



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería

**Estudio de las Características Eléctricas de Estructuras
tipo MOS con SiO_x para su posible aplicación a
fotodetectores.**

Tesis profesional para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Y Eléctrico

Presenta:

Gabriel Omar Mendoza Conde

Asesores:

**Dr. José Alberto Luna López
Dr. José Francisco Flores Gracia
M.C. Guillermo Flores Martínez**

Resumen

La optoelectrónica es un área de la electrónica que surge a partir del descubrimiento y posterior explicación por parte de Albert Einstein del efecto fotoeléctrico, el cual a su vez es una demostración de la dualidad partícula-onda de la radiación luminosa descubierta y explicada por Max Planck y que dio origen a la Física Cuántica. Los conceptos de esta nueva ciencia fueron luego utilizados para la caracterización de diversos materiales en cuanto a sus características ópticas, lo cual permitió su utilización en la construcción de dispositivos electrónicos. Estos dispositivos se utilizan en una muy amplia gama de aplicaciones, desde varias tan comunes como el lector de discos compactos hasta las comunicaciones por medio de fibra óptica, aplicaciones médicas, etc. De ahí que resulte de especial interés el estudio de ellos, al estar ya plenamente incorporados a los equipos y a la práctica en general de la Ingeniería Eléctrica.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN E HIPÓTESIS.....	- 7 -
1.1 Introducción.	8
1.2 Justificación.	9
1.3 Hipotesis.....	9
1.4 Objetivos.....	10
1.4.1 Objetivo general.	10
1.4.2 Objetivos Particulares.....	10
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	11
2.1 Silicio.	12
2.2 Propiedades Semiconductoras del Silicio.....	12
2.3 Dióxido de Silicio.	13
2.4 Óxido de Silicio Rico en Silicio.....	14
2.5 Semiconductores Intrínsecos.....	15
2.6 Semiconductores Extrínsecos.....	15
2.6.1 Material Tipo P.....	15
2.6.2 Material Tipo N.	16
2.7 Unión P-N.....	17
2.7.1 Polarización directa.....	17
2.7.2 Polarización inversa.....	19
2.8 Capacitor MOS.	20
2.9 Comportamiento eléctrico de la estructura MOS.....	21
2.9.1 Polarización de una estructura MOS.....	22
2.10 Efecto Fotoeléctrico.....	23
2.11 Fotoconductividad.....	25
2.12 Fotodetectores.....	26
2.12.1 Teoría del Fotodetector.....	28
CAPITULO 3 TECNICAS Y PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES	30
3.1 Sistema CVD.....	31
3.1.2 Sistema de Depósito HFCVD.....	31
3.2 Procedimiento de depósito de las películas de SiOx mediante HFCVD	32
3.3 Sistema de Spray-Pirolisis (Roció Pirolítico Ultrasónico).....	33

3.4	Fabricación del óxido de Estaño dopado con flúor (FTO).....	35
3.5	Metalización al vacío.....	35
3.6	Densificado en ambiente de Nitrógeno.....	37
3.7	Fabricación de Dispositivos MOS y MOM.....	37
3.8	Caracterizaciones Ópticas.	38
3.8.1	Fotolumiscencia.....	39
3.8.2	Transmitancia.....	40
3.9	Perfilometría.	41
3.10	Caracterizaciones Eléctricas de las películas de SiOx.....	42
3.10.1	Efecto Hall.	42
3.11	Caracterizaciones eléctricas de las estructuras MOS y MOM.....	43
3.11.1	Mediciones de Corriente-Voltaje de las estructuras tipo MOS en oscuridad, con luz blanca y luz UV.	44
3.11.2	Mediciones de Capacitancia-Voltaje.	45
CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN		46
4.1	Resultados Ópticos.	47
4.1.1	Perfilometría de las películas de SiOx.	47
4.1.2	Resultados de la Fotoluminiscencia (FL) de las películas de SiOx.	47
4.1.3	Transmitancia UV-Vis de las películas de SiOx.	49
4.1.4	Transmitancia UV-Vis de los contactos de FTO.....	50
4.2	Mediciones Eléctricas.....	50
4.2.1	Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOS con contacto de Aluminio Sin Tratamiento Térmico.	51
4.2.2	Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOS con contacto de Aluminio Con Tratamiento Térmico.	55
4.2.3	Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOS con contacto de FTO Sin Tratamiento Térmico.....	60
4.2.4	Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOS con contacto de FTO Con Tratamiento Térmico.	66
4.3	Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOM con contacto de FTO.....	70
4.4	Análisis de las Curvas I-V y discusión.....	72
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES		74

Anexos	76
Anexo 1-A – Proceso Experimental.....	76
Anexo 1-B – Preparación del óxido de Estaño dopado con flúor.	77
INDICE DE FIGURAS.....	79
INDICE DE TABLAS.....	82
BIBLIOGRAFÍA.	83

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN E HIPÓTESIS

1.1 INTRODUCCIÓN.

Actualmente uno de los materiales semiconductores más importante para la fabricación de dispositivos electrónicos es el silicio, aunque presenta desventajas ópticas, como una banda prohibida indirecta, que lo convierte en un carente emisor de luz, el estudio de su comportamiento eléctrico y fotoeléctrico ha hecho que el silicio tome un papel preponderante en la tecnología electrónica. Partiendo de la necesidad de generar semiconductores que logren adsorción y emisión de luz, y debido al gran interés dentro de la investigación y la industria, el óxido de silicio fuera de estequiometría (SiO_x) es un material importante por sus propiedades ópticas y eléctricas. A partir del descubrimiento de la emisión de luz visible en silicio poroso por Canham en 1990 [1], muchos investigadores han estudiado las propiedades de emisión de materiales con compuestos de silicio, estos materiales pueden contener en su composición tanto silicio (en forma de nanopartículas), óxido de silicio no estequiométrico (SiO_x), óxido de silicio estequiométrico (SiO_2) y defectos. Uno de estos materiales es el óxido de silicio no estequiométrico, el cual es un material con interesantes características estructurales, eléctricas y ópticas, las cuales varían con el exceso de silicio y defectos contenidos en las películas. La variación de las propiedades estructurales, ópticas y eléctricas debido al contenido de exceso de silicio y defectos en el óxido de silicio no estequiométrico lo hacen muy atractivo para fabricar dispositivos optoelectrónicos. Estas características han dado lugar a varios tipos de aplicaciones como guías de onda, memorias no volátiles, supresores de picos, dispositivos de detección y radiación de luz etc. El presente trabajo de tesis propone el estudio de las características ópticas, eléctricas y fotoeléctricas de estructuras tipo $\text{Al}(\text{o FTO})/\text{SiO}_x/\text{c-Si}/\text{Al}$ con películas de óxido de silicio fuera de estequiometría, el efecto de estas nanoestructuras se espera sea la adsorción de alguna longitud de onda en el visible, con la finalidad de obtener fotodetectores [2], [3], que dependiendo de su espesor y estructura de la película SiO_x puedan ser aplicada en la fotodetección a diferentes longitudes de onda.

1. 2 JUSTIFICACION.

En la investigación de materiales semiconductores que logren absorción y emisión de luz a partir del silicio presenta una gran oportunidad debido a que es un material muy abundante en la naturaleza y su avance tecnológico es impresionante. La fabricación de dispositivos cada vez de menor tamaño incrementa el análisis a escalas nanométricas donde el comportamiento óptico y eléctrico depende del material y presenta muchas ventajas. Por lo tanto, la variación de las propiedades ópticas y eléctricas del SiO_x debido al contenido de exceso de silicio (nanocristales de silicio) y defectos en la estructura del óxido de silicio no estequiométrico lo hacen muy atractivo para fabricar dispositivos optoelectrónicos. Por lo tanto, estos dispositivos pueden ser mejorados a partir del estudio de estas propiedades en las películas de SiO_x . El estudio de las películas de SiO_x en estructuras tipo MOS nos abre la posibilidad y nos da un camino para el desarrollo de diversos dispositivos optoelectrónicos, tales como emisores de luz y fotodetectores, los cuales son compatibles con la tecnología de circuitos integrados a base de silicio y tendrían ventajas en cuanto al costo y rapidez de fabricación.

1.3 HIPOTESIS.

La presente tesis está enfocada en la caracterización óptica y eléctrica de estructuras tipo MOS con SiO_x para su posible aplicación en fotodetectores. Se realizaron películas de SiO_x con diversos parámetros de fabricación, y se emplearon dos tipos de compuertas, una estructura con compuerta de Aluminio y la otra con FTO (óxido de estaño dopado con flúor). Las películas de SiO_x de película delgada tienen propiedades ópticas y estructurales muy interesantes, las cuales pueden ser usadas como capas absorbentes de radiación UV-Visible que pueden ser aplicadas en la fotodetección, esto debido al efecto combinado de los nanocristales de silicio y defectos presentes en la película SiO_x .

Por lo tanto, la investigación para la obtención y caracterización eléctrica y fotoeléctrica de estos dispositivos tipo MOS permitirá investigación de calidad en la aplicación de dispositivos semiconductores.

1.4 OBJETIVOS.

1.4.1 Objetivo general.

Investigación de las propiedades ópticas y eléctricas de las estructuras tipo MOS con SiO_x, y analizar las propiedades eléctricas corriente-voltaje (I-V) y capacitancia-voltaje (C-V) obtenidas en oscuridad y con luz, y usar esos resultados para la posible aplicación en fotodetectores.

1.4.2 Objetivos Particulares.

2. Analizar la teoría de operación de estructuras tipo MOS, efecto fotoeléctrico y fotodetectores de silicio.
3. Establecer la metodología para la caracterización eléctrica y óptica, así como la puesta en operación de equipos de medición óptica del laboratorio de mediciones fotoeléctricas del CIDS-ICUAP.
4. Colaborar en el depósito y caracterización estructural y óptica de las películas SiO_x. Así como obtener las estructuras MOS con aluminio y FTO.
5. Caracterizar eléctricamente las estructuras tipo MOS obtenidas, en oscuridad y con luz (efecto fotoeléctrico) y graficar los resultados obtenidos.
6. Analizar los resultados obtenidos y realizar la escritura de la Tesis de Licenciatura.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Silicio.

El silicio es una sustancia que tiene una estructura química muy similar a la del carbono, sustancia base de los seres vivos, es una sustancia con estructura tetravalente del grupo central de la tabla periódica de los elementos. Por otro lado, el óxido de silicio (SiO_2), es un compuesto de alta dureza y baja conductividad eléctrica.

El silicio presenta tres estructuras: la cristalina, amorfa y policristalina. (Figura 2.1) [4].

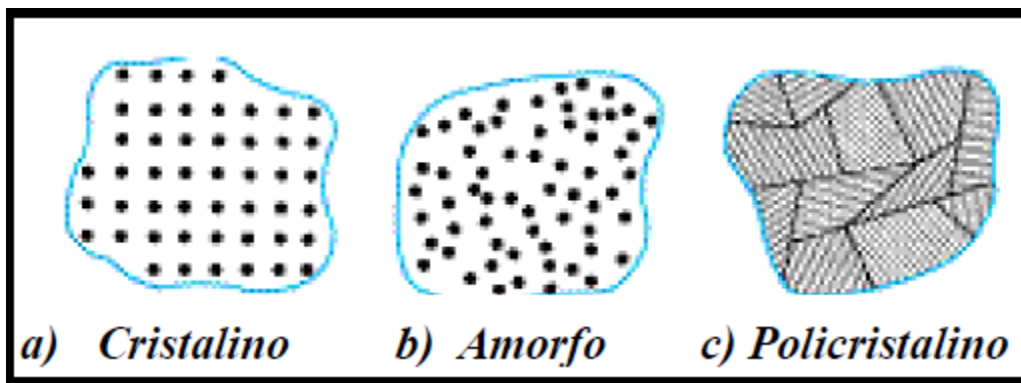


Figura 1 Estructuras que presenta el Silicio [5].

2.2 Propiedades Semiconductoras del Silicio.

Un material de silicio puro se llama semiconductor intrínseco, y su resistividad es demasiado baja para ser un aislante y demasiado alta para ser un conductor. Tiene una alta resistividad y una rigidez dieléctrica muy alta (más de 200kV/cm). La resistividad de un semiconductor intrínseco, y sus portadores de carga disponibles para la conducción, se pueden cambiar, conformarse en capas y graduar por implantación de impurezas específicas. Al proceso de agregar impurezas se le llama dopado, que implica agregar un átomo de impureza por más de un millón de átomos de silicio. Mediante distintas impurezas, concentraciones y formas de dopado, alta tecnología de fotolitografía, con corte láser, grabado y aislamiento se producen los dispositivos semiconductores del tipo P o tipo N [5].

2.3 Dióxido de Silicio.

El dióxido de silicio (SiO_2) es un aislante, que contrasta con las propiedades semiconductoras del silicio. La facilidad para producir una película delgada de SiO_2 en la superficie de una oblea de silicio es una de las características atractivas del silicio como un material semiconductor.

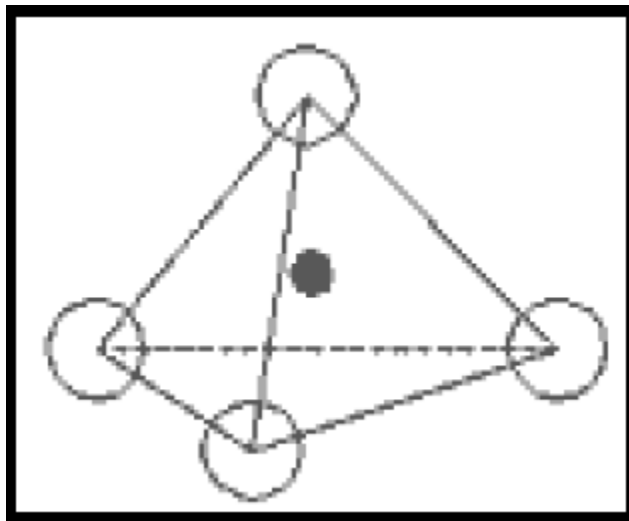


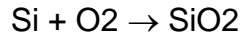
Figura 2 Estructura del Dióxido de Silicio.

El dióxido de silicio cumple una serie de funciones importantes en la fabricación de dispositivos semiconductores:

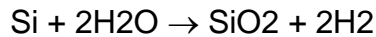
- 1) Se utiliza como una mascarilla para prevenir la difusión o la implantación de iones de los materiales dopantes en el silicio.
- 2) Puede usarse para aislar dispositivos en el circuito.
- 3) Es un componente crítico en algunos tipos de dispositivos MOS.
- 4) Proporciona aislamiento eléctrico entre los niveles en sistemas de metalización de varios niveles.

Durante la manufactura de semiconductores se utilizan varios procesos para formar el SiO_2 , dependiendo del momento en el que debe agregarse el óxido durante la fabricación del dispositivo. El proceso más común es la oxidación térmica, que

resulta adecuada para el depósito de las películas de SiO₂ sobre sustratos de silicio. En la **oxidación térmica**, la oblea se expone a una atmósfera de oxidación a una temperatura elevada; se usan atmósferas de oxígeno o vapor de agua y se producen las siguientes reacciones, respectivamente:



O bien



Las temperaturas típicas usadas en la oxidación térmica del silicio varían entre 900 y 1 300 °C (1 650 y 2 350 °F). Al controlar la temperatura y el tiempo, se obtienen películas de óxidos con espesores predecibles. Las películas producidas por la oxidación térmica poseen estructura amorfa, buena uniformidad y baja incidencia de fallas por dislocamientos y defectos [6].

2.4 Óxido de Silicio Rico en Silicio.

El silicio es un semiconductor que posee una banda indirecta, es decir el decaimiento desde niveles excitados ocurre a través de procesos no radiactivos (lo cual hace del silicio un pésimo material para manejar funciones optoelectrónicas), por ello a la fecha se realizan estudios sobre una gran variedad de materiales compatibles con la tecnología de fabricación de circuitos integrados de silicio, que sean capaces de realizar funciones optoelectrónicas. El descubrimiento de propiedades optoelectrónicas en algunos materiales basados en silicio; como el óxido de silicio no-estequiométrico (SiO_x, x<2, o SRO) y el silicio poroso, a finales de la década de los 70's y en los 80's, respectivamente, abrieron la posibilidad de integrar funciones fotónicas a la tecnología del silicio. El exceso de silicio y la forma en que se obtiene, producen cambios en las propiedades estructurales, eléctricas y ópticas de estos materiales. Las películas de SRO (Silicon Rich Oxide, SRO, por sus siglas en inglés) se obtienen mediante diferentes métodos como: depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD por sus siglas en inglés), depósito

químico en fase vapor activado por plasma (PECVD) o bien por implantación de iones (SITO por sus siglas en inglés) entre otras. En el presente trabajo de tesis es usada la técnica de depósito químico en fase vapor por filamento caliente (HFCVD por sus siglas en inglés).

2.5 Semiconductores Intrínsecos.

Se dice que un semiconductor es intrínseco cuando se encuentra en estado puro, o sea, que no contiene ninguna impureza, ni átomos de otro tipo dentro de su estructura. En ese caso, la cantidad de huecos que dejan los electrones en la banda de valencia al atravesar la banda prohibida será igual a la cantidad de electrones libres que se encuentran presentes en la banda de conducción.

Cuando se eleva la temperatura de la red cristalina de un elemento semiconductor intrínseco, algunos de los enlaces covalentes se rompen y varios electrones pertenecientes a la banda de valencia se liberan de la atracción que ejerce el núcleo del átomo sobre los mismos. Esos electrones libres saltan a la banda de conducción y allí funcionan como electrones de conducción, pudiéndose desplazar libremente de un átomo a otro dentro de la propia estructura cristalina, siempre que el elemento semiconductor se estimule con el paso de una corriente eléctrica.

2.6 Semiconductores Extrínsecos.

Cuando se habla de semiconductores extrínsecos se hace referencia a semiconductores intrínsecos que han sido modificados mediante un proceso llamado dopado, que consiste en introducirles impurezas, es decir, agregar características de otros elementos, para que pueda haber conducción eléctrica.

2.6.1 Material Tipo P.

Si el silicio puro se dopa con una pequeña cantidad de un elemento del grupo III, como boro, galio o indio, se introduce un sitio vacante, llamado hueco en la red

cristalina del silicio. A semejanza de un electrón, se puede considerar que un hueco es un portador móvil de carga, porque puede llenarse con un electrón, el cual a su vez deja un hueco. Estos huecos aumentan considerablemente la conductividad del material. Cuando el silicio dopado en forma ligera con una impureza como boro, recibe el nombre de dopado p y el material que resulta se llama semiconductor tipo P [5].

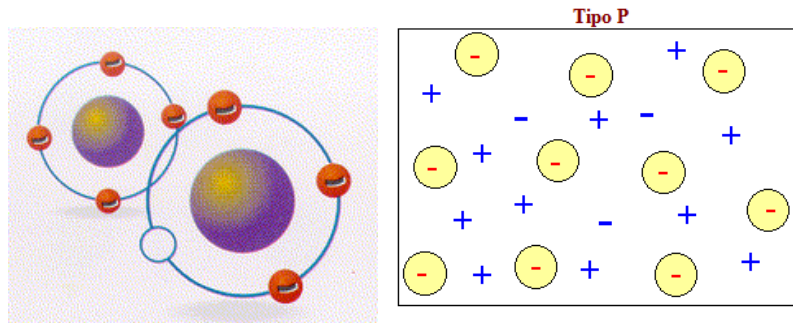


Figura 3 (a) Elemento con 4 y 3 electrones de valencia, (b) Portadores mayoritarios para un material tipo P [5].

2.6.2 Material Tipo N.

Sí el silicio puro se dopa con una pequeña cantidad de un elemento del grupo V, como fósforo, arsénico o antimonio, cada átomo del dopante forma un enlace covalente dentro de la red cristalina del silicio y queda un electrón suelto. Estos electrones sueltos aumentan mucho la conductividad del material. Cuando el silicio se dopa en forma leve con una impureza como fósforo, recibe el nombre de dopado n y el material que resulta se llama semiconductor tipo N [5].

