



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería

ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES ELÉCTRICAS EN BICAPAS DE SIOX PARA SU POSIBLE APLICACIÓN EN CELDAS SOLARES.

Tesis profesional para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Y Eléctrico

Presenta:

Zaira Jocelyn Hernández Simón

Asesores:

**Dr. José Alberto Luna López
Dra. Ma. Josefina Robles Águila
Dr. Martín Salazar Villanueva**

INDICE

RESUMEN	V
JUSTIFICACIÓN	VI
OBJETIVOS	VII
<i>GENERAL</i>	VII
<i>PARTICULARES</i>	VII
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	9
<i>1.1 Conceptos básicos en semiconductores</i>	<i>9</i>
1.1.1 Terminología básica.....	9
1.1.2 La unión p-n, polarización directa e indirecta.....	11
1.1.3 Teoría de bandas en sólidos	13
<i>1.2 Efecto Fotovoltaico</i>	<i>15</i>
1.2.1 Efecto fotoeléctrico	15
1.2.2 Efecto Fotovoltaico.....	16
1.2.3 Celda fotovoltaica	17
<i>1.3 Estructura MOS (Metal-Oxido-Semiconductor)</i>	<i>19</i>
1.3.1 Funcionamiento básico de una Estructura MOS	20
1.3.2 Regiones de funcionamiento	21
Acumulación	21
Agotamiento.....	21
Inversión.....	22
<i>1.4 Oxido rico en Silicio (SRO)</i>	<i>23</i>
1.4.1 Descripción	23
1.4.2 Principales Métodos de depósito de las películas SRO.....	24
1.4.3 HFCVD	24
<i>1.5 Técnicas de Caracterización</i>	<i>26</i>
1.5.1 Perfilometría.....	26
1.5.2 Fotoluminiscencia.	26
1.5.3 Transmitancia.....	27
1.5.4 Efecto Hall	28
CAPÍTULO 2: PROCESO EXPERIMENTAL.....	29
<i>2.1 Fabricación de dispositivos MOS y MOM</i>	<i>29</i>
<i>2.2 Películas (SiO_x/SiO_y) y Polisilicio</i>	<i>30</i>

2.2.1	Parámetros de depósito de una capa y de doble capa	31
2.2.2	Tratamiento térmico.....	34
2.3	<i>Contactos de Aluminio (Metalización de aluminio al alto vacío)</i>	34
2.4	<i>Contactos de FTO (Spray-pyrolysis)</i>	36
2.4.1	Proceso de depósito por Spray Pyrolysis.....	37
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIONES ÓPTICAS, ELÉCTRICAS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS		39
3.1	<i>Caracterizaciones Ópticas</i>	40
3.1.1	Fotoluminiscencia.	40
3.1.2	Resultados Fotoluminiscencia en Películas Simples.....	40
3.1.3	Resultados Fotoluminiscencia en Películas Dobles	42
3.1.4	Transmitancia.....	44
3.1.5	Resultados Transmitancia en Películas Simples	45
3.1.6	Resultados Transmitancia en Películas dobles	46
3.2	<i>Caracterizaciones Eléctricas</i>	48
3.2.1	Mediciones Corriente-Voltaje (I-V), Corriente-Tiempo (I-T) y Capacitancia-Voltaje (CV).....	48
3.2.2	Resultados Caracterizaciones Eléctricas Grupo A.....	50
3.2.3	Resultados Caracterizaciones Eléctricas Grupo B	54
3.2.4	Resultados Caracterizaciones Eléctricas Grupo C	59
3.2.5	Resultados Caracterizaciones Eléctricas Grupo D	66
CAPÍTULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS		76
4.1	<i>Muestras que presentan efecto fotoeléctrico y fotovoltaico</i>	79
4.2	<i>Conclusiones</i>	81
BIBLIOGRAFÍA		84
ÍNDICE DE TABLAS		86
ÍNDICE DE FIGURAS		86
ANEXO 1: PROCESOS DE LIMPIEZA		91
1A:	<i>Eliminación de grasas en la superficie para substratos</i>	91
1B:	<i>Eliminación del óxido nativo de la superficie para las obleas de silicio</i>	91
1C:	<i>Limpieza de los componentes del reactor</i>	91
ANEXO 2: SISTEMA HFCVD.....		92
ANEXO 3: PREPARACIÓN DEL FTO.....		96

RESUMEN

Con la finalidad de aportar un estudio innovador de las propiedades eléctricas y fotovoltaicas de estructuras tipo MOS (Metal-Oxido-Semiconductor) y MOM (Metal-Oxido-Metal) con capas dobles de óxido de silicio no estequiométrico (SiO_x), en el presente trabajo se plantea la fabricación de dichas estructuras empleando la técnica de Deposito químico en fase vapor asistido por filamento caliente (HFCVD), y como sustrato obleas de silicio cristalino y cuarzo en el caso de las estructuras MOM. Las películas de SiO_x se depositaron mediante diversos flujos y temperaturas para conseguir películas con propiedades ópticas y estructurales bien definidas (obtenidas en trabajos anteriores), cabe señalar que estas propiedades son adecuadas para la emisión fotoluminiscente, así como también el contenido de silicio permite la formación de nanocristales de silicio que de alguna manera contribuyen eficientemente a la absorción de fotones.

Los dispositivos tipo MOS con bicapa de SiO_x fueron realizados con la siguiente estructura: [Al/SiO_x/SiO_y/c-Si/Al] y [FTO/SiO_x/SiO_y/c-Si/Al], la mitad de bicapas SiO_x presentan tratamiento térmico mientras que la otra mitad no.

Además con las mejores películas se realizaron estructuras tipo MOM que tienen una estructura [FTO/SiO_x/SiO_y/Polisilicio/Cuarzo] y no presentan ningún tratamiento térmico.

A cada estructura se le realizó un estudio óptico y eléctrico mediante las caracterizaciones de: Fotoluminiscencia, Transmitancia, Perfilometría, Corriente-Voltaje (I-V), Corriente-Tiempo (I-T) y Capacitancia-Voltaje (C-V), éstas tres últimas caracterizaciones se hicieron bajo condiciones de oscuridad, luz blanca, luz UV de onda corta y de onda larga.

La contribución del presente trabajo nos permitirá encontrar los fenómenos fotovoltaicos presentes en las diferentes estructuras o dispositivos realizados, para su mejora y posteriormente posible aplicación en dispositivos fotoconductivos y fotovoltaicos.

JUSTIFICACIÓN

Hablando en materia de energía el mercado fotovoltaico sigue creciendo, actualmente los proyectos de investigación y desarrollo tecnológico han estado dirigidos hacia la creación de celdas solares más eficientes, por lo tanto, se requiere con urgencia una mayor aportación a la investigación de materiales que puedan ser aplicados a celdas solares de manera eficaz y económica.

La investigación de materiales semiconductores que logren absorción y emisión de luz a partir del silicio presentan una gran oportunidad tecnológica debido a que es un material muy abundante en la naturaleza y su avance tecnológico es impresionante.

Los dispositivos con SRO (Óxido Rico en Silicio) como película delgada tienen características ópticas y estructurales muy interesantes, como capas absorbentes de radiación UV-Visible debido al efecto combinado de los nanocristales de silicio y defectos inmersos en las películas. Por ello el estudio de sus propiedades es lo que nos abre la posibilidad y nos da un camino para el desarrollo de novedosos y diversos dispositivos optoelectrónicos, tales como emisores de luz y celdas solares (efecto fotovoltaico), 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.

OBJETIVOS

GENERAL

Investigación de las propiedades eléctricas (I-V, I-T y C-V) de estructuras tipo MOS y MOM con bicapas de óxido de silicio no estequiométrico ($\text{SiO}_x/\text{SiO}_y$). Para contribuir con la creación, experimentación y nuevos resultados en estos dispositivos SRO de película delgada, que permitan determinar si es posible su aplicación a celdas solares.

PARTICULARES

- Analizar la teoría de operación de estructuras tipo MOS y MOM, Óxido rico en silicio (SRO), técnicas de caracterización y el efecto fotovoltaico.
- Seleccionar las películas SiO_x con mejores características estructurales, ópticas y eléctricas.
- Realizar estructuras MOS y MOM con las películas seleccionadas usando aluminio y FTO como contacto.
- Caracterizar las propiedades eléctricas y fotovoltaicas de las estructuras en oscuridad y con luz (efecto fotovoltaico), mediante mediciones Corriente-Voltaje, Corriente-Tiempo y Capacitancia-Voltaje (I-V, I-T y C-V).
- Analizar los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1 Conceptos básicos en semiconductores

1.1.1 Terminología básica

Numero atómico. Nos provee la cantidad de electrones, protones y neutrones que conforman cada átomo del elemento, para el silicio con número atómico 14 se tienen 14 electrones, 14 protones y 14 neutrones

Niveles de energía. Orbitales del átomo que como su nombre lo dice presentan diferentes niveles de energía que contienen a los electrones de cada átomo.

