and Device Technology*, 2007.
- [48] A. R. Br SEGUNDO ENRIQUE DOBBERTIN SANCHEZ Asesor SEGUNDO JÁUREGUI ROSAS and P. Mayo.
- [49] COMSOL, “COMSOL Multiphysics® v. 5.5,” p. 1742, 2018.
- [50] “Una introducción a la teoría de la electrostática.” [Online]. Available: <https://www.comsol.com/multiphysics/electrostatics-theory>
- [51] COMSOL Multiphysics, “AC / DC Module User ’ s Guide,” © 1998–2019 Comsol, p. 300, 2019.
- [52] “Software de semiconductores - Modelado de la física de dispositivos semiconductores.” [Online]. Available: <https://www.comsol.com/semiconductor-module>
- [53] E. Calor, “Beroa,” pp. 1–7, 1849. [Online]. Available: <https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/inn-doc-ed-cientifica/eu-def/adjuntos/natur-zientziak/DBH1Z-03-BEROA-TENP/1-DBH1Z-03-IRAKASLE/Beroa.pdf>
- [54] E. Dos, T. Diferentes, and E. N. Dos.
- [55] M. Sturge, “Electrons and Holes in Semiconductors,” *Statistical and Thermal Physics*, pp. 269–290, 2020.
- [56] C. Maragliano, S. Lilliu, M. S. Dahlem, M. Chiesa, T. Souier, and M. Stefancich, “Quantifying charge carrier concentration in ZnO thin films by Scanning Kelvin Probe Microscopy,” *Scientific Reports*, vol. 4, 2014.
- [57] S. Kikuchi, Y. Takahashi, and T. Sakata, “Measurement on Work Function of Polycrystalline Zinc Oxide Covered by Organic Dye,” *Applied Optics*, vol. 8, no. S1, p. 42, 1969.
- [58] J. A. Dillon and H. E. Farnsworth, “Work function and sorption properties of silicon crystals,” *Journal of Applied Physics*, vol. 29, no. 8, pp. 1195–1202, 1958.
- [59] “Work Functions for Photoelectric Effect.” [Online]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Tables/photoelec.html>
- [60] “Zinc Oxide (ZnO) Semiconductors.” [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=8417>
- [61] “Aluminum Oxide — Al₂O₃ Material Properties.” [Online]. Available: <https://accuratus.com/alumox.html>
- [62] “2.1 Silicon Dioxide Properties.” [Online]. Available: <https://www.iue.tuwien.ac.at/phd/filipovic/node26.html>
- [63] C. J. Gonta, “Atomic Layer Deposition of Ferroelectric HfO₂,” no. May, pp. 1–6, 2017.
- [64] J. M. Chem, J. Zhu, S. Wei, L. Zhang, Y. Mao, J. Ryu, and N. Haldolaarachchige, “Electrical and dielectric properties of polyaniline – Al₂O₃ nanocomposites,” no. October, pp. 3952–3959, 2011.
- [65] S. Maikap, H. Y. Lee, T. Y. Wang, P. J. Tzeng, C. C. Wang, L. S. Lee, K. C. Liu, J. R. Yang, and M. J. Tsai, “Charge trapping characteristics of atomic-layer-deposited HfO₂ films with Al₂O₃ as a blocking oxide for high-density non-volatile memory device applications,” *Semiconductor Science and Technology*, vol. 22, no. 8, pp. 884–889, 2007.
- [66] M. M. Rahman, J. G. Kim, D. H. Kim, and T. W. Kim, “Characterization of Al incorporation into HfO₂ dielectric by atomic layer deposition,” *Micromachines*, vol. 10, no. 6, pp. 1–11, 2019.

- [67] I. R. U. Judgh, O. Olplw, R. I. D. Fdofxodwlrq, P. Edvhg, R. Q. Htxdwlrq, F. Qhfhvvdv, I. R. U. Uhdol, L. Q. J. Shuplwlylw, and J. Pdwhuldo, “(Ydoxdwlrq Ri 5Hodwlyh 3Huplwlylw Dqg Rhiilflhqw Ri 7Khupdo ([Sdqvlrq Ri 7L2 6L2 (Sr [Rpsrvlwhv,” vol. 2, pp. 568–571, 2017.
- [68] Z. March, “Midterm I,” pp. 1–7, 2005.
- [69] S. T. Tan, B. J. Chen, X. W. Sun, W. J. Fan, H. S. Kwok, X. H. Zhang, and S. J. Chua, “Blueshift of optical band gap in ZnO thin films grown by metal-organic chemical-vapor deposition,” *Journal of Applied Physics*, vol. 98, no. 1, 2005.