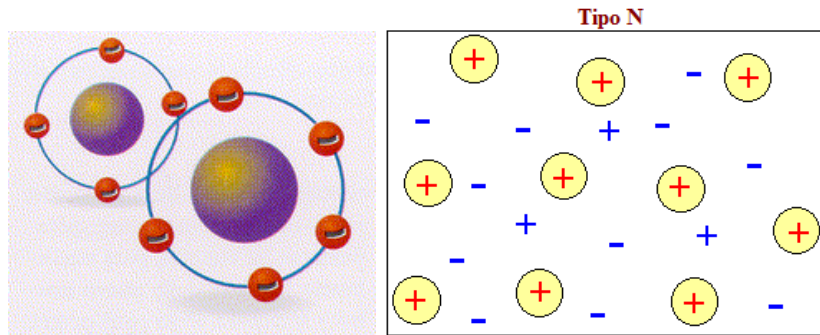


Figura 4 (a) Elemento con 4 y 5 electrones de valencia (b) Portadores mayoritarios y minoritarios para un material tipo N [5].

2.7 Unión P-N.

Una unión p-n consiste en dos capas de material, de tipo p y de tipo n, respectivamente, unidas íntimamente. Realmente la unión debe de ser hecha con tanto cuidado que no se pueda realizar poniendo simplemente dos placas de cristal semiconductor, por muy preparadas y limpias que puedan estar. El método clásico para preparar una unión p-n comienza con una sola oblea de silicio, por ejemplo, de tipo n. Desde una de sus caras se difunden sobre ella impurezas de tipo p en concentración suficiente para sobrepasar las propiedades originales de tipo n. Este proceso se lleva a cabo a altas temperaturas en un horno especialmente diseñado. Otro método utiliza la deposición o crecimiento de una capa epitaxial de material tipo n, por ejemplo, sobre una oblea tipo p. Este proceso se realiza en una cámara de vacío. El método más simple de formar una unión rectificadora consiste en juntar por fusión un pequeño fragmento de metal a un cristal semiconductor [7].

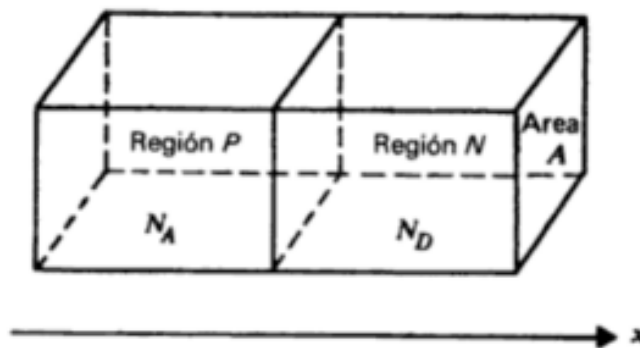


Figura 5 Unión P-N [7]

2.7.1 Polarización directa.

La polarización directa se produce cuando se conecta el polo positivo de la pila a la parte P de la unión PN y la negativa a la N. En este caso, la batería disminuye la barrera de potencial de la zona de carga espacial, permitiendo el paso de la corriente de electrones a través de la unión como se muestra en la Figura 6.

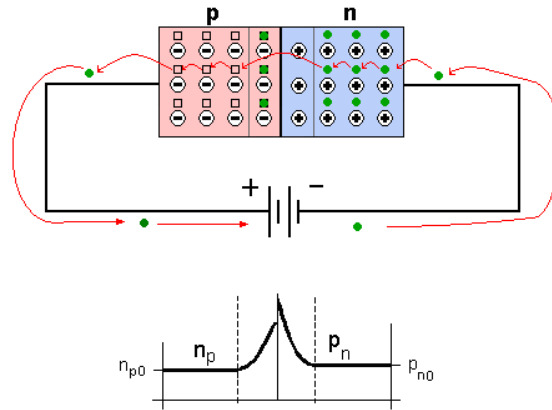


Figura 6 Polarización directa de una unión P-N [9].

En la polarización directa podemos observar que:

- El polo negativo de la batería repele los electrones libres del cristal n, con lo que estos electrones se dirigen hacia la unión p-n.
- El polo positivo de la batería atrae a los electrones de valencia del cristal p, esto es equivalente a decir que empuja a los huecos hacia la unión p-n.

Cuando la diferencia de potencial entre los bornes de la batería es mayor que la diferencia de potencial en la zona de carga espacial, los electrones libres del cristal n, adquieren la energía suficiente para saltar a los huecos del cristal p, los cuales previamente se han desplazado hacia la unión p-n [9].

Una vez que un electrón libre de la zona n salta a la zona p atravesando la zona de carga espacial, cae en uno de los múltiples huecos de la zona p convirtiéndose en electrón de valencia. Una vez ocurrido esto el electrón es atraído por el polo positivo de la batería y se desplaza de átomo en átomo hasta llegar al final del cristal p, desde el cual se introduce en el hilo conductor y llega hasta la batería.

De este modo, con la batería cediendo electrones libres a la zona n y atrayendo electrones de valencia de la zona p, aparece a través de la unión una corriente eléctrica constante hasta el final.

2.7.2 Polarización inversa.

En este caso, el polo negativo de la batería se conecta a la zona p y el polo positivo a la zona n, como se muestra en la figura 9.

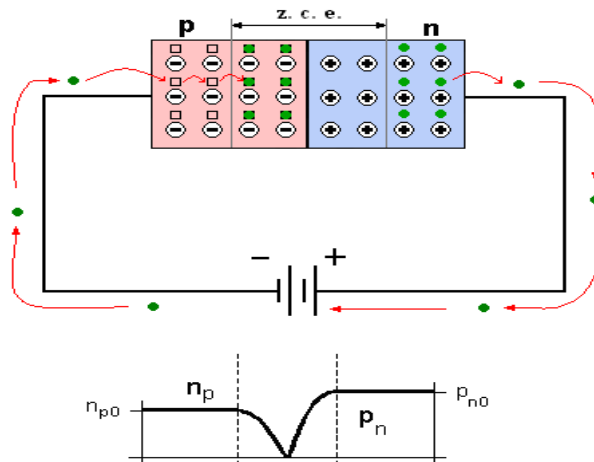


Figura 7 Polarización inversa de una unión P-N [9].

Para el caso de la polarización inversa se aumenta la zona de carga espacial, y la tensión en dicha zona hasta que se alcanza el valor de la tensión de la batería, tal y como se explica a continuación:

El polo positivo de la batería atrae a los electrones libres de la zona n, los cuales salen del cristal n y se introducen en el conductor dentro del cual se desplazan hasta llegar a la batería. A medida que los electrones libres abandonan la zona n, los átomos pentavalentes que antes eran neutros, al verse desprendidos de su electrón en el orbital de conducción, adquieren estabilidad (8 electrones en la capa de valencia, ver semiconductor y átomo) y una carga eléctrica neta de +1, con lo que se convierten en iones positivos.

El polo negativo de la batería cede electrones libres a los átomos trivalentes de la zona p. Recordemos que estos átomos sólo tienen 3 electrones de valencia, con lo que una vez que han formado los enlaces covalentes con los átomos de silicio,

tienen solamente 7 electrones de valencia, siendo el electrón que falta el denominado hueco. El caso es que cuando los electrones libres cedidos por la batería entran en la zona p, caen dentro de estos huecos con lo que los átomos trivalentes adquieren estabilidad (8 electrones en su orbital de valencia) y una carga eléctrica neta de -1, convirtiéndose así en iones negativos [9].

Este proceso se repite una y otra vez hasta que la zona de carga espacial adquiere el mismo potencial eléctrico que la batería.

En esta situación, el diodo no debería conducir la corriente; sin embargo, debido al efecto de la temperatura se formarán pares electrón-hueco (ver semiconductor) a ambos lados de la unión produciendo una pequeña corriente (del orden de $1 \mu\text{A}$) denominada corriente inversa de saturación. Además, existe también una denominada corriente superficial de fugas la cual, como su propio nombre indica, conduce una pequeña corriente por la superficie del diodo; ya que en la superficie, los átomos de silicio no están rodeados de suficientes átomos para realizar los cuatro enlaces covalentes necesarios para obtener estabilidad. Esto hace que los átomos de la superficie del diodo, tanto de la zona n como de la p, tengan huecos en su orbital de valencia con lo que los electrones circulan sin dificultad a través de ellos. No obstante, al igual que la corriente inversa de saturación, la corriente superficial de fugas es despreciable.

2.8 Capacitor MOS.

El capacitor Metal-Óxido-Semiconductor (MOS), ha sido el dispositivo semiconductor más usado en el estudio de superficies semiconductoras, así como de los aislantes utilizados en la integración de circuitos. Este dispositivo fue propuesto como un capacitor controlado por voltaje por J.L.Moll. En la siguiente figura se muestra la estructura de un capacitor MOS

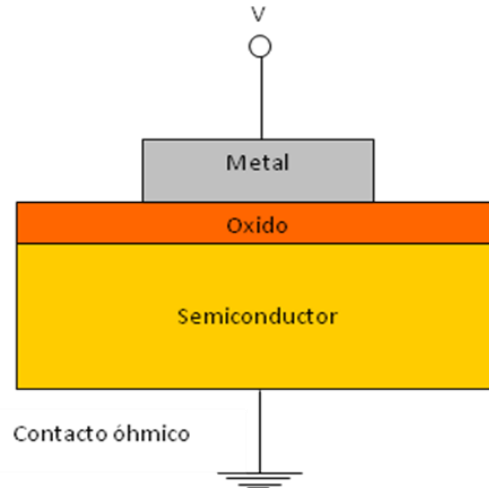


Figura 8 Esquema de un capacitor MOS.

El objetivo principal de la capa de óxido es proporcionar un aislamiento entre el metal y el semiconductor de modo que no haya esencialmente ningún flujo de corriente entre el contacto metálico de la parte superior y el contacto metálico de la parte inferior del semiconductor.

Durante la oxidación del silicio existen algunos problemas tecnológicos y efectos colaterales que se presentan como contaminantes, los cuales producen problemas en la interfaz óxido-silicio, y estos pueden ser estados permitidos en la banda prohibida del silicio [8].

2.9 Comportamiento eléctrico de la estructura MOS.

Cuando se aplica una tensión positiva a la terminal de compuerta de un MOSFET tipo N, se crea un campo eléctrico bajo la capa de óxido que incide perpendicularmente sobre la superficie del semiconductor. Este campo atrae a los electrones hacia la superficie bajo el óxido, repeliendo los huecos hacia el sustrato. Si el campo eléctrico es muy intenso se logra crear en dicha superficie una región muy rica en electrones, denominada canal N, que permite el paso de corriente de la fuente al drenador; cuanto mayor sea la tensión de compuerta mayor será el campo

eléctrico y, por tanto, la carga en el canal. Una vez creado el canal, la corriente se origina aplicando una tensión en el drenador positiva respecto a la de la fuente [8]. En un MOSFET tipo P el funcionamiento es a la inversa, ya que los portadores son huecos. En este caso, para que exista conducción el campo eléctrico perpendicular a la superficie debe tener sentido opuesto al del MOS tipo N, por lo que la tensión aplicada ha de ser negativa. Ahora los huecos son atraídos hacia la superficie bajo el óxido, y los electrones repelidos hacia el sustrato. Si la superficie es muy rica en huecos se forma el canal P. Cuanto más negativa sea la tensión de compuerta mayor puede ser la corriente (más huecos en el canal P), corriente que se establece al aplicar al terminal de drenador una tensión negativa respecto a la de la fuente. La corriente tiene sentido opuesto a la de un MOSFET tipo N.

2.9.1 Polarización de una estructura MOS.

Cuando un dispositivo ideal MOS es polarizado con voltajes positivos o negativos básicamente pueden existir tres casos en la superficie del semiconductor. Para un semiconductor tipo n, cuando un voltaje positivo ($V > 0$) es aplicado al metal, la superficie de la banda de conducción se dobla hacia abajo y está más cerca del nivel de Fermi [9]. Para un dispositivo ideal MOS, no hay flujo de corriente en la estructura, así el nivel de Fermi se mantiene constante en el semiconductor. Entonces la densidad de portadores depende exponencialmente de la diferencia de energía $E_C - E_F$. Este doblamiento de bandas causa una acumulación de portadores mayoritarios (electrones) cerca de la superficie del semiconductor. Este es el caso de acumulación, cuando un pequeño voltaje negativo es aplicado, las bandas se doblan hacia arriba y los portadores mayoritarios son alejados de la superficie de semiconductor. Este es el caso de agotamiento de portadores. Cuando se aplica un voltaje negativo mayor, el doblamiento de las bandas es aún más hacia arriba, así que el nivel intrínseco E_i en la superficie cruza sobre el nivel de Fermi E_F . En este punto el número de huecos (portadores minoritarios) en la superficie es mayor que el de electrones (portadores mayoritarios), la superficie es así invertida, y este es el caso de inversión.

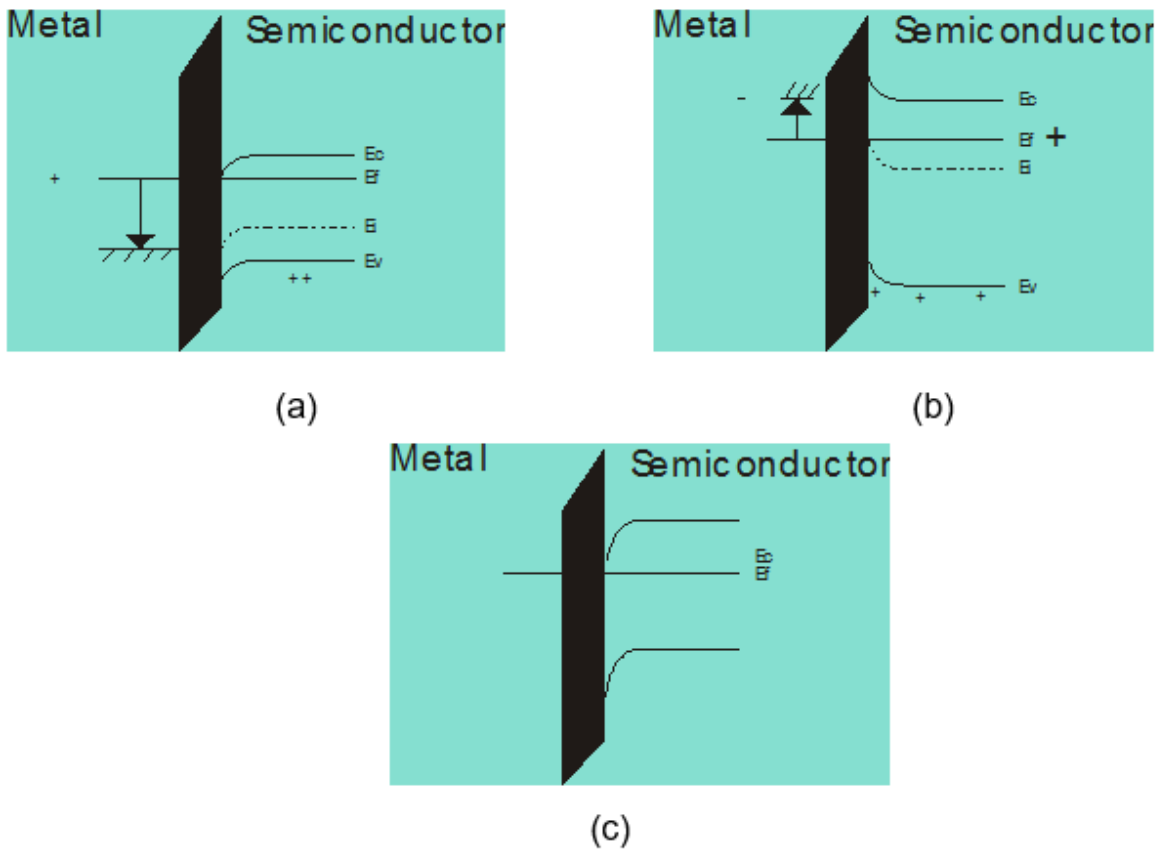


Figura 9 Comportamiento de la superficie del semiconductor cuando un dispositivo MOS es polarizado. (a) Acumulación. (b) Deserción. (c) Inversión

2.10 Efecto Fotoeléctrico.

El efecto fotoeléctrico es el fenómeno en el que las partículas de luz llamadas fotones, impactan con los electrones de un metal arrancando sus átomos. El electrón se mueve durante el proceso, dado origen a una corriente eléctrica (como se puede observar en la figura. El efecto fotoeléctrico fue descubierto y descrito por Heinrich Hertz en 1887, al observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores cuando se ilumina con luz ultravioleta que cuando se deja en la oscuridad [10].

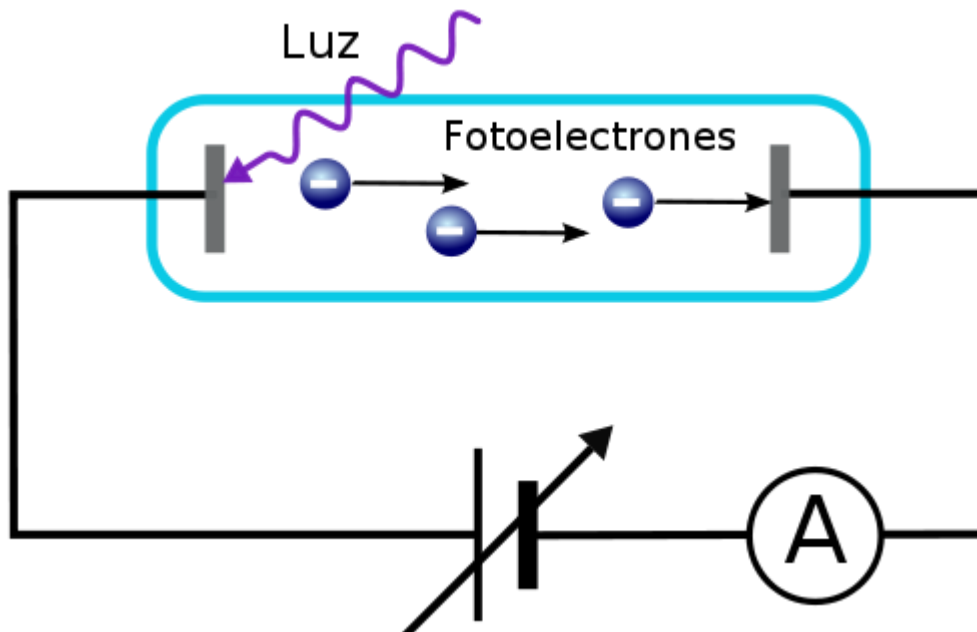


Figura 10 Esquema del efecto Fotoeléctrico [10]

En 1905, mediante el uso de nuevos conceptos de la mecánica cuántica, Einstein supuso que la radiación incidente consistía en paquetes de energía localizada $E = h\nu$, donde ν es la frecuencia de la radiación y h es la constante de Planck. Cuando un fotón incide sobre el metal, transfiere toda su energía a alguno de los electrones. Si esta energía es suficiente para romper la ligadura del electrón con el metal, entonces el electrón se desprende. Cuando los fotones caen sobre una superficie metálica puede ocurrir lo siguiente:

1. Los fotones son reflejados de acuerdo con las leyes de la óptica.
2. Los fotones desaparecen cediendo toda su energía para sacar los electrones.

Los principios básicos que rigen el efecto fotoeléctrico son los siguientes:

1. No hay emisión de electrones si la frecuencia de la luz incidente cae por debajo de la frecuencia umbral ν_0 , que es una característica del metal iluminado.

2. El efecto se observa si la frecuencia de la luz excede la frecuencia umbral, y el número de fotoelectrones emitidos es proporcional a la intensidad de la luz; sin embargo, la energía cinética máxima de los fotoelectrones es independiente de la intensidad de la luz, lo cual es posible explicar con los conceptos de la física clásica.
3. La energía cinética máxima de los fotoelectrones se incrementa con el aumento de la frecuencia de la luz.
4. Los electrones de la superficie se emiten casi de manera instantánea, incluso a bajas intensidades.

La teoría de Einstein, en cambio, predice que: Una radiación de frecuencia adecuada, aunque de intensidad sumamente baja, produce emisión de electrones en forma instantánea. Pasaron diez años de experimentación hasta que la nueva teoría fue corroborada y aceptada. Se determinó el valor de h a partir de experiencias de efecto fotoeléctrico y se encontró que concordaba perfectamente con el valor hallado por Planck a partir del espectro de radiación de cuerpo negro. Desde ese momento los físicos aceptaron que, si bien la luz se propaga como si fuera una onda, al interactuar con la materia (en los procesos de absorción y emisión) se comporta como un haz de partículas. Esta sorprendente conducta es lo que se ha llamado la dualidad onda-partícula de la luz.