El número máximo de electrones que puede haber en cada nivel de energía está determinado por la ecuación: **$Ne=2n^2$**

Donde n=Numero del nivel de energía

Para el silicio de acuerdo al número atómico que es 14 se tiene 14 electrones distribuidos de la siguiente manera

Primer nivel: $2(1)^2= 2(1)= 2$ electrones

Segundo nivel: $2(2)^2= 2(4)= 8$ electrones

Tercer nivel: $2(3)^2=2(9)= 18$ electrones, pero como $8+2=10$ y el número atómico es 14 en la última capa el silicio solo tiene 4 electrones

Electrones libres. Electrones que se logran extraer del último nivel de energía también llamado **capa de valencia** y en su lugar dejan un “hueco” en la línea de energía de la cual salieron, un hueco se comporta como una carga positiva

Cristal de silicio. Se forma cuando los átomos de silicio se aproximan a más átomos de silicio las capas de valencia se juntan y en este caso cada átomo

comparte un electrón con los átomos vecinos y a cada electrón compartido se le denomina enlace covalente.

Regla del octeto. Establece que si los átomos completan su capa de valencia con 8 electrones la forma que adquieren es una estructura muy estable, que no da lugar a que haya electrones libres y a este efecto se le llama saturación de valencia.

Cristal puro. Por el efecto de saturación de valencia no da lugar a electrones libres y se comporta como un aislante perfecto, que es aquel que por su estructura muy difícilmente da lugar a electrones libres, lo cual ocasiona un flujo de electrones nulos o corriente eléctrica nula. Por otro lado un conductor es aquel que por su estructura fácilmente puede intercambiar o perder sus electrones de valencia.

Semiconductor. No es un aislante perfecto, pero tampoco es un conductor por excelencia sino que tiene comportamiento de ambos, esto dependiendo de la energía térmica que se le aplique al material

Semiconductor intrínseco. Un semiconductor cuando se encuentra en estado puro.

Semiconductor extrínseco. Cuando a la estructura molecular cristalina pura se le introduce cierta alteración y esos elementos permiten el paso de la corriente eléctrica.

Dopado. Quiere decir que se le dotara al cristal de algunas impurezas, las impurezas son algunos átomos de otro material

Dopado con un material pentavalente (Semiconductor tipo n). Se realiza con Fosforo o Arsénico cuya estructura tiene 5 electrones en la última capa de valencia, cuantos más átomos pentavalentes o impurezas se añadan a un

semiconductor intrínseco puro, más electrones libres habrá, las impurezas donaran un electrón adicional por cada átomo pentavalente entonces habitualmente se denominan impurezas donadoras y este semiconductor lleva el nombre de semiconductor tipo n donde n significa negativo.

Dopado con un material trivalente (Semiconductor tipo p). Existe la posibilidad de dopar un cristal de silicio con impurezas aceptadoras introduciendo al cristal de silicio átomos de otro material pero ahora trivalentes cuya estructura tiene 3 electrones en su última capa de valencia como el Boro, Aluminio y Galio, cuando se introduce esta impureza trivalente al cristal intrínseco esta donara un hueco y por lo tanto se denomina impureza aceptadora porque cada uno de los huecos con los que contribuye puede aceptar un electrón libre y por lo tanto a este cristal se le denomina semiconductor tipo p donde p significa positivo. [17]

1.1.2 La unión p-n, polarización directa e indirecta

La unión p-n. Es aquella conformada por un cristal extrínseco tipo n con uno tipo p, justo donde se juntan dichos cristales se conforma una línea llamada de unión. Los electrones libres del material tipo n comienzan a traspasar la línea de unión con lo cual se convierten en portadores minoritarios del material tipo p el cual no tardara en atraerlos a los huecos, cuando esto ocurre el hueco desaparece y el electrón libre se convierte en un electrón de valencia y poco a poco estos pares van formando en la línea de unión una zona llamada **barrera interna de potencial, zona de carga espacial, de agotamiento o de depleción**, la acumulación de iones positivos en la zona n y de iones negativos en la zona p, crea un campo eléctrico (E) que actuará sobre los electrones libres de la zona n con una determinada fuerza de desplazamiento, que se opondrá a la corriente de electrones y terminará deteniéndolos. A la barrera que impide el paso de los electrones del lado n al lado p se le denomina **potencial de barrera** y se expresa en Volts cualquier electrón que quiera cruzar la línea de unión deberá vencer ese potencial de barrera.

El voltaje que habrá en dicho potencial depende de 3 cosas:

- 1.- Cantidad de dopado del material n y p
- 2.- Temperatura la que este expuesto el material
- 3.- Tipo de material, típicamente el potencial de barrera para el silicio a 25°c es de 0.7v

Polarización de la unión p-n en directa. Se colocan 2 placas de metal una del lado del material tipo n y otra del lado del material tipo p y se conecta a estas placas una fuente de tensión de corriente continua y la polaridad de la fuente debe conectarse positivo con el lado p y negativo del lado n, para que haya flujo de electrones o corriente eléctrica, la fuente de voltaje debe proporcionar un voltaje mayor al potencial de barrera es decir mayor 0.7V y así los electrones proporcionados por la fuente tendrán la energía suficiente para atravesar la barrera y serán atraídos al lado positivo de la placa y el recorrido se repetirá

Entonces mientras no se rompe la barrera se puede decir que el semiconductor no conduce y cuando se rompe comienza a elevarse la corriente abruptamente.

Polarización de la unión p-n en inversa. Se colocan 2 placas de metal una del lado del material tipo n y otra del lado del material tipo p y se conecta a estas placas una fuente de tensión de corriente continua y la polaridad de la fuente debe conectarse positivo con el lado n y negativo del lado p, y debido a esto la polarización se comporta diferente a como se comportaría polarizada en directa, pues lo que ocurrirá es que el lado positivo comenzara a recibir electrones del exterior del semiconductor llenando los huecos y haciendo por tanto más grande la barrera de potencial, esto mismo ocurre para el lado negativo, pues los electrones libres que se encuentran en el material serán atraídos hacia la placa positiva haciendo de la misma forma una barrera de potencial más grande, el valor que alcanzara entonces la barrera de potencial es igual al potencial de la fuente de tensión, sin embargo mientras se hace crecer más el valor del voltaje y las zonas de empobrecimiento se hacen más anchas, llegara un momento en que el material este totalmente saturado mientras esto ocurre se presenta una corriente llamada

corriente de transición la cual es muy pequeña, una vez que el material se satura no habrá cambios en esta corriente, sin embargo cuando el material se encuentra saturado, los electrones provenientes de la fuente poseen la suficiente fuerza cinética como para romper enlaces covalentes del lado n y esto ocasiona que ahora existan dos electrones libres atraídos al lado positivo de la fuente, pero también el electrón ahora libre del lado n también tiene la suficiente energía cinética como para desprender otro electrón más y así sucesivamente y a esto se le conoce como efecto avalancha pues se irán multiplicando por este efecto los electrones libres que ahora fluirán por el exterior del semiconductor lo que generara abruptamente una corriente eléctrica y a la magnitud de voltaje necesaria como para que ocurra este efecto avalancha se le conoce como **voltaje de ruptura**.