- [70] E. O. Filatova and A. S. Konashuk, “Interpretation of the Changing the Band Gap of Al₂O₃ Depending on Its Crystalline Form: Connection with Different Local Symmetries,” *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 119, no. 35, pp. 20 755–20 761, 2015.
- [71] M. C. Cheynet, S. Pokrant, F. D. Tichelaar, and J. L. Rouvère, “Crystal structure and band gap determination of Hf O₂ thin films,” *Journal of Applied Physics*, vol. 101, no. 5, 2007.
- [72] B. C. Shih, Y. Xue, P. Zhang, M. L. Cohen, and S. G. Louie, “Quasiparticle band gap of ZnO: High accuracy from the conventional G₀W₀ approach,” *Physical Review Letters*, vol. 105, no. 14, pp. 1–4, 2010.
- [73] M. S. Seehra and S. S. Seehra, “Temperature dependence of the band gap of FeS₂,” *Physical Review B*, vol. 19, no. 12, pp. 6620–6621, 1979.
- [74] G. L. Tan, M. F. Lemon, D. J. Jones, and R. H. French, “Optical properties and London dispersion interaction of amorphous and crystalline SiO₂ determined by vacuum ultraviolet spectroscopy and spectroscopic ellipsometry,” *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, vol. 72, no. 20, pp. 1885–1892, 2005.
- [75] M. K. Hudait and Y. Zhu, “Energy band alignment of atomic layer deposited HfO₂ oxide film on epitaxial (100)Ge, (110)Ge, and (111)Ge layers,” *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 11, 2013.
- [76] S. Canulescu, K. Rechendorff, C. N. Borca, N. C. Jones, K. Bordo, J. Schou, L. Pleth Nielsen, S. V. Hoffmann, and R. Ambat, “Band gap structure modification of amorphous anodic Al oxide film by Ti-alloying,” *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 12, 2014.
- [77] “What is a wide-band-gap semiconductor? — Toshiba Electronic Devices Storage Corporation — Americas — United States.” [Online]. Available: <https://toshiba.semicon-storage.com/us/semiconductor/knowledge/faq/diode-sic-sbd/sic-sbd001.html>
- [78] P. H. Jefferson, S. A. Hatfield, T. D. Veal, P. D. King, C. F. McConville, J. Zúñiga-Pérez, and V. Muñoz-Sanjosé, “Bandgap and effective mass of epitaxial cadmium oxide,” *Applied Physics Letters*, vol. 92, no. 2, pp. 2–5, 2008.
- [79] S. Saha, B. T. Diroll, J. Shank, Z. Kudyshev, A. Dutta, S. N. Chowdhury, T. S. Luk, S. Campione, R. D. Schaller, V. M. Shalaev, A. Boltasseva, and M. G. Wood, “Broadband, High-Speed, and Large-Amplitude Dynamic Optical Switching with Yttrium-Doped Cadmium Oxide,” *Advanced Functional Materials*, vol. 30, no. 7, pp. 1–7, 2020.
- [80] W. Zheng, K. H. Bowen, J. Li, I. Dabkowska, and M. Gutowski, “Electronic structure differences in ZrO₂ vs HfO₂,” *Journal of Physical Chemistry A*, vol. 109, no. 50, pp. 11 521–11 525, 2005.
- [81] A. Jimenéz-González and D. Schmeisser, “Preparation and spectroscopic characterization of γ -Al₂O₃ thin films,” *Surface Science*, vol. 250, no. 1-3, pp. 59–70, 1991.
- [82] S. Monaghan, P. K. Hurley, K. Cherkaoui, M. A. Negara, and A. Schenk, “Determination of electron effective mass and electron affinity in HfO₂ using MOS and MOSFET structures,” *Solid-State Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 438–444, 2009. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sse.2008.09.018>
- [83] J. Li, H. Liu, Y. Feng, H. Zhu, and X. Bao, “Effects of Thermal Treatment on the Properties of γ -Al₂O₃ and θ -Al₂O₃,” *Huaxue Fanying Gongcheng Yu Gongyi/Chemical Reaction Engineering and Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 466–473, 2017.

- [84] V. Astašauskas, A. Bellissimo, P. Kuksa, C. Tomastik, H. Kalbe, and W. S. Werner, "Optical and electronic properties of amorphous silicon dioxide by single and double electron spectroscopy," *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, vol. 241, no. October 2018, pp. 1–7, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.elspec.2019.02.008>
- [85] B. Hussain, A. Aslam, T. M. Khan, M. Creighton, and B. Zohuri, "Electron affinity and bandgap optimization of zinc oxide for improved performance of zno/si heterojunction solar cell using PC1D simulations," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 2, pp. 1–8, 2019.