2.11 Fotoconductividad.

La conductividad de los materiales semiconductores depende del número de electrones de la banda de conducción y también del número de huecos de la banda de valencia. La energía térmica asociada con las vibraciones de red puede excitar a los electrones y generar huecos y/o electrones libres. Como consecuencia de transiciones electrónicas inducidas por fotones en las cuales se absorbe luz, se pueden generar transportadores de carga adicionales; este incremento de conductividad se denomina fotoconductividad. De este modo, cuando se ilumina una muestra de material fotoconductor, la conductividad aumenta [11].

El principio básico sobre el que se basa la fotoconductividad es muy simple:

- Cuando un fotón de energía mayor o igual que la brecha prohibida del material incide sobre un semiconductor puede ser absorbido por el material, pasando un electrón a la banda de conducción, dejando un hueco (vacío) en la banda de valencia; estos dos portadores contribuyen al aumento de la conductividad del material. En este caso la conductividad es denominada intrínseca.
- En el caso de materiales con defectos, impurezas o cualquier tipo de distorsión puede ocurrir que un fotón de energía menor que la brecha prohibida del material sea absorbido y los electrones pasen a la banda de conducción o se formen huecos en la banda de valencia, en este caso solo se incrementa un tipo de portador. Este proceso da lugar a la fotoconductividad extrínseca.

2.12 Fotodetectores.

Los fotodetectores (o detectores de fotones) son dispositivos optoelectrónicos que absorben energía óptica y la convierten en corriente eléctrica (fotocorriente) bajo la condición de polarización inversa. Existen dos tipos fundamentales de detectores de luz, los térmicos y los fotónicos que operan con mecanismos de transducción diferentes. Los dispositivos fotónicos son dispositivos semiconductores cuya partícula principal es el fotón. Hay cuatro grupos de dispositivos fotónicos:

- Diodo emisor de luz (LED).
- Fotodetectores, los cuales electrónicamente detectan señales ópticas.
- Diodo láser (amplificación de luz por emisión estimulada por radiación), que tienen la característica de convertir la energía eléctrica a energía óptica.
- Celdas solares, que convierten energía óptica a energía eléctrica.

La operación de un fotodetector implica tres pasos:

- Generación de portadores por incidencia de la luz.
- Transporte y multiplicación de portadores por cualquier mecanismo de ganancia de corriente que esté presente.
- Generación de la fotocorriente en un circuito con polarización externa.

Los fotodetectores tienen muchas aplicaciones incluyendo al sensor infrarrojo en optoacopladores y detectores para las comunicaciones de fibra óptica. Para estas aplicaciones, el fotodetector debe tener una alta sensibilidad en las longitudes de onda de operación, alta velocidad de respuesta, y bajo ruido. Además, el fotodetector puede ser compacto, usar baja polarización de voltaje o corriente, y debe ser confiable bajo las condiciones de operación requeridas [12].

En la figura [11] se muestra un diagrama donde se presenta de manera simple la definición, así como las características y tipos de fotodetectores.

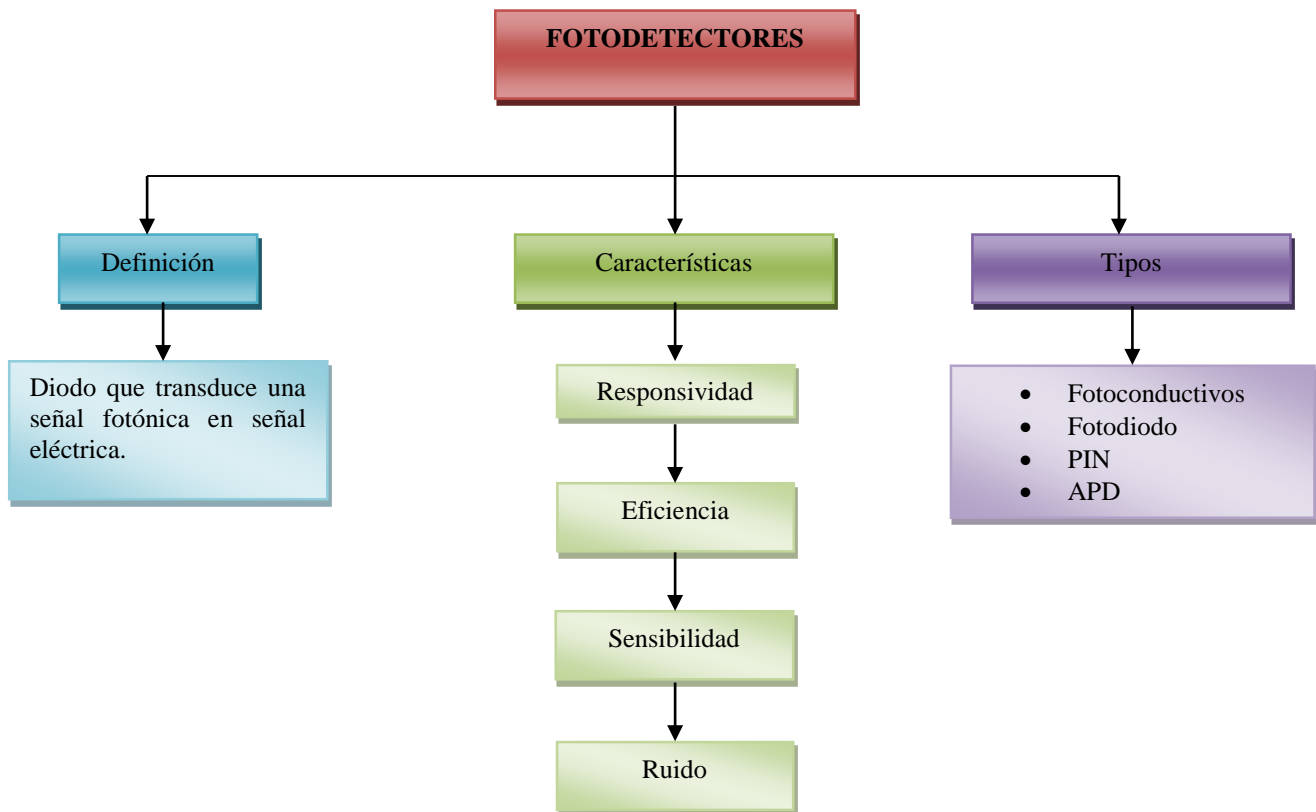


Figura 11 Clasificación de los fotodetectores

2.12.1 Teoría del Fotodetector.

La luz que entra por la ventana de un fotodetector se absorbe en el material intrínseco y agrega la energía suficiente para hacer que los electrones pasen de la banda de valencia a la banda de conducción. El aumento en la cantidad de electrones que pasan a la banda de conducción produce un aumento en la cantidad de huecos en la banda de valencia. Para hacer que la corriente pase por un fotodetector, se debe absorber luz de la energía suficiente para comunicar a los electrones de valencia la energía suficiente para que salten la banda prohibida. La banda prohibida, para el silicio, es 1.12 eV (electrón volts) [20].

La descripción matemática es la siguiente:

La equivalencia de unidades de energía es:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Así la banda prohibida para el silicio es:

$$E_g = (1.12 \text{ eV}) \left(1.6 \times 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} \right) = 1.792 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Y la energía:

$$E = h\nu$$

En donde:

$$h = \text{constante de Planck} = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J/Hz}$$

ν = frecuencia (Hertz)

Despejando se obtiene la frecuencia.

$$f = \frac{E}{h}$$

Para un fotodetector de Silicio

$$f = \frac{1.792 \times 10^{-19} \text{ J}}{6.63 \times 10^{-34} \frac{\text{J}}{\text{Hz}}} = 2.705 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Al pasar a longitud de onda se obtiene:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{2.705 \times 10^{14} \text{ Hz}} = 1109 \text{ nm/ciclo}$$

Así, la luz de longitudes de onda de 1109 nm o menores, o de frecuencias de $2.705 \times 10^{14} \text{ Hz}$ o mayores, es la que se requiere para hacer que haya electrones suficientes que salten la banda prohibida de un fotodiodo de silicio.

CAPITULO 3

TECNICAS Y PROCEDIMIENTOS
EXPERIMENTALES

Actualmente, la gran mayoría de los dispositivos optoelectrónicos se fabrican utilizando semiconductores inorgánicos, tales como el silicio, de esta forma se obtienen propiedades, ópticas y eléctricas excelentes. Actualmente es posible fabricar dispositivos tan diversos como transistores de película delgada (TFT, por sus siglas en inglés), celdas solares fotovoltaicas, diodos emisores de luz y fotodetectores. En el presente capítulo se presentan los métodos usados para obtener el SRO y las estructuras MOS, así como las propiedades ópticas del SRO y de las propiedades eléctricas de las estructuras MOS.

3.1 Sistema CVD.

El depósito químico en fase vapor de sustancias químicas (CVD) es un sistema que consiste en la deposición de películas sobre un sustrato. Las unidades de CVD trabajan en general como un sistema cerrado, y por consiguiente la exposición a agentes químicos es pequeña o nula [13], [14].

En la presente tesis se utilizó la técnica HFCVD (Hot filament chemical vapor deposition o depósito químico en fase vapor asistido por filamento caliente) para la deposición de las películas de SiO_x que sirven como el óxido en los capacitores MOS realizados en el presente trabajo.

Estos depósitos se realizaron en el Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores de la BUAP.

3.1.2 Sistema de Depósito HFCVD.

El sistema de depósito químico en fase vapor activado por un filamento caliente (HFCVD) está constituido elementalmente por un reactor hermético vertical, un tanque de hidrógeno de alta pureza, una bomba de vacío, una fuente de alimentación para el filamento, tubería de acero inoxidable, llaves de paso y elementos que nos permiten medir y visualizar el flujo de hidrógeno. El reactor hermético está fabricado con acero inoxidable, los elementos más importantes son:

el reactor de acero inoxidable, filamento de tungsteno, soportes para el filamento, tubo de entrada de hidrogeno dirigido al filamento, porta-muestras, regadera para el flujo de hidrógeno conjunto de aro-sellos. El reactor de acero inoxidable es la parte central del sistema y del reactor, ya que es donde se ejecuta la reacción química [15].

3.2 Procedimiento de depósito de las películas de SiOx mediante HFCVD.

Las películas de SiOx fueron depositadas sobre sustratos de silicio y cuarzo, utilizando como fuente sólida cuarzo. Los sustratos de silicio se obtuvieron de clivar obleas de silicio tipo n en piezas de 9mm por 9mm. Dichas obleas tienen las siguientes características:

- Diámetro de 4 in.
- Espesor de 500 nm.
- Orientación (1 0 0).
- Tipo n.
- Baja resistividad (5-10 Ω -cm).

Los sustratos de cuarzo fueron clivados con las mismas dimensiones que los de silicio. Es de suma importancia mencionar que los sustratos se sometieron a un proceso de limpieza descrito detalladamente en el anexo 1C, con el fin de eliminar el óxido nativo, grasa y compuesto orgánico en la superficie, esto se describe en el anexo 1-A.

Para la obtención de las fuentes de cuarzo, se utilizaron barras de cuarzo fundido de 2 cm de largo por 2 mm de grosor. El depósito se llevó a cabo mediante la técnica de HFCVD la cual permite reducir el tiempo de obtención de las películas delgadas y modificar parámetros de manera sencilla, con lo cual se logran variedad películas con diversas propiedades y comportamientos [15].

Para el caso de las estructuras MOM el depósito del polisilicio sobre sustratos de

cuarzo se obtuvieron mediante un depósito de silicio policristalino en un horno de LPCVD de 4" con una presión de silano de SiH_4 de 1.5 Torr y un flujo de silano SiH_4 de 3.4 lpm a una temperatura de depósito de 650 °C durante 20 min. Posteriormente se realiza el dopado del silicio policristalino, este procedimiento se hizo en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

3.3 Sistema de Spray-Pirolisis (Roció Pirolítico Ultrasónico).

En el presente trabajo de tesis, se realizaron los depósitos para los contactos Óhmicos de óxido de estaño dopado con flúor (FTO), mediante la técnica de Roció Pirolítico Ultrasónico (RPU), que ya ha sido empleada con anterioridad en el Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores de la BUAP para el depósito de películas conductoras transparentes tales como el FTO y el óxido de Zinc (ZnO). Esta técnica es muy efectiva y es de muy bajo costo (ya que no requiere equipos de vacío), además que reporta altas tasas de depósito, se pueden hacer depósitos en áreas grandes y puede ser realizado a niveles industriales. El sistema de aparatos usados para implementar el proceso de pirolisis es relativamente barato y nada sofisticado. Básicamente consiste en dos zonas independientes, conectadas mediante una manguera y una boquilla de cuarzo y son: la cámara de atomización y el reactor pirolítico. El roció generado en la primera zona es arrastrado por un gas (gas de transporte) a través de la boquilla a la segunda zona, donde se llega a una reacción pirolítica en un sustrato caliente. El producto de la reacción pirolítica es un material en forma de película o polvo, la composición, adherencia y morfología del mismo dependen de las condiciones experimentales del depósito, como lo son el caudal, la temperatura del sustrato y la frecuencia requerida para generar el roció. Ambas zonas se pueden desmantelar por completo para propósitos de limpieza. Una de las ventajas que hace el proceso tan simple, es el hecho de que la técnica de Roció Pirolítico no hace uso de sistemas de vacío. El sistema se encuentra aislado del medio ambiente mediante una ventana de vidrio, además de que contiene un extractor de gases residuales, lo cual resulta bastante conveniente por los solventes ocupados para la deposición de la película conductora

transparente un ejemplo del sistema se muestra en la Figura 12. La reacción pirolítica determina la cinética de depósito, ésta se da cuando el rocío se aproxima a la superficie del substrato, el cual es calentado mediante un sistema de calefactor, que consiste en un recipiente con estaño, que en su fondo tiene acopladas varias resistencias y en su superficie un termopar de aluminio, ambas cosas permiten un incremento controlado de la temperatura, generando así una cama de estaño caliente, que es líquida o sólida dependiendo de la temperatura a la que se trabaja, es mayor o menor al punto de fusión del estaño 235°C. En este trabajo de tesis se utilizaron temperatura de 400°C, por lo cual la cama de estaño es líquida. La cama de estaño asegura un contacto térmico perfecto con el substrato, además de proveer homogeneidad de calentamiento sobre áreas grandes en un intervalo de temperaturas relativamente extenso, por encima del punto de fusión del estaño, además de tener una presión de vapor baja y buena conductividad térmica. La medida de la temperatura que reporta el termómetro, puede ser un par de grados Celsius diferente a la temperatura efectiva del depósito (temperatura de la superficie del substrato), debido al gradiente de temperaturas entre el estaño y la superficie del substrato, generado por la conductividad térmica del substrato. Para verificar éstas medias se utilizó un pirómetro infrarrojo. La configuración del reactor pirolítico es gobernada por los requerimientos del depósito, ya sea que se desee recubrir una superficie pequeña o una grande, con un depósito homogéneo o no homogéneo [16].

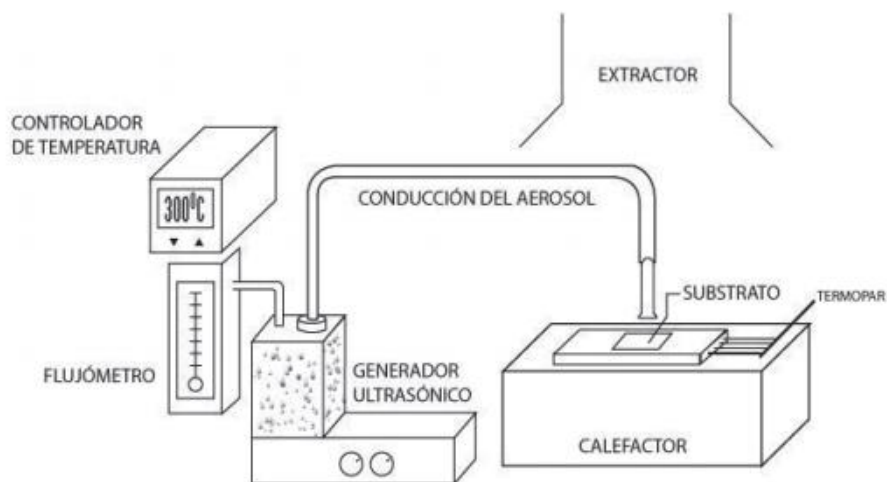


Figura 12 Esquema del Proceso de Rocío Pirolítico Ultrasónico [16].

3.4 Fabricación del óxido de Estaño dopado con flúor (FTO).

Los Óxidos Conductores Transparentes (TCO, por sus siglas en inglés.) son materiales que presentan propiedades interesantes en el espectro de luz visible y en el espectro de infrarrojo. Dentro de las aplicaciones tecnológicas más comunes de los TCOs destacan: contactos de celdas solares, sensores de gas, dispositivos optoelectrónicos, sensores fotodetectores, contactos óhmicos, entre otras [17].

Las propiedades estructurales, morfológicas, eléctricas y ópticas de las películas de óxido de estaño dopadas con flúor (FTO), han presentado características muy interesantes, además de su fácil proceso de deposición, por lo cual se eligió para realizar los contactos conductores transparentes de los dispositivos MOS y MOM fabricados y caracterizados en el presente trabajo de tesis.

3.5 Metalización al vacío.

La metalización al vacío consiste en evaporar un metal, en una cámara de vacío para que se deposite sobre los sustratos. Estos sustratos pueden ser piezas de plástico, vidrio o metal que dentro de la cámara de vacío el metal se deposite de forma uniforme en todas sus superficies [13]

Una vez hechos los contactos Óhmicos de FTO, tienen que conectarse para que el dispositivo pueda ejecutar funciones de circuito eléctrico u electrónico. Entonces en la parte posterior del dispositivo se deposita Aluminio. Este proceso se llama Metalización, y es una manera para conectar las partes superiores y posteriores del capacitor MOS, para que conduzca la energía eléctrica al interior del dispositivo. El amplio proceso de metalización se diferencia en función del tamaño y el espesor de las capas de metales y otros materiales que se depositan. Para esta tesis se utilizó una película delgada, con espesor de una micra. El metal utilizado para realizar la metalización del capacitor MOS, fue el Aluminio. Se usa la técnica de evaporación en alto vacío. Para realizar cualquier tipo de metalización de película delgada al vacío, el sistema suele constar en los siguientes componentes básicos:

- Una cámara que pueda evacuarse para conseguir un vacío adecuado para realizar el vacío.
- Una bomba para reducir los gases ambientales en la cámara.
- La instrumentación adecuada para la vigilancia del nivel de vacío.
- Un método de depositar o evaporar las capas del material usado para la metalización.

En esta técnica de deposición, se calienta el material hasta su punto de fusión mediante el paso de corriente eléctrica a través de un filamento de tungsteno sobre el cual se deposita el material (efecto Joule) un ejemplo del sistema usado se muestra en la figura 13. El material en forma de vapor se condensa entonces sobre el sustrato. El montaje de la técnica es simple, y resulta muy apropiada para depositar metales y algunos compuestos de bajo punto de fusión (Al, Ag, Au, SiO₂, etc.).