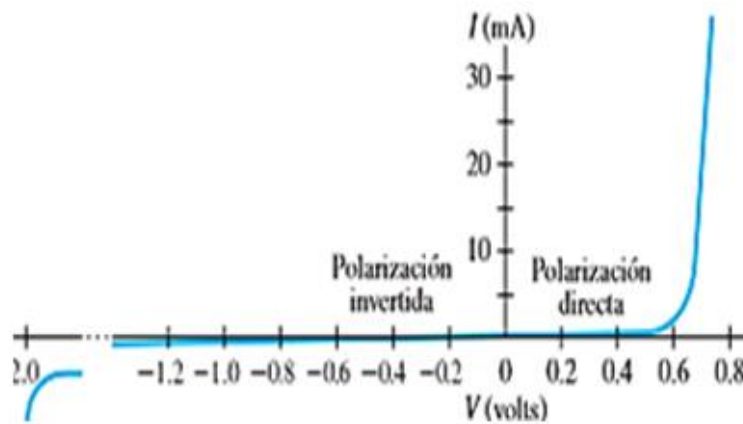


FIGURA 1.1 Curva I-V que representa el comportamiento normal de un diodo en polarización directa e inversa [2]

1.1.3 Teoría de bandas en sólidos

Cada átomo tiene un conjunto de niveles de energía posibles, cuando una gran cantidad de átomos se unen, como en una estructura, el número de capas de valencia (los niveles de energía más altos) es tan grande y la diferencia de energía entre cada uno de ellos tan pequeña que se puede considerar como si los niveles de energía conjunta formaran bandas continuas de energía, sin embargo debido a que algunos intervalos de energía no contienen orbitales, se crean ciertas brechas energéticas entre las diferentes bandas.

La banda de valencia es la que está ocupada por aquellos electrones que se encuentran en el último nivel energético de los átomos. Los electrones de valencia son los que forman los enlaces entre los átomos, pero no intervienen en la conducción eléctrica.

La banda de conducción está ocupada por los electrones libres, estos electrones son los responsables de conducir la corriente eléctrica.

Entre la banda de valencia y la de conducción existe una zona denominada **banda prohibida o gap (E_g)** que separa ambas bandas y en la cual no pueden encontrarse los electrones.

El aspecto crucial de un buen conductor es que la banda de energía más alta que contiene electrones sólo está parcialmente llena.

Por otra parte, en un material que es buen aislante, la banda de valencia, está completamente llena. La siguiente banda más alta de energía, llamada banda de conducción, está separada de la banda de valencia por una brecha de energía E_g , por lo general de 5 a 10 eV.

Las bandas para un semiconductor puro o intrínseco, son como las de un aislante, excepto que la banda de conducción no llena está separada de la banda de valencia llena por una brecha de energía prohibida mucho más pequeña (E_g) por lo general del orden de 1 eV. A temperatura ambiente, algunos electrones adquieren suficiente energía térmica para llegar a la banda de conducción, y por lo tanto puede fluir una corriente muy pequeña cuando se aplica un voltaje. A temperaturas más altas, más electrones tienen suficiente energía para saltar la brecha. [1]

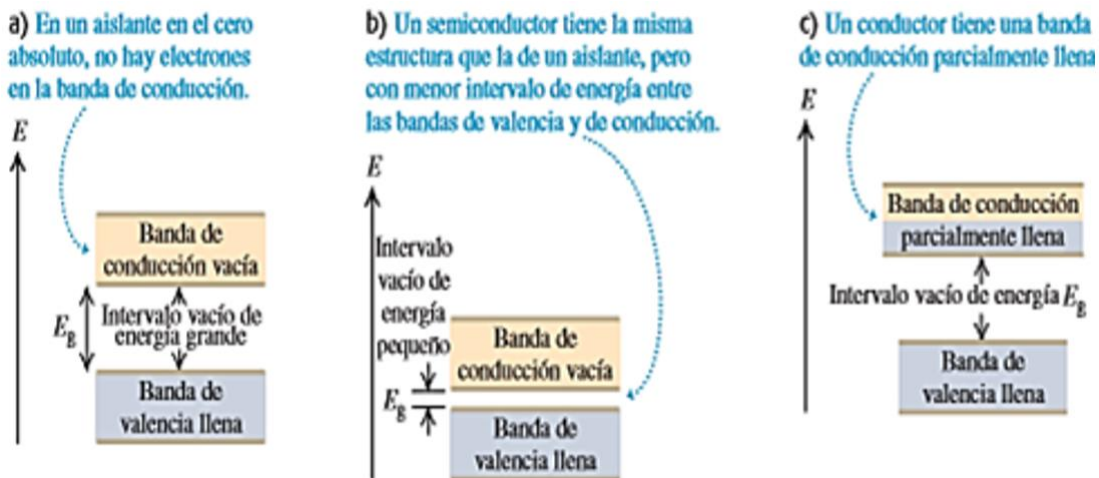


FIGURA 1.2 Representación gráfica de la brecha de energía prohibida (GAP) en aislantes, semiconductores y conductores [2]

1.2 Efecto Fotovoltaico

1.2.1 Efecto fotoeléctrico

En 1905 Albert Einstein desarrolló el análisis correcto del efecto fotoeléctrico, Einstein postuló que un rayo de luz consiste en pequeños paquetes de energía llamados fotones o cuantos.

Un fotón que llega a la superficie es absorbido por un electrón. Esta transferencia de energía es un proceso de todo o nada, a diferencia de la transferencia continua de energía de la teoría clásica; el electrón obtiene toda la energía del fotón o no obtiene nada. Si esta energía es mayor que la **función trabajo** (energía mínima necesaria para arrancar un electrón), el electrón puede escapar de la superficie. [2] Normalmente, un haz de luz puede expulsar electrones de un metal, siempre que tenga una frecuencia mayor que cierto valor mínimo llamado **frecuencia de umbral**.

La explicación de Einstein fue que la energía del fotón es proporcional a la longitud de onda y viene dada por la **relación de Einstein** $E \text{ (eV)} = hc/\lambda$

Donde

$h = 4,136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ (Constante de Planck)

$c = 299792458 \text{ m/s}$ (Velocidad de la luz)

λ = Longitud de onda m

[4]

Las longitudes de onda o frecuencias de la luz se relacionan con el color. La luz visible, tiene longitudes de onda en el intervalo que va aproximadamente de 400 nm a 750 nm. Esto se conoce como espectro visible, y dentro de él se encuentran los diferentes colores, del violeta al rojo. La luz con longitud de onda más corta que 400 nm se llama ultravioleta (UV), y la luz con longitud de onda mayor que 750 nm se llama infrarroja (IR), tal y como se muestra en la figura. [1]

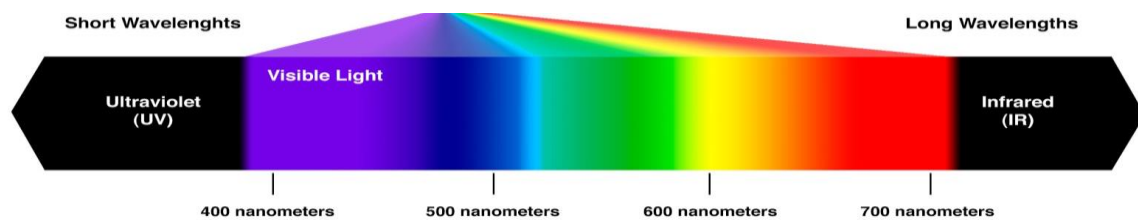


FIGURA 1.3 Longitudes de onda y espectro [25]

La energía necesaria para romper el enlace que une las cargas de un átomo de un cristal de silicio es $E=1,12\text{eV}$. La energía de cualquier fotón con $\lambda < 1100\text{ nm}$ es mayor que la energía de enlace de las cargas en los átomos del silicio. Por ello un cristal de silicio puede absorber hasta el 80% de la energía contenida en la luz solar. [12]

1.2.2 Efecto Fotovoltaico

El efecto fotovoltaico se basa en el efecto fotoeléctrico, para transformar las diferentes longitudes de onda que recibe de la luz en energía eléctrica, mediante la generación de una diferencia de potencial como resultado de la absorción de la radiación.

El efecto fotovoltaico ocurre cuando:

1. Se realiza una unión tipo p-n y como se había mencionado con anterioridad, se forma la zona de deplexion, que carece de carga en movimiento y forma

un campo eléctrico interno.

2. Ocurre la generación de pares electrón-hueco en ambos lados de la unión p-n debido a la absorción de fotones de luz.
3. Los pares electrón-hueco generados alcanzan la zona de deplexion o carga espacial
4. Los pares electrón-hueco son separados por el campo eléctrico interno, luego los electrones en el semiconductor tipo p se desplazan hacia el tipo n y los huecos del tipo n se mueven hacia el tipo p. **[5]**

Puesto que los electrones y los huecos tienen cargas opuestas, al moverse en la banda de conducción y de valencia, respectivamente en sentidos contrarios causan una corriente eléctrica que tiene la misma dirección convencional, entonces si se conecta un conductor entre los extremos del diodo iluminado, la corriente eléctrica causada circulará a través de todo el circuito y diremos entonces que tenemos una fotocorriente.