- [86] O. T. Hofmann, J. C. Deinert, Y. Xu, P. Rinke, J. Stähler, M. Wolf, and M. Scheffler, "Large work function reduction by adsorption of a molecule with a negative electron affinity: Pyridine on ZnO (1010)," *Journal of Chemical Physics*, vol. 139, no. 17, pp. 0–10, 2013.
- [87] "Silicon - Electron Affinity - Electronegativity - Ionization Energy of Silicon — nuclear-power.com." [Online]. Available: <https://www.nuclear-power.com/silicon-affinity-electronegativity-ionization/>
- [88] X. Wu, J. Lee, V. Varshney, J. L. Wohlwend, A. K. Roy, and T. Luo, "Thermal Conductivity of Wurtzite Zinc-Oxide from First-Principles Lattice Dynamics - A Comparative Study with Gallium Nitride," *Scientific Reports*, vol. 6, no. February, pp. 1–10, 2016.
- [89] J. B. You, X. W. Zhang, S. G. Zhang, H. R. Tan, J. Ying, Z. G. Yin, Q. S. Zhu, and P. K. Chu, "Electroluminescence behavior of ZnO/Si heterojunctions: Energy band alignment and interfacial microstructure," *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 8, 2010.
- [90] "Insulator -band structure." [Online]. Available: <https://ns.ph.liv.ac.uk/~ajb/radiometrics/glossary/insulator.html>
- [91] J. P. Van Dyke and G. A. Samara, "Thallous halides: Pressure dependence of the energy-band structure and the insulator-metal transition," *Physical Review B*, vol. 11, no. 12, pp. 4935–4944, 1975.
- [92] R. C. Santos, E. Longhinotti, V. N. Freire, R. B. Reimberg, and E. W. Caetano, "Elucidating the high-k insulator α -Al₂O₃ direct/indirect energy band gap type through density functional theory computations," *Chemical Physics Letters*, vol. 637, pp. 172–176, 2015. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2015.08.004>
- [93] M. A. Negara, K. Cherkaoui, P. K. Hurley, C. D. Young, P. Majhi, W. Tsai, D. Bauza, and G. Ghibaudo, "Analysis of electron mobility in HfO₂ /TiN gate metal-oxide-semiconductor field effect transistors: The influence of HfO₂ thickness, temperature, and oxide charge," *Journal of Applied Physics*, vol. 105, no. 2, 2009.
- [94] R. C. Hughes, "Hole mobility and transport in thin SiO₂ films," *Applied Physics Letters*, vol. 26, no. 8, pp. 436–438, 1975.
- [95] N. A. Jayah, H. Yahaya, M. R. Mahmood, T. Terasako, K. Yasui, and A. M. Hashim, "High electron mobility and low carrier concentration of hydrothermally grown ZnO thin films on seeded a-plane sapphire at low temperature," *Nanoscale Research Letters*, vol. 10, no. 1, pp. 1–10, 2015.
- [96] V. H. Nguyen, D. Bellet, B. Masenelli, and D. Muñoz-Rojas, "Increasing the Electron Mobility of ZnO-Based Transparent Conductive Films Deposited by Open-Air Methods for Enhanced Sensing Performance," *ACS Applied Nano Materials*, vol. 1, no. 12, pp. 6922–6931, 2018.
- [97] J. H. Ryu, Y. G. You, S. W. Kim, J. H. Hong, J. H. Na, and S. H. Jhang, "Effect of Al₂O₃ deposition on carrier mobility and ambient stability of few-layer MoS₂ field effect transistors," *Current Applied Physics*, vol. 20, no. 2, pp. 363–365, 2020.
- [98] L. Å. Ragnarsson, N. A. Bojarczuk, J. Karasinski, and S. Guha, "Hall Mobility in Hafnium Oxide Based MOSFETs: Charge Effects," *IEEE Electron Device Letters*, vol. 24, no. 11, pp. 689–691, 2003.
- [99] S. Cornelius, M. Vinnichenko, N. Shevchenko, A. Rogozin, A. Kolitsch, and W. Möller, "Achieving high free electron mobility in ZnO:Al thin films grown by reactive pulsed magnetron sputtering," *Applied Physics Letters*, vol. 94, no. 4, pp. 1–4, 2009.
- [100] J. Sun, Y. Huang, and H. Gong, "Improved mobility and conductivity of an Al₂O₃ incorporated indium zinc oxide system," *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 2, 2011.

- [101] D. V. Christensen, Y. Frenkel, P. Schütz, F. Trier, S. Wissberg, R. Claessen, B. Kalisky, A. Smith, Y. Z. Chen, and N. Pryds, “Electron Mobility in γ -Al₂O₃/SrTiO₃,” *Physical Review Applied*, vol. 9, no. 5, 2018.