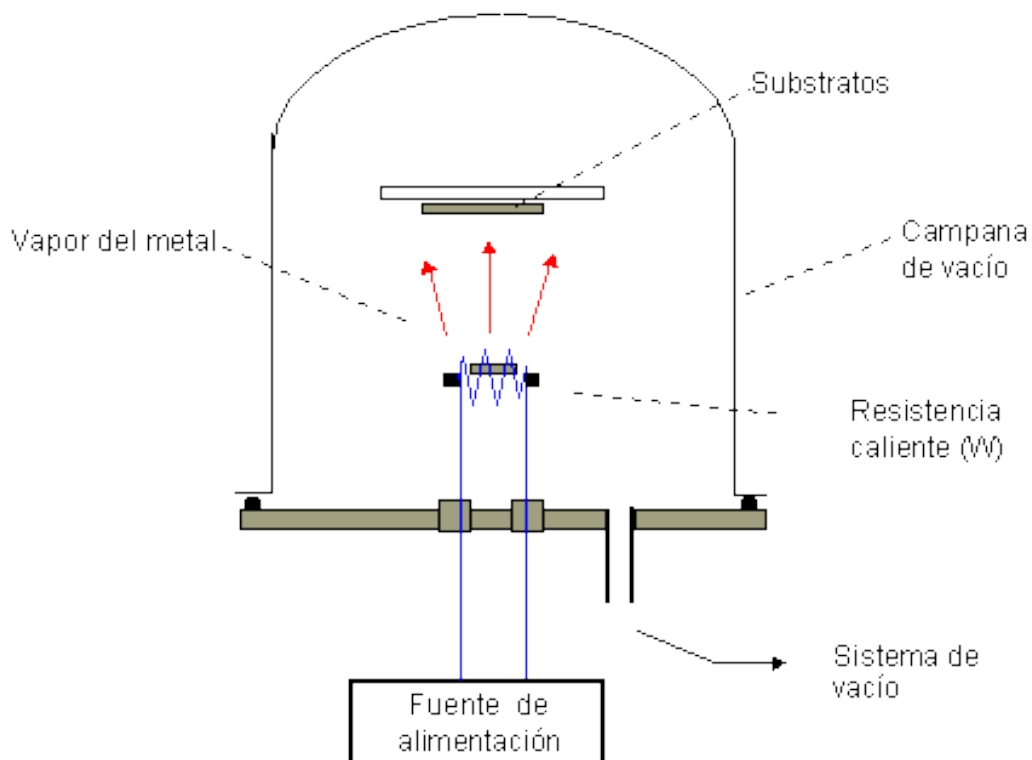


Figura 13 Esquema del proceso de Metalización al vacío [13].

3.6 Densificado en ambiente de Nitrógeno.

Después de haber depositado y realizado el proceso de metalización, se puede efectuar el grabado las interconexiones metalizadas, puede efectuarse un paso final de tratamiento térmico. Este tratamiento consiste en colocar los dispositivos ya metalizados, en un horno de difusión de baja temperatura para garantizar un buen contacto de baja resistencia entre el aluminio y el sustrato de Silicio. Por último, los dispositivos ya metalizados se suelen exponer a Nitrógeno en el horno de difusión a una temperatura de 400°C por un tiempo de 30 min. Este proceso está concebido para optimizar y estabilizar las características del dispositivo al combinar Nitrógeno con átomos no ligados en la interfase Silicio-SiOx o bien, cerca de ella.

3.7 Fabricación de Dispositivos MOS y MOM.

Se realizaron 68 dispositivos MOS y MOM en el presente trabajo de tesis, y se clasifican en tres grupos:

1. Metal-Óxido-Semiconductor (MOS), con contactos de Aluminio.
2. Metal-Óxido-Semiconductor (MOS), con contactos óhmicos transparentes de FTO (Óxido de estaño dopado con flúor).
3. Metal-Óxido-Metal (MOM), con contactos óhmicos transparentes de FTO (Óxido de estaño dopado con flúor).

En la siguiente tabla se muestran las características de los diferentes dispositivos realizados.

Tabla 1 Tipos de Estructuras realizadas.

La estructura básica de un capacitor MOS (figura 13) consta de Metal-Óxido-Semiconductor. La primera es un electrodo metálico que forma la compuerta. Posteriormente, se encuentra la capa aislante (SiOx). Posteriormente, se localiza el

Estructura	MOS	MOS	MOM
Contacto Frontal	Aluminio	Óxido de Estaño dopado con Flúor (FTO)	Óxido de Estaño dopado con Flúor (FTO)
Película	SiOx (Con y Sin Tratamiento Térmico)	SiOx (Con y Sin Tratamiento Térmico)	SiOx (Sin Tratamiento Térmico)
Sustrato	Silicio tipo N	Silicio Tipo N	Cuarzo
Contacto Trasero	Aluminio	Aluminio	Polisilicio

sustrato de silicio, el cual es un semiconductor y forma la base del dispositivo. Finalmente, en la parte inferior se cuenta con una capa metálica que sirve como un electrodo de contacto.

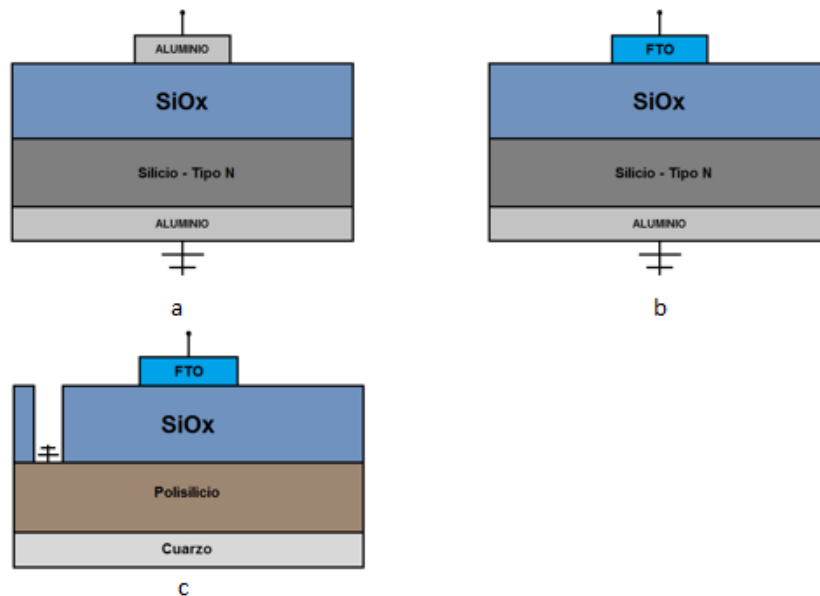


Figura 14 Estructura básica del Capacitor MOS. (a) MOS con contacto de Aluminio. (b) MOS con contacto de FTO. (c) MOM con contacto de FTO.

3.8 Caracterizaciones Ópticas.

La espectroscopia óptica engloba algunas de las técnicas de caracterización de materiales más utilizadas en la ciencia de materiales. En general en estas técnicas se trata de identificar la respuesta de un material respecto a la incidencia de

radiación electromagnética, por ello no son destructivas ni invasivas. Las dos técnicas utilizadas en este trabajo de tesis fueron: Espectrofluorimetría, también llamada Fotoluminiscencia (FL) y Espectroscopia UV-Vis en este caso Transmitancia (ET) [18].

3.8.1 Fotoluminiscencia.

La Espectroscopia de Fotoluminiscencia es un método de no-contacto, no destructivo que permite sondear la estructura electrónica de los materiales. En esencia, la luz se dirige sobre una muestra, donde se absorbe y puede ocurrir un proceso llamado foto-excitación. La foto-excitación hace que los átomos del material pasen un estado electrónico superior, y entonces liberar energía, (fotones), al relajarse, vuelve a retroceder a un nivel de energía más bajo. La emisión de luz, o luminiscencia a través de este proceso es la Fotoluminiscencia (PL).

Un sistema de fotoluminiscencia cuenta con una fuente de excitación de luz láser la que proporciona la energía necesaria para mover los electrones a estados superiores, tiene un arreglo de espejos y lentes que dirigen la señal láser hacia la muestra. La señal de fotoluminiscencia se recupera por medio de otro arreglo de lentes que envían la señal fotoluminiscente a la entrada del monocromador, el monocromador selecciona y hace el barrido en longitud de onda de la señal. Un conjunto de instrumentos realizará el control y la adquisición de los datos del espectro de FL, un ejemplo de este sistema de Fotoluminiscencia se muestra en la Figura 15 [15].

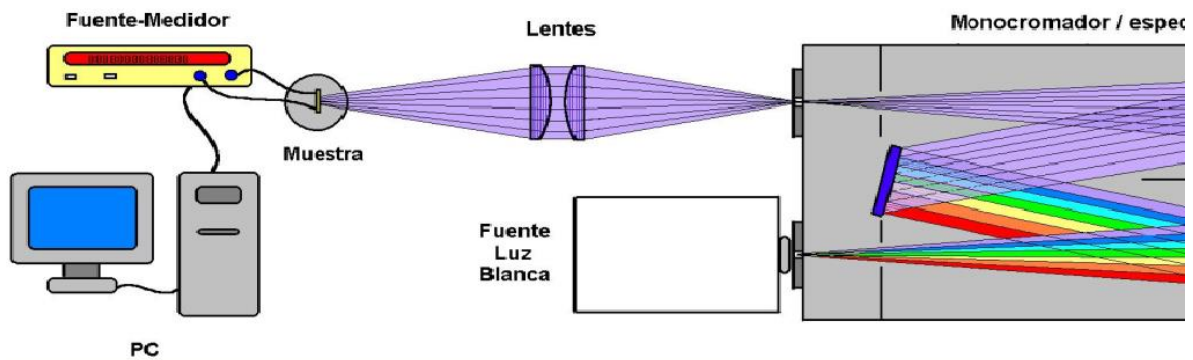


Figura 15 Esquema del equipo usado para la medición de Fotoluminiscencia.

3.8.2 Transmitancia.

La transmitancia óptica se refiere a la cantidad de luz que atraviesa un cuerpo, en una determinada longitud de onda. Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo traslúcido, una parte de esa luz es absorbida por el mismo, y otra fracción de ese haz de luz atravesará el cuerpo, según su transmitancia. El valor de la transmitancia óptica de un objeto se puede determinar según la siguiente expresión:

$$T\% = \frac{I}{I_0} \cdot 100\%$$

I es la cantidad de luz transmitida por la muestra e I_0 es la cantidad total de luz incidente.

Las partes básicas de un espectrofotómetro son una fuente de luz, un soporte para la muestra, una rejilla de difracción o monocromador para separar las diferentes longitudes de onda de la luz, y un detector. La fuente de radiación es a menudo un filamento de tungsteno (300-2500 nm), una lámpara de arco de Deuterio (190-400 nm) y lámparas de arco de Xenón para las longitudes de onda visibles. El detector suele ser un fotodiodo. Los monocromadores se utilizan para filtrar la luz de manera que sólo pase una sola longitud de onda. Se utilizan rejillas de difracción, que recogen la luz de diferentes longitudes de onda en diferentes píxeles. La luz se divide en dos haces antes de que llegue a la muestra. Un rayo se usa como referencia, y el otro haz pasa a través de la muestra [15].

Los espectros de transmitancia de las películas de SiOx depositadas sobre cuarzo se obtuvieron de un espectrofotómetro UV-Vis-NIR Cary 5000 del Laboratorio Central del IFUAP en el rango de longitud de onda de 200-1000 nm con una resolución de 0.5 nm, el cual se muestra en la Figura 16.



Figura 16 Espectrómetro UV-vis del IFUAP, utilizado para las mediciones de Transmitancia.

3.9 Perfilometría.

La perfilometría de contacto es una técnica de análisis superficial en 2D basada en un estilite. La técnica consiste en la medida del desplazamiento vertical que se produce en el estilite mientras se realiza un barrido lineal manteniendo constante la fuerza que éste realiza sobre la superficie de la muestra. La realización de barridos sucesivos y paralelos permite componer los resultados para obtener un mapa tridimensional con resolución nanométrica en el eje vertical.

Las mediciones de perfilometría de las películas de SiOx depositadas sobre cuarzo se obtuvieron de un perfilómetro Dektak 150 del Laboratorio Central del IFUAP, mostrado en la Figura 17.

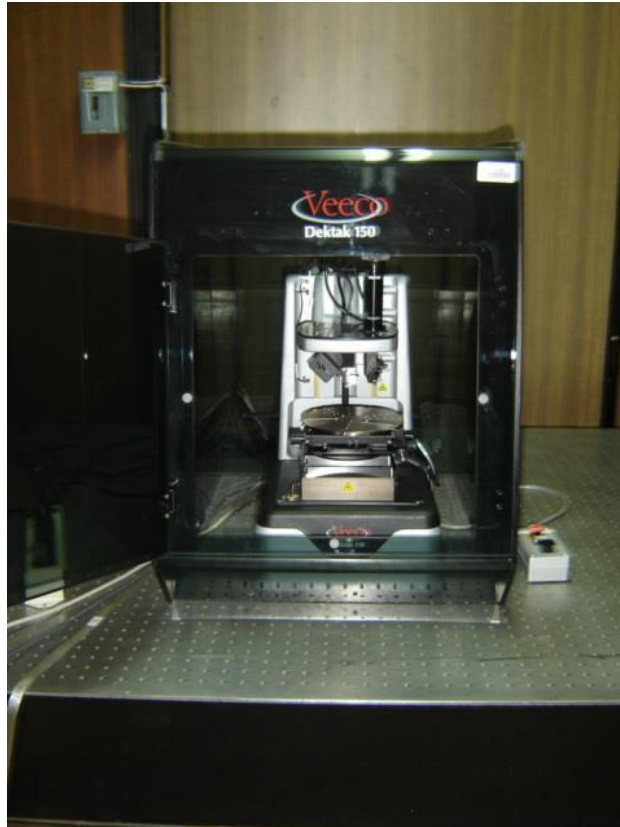


Figura 17 Perfilometro marca Dektak del IFUAP.

3.10 Caracterizaciones Eléctricas de las películas de SiOx.

La caracterización eléctrica de las películas de SiOx se realiza con la finalidad de estudiar las propiedades eléctricas, esas características son necesarias para comprender y entender sus propiedades eléctricas y fotoeléctricas, para sus posibles aplicaciones como dispositivos fotodetectores, éstas se realizaron mediante efecto Hall.

3.10.1 Efecto Hall.

El efecto Hall es un fenómeno de conducción que es diferente para portadores de cargas diferentes. En la mayoría de las aplicaciones eléctricas, se usa la corriente convencional parcialmente porque no hay diferencia en considerar que se muevan

cargas positivas o negativas, se muestra un equipo de efecto Hall en la figura 18. Pero el voltaje Hall tiene una polaridad diferente para los portadores de cargas positivas o negativas y se ha usado para el estudio de los detalles de la conducción en los semiconductores y otros materiales que muestran una combinación de portadores de cargas positivas y negativas. El efecto Hall se puede usar para medir la velocidad media de drenaje de los portadores de cargas, moviendo mecánicamente la sonda Hall a diferentes velocidades hasta que desaparece el voltaje Hall, mostrando entonces que los portadores de cargas no se están moviendo respecto del campo magnético [19].



Figura 18 Efecto Hall Marca Ecopia, Modelo HMS 5300 del IFUAP.

3.11 Caracterizaciones eléctricas de las estructuras MOS y MOM.

La caracterización eléctrica de las estructuras tipo MOS se realiza con la finalidad de estudiar las propiedades eléctricas y fotoeléctricas mediante I-V, I-T y C-V las propiedades eléctricas y fotoeléctricas de las estructuras tipo MOS y MOM. La técnica de medición corriente-Voltaje (I-V), permite observar el comportamiento eléctrico en estas estructuras como son los fenómenos de conducción eléctrica debidos principalmente al dieléctrico. Por otro lado, en esta tesis también se

utilizaron curvas Capacitancia–Voltaje (C-V), las cuales nos proporcionan información sobre la densidad de dopantes del sustrato, efectos de atrapamiento de carga y el tiempo de generación de los portadores de carga.

3.11.1 Mediciones de Corriente-Voltaje de las estructuras tipo MOS en oscuridad, con luz blanca y luz UV.

Las mediciones de corriente-voltaje (I-V) de las estructuras tipo MOS con una sola capa de SiO_x, fueron realizadas en el Laboratorio de Mediciones Fotoeléctricas del Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores de la BUAP. Estas mediciones fueron realizadas por lo menos a 5 dispositivos diferentes, de cada una de las diferentes muestras. Estas mediciones de I-V, se realizaron con el sistema de medición Keithley modelo 4200 SC para las mediciones en oscuridad y con luz blanca, y para las mediciones con luz UV se utilizó la fuente de voltaje Keithley modelo 2400. La forma de conexión se muestra en la figura 19, para este trabajo de tesis se utilizó la forma de medición vertical. La medición vertical se realiza para conocer el comportamiento de la corriente del SiO_x con respecto al sustrato. Para realizar las mediciones a cada dispositivo se le asigna un nombre o referencia (tabla), esto se hace en base a un número y una literal. Primero se mide la corriente de oscuridad, y posteriormente se le aplica una fuente de luz (luz blanca, UV larga y UV corta), en ambos casos se mide la corriente en inversa y en directa. Para la aplicación de luz blanca, se prende la lámpara del microscopio, la cual incide directamente sobre la muestra. En la aplicación de luz UV se aplican dos tipos de longitud de onda: la primera para UV-corta en el rango de 254nm, y la segunda UV-larga de 365nm.

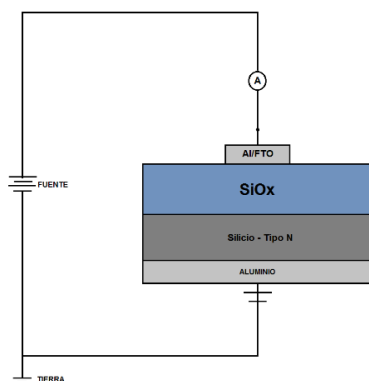


Figura 19 Esquema de conexión para los dispositivos MOS.

3.11.2 Mediciones de Capacitancia-Voltaje.

Las mediciones de capacitancia-voltaje (C-V) de las estructuras tipo MOS con una sola capa de SiO_x, fueron realizadas por lo menos a 5 dispositivos diferentes, en cada una de las diferentes estructuras. Para esta medición se utilizó un sistema controlado por computadora con un analizador C-V Keithley 4200 SC a una frecuencia de 1 MHz y un voltaje de corriente alterna de 30 mV. De las curvas C-V experimentales, obtenemos los parámetros importantes del substrato y del dieléctrico SiO_x del dispositivo en este estudio. Para la realización de estas mediciones se ocupó el mismo esquema de medición mostrado en la Figura 19.

CAPÍTULO 4

*RESULTADOS EXPERIMENTALES Y
DISCUSIÓN*

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos mediante las técnicas de caracterización óptica de las películas de SiOx depositadas por HFCVD. Así como de las mediciones eléctricas y fotoeléctricas de las estructuras MOS con contactos de Aluminio y contactos de FTO, y de las estructuras MOM.

4.1 Resultados Ópticos.

Los resultados experimentales de la caracterización óptica de las películas de SiOx fueron obtenidos mediante, Perfilometría, Fotoluminiscencia y Transmitancia UV-Vis.

4.1.1 Perfilometría de las películas de SiOx.

Los espesores de las películas de SiOx fueron obtenidos usando los equipos señalados en el apartado 3.9. En la tabla 2 se presenta el valor promedio del

Flujo (sccm) / dfs (mm)	25	50	75	100
3 <i>Espesor</i>	A1 (382 nm)	B1 (415 nm)	C1 (774 nm)	D1 (518 nm)
4 <i>Espesor</i>	A2 (169 nm)	B2 (545 nm)	C2 (150 nm)	D2 (403 nm)
5 <i>Espesor</i>	A3 (383 nm)	B3 (225 nm)	C3 (319 nm)	D3 (119 nm)
6 <i>Espesor</i>	A4 (610 nm)	B4 (574 nm)	C4 (493 nm)	D4 (604 nm)

espesor de las películas de SiOx obtenido por perfilometría. *Tabla 2 Espesores de las películas de SiOx.*

4.1.2 Resultados de la Fotoluminiscencia (FL) de las películas de SiOx.

Los espectros de FL de las películas de SiOx se obtuvieron en un intervalo de longitud de onda de 400-100 nm con el equipo señalado en el apartado 3.8.1. En la

Figura 20 se presentan los espectros de FL de las películas depositadas sobre sustratos de Silicio sin TT y con TT 3, como son etiquetadas en la Tabla 1.