La efectividad del campo eléctrico interno para hacer fluir a los portadores minoritarios foto generados de forma que produzcan la fotocorriente mencionada, dependerá de que los mismos no se pierdan en su trayecto hacia la región donde existe el campo y también de la intensidad del campo eléctrico, una forma más correcta de visualizar el efecto fotovoltaico es entender que para que se genere una fotocorriente, los pares electrón- hueco generados por la luz deben de ser separados antes de que se recombinen a través de las trampas en el volumen o en la superficie. **[14]**

1.2.3 Celda fotovoltaica

Las celdas fotovoltaicas están formadas generalmente por una juntura semiconductor P-N de silicio de gran superficie y reducido espesor (típico: 0,3 mm), similar a la utilizada en los diodos.

En la transición entre las capas P y N se forma una capa límite en la que se establece una barrera de potencial. Para lograr un buen rendimiento energético, la capa límite deberá encontrarse lo más cerca posible de la superficie expuesta a la luz.

La celda se completa mediante los contactos óhmicos de reducida resistencia eléctrica para no provocar caídas de tensión adicionales en las capas P y N.

Al incidir la luz sobre la juntura, una parte de la luz se refleja (energía perdida) y la otra penetra en el semiconductor. Los fotones que ingresan con energía suficiente liberan cada uno un par electrón-hueco. Los portadores de carga liberados se propagan por el cristal mediante difusión o bajo la influencia de un campo eléctrico. Los electrones pueden recombinarse durante su recorrido, pero si un portador minoritario (electrón en la zona P, hueco en la zona N) alcanza la capa límite de la barrera de potencial, queda atraído por el campo eléctrico de esa capa y penetra en la región en que son mayoritarios los portadores de igual signo. Por otro lado, el campo de la capa límite retiene los portadores mayoritarios en la región en que han sido liberados. De este modo, cualquiera que sea la región en que queda absorbido el fotón y liberados los portadores de carga, el efecto fotovoltaico produce un desplazamiento de portadores que da lugar a una diferencia de potencial aprovechable de alrededor de 0,5 V entre los electrodos a circuito abierto. La barrera de potencial impide que el proceso se revierta, aunque puede existir una pequeña corriente de fuga. En circuito cerrado la corriente pasa por la carga del borne P al N, por el exterior de la célula.

Desde el punto de vista eléctrico, las celdas fotovoltaicas pueden compararse con los diodos de silicio normales.

Así la curva tensión-corriente trazada en la oscuridad (O) resulta igual a la de un diodo ordinario, mientras que la curva correspondiente a la incidencia sobre la

celda de una determinada iluminación (E), resulta de la traslación de la curva anterior, proporcional a la energía luminosa recibida.

Analizando la curva (E) se ve, que en el primer cuadrante (1), correspondiente al diodo con polarización directa, la característica no sale del origen, pues a corriente nula la tensión en bornes no es cero (V_{co}).

En el tercer cuadrante (3), la curva (O) indica la corriente inversa de fuga en la oscuridad en función de la tensión inversa, mientras que la curva (E) da la variación de esa corriente con la iluminación. Aquí la celda funciona como fotodiodo.

Finalmente, en el cuarto cuadrante (4), la celda funciona como generador de energía, siendo la región de trabajo normal de las celdas fotovoltaicas. En estas condiciones, la potencia que entrega pasa por un máximo (P_m) para determinados valores de tensión (V_m) y corriente (I_m), fijados en función de la resistencia óptima de carga ($R_m = V_m / I_m$). [13]

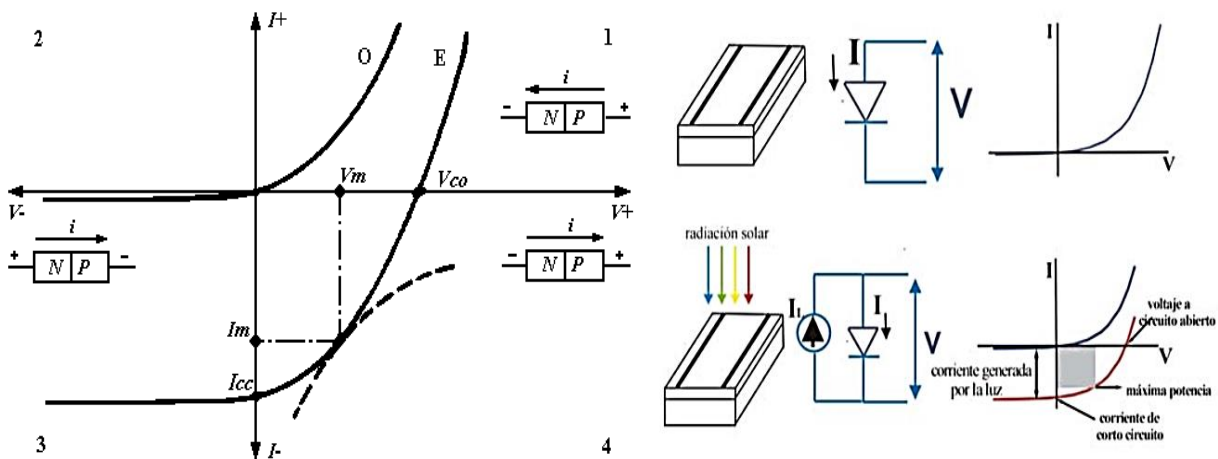


FIGURA 1.4 Curva I-V característica de celdas fotovoltaicas y su comportamiento [5]

1.3 Estructura MOS (Metal-Oxido-Semiconductor)

Una estructura MOS es un dispositivo electrónico formado por un metal, un óxido y un semiconductor. El dispositivo de interés a estudiar, presenta una

composición como la siguiente: sustrato de silicio dopado, sobre el cual se hace crecer una capa de óxido, los elementos se contactan con dos terminales metálicas llamadas sustrato y compuerta. La estructura es similar a la de un capacitor de placas paralelas, en donde se reemplaza una de las placas por el silicio semiconductor del sustrato, y la otra por un metal. [3]

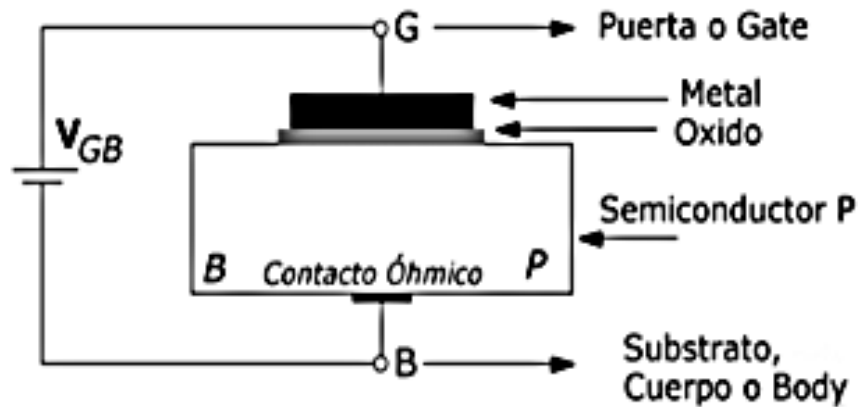


FIGURA 1.5 Representación de la estructura del Capacitor MOS [6]

1.3.1 Funcionamiento básico de una Estructura MOS

Al aplicar un potencial a través de la estructura MOS, se produce una modificación de las cargas en el semiconductor.

Estructura NMOS. Está formada por un sustrato de silicio dopado con huecos. Al aplicar un potencial de compuerta positivo, los electrones presentes en el sustrato son atraídos hacia la capa de óxido de compuerta. Al mismo tiempo, los huecos son repelidos de la capa de óxido de compuerta debido a que el potencial positivo los aleja. Esto ocasiona una acumulación de electrones en la cercanía del óxido, en donde el silicio presenta un exceso de electrones y por lo tanto es de tipo n. La inversión del dopado en el silicio (que antes era de tipo p) es lo que le da origen al nombre de esta región.

Estructura PMOS. Está formada por un sustrato de silicio dopado con electrones. Al aplicar un potencial de compuerta negativo, los huecos presentes en

el sustrato son atraídos hacia la capa de óxido de compuerta. Los electrones son repelidos del óxido de compuerta debido a que el potencial negativo los aleja. Los huecos se acumulan en la cercanía del óxido, en donde el silicio acumula un exceso de huecos y por lo tanto se comporta como un material de tipo p. La recombinación de huecos y electrones produce una región de agotamiento.

1.3.2 Regiones de funcionamiento

Se distinguen tres regiones de funcionamiento, dependiendo del nivel de tensión que se aplica en la terminal de la compuerta.

Acumulación

Las cargas se almacenan en el óxido por el mismo principio de operación de un capacitor, en donde el dieléctrico se polariza de forma proporcional al campo eléctrico aplicado.

Caso pMOS:

Aplicamos un potencial negativo en la compuerta. Esto induce electrones, atrayendo huecos a la interface y creando un campo eléctrico. De ahí el nombre de acumulación.

Caso nMOS:

Aplicamos un potencial positivo en la compuerta. Esto induce huecos, atrayendo electrones a la interfase y creando un campo eléctrico.

Recordemos que el campo eléctrico va siempre de carga positiva a carga negativa

Agotamiento

Al incrementar el potencial de compuerta, los electrones y los huecos se comienzan a recombinar en el semiconductor para formar la región de agotamiento

Caso pMOS:

Aplicamos potencial positivo a la puerta, con lo que se acumula carga positiva en el metal. El Semiconductor es tipo N, con lo que se atraen electrones a la interfase y se apartan los huecos que había antes en la interfase. Se produce un campo eléctrico en el sentido contrario al caso de Acumulación, en este caso desde el metal al semiconductor. Como consecuencia, hay una recombinación de electrones y huecos que produce el agotamiento del canal.

Caso nMOS:

Aplicamos potencial negativo a la puerta. Como consecuencia se atraen huecos a la interfase y se crea un campo eléctrico. Del Semiconductor al metal. Electrones y huecos se recombinan.

Inversión

Si se continúa aumentando la tensión de compuerta, se logra la inversión del tipo de dopado del semiconductor.

Caso pMOS:

En este caso inducimos una tensión muy positiva, lo que induce muchos huecos en el metal. Como el semiconductor es tipo N, lo que se consigue es un campo eléctrico grande que va del metal al semiconductor, y por tanto una Intensidad grande, debido a los electrones que se acercan a la interfase atraído por el exceso de huecos del metal.

Caso nMOS:

Aplicamos una tensión muy negativa que hace que el metal se llene de electrones. Como consecuencia, los huecos del semiconductor, se ven atraídos hacia la interfase creándose un campo eléctrico del semiconductor al metal. [27]
[28]

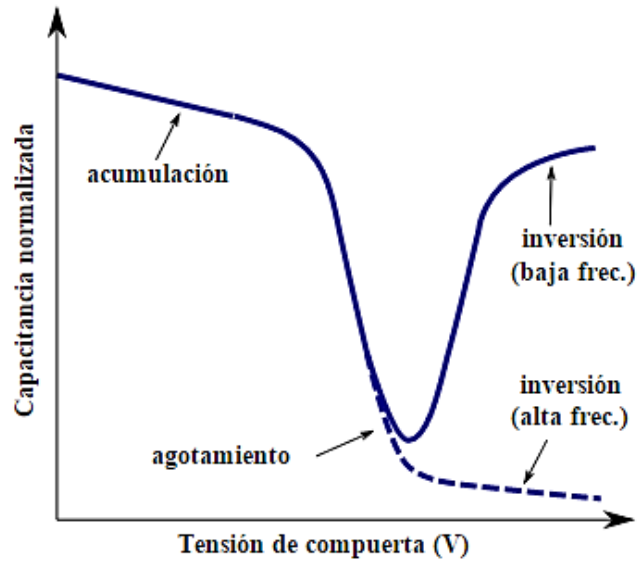


FIGURA 1.6 Curva Capacitancia-Voltaje característica del capacitor MOS [26]

1.4 Óxido rico en Silicio (SRO)

1.4.1 Descripción

El silicio es un semiconductor de gap o transición indirecta, es decir en la recombinación, un electrón de conducción pasa al lugar de un hueco y si el semiconductor es de gap directo, se hará una transición vertical con emisión de un fotón, en cambio en el semiconductor de gap indirecto normalmente se emite un fonón (calor), lo cual implica su imposibilidad para actuar como un material con aplicaciones fotónicas. Sin embargo, se realizan estudios para resolver esta inhabilidad física del silicio, lo que trae consigo la búsqueda de nuevos materiales como silicio poroso, oxinitruros, nitruros de silicio y óxido de silicio rico en silicio (SRO), los cuales presentan fotoluminiscencia.

El SRO es un candidato para aplicaciones en dispositivos opto electrónicos, pero se requiere el estudio y caracterización de sus propiedades estructurales y ópticas, debido a que estas propiedades varían con el exceso de silicio contenido en las películas. El estudio de las películas de SRO nos abre la posibilidad y nos da

un camino para el desarrollo de novedosos y diversos dispositivos optoelectrónicos, tales como sensores, emisores de luz y celdas solares.

El óxido de silicio fuera de estequiometría también conocido como óxido de silicio rico en silicio, SRO por sus siglas en inglés, es un material formado por una matriz de dióxido de silicio con exceso de silicio. La fórmula SiO_2 ya no es válida y en su lugar se tiene que usar la de SiO_x donde el valor de x queda determinado dependiendo del contenido de oxígeno, por lo general está delimitado entre [0-2]; teniendo que cuando $x=2$ es Dióxido de Silicio (SiO_2) y si $x=0$ es Polisilicio; mientras que, si el valor de x se encuentra comprendido entre 0 y 2 es Silicio policristalino semiaislante (SIPOS).

1.4.2 Principales Métodos de depósito de las películas SRO

El SRO es uno de los materiales que presenta las mejores perspectivas para realizar funciones fotónicas. Este material se puede obtener mediante procesos tecnológicos, tres de los más importantes son: óxidos térmicos implantados con silicio (SITO), depósito químico en fase vapor activado por plasma (PECVD) y depósito químico en fase vapor a baja presión (LPCVD). En general el sustrato es silicio, sobre el cual se deposita la película de óxido no estequiométrico (SRO)

En el presente trabajo se utilizó el depósito mediante HFCVD, el cual se explica a detalle a continuación.

1.4.3 HFCVD

El Depósito Químico en Fase Vapor asistido por Filamento Caliente (HFCVD, por sus siglas en inglés), es conocido por ser un método interesante para el depósito de películas delgadas de silicio. Se sabe que dependiendo de la

configuración experimental se puede obtener tanto silicio amorfo como microcristalino.

El equipo de HFCVD se compone de tres zonas principales; la entrada de gases, el reactor y la salida de los subproductos gaseosos. La entrada de gases se compone normalmente de flujómetros o medidores de flujo de masa. En la cámara de cuarzo es donde se lleva a cabo la reacción y se compone de porta muestra y filamento. La salida está conectada a una bomba de vacío para extraer los residuos gaseosos después del proceso y mantener el reactor en vacío antes y después de los experimentos.

El depósito se lleva a cabo de la siguiente manera: los gases reactivos y diluyentes son transportados a la región de depósito, donde las especies reactivas llegan al sustrato y son adsorbidas en la superficie del sustrato caliente. En esta etapa inicia la reacción superficial, la cual incluye la descomposición química, donde las especies migran hacia la superficie y reaccionan para la formación de la película.