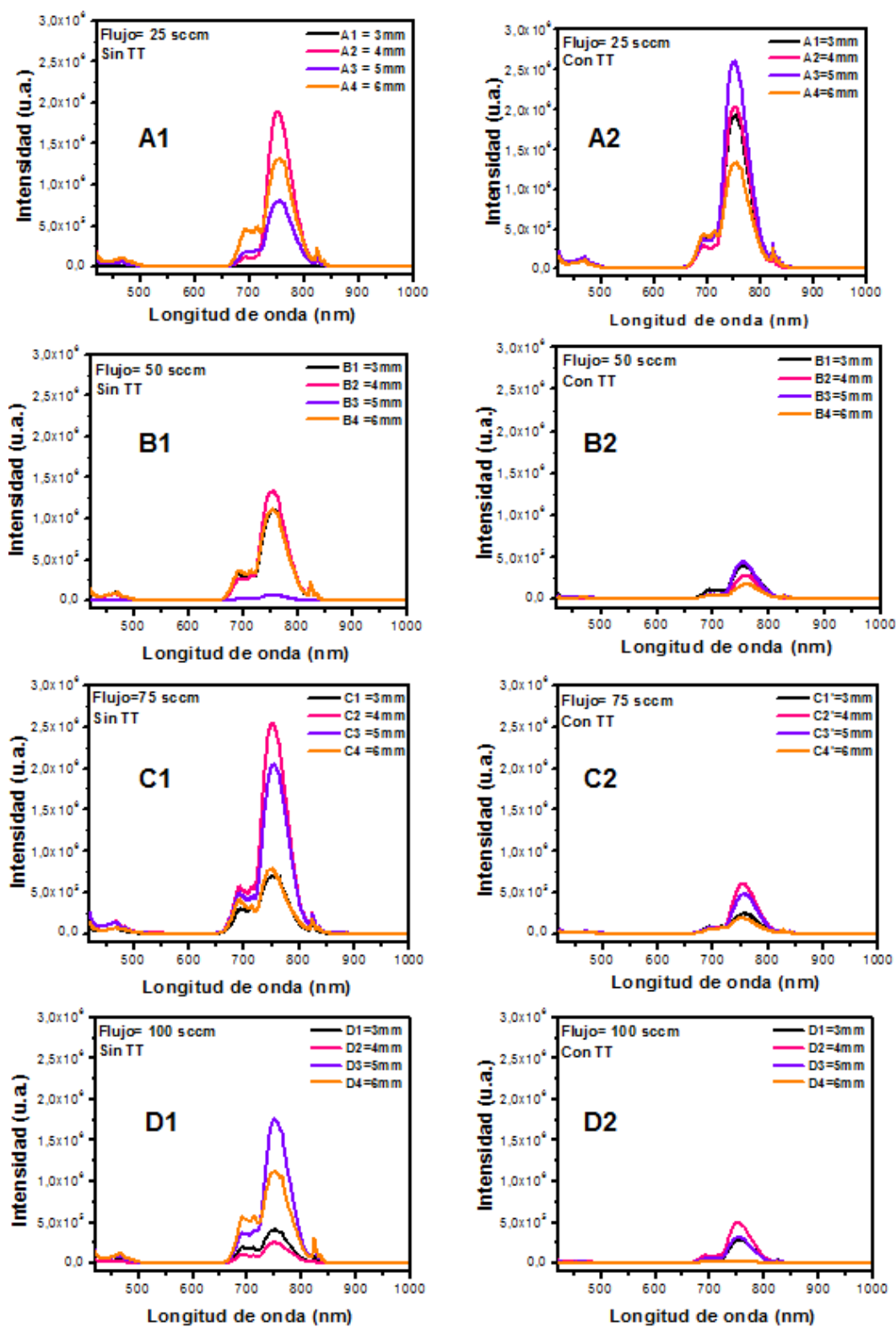


Figura 20 Espectros de FL de las películas de SiOx depositadas sobre de Silicio sin TT (A1, B1, C1, D1) y Silicio con TT (A2, B2, C2, C3).

4.1.3 Transmitancia UV-Vis de las películas de SiOx.

Los espectros de Transmitancia de las películas de SiOx se obtuvieron en un intervalo de longitud de onda de 200-1000 nm con el equipo señalado en el apartado 3.8.2. En la figura 21 se muestran los espectros de Transmitancia de las películas depositadas sobre los sustratos de cuarzo sin TT y con TT.

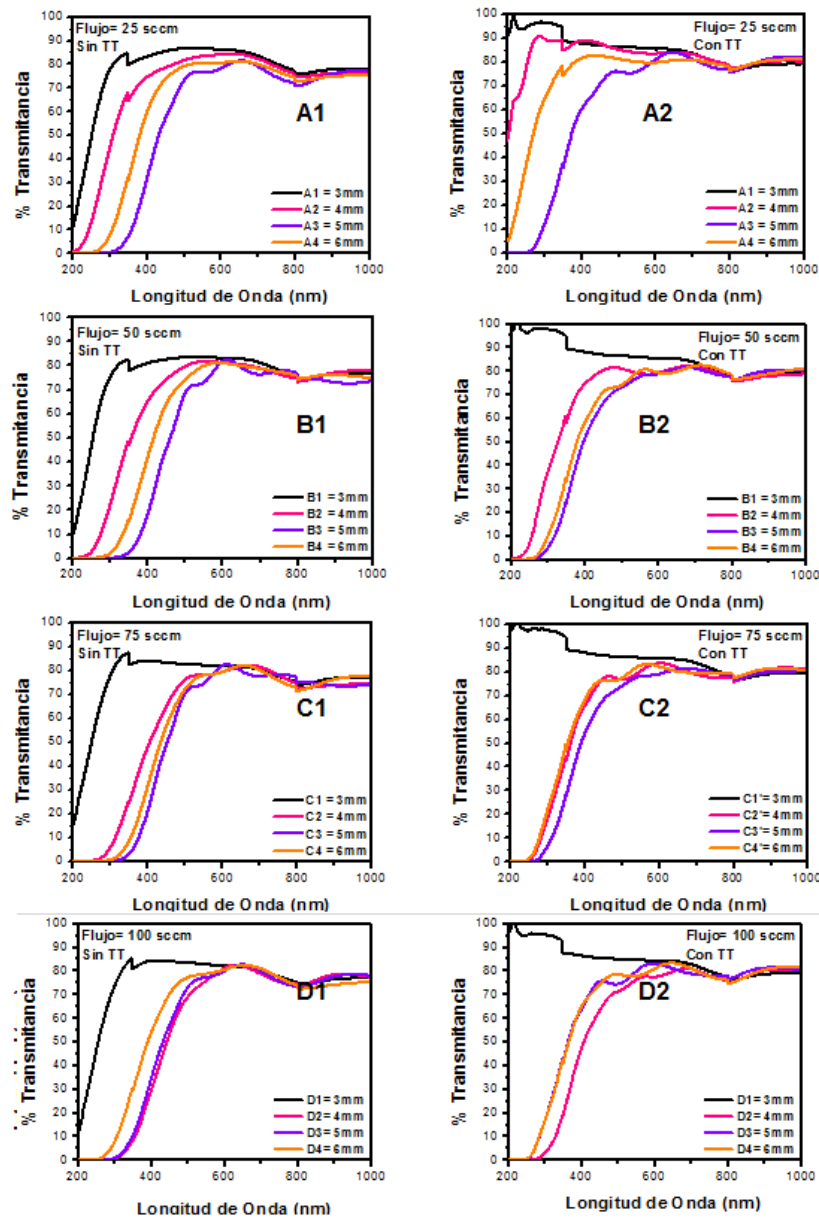


Figura 21. Espectros de Transmitancia de las películas de SiOx depositadas sobre de Silicio sin TT 3.1 A1, B1, C1, D1) y Silicio con TT 3.1 A2, B2, C2, C3).

4.1.4 Transmitancia UV-Vis de los contactos de FTO.

Los espectros de Transmitancia de las películas de SiO_x se obtuvieron en un intervalo de longitud de onda de 200-1000 nm con el equipo señalado en el apartado 3.8.2. En la figura 4.3 se muestran los espectros de Transmitancia de los contactos de FTO.

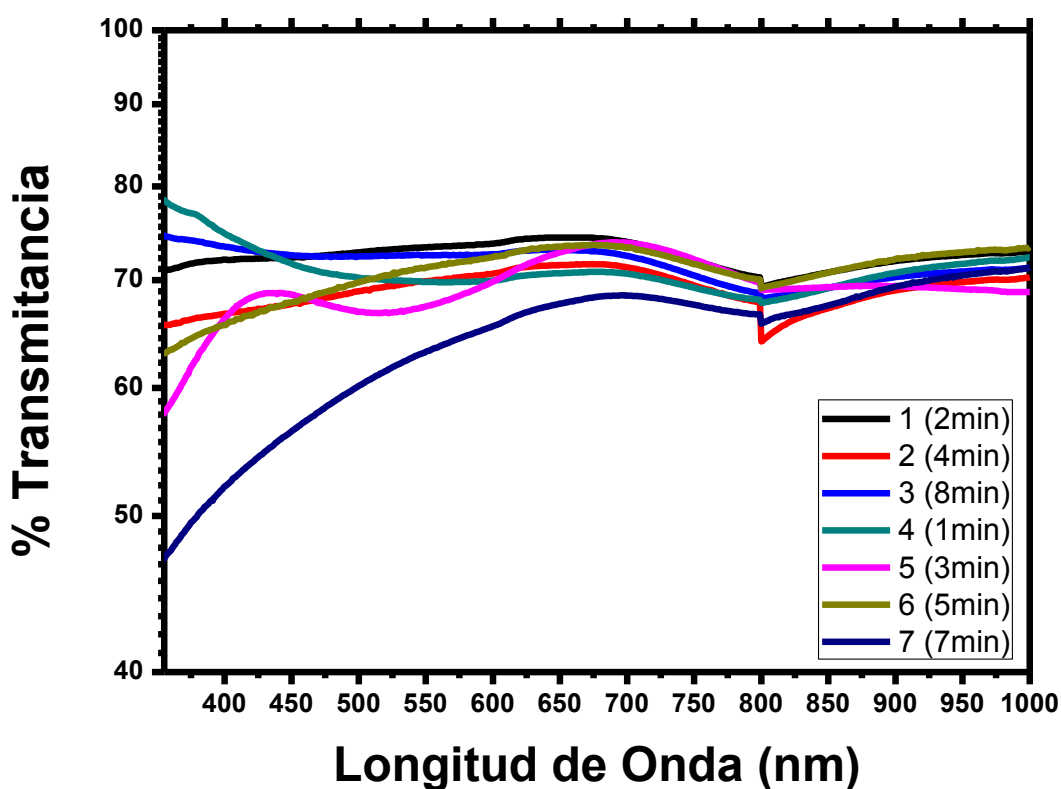


Figura 22 Espectros de Transmitancia para los contactos de FTO.

4.2 Mediciones Eléctricas.

Los resultados obtenidos de las mediciones I-V, I-T y C-V en la presente tesis, se hará de la forma siguiente; la gráfica de la izquierda corresponde a las mediciones

I-V, en las que se muestran las curvas I-V obtenidas en oscuridad, luz blanca, UV corta y UV larga polarizadas con voltaje en directa e inversa, con diferentes colores para cada curva I-V obtenida, oscuridad (Negro), luz blanca (Verde), luz UV de onda larga (Rojo) y luz UV de onda corta (Azul). La gráfica del centro corresponde a la medición de corriente versus tiempo, I-T, donde nuevamente el negro representa oscuridad, el rojo es la luz UV de onda larga y el azul luz UV de onda corta. La gráfica de la izquierda corresponde a la medición capacitancia-Voltaje, C-V. Los resultados se muestran en tres grupos principales:

Las estructuras MOS con Aluminio sin y con tratamiento térmico, las estructuras MOS con FTO sin y con tratamiento térmico y las estructuras MOM con FTO y Polisilicio.

4.2.1 Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOS con contacto de Aluminio Sin Tratamiento Térmico.

La figura 23 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A1 en el dispositivo E4 de la estructura Al/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

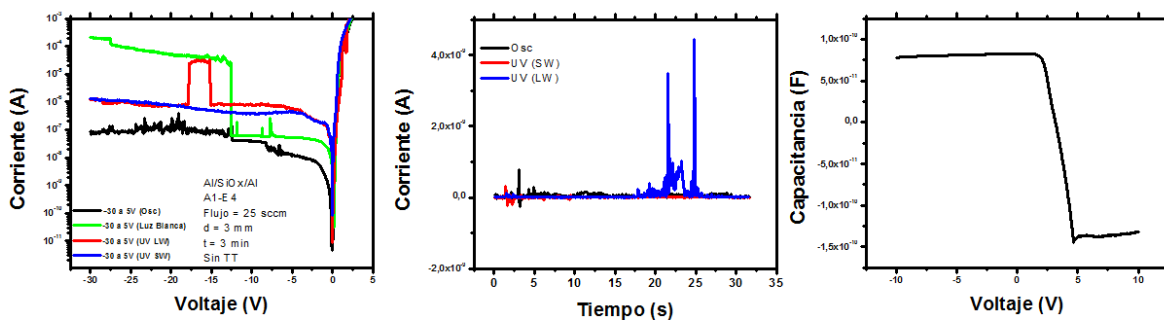


Figura 23 Muestra A1, Dispositivo E4, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 23 se puede observar que se realizó un barrido de voltaje de -30 V a 5 V en la curva I-V; la corriente encuentra su máximo en aproximadamente a 2 V cuando polarizamos en directa, llegando incluso a los mA, la iluminación con luz no

cambia en nada este comportamiento de la corriente, como es de esperarse el dispositivo se encuentra en acumulación, por lo tanto su corriente incrementa sustancialmente. En polarización inversa, tenemos una corriente de 10^{-8} A de 0 a 8 V, incrementando a una corriente de 10^{-7} A, en saturación hasta -30 V, mostrando una corriente de oscuridad mucho menor que la obtenida en directa a voltaje mucho menor que el de inversa, esto nos muestra que la región está en inversión y una ancho de deserción está formado. Cuando se incide luz blanca Se puede apreciar un incremento significativo de la corriente, a voltajes bajos menores a 2 V se observa un aumento de 2 órdenes de magnitud con respecto a la corriente de oscuridad, después de 13 V. en adelante, vuelva a existir un incremento significativo de aproximadamente 3 órdenes de magnitud. Con luz UV corta y larga existe aproximadamente un aumento de dos órdenes de magnitud hasta -8 V, posteriormente a mayor voltaje solo existe un incremento de 1 orden de magnitud con respecto a la corriente de oscuridad.

En la medición I-T se puede apreciar un incremento en la corriente cuando se le incide luz UV, lo cual corresponde de manera poco significativa a lo visto en I-V.

En la medición de C-V se realiza un barrido de -10 V a 10 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en -10 V hasta 2 V y el comienzo de la zona de deserción a partir de los 2 V a 5 V, en 5 V inicia la región de inversión hasta 10 V. Cabe señalar que este comportamiento es anómalo debido a que tenemos un sustrato de silicio tipo N, por lo que la región de acumulación deberá estar en polarización positiva y la región de inversión en polarización negativa.

La figura 24 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A3 en el dispositivo G1 de la estructura Al/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

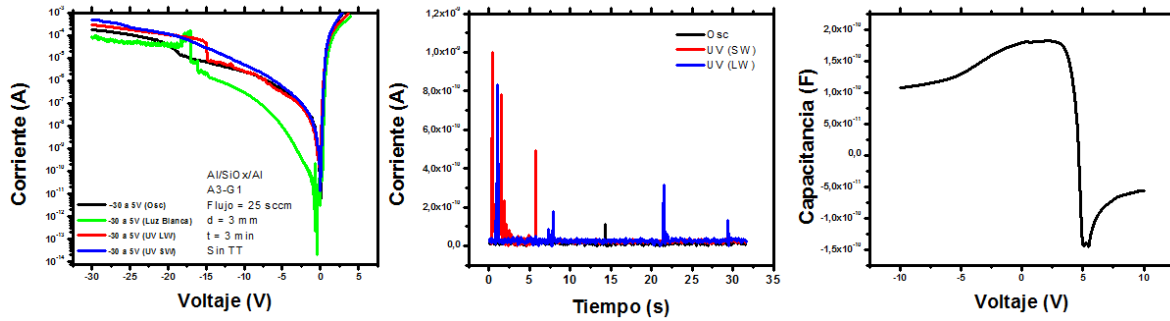


Figura 24 Muestra A3, Dispositivo G1, Estructura MOS – Al/SiO₂/Si/Al sin TT.

En la figura 24 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 5 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en aproximadamente 5 V cuando polarizamos en directa, cuando incidimos cualquier tipo de luz, no se aprecia un cambio significativo en la corriente, llegando incluso a los mA. En polarización inversa, la corriente se mantiene constante, pero cuando incidimos luz blanca, la corriente disminuye, produciendo una resistencia negativa, que consume corriente, logrando estabilizarse hasta los 20 V, incluso presenta un salto en la corriente que luego disminuye, de esta forma la corriente con luz blanca, es mucho menor respecto a los otros tipos de luz.

En la medición I-T se puede apreciar un incremento en la corriente cuando se le incide luz UV de onda corta y larga, lo cual corresponde a lo visto en I-V; en la medición C-V se realiza un barrido de -10 V a 10 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en 5 V hasta 0 V y el comienzo de la zona de inversión en 6 V, lo cual es un comportamiento anómalo, ya que el sustrato es tipo N y la gráfica nos presenta una curva característica de un sustrato tipo P.

La figura 25 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra D1 en el dispositivo D2 de la estructura Al/SiO₂/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

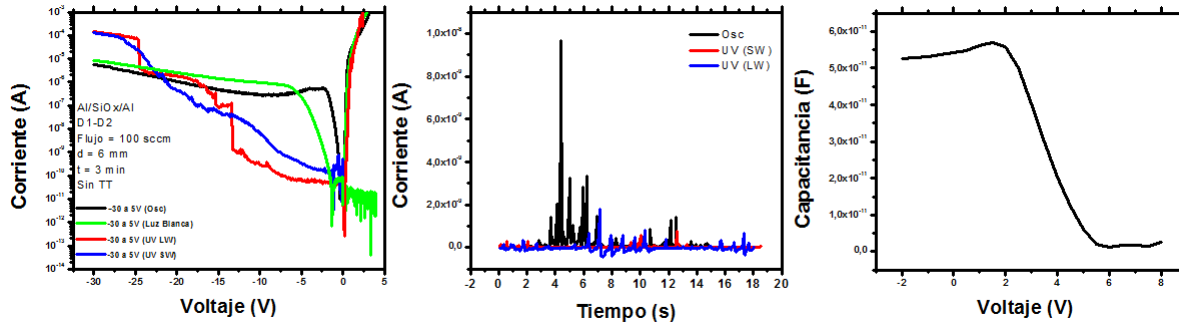


Figura 25 Muestra D1, Dispositivo D2, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 25 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 5 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en aproximadamente 2 V, cuando se realiza la polarización en directa, llegando incluso a los mA, se observa una disminución de la corriente cuando se le incide una luz blanca, lo cual nos indica la presencia de resistencia negativa, que produce la disminución de la corriente. Cuando polarizamos en inversa, podemos observar que las corrientes no se comportan de la misma manera, en oscuridad la corriente llega a 10^{-7} A, con luz blanca, la corriente presenta un comportamiento similar, solo que está se desfasa respecto a la corriente en oscuridad, pero se puede apreciar un incremento significativo de la corriente, esto se aprecia a partir de -25 V, con las luces UV, la corriente presenta una disminución de 3 órdenes de magnitud respecto a la oscuridad y la luz blanca, a medida que aumenta el voltaje, esta aumenta, llegando a los mA, siendo este el valor máximo de corriente.

En la medición I-T se puede apreciar un incremento en la corriente, cuando está en oscuridad, presentando picos muy pronunciados, lo cual, corresponde a lo visto en I-V; en la medición C-V se realiza un barrido de -2 V a 8 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en 2 V hasta -2 V y el comienzo de la zona de inversión en 6 V, con una curva característica de un sustrato tipo P.

La figura 26 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra D2 en el dispositivo I3 de la estructura Al/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

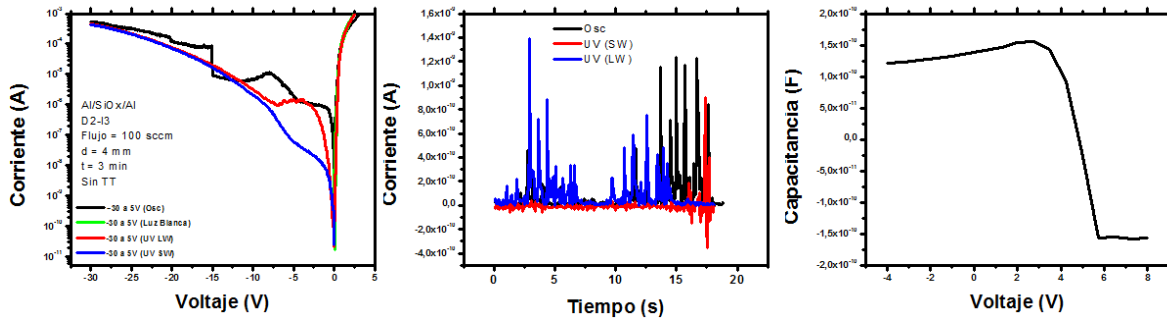


Figura 26 Muestra D2, Dispositivo I3, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 26 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 5 V en la medición I-V; Cuando polarizamos en directa, la corriente encuentra su máximo en aproximadamente 2 V con cualquier tipo de luz, llegando a los mA, es importante mencionar que la gráfica nos indica que el dispositivo es bastante conductor. Cuando se realiza la polarización inversa, podemos observar que la corriente de oscuridad presenta unos escalones, en intervalos de 5 V, hasta -15 V que es donde el dispositivo presenta la mayor corriente, con luz UV de onda larga, la corriente tiene un aumento de corriente en -3 V, después de eso la corriente aumenta hasta llegar a los mA, con luz UV de onda corta, la corriente aumenta constantemente sin presentar alteraciones abruptas, como en oscuridad o con la luz UV de onda larga. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; la medición C-V se realiza un barrido de -4 V a 8 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en 4 V hasta 0 V y el comienzo de la zona de inversión en 6 V, con la curva típica de un sustrato tipo P.

4.2.2 Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOS con contacto de Aluminio Con Tratamiento Térmico.

La figura 27 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A3 en el dispositivo F6 de la estructura Al/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

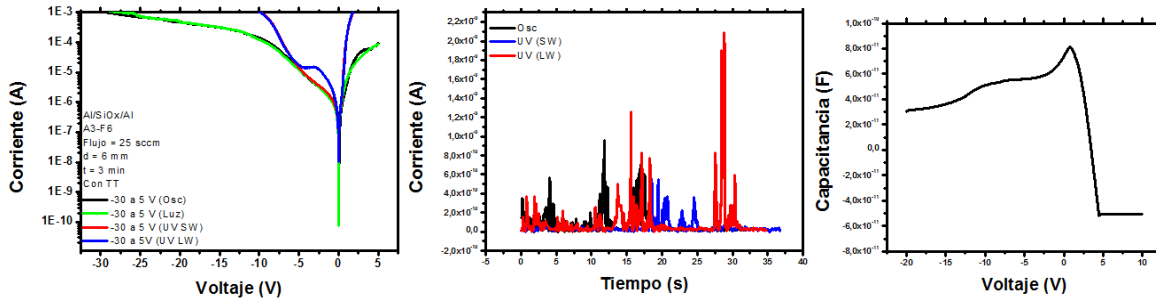


Figura 27 Muestra A3, Dispositivo F6, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 27 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 5 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en aproximadamente 2 V, esto es cuando se incide una luz UV de onda larga, además nos muestra lo conductor que es el dispositivo, también es importante mencionar que en 0 V, la corriente aumenta dos órdenes de magnitud respecto a la luz blanca, lo cual nos indica la presencia del efecto fotoeléctrico en este dispositivo. Cuando se polariza en inversa, la corriente encuentra su máximo en -10 V, llegando a los mA, este incremento de corriente solo se ve cuando se le incide luz UV de onda larga, con los otros tipos de luz, la corriente aumenta gradualmente.

En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; la medición C-V se realiza un barrido de -20 V a 10 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en 2 V hasta 0 V y el comienzo de la zona de inversión en 4 V, mostrando la gráfica de un sustrato tipo P.

La figura 28 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra C1 en el dispositivo E6 de la estructura Al/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

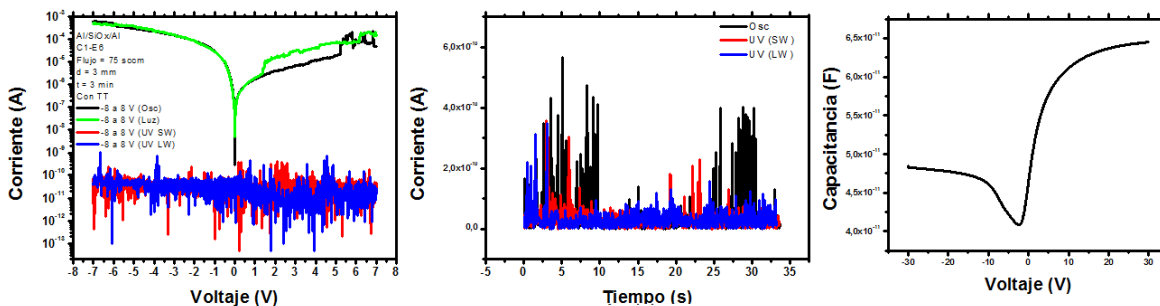


Figura 28 Muestra C1, Dispositivo E6, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 28 se puede observar un barrido de voltaje de -8 V a 8 V en la medición I-V, cuando se polariza en directa, la corriente encuentra su máximo en el rango de 6 a 8 V, esto es en oscuridad y con luz blanca respectivamente, también podemos observar que cuando se inciden los dos tipos de luz UV, la corriente sufre una caída de corriente de 6 órdenes de magnitud. Cuando se polariza en inversa, la corriente en oscuridad y en luz blanca presenta el mismo comportamiento, llegando a su máximo en -6 V, al igual que en la polarización directa, cuando se inciden los dos tipos de luz UV, la corriente disminuye.

En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; la medición C-V se realiza un barrido de -30 V a 30 V y podemos ver una zona de inversión a partir de -5 V y una zona de acumulación en 10 V.

La figura 29 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A1 en el dispositivo F6 de la estructura Al/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

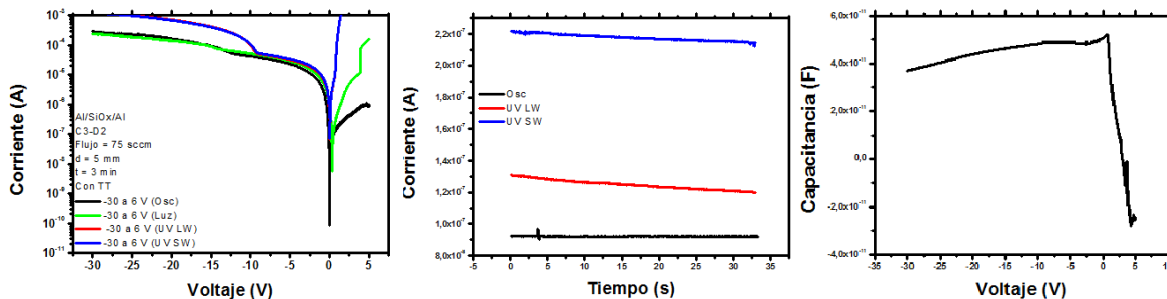


Figura 29 Muestra C3, Dispositivo D2, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 29 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 5 V en la medición I-V, en la polarización directa, la corriente encuentra su máximo cuando se incide una luz UV de onda corta además de ser muy conductora, con luz blanca la corriente disminuye un orden de magnitud respecto a la luz UV de onda corta, y en oscuridad la corriente disminuye cuatro órdenes de magnitud respecto a la luz UV, por lo cual se puede apreciar el efecto fotoeléctrico en este dispositivo. En la polarización inversa, la corriente mantiene el mismo comportamiento hasta -10 V, donde con luz UV la corriente aumenta un orden de magnitud respecto a la luz blanca y la oscuridad.

En la medición I-T, se observan los incrementos de corriente vistos en I-V por lo que la muestra presenta un efecto Fotoeléctrico notable; la medición C-V se realiza un barrido de -30 V a 5 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en -10 V el comienzo de la zona de inversión en 4 V, presentando la curva de un sustrato tipo P.

La figura 30 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra D1 en el dispositivo L1 de la estructura Al/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

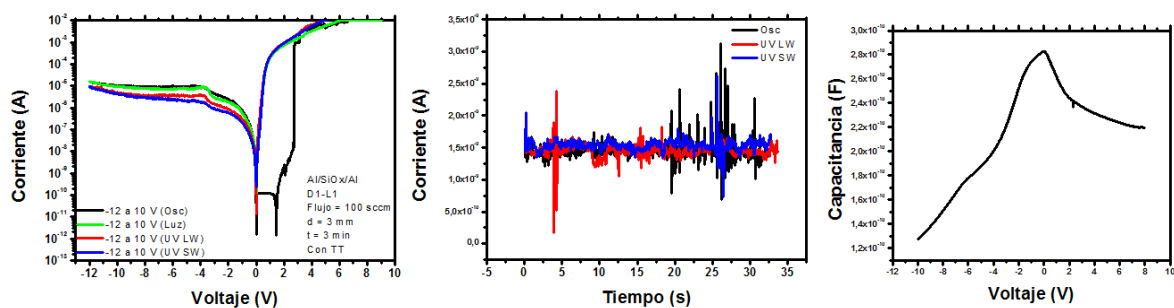


Figura 30 Muestra D1, Dispositivo L1, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 30 se puede observar un barrido de voltaje de -12 V a 10 V en la medición I-V, en la polarización en directa, la corriente muestra el mismo comportamiento cuando se le incide cualquier tipo de luz, no así cuando está en oscuridad, ya que la corriente presenta una caída de corriente en 2 V, pero tiene un incremento abrupto de corriente en 3 V, aumentando 9 órdenes de magnitud. Cuando se polariza en inversa, la corriente se comporta igual, salvo unos pequeños incrementos con luz blanca, la cual presenta la corriente mayor, y la luz UV que presenta la corriente menor. Sí observamos la gráfica en 0 V podemos observar que cuando se incide luz UV de onda corta y larga, la corriente aumenta, por lo cual se observa el efecto fotoeléctrico.

En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; la medición C-V se realiza un barrido de -10 V a 8 V y presenta un comportamiento que no es característico del capacitor MOS.

La figura 31 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra D2 en el dispositivo K6 de la estructura Al/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

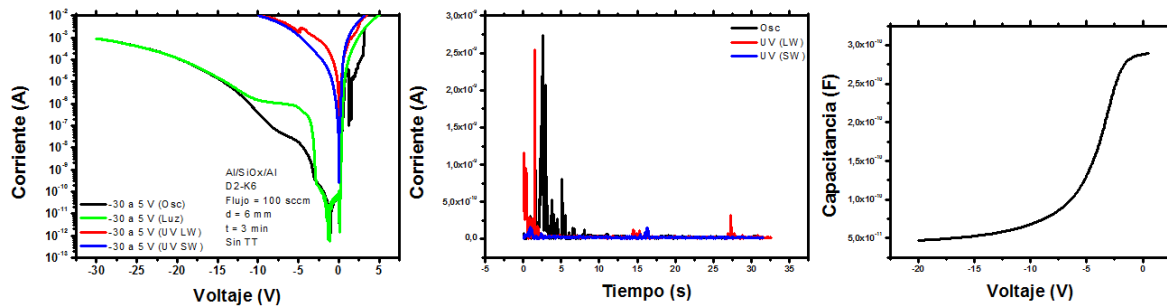


Figura 31 Muestra D2, Dispositivo K6, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 31 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 5 V en la medición I-V, cuando se polariza en directa podemos observar que al incidir cualquier tipo de luz, la corriente aumenta hasta llegar a los mA, no así en oscuridad, donde observamos que la corriente disminuye en 1 V pero incrementa hasta llegar a los valores de corriente que se obtienen al incidir luz. Cuando se polariza en inversa se puede apreciar que con la luz UV, la corriente aumenta considerablemente respecto a la luz blanca y la oscuridad, con luz blanca la corriente tiene un incremento en -2.5 V hasta -12.5 V donde aumenta gradualmente, la corriente en oscuridad se comporta igual que la luz blanca, salvo el incremento que está presenta a partir de -2.5 V.

En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes. En la medición C-V se realiza un barrido de -20 V a 0 V y podemos ver una curva característica del capacitor MOS.

La figura 32 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra D3 en el dispositivo G2 de la estructura Al/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

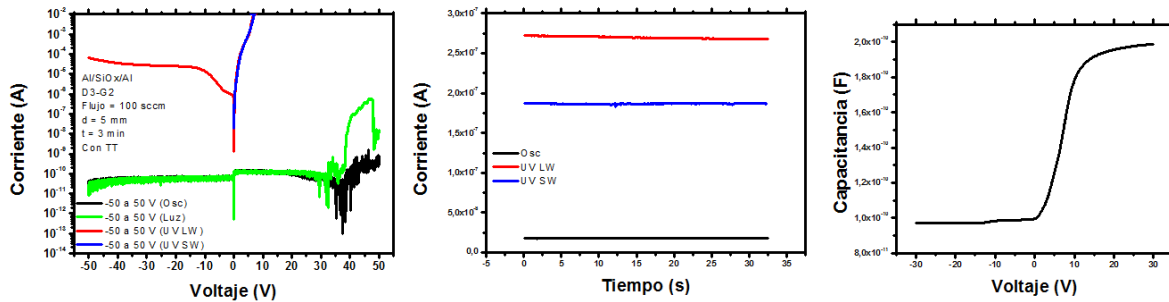


Figura 32 Muestra D3, Dispositivo G2, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 32 se puede observar un barrido de voltaje de -50 V a 50 V en la medición I-V, cuando polarizamos en directa, observamos que la corriente aumenta considerablemente, con la luz UV, ya que está llega a los mA con 5 V, la corriente en oscuridad y con luz blanca, se mantiene en un valor constante hasta los 30 V, que es donde con luz blanca aumenta 3 órdenes de magnitud, respecto a la corriente de oscuridad. En polarización inversa observamos que al incidir luz UV, la corriente se dispara, además de que se puede apreciar un aumento considerable respecto a la luz blanca y la corriente de oscuridad que se mantienen constantes. En 0 V, se puede observar con mayor claridad la diferencia de órdenes de magnitud, con luz UV de onda corta, de onda larga y luz blanca, mostrando así la presencia del efecto fotoeléctrico.

En la medición I-T, se observan los incrementos ya antes vistos en la gráfica I-V, por lo cual se comprueba el efecto Fotoeléctrico. En la medición C-V se realiza un barrido de -30 V a 30 V y podemos ver una curva característica del capacitor MOS, con una zona de inversión de -30 V a 0 y una acumulación de 7 V a 30 V.

4.2.3 Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOS con contacto de FTO Sin Tratamiento Térmico.

La figura 33 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A1 en el dispositivo D2 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

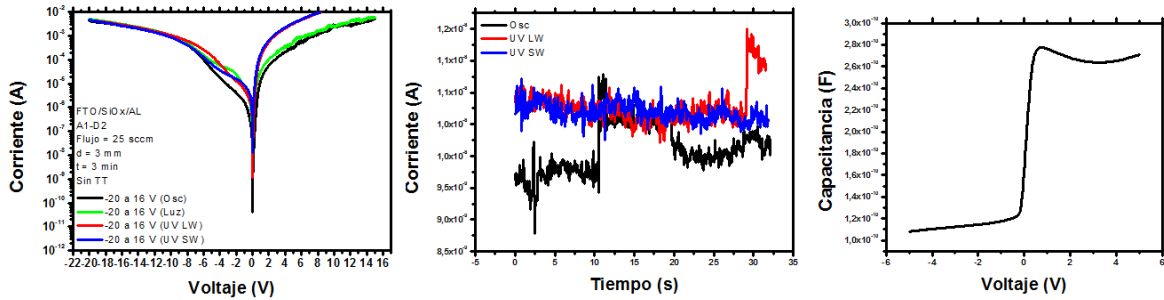


Figura 33 Muestra A1, Dispositivo D2, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 33 se puede observar un barrido de voltaje de -20 V a 15 V en la medición I-V, en la polarización directa se puede apreciar un aumento en la corriente cuando se incide luz UV, mientras que con la luz blanca y oscuridad la corriente se comporta igual, solo que la corriente disminuye un orden de magnitud respecto a la luz UV. En la polarización inversa podemos observar que la corriente tiene un comportamiento parecido, cuando se inciden diferentes tipos de luz.

En la medición I-T, se observan los incrementos ya vistos en I-V, lo cual nos indica la presencia del efecto fotoeléctrico; en la medición C-V se realiza un barrido de -5 V a 5 V y podemos ver una curva característica del capacitor MOS, con una zona de inversión de -5 V a 0 y una acumulación de 1 V a 5 V.

La figura 34 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A2 en el dispositivo A1 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

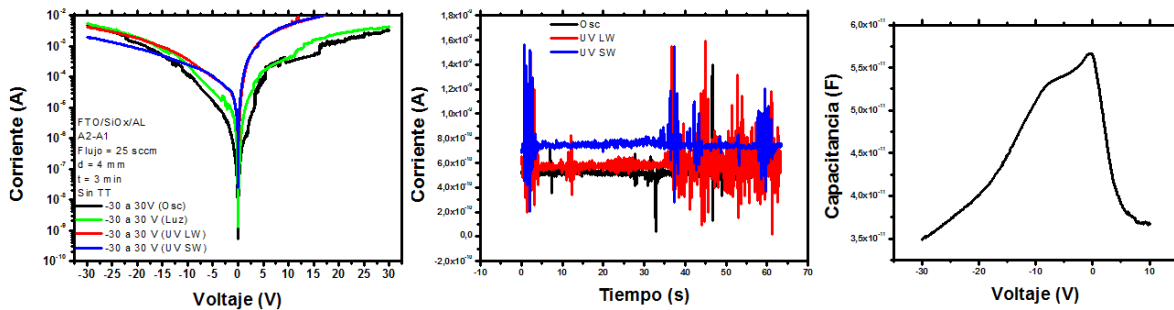


Figura 34 Muestra A2, Dispositivo A1, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 34 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en 15 V, en esta figura se puede

ver que al incidir luz UV, la corriente llegó hasta los mA, por lo que se ve un aumento de un orden de magnitud con la luz blanca. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes, pero con un incremento con la luz UV; en la medición C-V se realiza un barrido de -30 V a 10 V y podemos ver un comportamiento no característico del capacitor MOS.

La figura 35 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A3 en el dispositivo A2 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

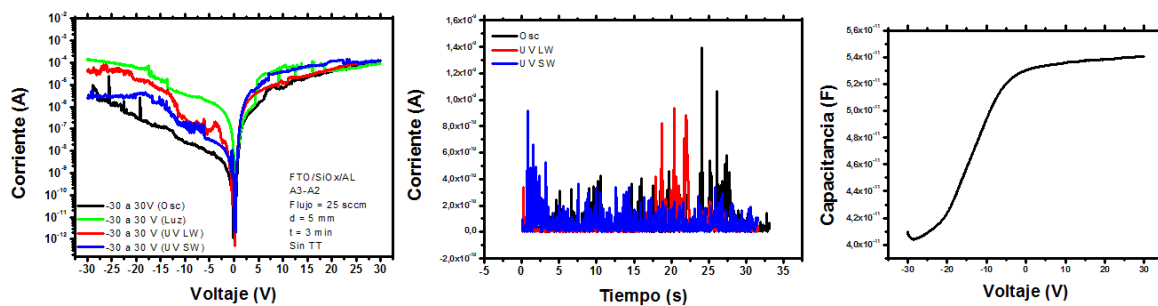


Figura 35 Muestra A3, Dispositivo A2, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 35 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo cuando se le incide luz blanca, con un aumento muy pequeño respecto a los otros tipos de luz. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; en la medición C-V se realiza un barrido de -30 V a 30 V y podemos ver una gráfica característica del capacitor MOS zona de inversión en -30 V y la acumulación en -2 V.

La figura 36 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra B2 en el dispositivo B2 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

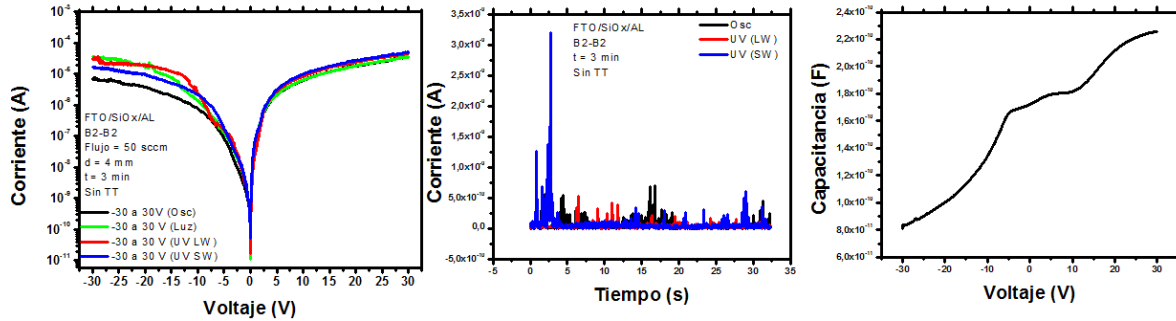


Figura 36 Muestra B2, Dispositivo B2, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 36 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; se aprecia que todas las corrientes presentan el mismo comportamiento, no importando el tipo de luz que se le incida. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; en la medición C-V se realiza un barrido de -30 V a 30 V y podemos ver una zona de doble acumulación en -7 V y en 5 V y el comienzo de la zona de inversión en -30 V.