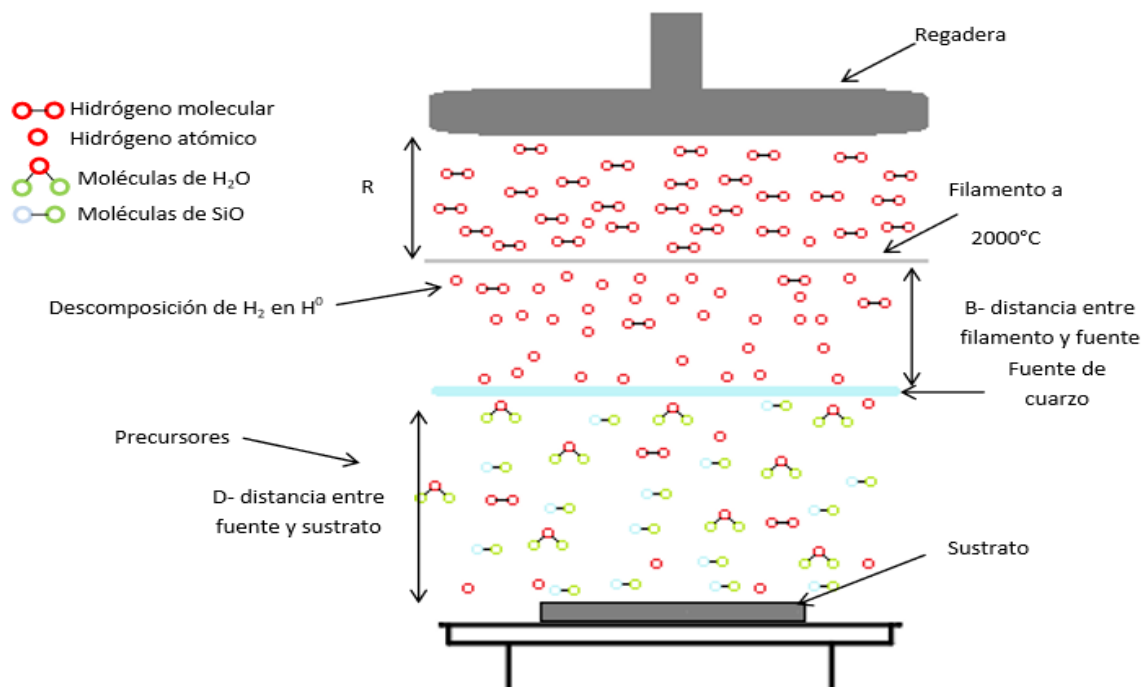


FIGURA 1.7 Reacción química dentro del equipo HFCVD durante el proceso de crecimiento o depósito de la película SiOx [9]

Posteriormente ocurre la desorción de los subproductos gaseosos, los cuales debido a la reacción son desprendidos de la superficie siendo retirados de la región de depósito.

Las reacciones químicas se obtienen a través de colisiones o choques efectivos entre moléculas. Un choque efectivo se da cuando las moléculas colisionan con la suficiente energía ya sea para enlazarse o separarse y así obtener productos.

Las propiedades de las películas de óxido de silicio no estequiométrico obtenidas por HFCVD dependen de las condiciones de depósito, tales como: temperatura de sustrato (T_s), distancia de filamento a fuente (d_{ff}), distancia de fuente a sustrato (d_{fs}), tiempo de depósito (t_d) y fuentes sólidas [11]

1.5 Técnicas de Caracterización

1.5.1 Perfilometría

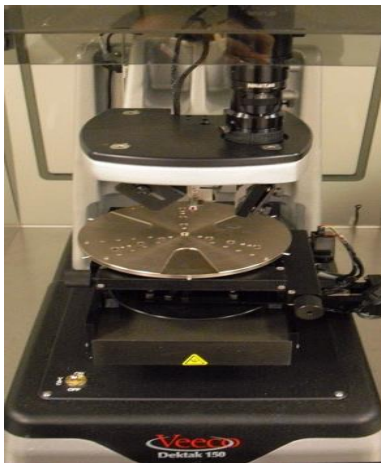


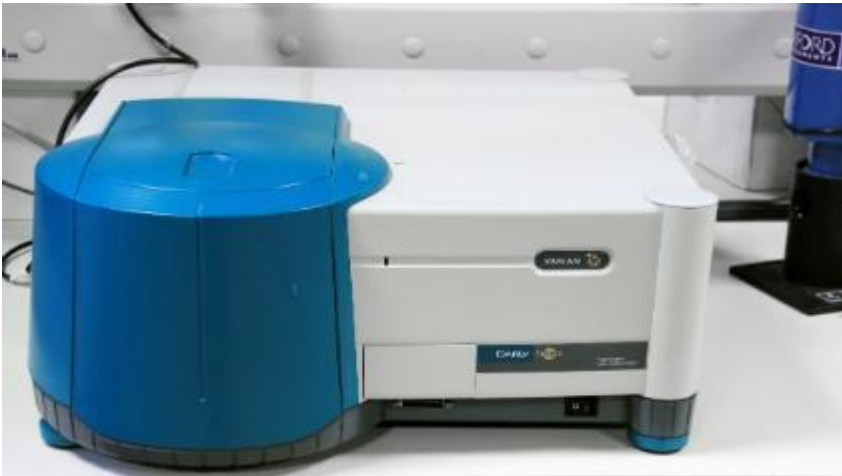
FIGURA 1.8 Perfilometro Dektak 150

La perfilometría consiste en la medición del espesor y la rugosidad superficial de un material mediante el movimiento electromecánico de una punta de prueba a través de la superficie del material en modo de fuerza y longitud de barrido constante, las variaciones verticales detectadas por la punta se traducen a una señal eléctrica que corresponde al perfil apropiado de cada muestra.

1.5.2 Fotoluminiscencia.

La Fotoluminiscencia es la emisión de fotones generados por un material que se encuentra bajo excitación óptica.

En este método un haz de luz es dirigido sobre la muestra, esto provoca que los electrones dentro del material se muevan a estados excitados permitidos, cuando los electrones regresan a su estado de equilibrio, el exceso de energía es liberado mediante fotones provocando la emisión de luz (proceso radiativo), aunque puede



no haber emisión de luz (proceso no radiativo). La fotoluminiscencia está relacionada con la diferencia en los niveles de energía entre el estado excitado y el estado en equilibrio [7] [8]

FIGURA 1.9 Espectrofluorímetro Cary 50

1.5.3 Transmitancia

La transmitancia es el porcentaje de luz que pasa a través de una muestra, es una medición de la atenuación de un haz de luz después de que éste pasa a través de una muestra.

Para realizar esta técnica de caracterización se requiere de un espectrofotómetro, el cual consiste de una lámpara de tungsteno que genera un haz dirigido por unas lentes y la longitud de onda se selecciona por medio de un monocromador,



enseguida, el haz que atraviesa la muestra pasa por un detector, la señal es amplificada y los datos son leídos en una computadora. [9]

FIGURA 1.10 Espectrofotómetro Cary 500

1.5.4 Efecto Hall

Efecto Hall es la medición del voltaje transversal en un conductor cuando es puesto en un campo magnético. Mediante esta medición es posible determinar el tipo, concentración, movilidad de portadores y resistividad de un material.

La técnica de medición más utilizada es la técnica de Van Der Paw, conocida también como técnica de cuatro puntas, por lo general, esta técnica se aplica en muestras en forma de películas delgadas.

El objetivo es determinar la densidad de portadores de carga midiendo el voltaje de Hall. Para medir la tensión Hall, una corriente es forzada a fluir través del par opuesto de contactos 1 y 3 y el voltaje Hall es medido en el par de contactos cruzados restante 2 y 4.

Para obtener las dos resistencias características, se aplica una corriente directa



entre los contactos 1 y 2 y se mide el voltaje V desde el contacto 4 al contacto 3. Posteriormente se aplica la misma corriente para los contactos 2 y 3, y se mide el voltaje V para los contactos 1 y 4.

[10]

FIGURA 1.11 Sistema medidor de efecto Hall

CAPÍTULO 2: PROCESO EXPERIMENTAL

2.1 Fabricación de dispositivos MOS y MOM

Se realizaron 74 diferentes dispositivos, los cuales se dividen a grandes rasgos por la estructura que presentan y son de 3 tipos diferentes:

MOS (Metal Oxido Semiconductor) con contactos de aluminio

MOS (Metal Oxido Semiconductor) con contactos de FTO (Oxido de estaño dopado con flúor)

MOM (Metal Oxido Metal) con contactos de FTO (Oxido de estaño dopado con flúor)

Para realizar éstas estructuras se utilizaron 2 tipos de sustrato; para ambas estructuras tipo MOS fue oblea de silicio cristalino tipo n y para la estructura MOM placa de cuarzo.

Tabla 2.1 Estructuras MOS y MOM

Estructura	MOS	MOS	MOM
Contacto	Aluminio	FTO	FTO
Película	(SiO _x /SiO _y) Con y Sin Tratamiento Térmico	(SiO _x /SiO _y) Con y Sin Tratamiento Térmico	(SiO _x /SiO _y) Con y Sin Tratamiento Térmico
Substrato	Silicio Cristalino n	Silicio Cristalino n	Cuarzo
Contacto	Aluminio	Aluminio	Polisilicio

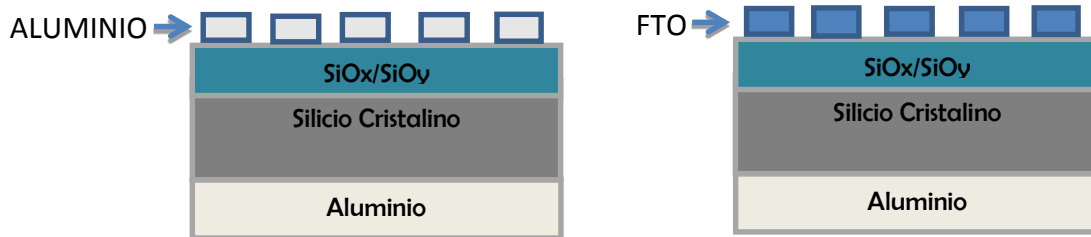


FIGURA 2.1 Estructura MOS en sustrato de Silicio

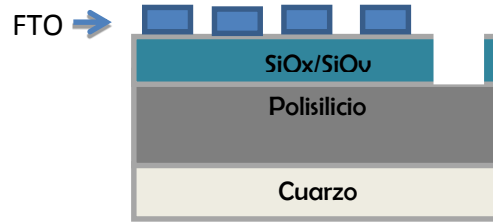


FIGURA 2.2 Estructura MOM en sustrato de Cuarzo

La primera acción realizada en el proceso de formación de éstas estructuras fue el depósito de las películas (SiOx/SiOy) para sustrato de silicio, y en el caso de sustrato de cuarzo se depositaron primero las películas de Polisilicio y posteriormente las películas (SiOx/SiOy). Después fue depositado el contacto para la parte posterior de la oblea de silicio, que fue de aluminio para todos los casos y los contactos superiores fueron divididos en 2 tipos; de aluminio y de Oxido de estaño dopado con flúor (FTO)

2.2 Películas (SiOx/SiOy) y Polisilicio

Las películas de SiOx/SiOy fueron depositadas sobre sustratos de silicio y cuarzo, utilizando como fuente sólida cuarzo.

Los sustratos de silicio se obtuvieron de cribar obleas tipo n de alta resistividad ($2000 \Omega\text{-cm}$) con un diámetro 4'' y espesor de $400\mu\text{m}$ en piezas de 9mm por 9mm. Los sustratos de cuarzo fueron cribados con las mismas dimensiones que los de silicio.

Antes de su utilización los sustratos se sometieron a un proceso de limpieza (anexo), con el fin de eliminar el óxido nativo, grasas y compuestos orgánicos en la superficie.

Para 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.

Para el caso de las estructuras MOM el depósito del Polisilicio sobre substratos 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 slpm a una temperatura de depósito de 650 °C durante 20 min. Posteriormente se realiza el dopado del silicio policristalino.

2.2.1 Parámetros de depósito de una capa y de doble capa

Las propiedades de las películas obtenidas por HFCVD dependen de las condiciones de depósito.

En el presente trabajo se utilizaron los parámetros con mejores resultados en base al proyecto de tesis de Maestría de la M. Diana Elizabeth Vázquez Valerdi [9]

Los parámetros que permanecieron constantes durante el proceso de depósito fueron: el voltaje aplicado de 87 V a los filamentos del reactor, la presión del sistema a una atmósfera, la distancia filamento a fuente con 2mm y el tiempo de depósito se estableció en 3 minutos.

Los parámetros que se variaron con el fin de obtener diversas propiedades en los óxidos fueron: la distancia de fuente a substrato utilizando combinaciones de 4mm, 5mm y el flujo de hidrogeno dentro del reactor 25 sccm, 75 sccm (tabla 2.2). Las condiciones específicas para cada grupo así como el espesor de cada placa se pueden apreciar en la tabla 2.3

Condiciones de Depósito Película Simple (SiOx)		
Flujo: sccm Distancia Fuente-Sustrato: mm		
	25 sccm	75 sccm
4 mm	A2	C2
5 mm	A3	C3

TABLA 2.2 Condiciones de Depósito Películas Simples (SiOx)

Condiciones de Depósito en Películas Dobles (SiOx/SiOy)				
GRUPO	A	B	C	D
PLACA (Depósito) Espesor	A1 (A2/A2) 1396nm	A4 (C2/A2) -	B5 (A3/A2) 816nm	B7 (C3/A2) 1340nm
PLACA (Depósito) Espesor	A3 (A2/C2) 2304nm	A2 (C2/C2) 1181nm	B6 (A3/C2) 1168nm	B8 (C3/C2) 1323nm
PLACA (Depósito) Espesor	A5 (A2/A3) 1646nm	A7 (C2/A3) 2307nm	B1 (A3/A3) 770nm	B4 (C3/A3) 567nm
PLACA (Depósito) Espesor	A6 (A2/C3) 1510nm	A8 (C2/C3) 1710nm	B3 (A3/C3) 847nm	B2 (C3/C3) 702nm

TABLA 2.3 Condiciones de Depósito Películas dobles (SiOx/SiOy)

Como se pudo observar en la tabla 2.3 el Grupo A está formado por todos los dispositivos que tienen como película base la depositada a un flujo de 25sccm con una distancia Fuente-Sustrato de 4mm

Por lo tanto consta de las placas:

A1 (4mm/25sccm - 4mm/25sccm) **A3** (4mm/25sccm - 4mm/75sccm)

A5 (4mm/25sccm - 5mm/25sccm) **A6** (4mm/25sccm - 5mm/75sccm)

El Grupo B está formado por todos los dispositivos que tienen como película base la depositada a un flujo de 75sccm con una distancia Fuente-Sustrato de 4mm

Por lo tanto consta de las placas:

A4 (4mm/75sccm - 4mm/25sccm) **A2** (4mm/75sccm - 4mm/75sccm)

A7 (4mm/75sccm - 5mm/25sccm) **A8** (4mm/75sccm - 5mm/75sccm)

El Grupo C está formado por todos los dispositivos que tienen como película base la depositada a un flujo de 25sccm con una distancia Fuente-Sustrato de 5mm

Por lo tanto consta de las placas:

B5 (5mm/25sccm - 4mm/25sccm) **B6** (5mm/25sccm - 4mm/75sccm)

B1 (5mm/25sccm - 5mm/25sccm) **B3** (5mm/25sccm - 5mm/75sccm)

Y por último el Grupo D está formado por todos los dispositivos que tienen como película base la depositada a un flujo de 75sccm con una distancia Fuente-Sustrato de 5mm

Por lo tanto consta de las placas:

B7 (5mm/75sccm - 4mm/25sccm) **B8** (5mm/75sccm - 4mm/75sccm)

B4 (5mm/75sccm - 5mm/25sccm) **B2** (5mm/75sccm - 5mm/75sccm)

La relación que existe entre la temperatura del filamento y la variación de la distancia entre fuente y sustrato nos proporciona un cambio en la temperatura de sustrato, la cual de acuerdo a la figura 2.3, en el los depósitos realizados fue de 1020°C para 4mm y 920°C para 5mm.

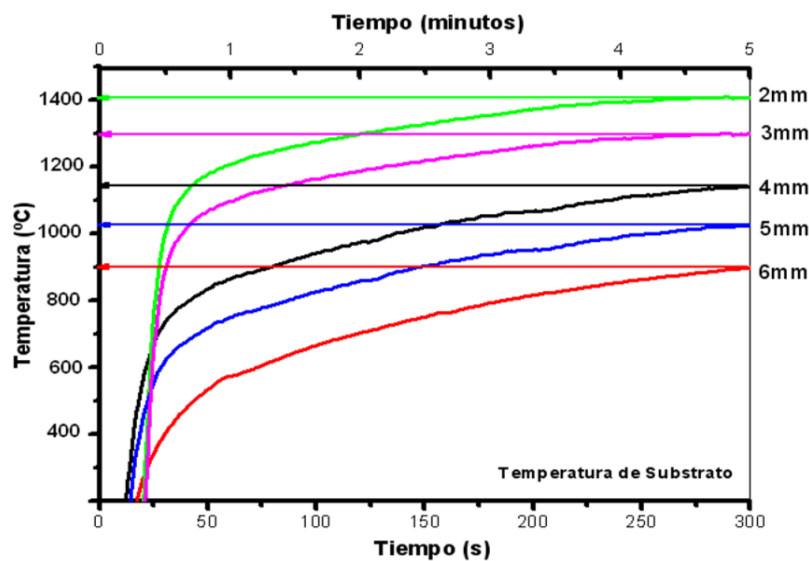


FIGURA 2.3 Grafica de la relación entre la temperatura del filamento, variación de la distancia entre fuente-substrato y temperatura del sustrato [9]