La figura 37 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra C1 en el dispositivo D3 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

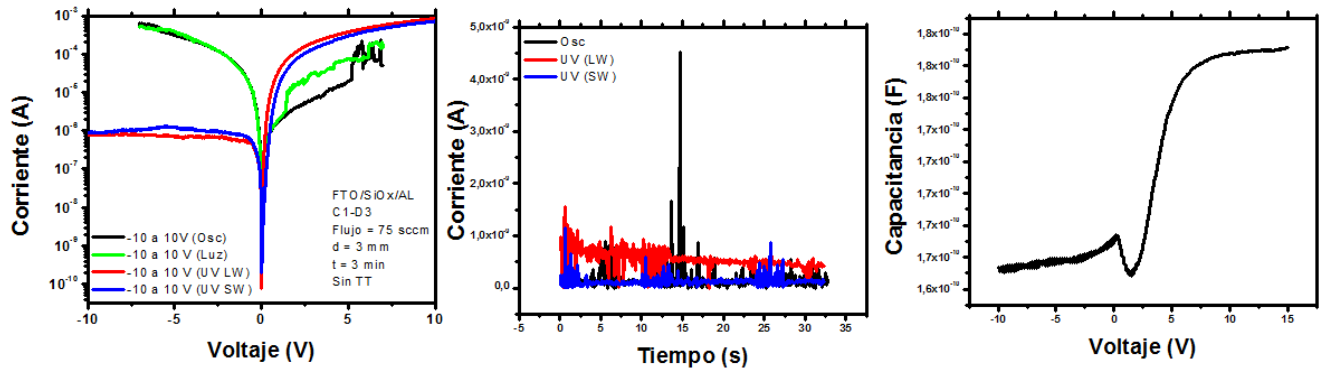


Figura 37 Muestra C1, Dispositivo D3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 37 se puede observar un barrido de voltaje de -10 V a 10 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en 10 V, en esta figura se puede ver que al incidir luz UV, la corriente aumento, cuando el voltaje es positivo, mientras

tanto, si el voltaje es positivo, la corriente disminuye, pero aumenta con la luz blanca. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes, pero con los incrementos marcados con la luz UV; en la medición C-V se realiza un barrido de -10 V a 15 V y podemos ver un comportamiento típico del capacitor MOS, con la zona de inversión en -10 V y la zona de acumulación que comienza en 5 V.

La figura 38 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra C2 en el dispositivo B3 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

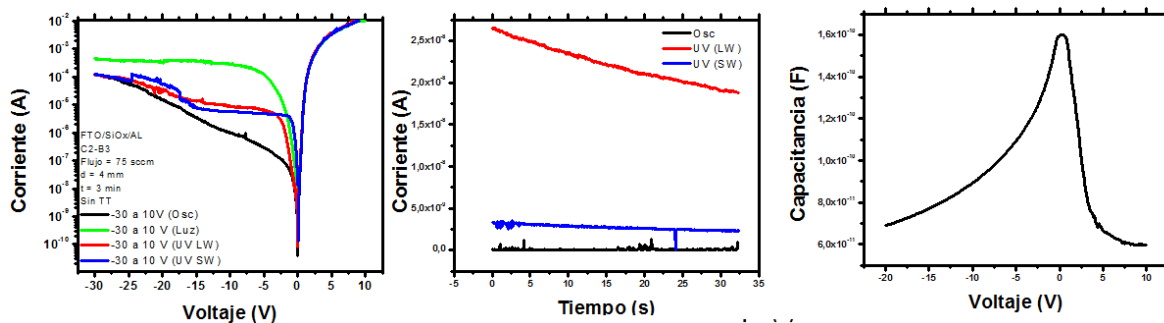


Figura 38 Muestra C2, Dispositivo B3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 38 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 10 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo cuando se incide luz UV con un voltaje positivo, y cuando se incide luz blanca con un voltaje negativo, en este caso se aprecia un incremento de un orden de magnitud respecto a la luz UV. En la medición I-T, se observan los incrementos de la corriente cuando se incide la luz UV, siendo la onda larga, la que presenta un mayor aumento de corriente. En la medición C-V se realiza un barrido de -20 V a 10 V y podemos ver un comportamiento no característico del capacitor MOS.

La figura 39 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra D2 en el dispositivo C3 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

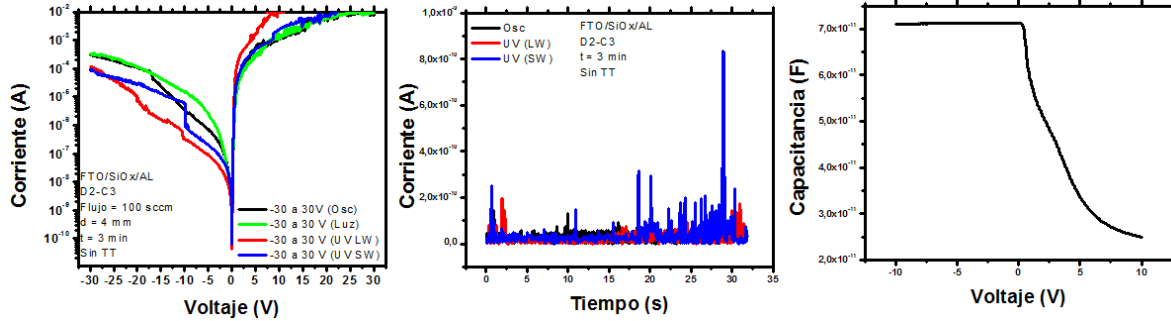


Figura 39 Muestra D2, Dispositivo C3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 39 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en 5 V, en esta figura se puede ver que al incidir luz UV de onda larga, la corriente llega hasta 1mA. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; la medición C-V se realizó con un barrido de -10 V a 10 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en -5 V hasta 0 V y el comienzo de la zona de inversión en 10 V.

La figura 40 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra D3 en el dispositivo C1 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al sin tratamiento térmico (TT).

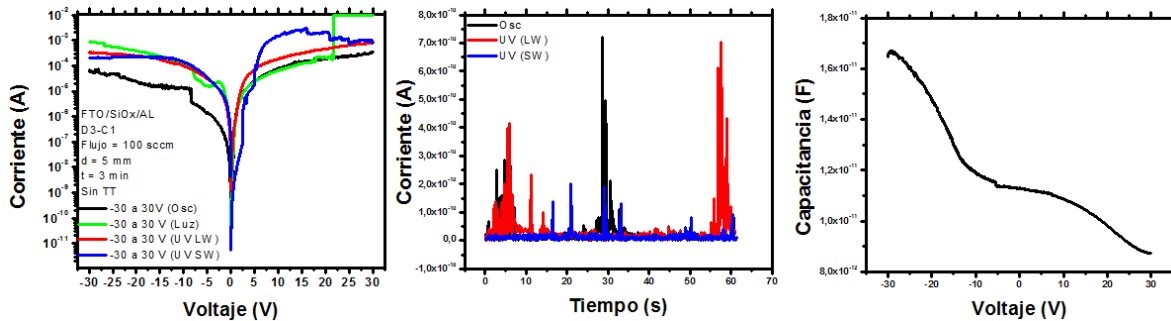


Figura 40 Muestra D3, Dispositivo C1, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.

En la figura 40 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en 20 V, cuando se le incide luz blanca, pero antes de este brinco, la corriente era mayor con la luz UV de onda corta. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes, con picos pronunciados al principio y al final de la medición; la medición C-V se realizó con un barrido de -30 V a 30 V y podemos ver una zona de

acumulación que comienza en -30 V y una doble zona de inversión en -5 V y en 30 V.

4.2.4 Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOS con contacto de FTO Con Tratamiento Térmico.

La figura 41 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A1 en el dispositivo D3 de la estructura FTO/SiO_x/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

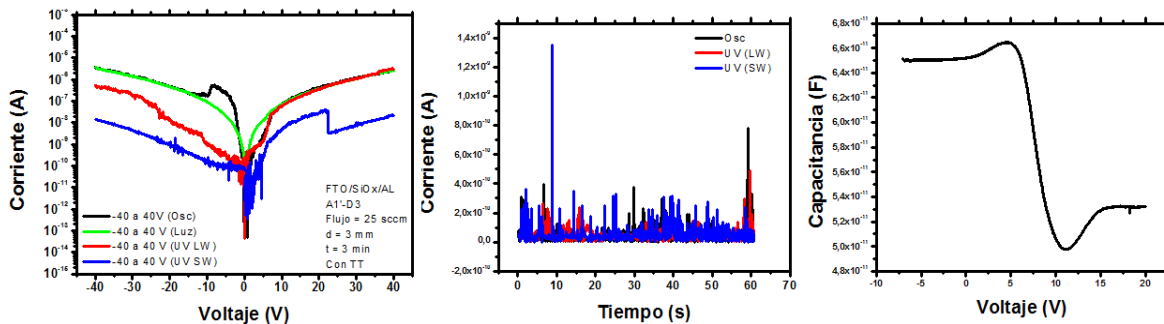


Figura 41 Muestra A1, Dispositivo D3, Estructura MOS – FTO/SiO_x/Si/Al con TT.

En la figura 41 se puede observar un barrido de voltaje de -40 V a 40 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo cuando se le incide luz blanca y luz UV de onda larga. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; en la medición C-V se realiza un barrido de -10 V a 20 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en 0 V hasta 6 V y el comienzo de la zona de inversión en 12 V.

La figura 42 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra A3 en el dispositivo C4 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

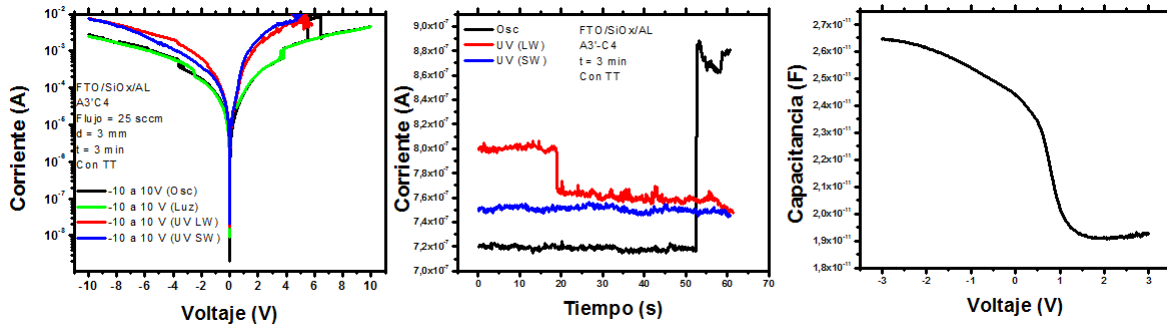


Figura 42 Muestra A3, Dispositivo C4, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 42 se puede observar un barrido de voltaje de -10 V a 10 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en 6 V, con los dos tipos de luz UV y en oscuridad, aunque está cae después de los 6 V. En la medición I-T, se observan grandes incrementos de corriente, con los diferentes tipos de luz UV. En la medición C-V se realiza un barrido de -3 V a 3 V y podemos ver una zona de acumulación que comienza en -3 V y el comienzo de la zona de inversión en 1 V.

La figura 43 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra B2 en el dispositivo E1 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

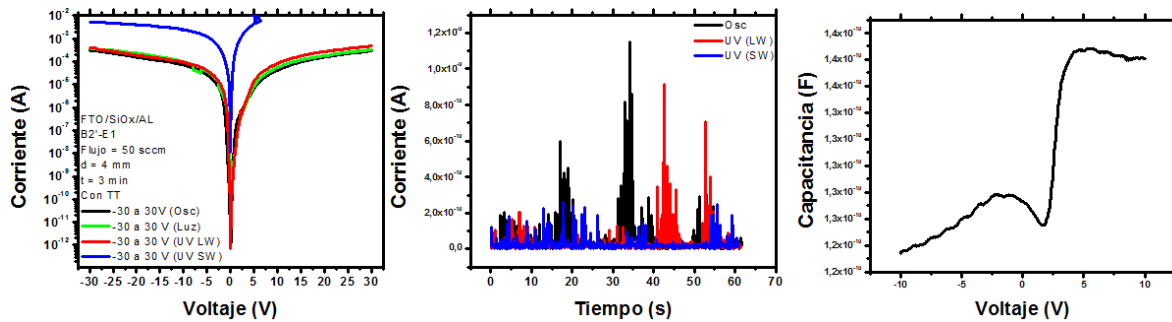


Figura 43 Muestra B2, Dispositivo E1, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 43 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; la corriente se mantiene igual, cuando está en oscuridad, expuesta a luz blanca y con luz uv de onda larga, pero cuando se incide luz UV de onda corta, se presenta un aumento bastante significativo en la corriente. En la medición I-T, se

observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; en la medición C-V se realiza un barrido de -10 V a 10 V y podemos ver una gráfica característica del MOS, con la inversión comenzando en -10 V y la acumulación en 4 V.

La figura 44 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra C1 en el dispositivo D4 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

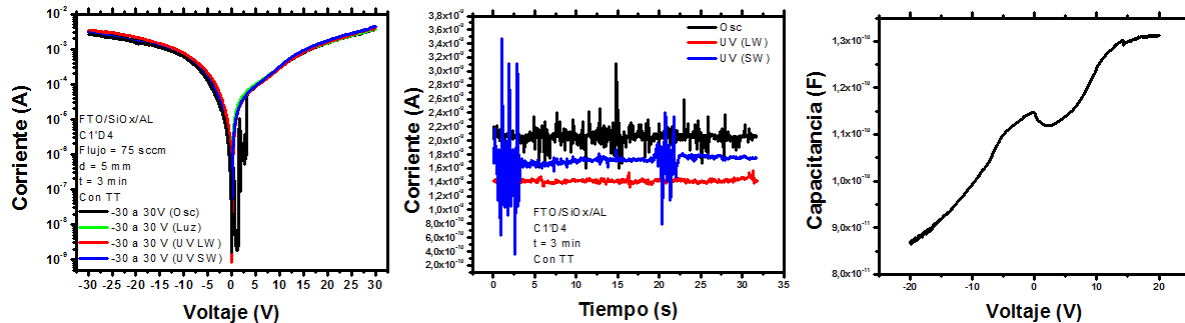


Figura 44 Muestra C1, Dispositivo D4, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 44 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; la corriente se mantiene igual, cuando está en oscuridad, la corriente disminuye considerablemente. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente, pero con los incrementos de corriente bastante notorios. La medición C-V se realiza un barrido de -20 V a 20 V y podemos ver una gráfica característica del MOS, con la inversión comenzando en -20 V y una doble acumulación 0 V y en 7 V.

La figura 45 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra C2 en el dispositivo B1 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

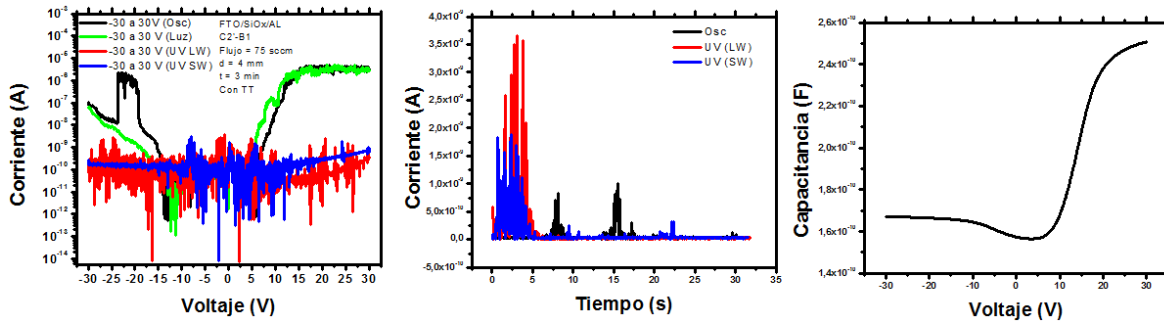


Figura 45 Muestra C2, Dispositivo B1, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 45 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo cuando es sometida a luz blanca, así como a oscuridad, se puede apreciar un aumento notable en la corriente, de cuatro ordenes de magnitud. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente para todas las corrientes; en la medición C-V se realiza un barrido de -30 V a 30 V y podemos ver una gráfica característica del MOS, con su zona de inversión en -20 V y la acumulación en 30 V.

La figura 46 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra C3 en el dispositivo D3 de la estructura FTO/SiOx/Si/Al con tratamiento térmico (TT).

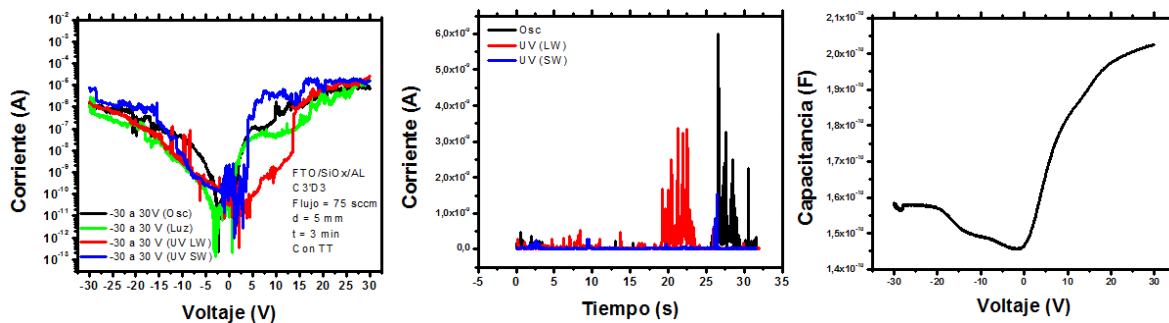


Figura 46 Muestra C3, Dispositivo D3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.

En la figura 46 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo en cuando se le incide luz UV de onda corta, llegando a los mA, lo cual contrasta con la corriente mínima cuando es sometida a luz UV de onda larga. En la medición I-T, se observan grandes oscilaciones de corriente a partir de 20s para todas las corrientes; en la medición C-

V se realiza un barrido de -30 V a 30 V y podemos ver una gráfica que se asemeja a la típica del capacitor MOS.

4.3 Mediciones Eléctricas (I-V, I-T y C-V) de los dispositivos MOM con contacto de FTO.

La figura 47 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra M1 en el dispositivo F4 de la estructura FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.

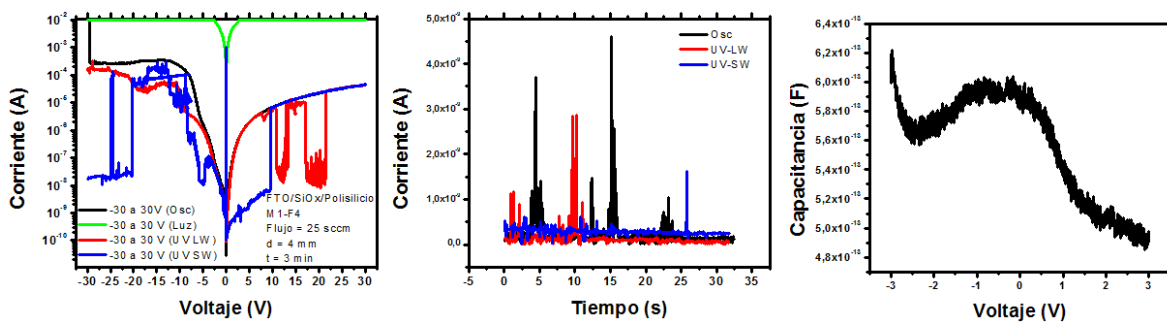


Figura 47 Muestra M1, Dispositivo F4, Estructura MOM – FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.

En la figura 47 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; se puede apreciar que se consigue la mayor corriente, cuando la muestra es sometida a luz blanca, mientras que con la luz UV, se observan, subidas y caídas de corriente. La medición I-T nos muestra un pequeño incremento en la corriente, con los diferentes tipos de luz, aunque también se aprecian picos bastante pronunciados. La medición C-V nos muestra un comportamiento atípico del capacitor MOM.

La figura 48 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra M2 en el dispositivo A1 de la estructura FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.

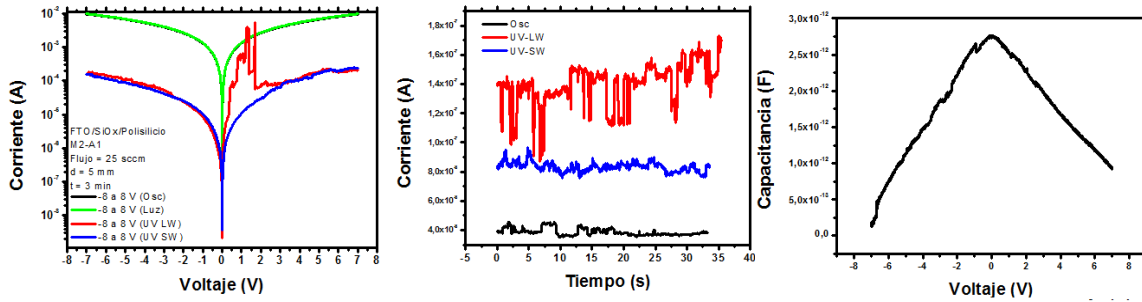


Figura 48 Muestra M2, Dispositivo A1, Estructura MOM – FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.

En la figura 48 se puede observar un barrido de voltaje de -8 V a 8 V en la medición I-V; el comportamiento es similar entre luz blanca y luz UV, solo que se recorren varios órdenes de magnitud, por lo cual se deduce que esta muestra presenta efecto fotoeléctrico con la luz blanca. En la medición de I-T se puede observar los incrementos de corriente, que se apreciaron en la gráfica I-V, por lo cual se comprueba la presencia de efecto fotoeléctrico. En la gráfica de C-V se presenta un comportamiento atípico de estas estructuras.

La figura 49 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra M3 en el dispositivo A2 de la estructura FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.

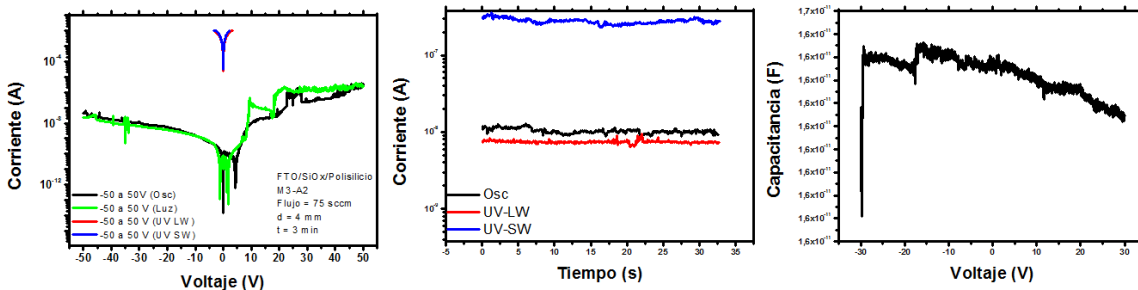


Figura 49 Muestra M3, Dispositivo A2, Estructura MOM – FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.

En la figura 49 se puede observar un barrido de voltaje de -50 V a 50 V en la medición I-V; la corriente encuentra su máximo cuando es sometida a luz UV, presentando un incremento bastante notable, respecto a la luz blanca y a la oscuridad. En la medición I-T, se observan grandes incrementos de corriente, con los diferentes tipos de luz, demostrando que si existe efecto fotoeléctrico en esta muestra. Y la gráfica de C-V presenta un barrido de -30 V a 30 V, con un comportamiento atípico de estas estructuras, no reportado antes.

La figura 50 muestra las gráficas de I-V, I-T y CV, obtenidas de la muestra M4 en el dispositivo A1 de la estructura FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.

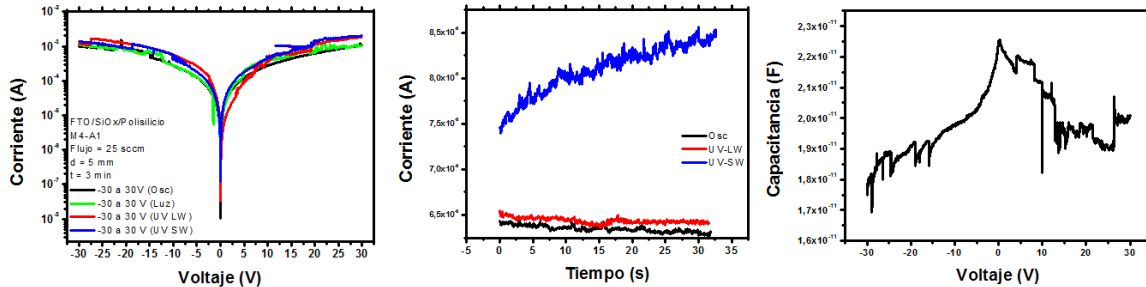


Figura 50 Muestra M4, Dispositivo A1, Estructura MOM – FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.

En la figura 50 se puede observar un barrido de voltaje de -30 V a 30 V en la medición I-V; se puede observar que el comportamiento es similar entre todas las corrientes, sin presentar incrementos significativos, sin embargo, al aplicar una luz, la corriente aumenta cuando el voltaje es 0, lo cual es característico del efecto fotoeléctrico. En la medición I-T, se observan grandes incrementos de corriente, con los diferentes tipos de luz, demostrando que si existe efecto fotoeléctrico en esta muestra. Y la gráfica de C-V presenta un barrido de -30 V a 30 V, con un comportamiento atípico de estas estructuras, no reportado antes.

4.4 Análisis de las Curvas I-V y discusión.

En el presente trabajo de tesis, se realizaron caracterizaciones eléctricas a varios dispositivos MOS, con la finalidad de encontrar efecto fotoeléctrico, que nos sirviera para la realización de fotodetectores, por lo tanto, se seleccionaron los dispositivos con los mejores resultados:

- Placa A3' MOS – Al/SiOx/Al (Figura 26).
- Placa C3' MOS – Al/SiOx/Si/Al (Figura 28).

- Placa D2' MOS – Al/SiOx/Si/Al (Figura 30).
- Placa D3' MOS – Al/SiOx/Si/Al (Figura 31).
- Placa A1 MOS – FTO/SiOX/Si/Al (Figura 32).
- Placa B2' MOS – FTO/SiOx/Si/Al (Figura 42).
- Placa M2 MOM – FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo (Figura 47).
- Placa M3 MOM – FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo (Figura 48).
- Placa M4 MOM – FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo (Figura 49).

Es importante mencionar que las muestras que respondieron mejor, presentan un flujo de depósito de SiOx de 100 sccm, además que la mayoría de muestras cuentan con un tratamiento térmico en un ambiente de Nitrógeno, lo cual contradice a las muestras de fotoluminiscencia, en las cuales se veían una disminución de la misma, cuando las muestras eran sometidas al tratamiento térmico, por último, cabe mencionar que las estructuras que mejor respondieron fueron las que presentaban un contacto óhmico de aluminio, seguidas por las estructuras MOM.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

En el presente trabajo de tesis, se estudiaron e investigaron películas simples de SiO_x en sustratos de Silicio tipo n de una sola capa. Así como la fabricación de una película conductora transparente, que nos sirvió como contacto Óhmico de los capacitores MOS que se presentaron en el presente trabajo. Se encuentra mediante las mediciones I-V con Luz blanca y UV el efecto fotoeléctrico en las muestras analizadas, y de las diferentes caracterizaciones eléctricas se observan diferentes comportamientos fotoeléctricos interesantes en la presente tesis.

Es importante conocer las condiciones de depósito de las películas de SiO_x, ya que de esta forma se obtuvieron muestras con comportamientos eléctricos sumamente interesantes.

Anexos

Anexo 1-A – Proceso Experimental.

En este apartado se menciona la limpieza de sustratos y elementos que conforman al sistema. También, se describe el proceso de obtención de las fuentes sólidas, así como de las películas de SiO_x.

Limpieza de sustratos

Es importante realizar correctamente la limpieza de los sustratos, para evitar en la mayor medida óxidos nativos y compuestos orgánicos que puedan afectar el proceso de depósito. A continuación se describe el proceso de limpieza.

Eliminación de grasas en la superficie de los sustratos

1. Introducir las obleas en xileno, durante 10 min en ultrasonido.
2. Introducir las obleas en acetona, durante 10 min en ultrasonido.
3. Introducir las obleas en metanol, durante 10 min en ultrasonido.
4. Enjuagar las obleas en agua desionizada.

Eliminación del óxido nativo de la superficie

1. Sumergir las obleas en una solución de HF al 10% por tres segundos.
2. Enjuagar las obleas en agua desionizada.

Limpieza de los componentes del reactor

El tipo de limpieza realizado varía ligeramente en función del material a limpiar, pero en todos los casos consiste en el desengrasado con solventes orgánicos. El orden y tiempo de limpieza es el siguiente:

1. Xileno durante 10 minutos.
2. Acetona durante 10 minutos.
3. Propanol durante 10 minutos.

Acero inoxidable: Se realiza el desengrasado con solventes orgánicos en ultrasonido. Cuando se ha secado a temperatura ambiente se envuelve en plástico auto adherente para su uso posterior.

Tubo de cuarzo: Se desengrasa con solventes orgánicos y posteriormente se decapa en Ácido Fluorhídrico, moviendo el tubo durante aproximadamente 5 minutos, agitándose después con cuidado durante aproximadamente 1 minuto y enjuagando enseguida con agua desionizada.

Sellos de bitón: Se limpia con papel óptico humedecido en propanol.

Burbujeador y fuente de cuarzo: Se limpian con solventes orgánicos en ultrasonido.

Tubería y conexiones de plástico: Se realiza un enjuague con propanol y se deja secar.

Anexo 1-B – Preparación del óxido de Estaño dopado con flúor.

Para la preparación de una solución de 50ml de FTO se requieren los siguientes materiales:

- 3.57 gramos de Cloruro de Estaño pentahidratado.
- 0.19 gramos de Fluoruro de Amonio.
- Etanol.
- Agua destilada o desionizada.
- Matraz aforado de 50 ml.
- Limpiador por ultrasonido.

1. El primer paso a seguir es pesar el Cloruro de Estaño y el Fluoruro de Amonio. El cloruro de Estaño se debe manejar con materiales plásticos por lo corrosivo que es, una vez pesado el material, lo que se debe hacer es vaciar el Cloruro de Estaño en el Matraz aforado y agregar 30 ml de Etanol.
2. A continuación se debe colocar el Matraz en el limpiador por ultrasonido para disolver todo el cloruro de Estaño en el Etanol.

3. Mientras se disuelve el Cloruro de Estaño, se debe colocar el Fluoruro de Amonio en un recipiente (Un vaso de precipitados funciona) y agregar gotas de agua destilada y mover constantemente el recipiente, todo esto para disolver los cristales, no debemos de agregar más de 10 gotas, porque el proceso de disolución del Fluoruro de Amonio se alargará.
4. Una vez disuelto el Fluoruro de Amonio, se debe agregar esta solución al Matraz que contiene el Cloruro de Estaño y se llena el matraz hasta los 50 ml agregando más Etanol, cuando se mezclen el Fluoruro de Amonio y el Cloruro de Estaño, se formara unos hilos blancuzcos, estos hilos se disolverán colocando el Matraz en el limpiador por ultrasonido, hasta obtener una solución totalmente transparente.

Como recomendación se debe dejar reposar el FTO por lo menos 24 horas antes de realizar cualquier depósito.

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1 Estructuras que presenta el Silicio [5].	12
Figura 2 Estructura del Dióxido de Silicio.	13
Figura 3 Unión P-N [7].	¡Error! Marcador no definido.
Figura 4 (a) Elemento con 4 y 3 electrones de valencia, (b) Portadores mayoritarios para un material tipo P [5].	16
Figura 5 (a) Elemento con 4 y 5 electrones de valencia (b) Portadores mayoritarios y minoritarios para un material tipo N [5].	16
Figura 6 Esquema de un capacitor MOS.	21
Figura 7 Comportamiento de la superficie del semiconductor cuando un dispositivo MOS es polarizado. (a) Acumulación. (b) Deserción. (c) Inversión	23
Figura 8 Polarización directa de una unión P-N [9].	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9 Polarización inversa de una unión P-N [9].	19
Figura 10 Esquema del efecto Fotoeléctrico [10]	24
Figura 11 Clasificación de los fotodetectores	27
Figura 12 Esquema del Proceso de Roció Pirolíticó Ultrasónico [16].	34
Figura 13 Esquema del proceso de Metalización al vacío [13].	36
Figura 14 Estructura básica del Capacitor MOS. (a) MOS con contacto de Aluminio. (b) MOS con contacto de FTO. (c) MOM con contacto de FTO.	38
Figura 15 Esquema del equipo usado para la medición de Fotoluminiscencia.	40
Figura 16 Espectrómetro UV-vis del IFUAP, utilizado para las mediciones de Transmitancia.	41
Figura 17 Perfilómetro marca Dektak del IFUAP.	42
Figura 18 Efecto Hall Marca Ecopia, Modelo HMS 5300 del IFUAP.	43
Figura 19 Esquema de conexión para los dispositivos MOS.	45
Figura 20 Espectros de FL de las películas de SiOx depositadas sobre de Silicio sin TT (A1, B1, C1, D1) y Silicio con TT (A2, B2, C2, C3).	49
Figura 21. Espectros de Transmitancia de las películas de SiOx depositadas sobre de Silicio sin TT 3.1 A1, B1, C1, D1) y Silicio con TT 3.1 A2, B2, C2, C3).	49
Figura 22 Espectros de Transmitancia para los contactos de FTO.	50
Figura 23 Muestra A1, Dispositivo E4, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al sin TT.	51

Figura 24 Muestra A3, Dispositivo G1, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al sin TT. ...	53
Figura 25 Muestra D1, Dispositivo D2, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al sin TT. ...	54
Figura 26 Muestra D2, Dispositivo I3, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al sin TT.....	55
Figura 27 Muestra A3, Dispositivo F6, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT....	56
Figura 28 Muestra C1, Dispositivo E6, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT. ...	56
Figura 29 Muestra A1, Dispositivo E4, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al sin TT Placa C3' MOS – Al/SiOx/Si/Al.	57
Figura 30 Muestra D1, Dispositivo L1, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT....	58
Figura 31 Muestra D2, Dispositivo K6, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT. ...	59
Figura 32 Muestra D3, Dispositivo G2, Estructura MOS – Al/SiOx/Si/Al con TT...	60
Figura 33 Muestra A1, Dispositivo D2, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.	61
Figura 34 Muestra A2, Dispositivo A1, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.	61
Figura 35 Muestra A3, Dispositivo A2, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.	62
Figura 36 Muestra B2, Dispositivo B2, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.	63
Figura 37 Muestra C1, Dispositivo D3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.	63
Figura 38 Muestra C2, Dispositivo B3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.	64
Figura 39 Muestra D2, Dispositivo C3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.	65
Figura 40 Muestra D3, Dispositivo C1, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al sin TT.	65
Figura 41 Muestra A1, Dispositivo D3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.	66
Figura 42 Muestra A3, Dispositivo C4, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.	67
Figura 43 Muestra B2, Dispositivo E1, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.	67
Figura 44 Muestra C1, Dispositivo D4, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.	68
Figura 45 Muestra C2, Dispositivo B1, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.	69
Figura 46 Muestra C3, Dispositivo D3, Estructura MOS – FTO/SiOx/Si/Al con TT.	69

Figura 47	Muestra M1,	Dispositivo F4,	Estructura MOM	–
FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.				70
Figura 48	Muestra M2,	Dispositivo A1,	Estructura MOM	–
FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.				71
Figura 49	Muestra M3,	Dispositivo A2,	Estructura MOM	–
FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.				71
Figura 50	Muestra M4,	Dispositivo A1,	Estructura MOM	–
FTO/SiOx/Polisilicio/Cuarzo.				72

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Tipos de Estructuras realizadas.	37
Tabla 2 Espesores de las películas de SiO _x	47

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Canham, L. T. (1990), "Silicon quantum wire array fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers" *Appl. Phys. Lett.* 57 (10) 1046.
- [2] Luna López, J. A, Aceves Mijares, M, Carrillo López. J and Morales Sánchez, A. (2010), "Photoconduction in silicon rich oxide films obtained by LPCVD", *J. Vac. Sci. and Technol. A* 28(2), 170 (2010).
- [3] Luna López, J.A, Vázquez Valerdi, D.E, García Salgado, G, Hernández de la Luz, A.D, Carrillo López, J, Nieto Caballero, F. G, Domínguez, M.A. (2015), "Influence of trapping and de-trapping charge in MOS-like structures with single and twofold SiO_x films as active layers", *Sensors and actuators A*, 233, 83-90.
- [4] Espí López, J., Camps Valls, G y Muñoz Mari, J. (2006). "Fundamentos de Electrónica Analógica", (p. 35), España: U. Valencia.
- [5] Rashid, M. H. (2004), "Electrónica de Potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones", (p. 32) México: Pearson.
- [6] Groover, M. P. (1997), "Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas". 1ª Ed, (p. 859). México: Pearson.
- [7] Holt, C. A. (1989), "Circuitos Electrónicos; Digitales y analógicos", (p. 22), España: Editorial Reverté.
- [8] El-Kareh, B. (2009) "Silicon Devices and Process Integration: Deep Submicron and Nano-Scale Technologies", EUA: Springer.
- [9] Aleidi Nicolás, P. (2012). *Análisis de Distorsión Armónica en Transistores SB/Mosfet* (Maestría en Ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de México.
- [10] Flores, N. H, Figueroa, J. E. (2007) "Física Moderna", (p. 29), México: Pearson.
- [11] Joshi, N.V. (1990) "Photoconductivity: Art, Science & Technology", (p. 1), EUA: Marcel Dekker, Inc.
- [12] Sze, S. M. (1981), "Semiconductor Devices: Physics and Technology", EUA: John Wiley & Sons.
- [13] Williams, M. E., 2012. Microelectrónica y Semiconductores. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Cap. 83, (pag 13-14) España: Organización Editorial del Trabajo.

- [14] Luna López, J. A., Aceves Mijares, M., Carrillo López, J and Morales Sánchez, A, (2010) "Photoconduction in silicon rich oxide films obtained by LPCVD", J. Vac. Sci. and Technol. A 28(2), 170.
- [15] Vázquez Valerdi, D.E. (2011). *Estudio de las Propiedades Estructurales y Ópticas de Películas de Óxido de Silicio no Estequiométrico Depositado Mediante HFCVD*, (Maestría en Ciencias). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- [16] Martínez Martínez, R., G. Juárez L, E. Yescas Mendoza, I. Vázquez Báez, U. Caldiño, C. Falcony. (Septiembre 2012). Inducción luminiscente, caracterización fotoluminiscente y estructural en barro negro como valor agregado. Temas de Ciencia y Tecnología, Vol. 15, (pag, 3 – 8)
- [17] Ramírez Amador, R. (2004). *OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES ÓPTICAS Y ELÉCTRICAS DE PELÍCULAS DE ÓXIDO DE ESTAÑO, PARA APLICACIONES EN FOTODIODOS DE BARRERA SUPERFICIAL* (Maestría en Ciencias). Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica.
- [18] Antonio Méndez Blas. (2015). Módulo A. ESPECTROFOTOMETRO UV - Vis - NIR. 12 de Mayo de 2015, de IFUAP Sitio web: http://www.ifuap.buap.mx/infraestructura/laboratorios/central_espectrofotometro.html.
- [19] Rodriguez, H. and Jiménez, C. (2008). Unidad para supervisión y control de medición de efecto hall con labview. Revistas Científicas Pontificia Universidad Javeriana, Vol. 13 (Ed No. 2), pag, 2-4.
- [20] Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. México: Pearson.