2.2.2 Tratamiento térmico.

Se puede observar en la tabla que se realizaron 16 diferentes películas SiOx/SiOy de acuerdo a sus condiciones de depósito y con el fin de estudiar el comportamiento de estas películas bajo diferentes arreglos en el dispositivo, se hicieron juegos de 4 placas en sustrato de silicio para cada película, es decir un total de 64 placas o dispositivos divididos como se muestra en la tabla 2.4

DIVISIÓN DE PELÍCULAS EN SUBSTRATO DE SILICIO		
	Con tratamiento térmico	Sin tratamiento térmico
Contacto de aluminio	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8
Contacto de FTO	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8	A1 A2 A3 A4 A5 A6 A7 A8 B1 B2 B3 B4 B5 B6 B7 B8

TABLA 2.4 División de las películas realizadas para la fabricación de los dispositivos en sustrato de silicio

Como se puede observar la mitad de estas películas fueron sometidas a tratamiento térmico el cual consistió en colocarlas en un ambiente de Nitrógeno durante 60 minutos a una temperatura de 1100°C

Para el caso de los 10 dispositivos MOM no se aplicó tratamiento térmico y las películas SiOx/SiOy seleccionadas para la creación de estos dispositivos fueron: A4, A5, A6, A7, A8, B1, B4, B5, B7, B8; las cuales fueron depositadas sobre la película de Polisilicio contenida en los sustratos de cuarzo.

2.3 Contactos de Aluminio (Metalización de aluminio al alto vacío)

La técnica de Metalización al vacío consiste en producir la evaporación de un metal dentro de una cámara de vacío, para ello se coloca sobre filamentos de tungsteno el metal que desea depositarse, estos filamentos son calentados por una corriente eléctrica que los cruza. Cuando la temperatura de fusión del aluminio se alcanza éste se evapora y los átomos metálicos se propagan hasta la superficie del objeto que debe tratarse. [16]

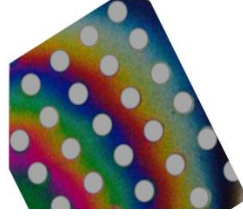


FIGURA 2.4 Dispositivo MOS con contactos de aluminio

Todos los dispositivos en sustrato de silicio tienen como contacto posterior una micra de aluminio depositado mediante esta técnica, para lo cual se usó una presión de vacío de 0.0001 Torr y una corriente en los filamentos de tungsteno de 12A durante 3 minutos.

Los contactos superiores realizados a 32 placas tienen media micra de espesor y un diámetro de 2mm, para realizar los patrones circulares en los dispositivos se colocó encima una mascarilla para evitar el depósito en áreas indeseadas.

Posterior al depósito de aluminio se hizo un proceso de densificado, el cual consistió en colocar las placas dentro de un horno de tubo de cuarzo en el que se administró un flujo constante de nitrógeno a una temperatura de 400°C durante 30 minutos.

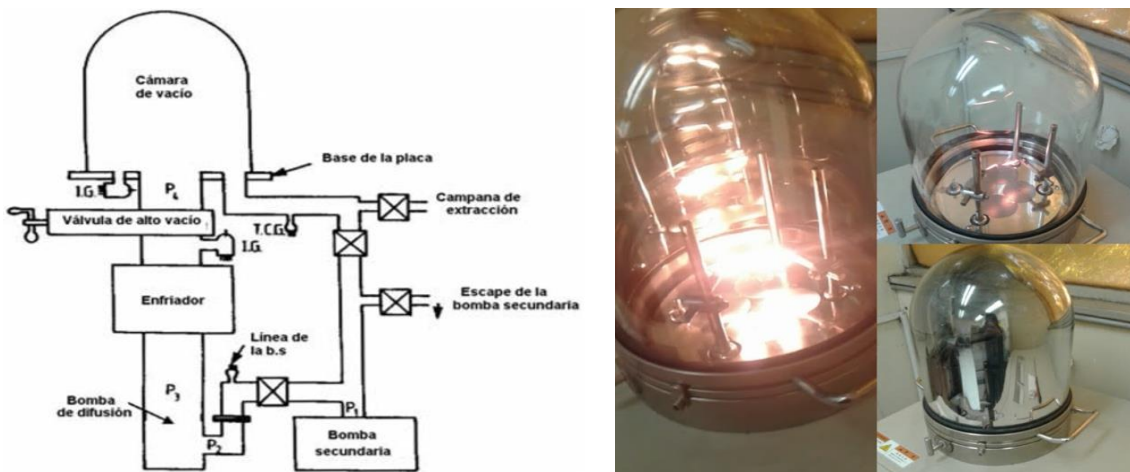


FIGURA 2.5 Proceso de metalización al Alto vacío [18]

2.4 Contactos de FTO (Spray-pyrolysis)

El FTO es un Óxido Conductor Transparente empleado como contacto para propósitos de esta tesis debido a las propiedades que posee. Entre las más importantes tenemos:

- Alta transmisión a la luz visible
- Alta conductividad eléctrica
- Buena adherencia al substrato (vidrio, silicio u otros materiales)
- Alta estabilidad contra fricciones mecánicas
- Alta estabilidad contra los cambios climáticos
- Bajos costos de producción **[19]**

El FTO es de tipo P y dependiendo de las condiciones de depósito se puede obtener diferente espesor, resistividad, conductividad y transmitancia.

Para elegir las condiciones de depósito que brindaran mejores contactos, se realizaron diversas muestras donde el parámetro de flujo (30 sccm) y temperatura (400°C) se mantuvieron constantes. Lo que se modificó fueron los tiempos de depósito, siendo de 1 a 8 minutos y posteriormente se caracterizaron mediante pruebas de transmitancia, perfilometría y efecto Hall.

La muestra con mejores características fue la de 1 minuto de depósito, con 390nm de espesor (valor obtenido por perfilometría) y con resultados de transmitancia y efecto Hall mostrados en la figura 2.6

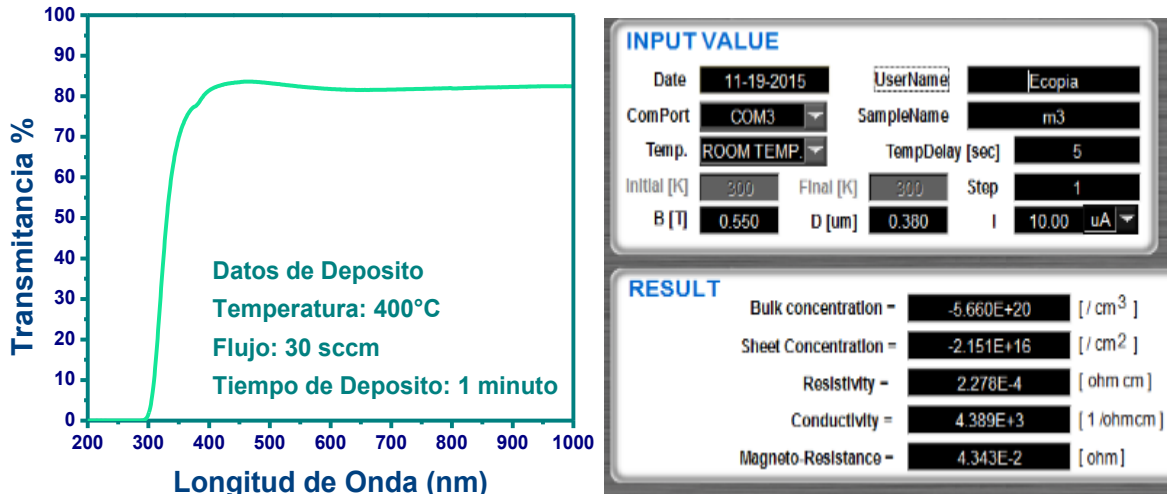


FIGURA 2.6 Resultados de la caracterización del FTO con depósito de 1 minuto
 a) Transmitancia b) Efecto Hall

2.4.1 Proceso de depósito por Spray Pyrolysis

Los contactos superiores de FTO con un diámetro de 2mm, realizados a 42 placas (32 en substrato de silicio y 10 en substrato de cuarzo) se depositaron mediante la técnica de rocío pirolítico o Spray Pyrolysis, porque es una técnica simple y económica que se puede adaptar para producir grandes cantidades en áreas extensas.

La técnica se basa en la descomposición pirolítica (descomposición química causada por el calentamiento a altas temperaturas) de una solución cuando ésta es rociada sobre un substrato caliente [19]

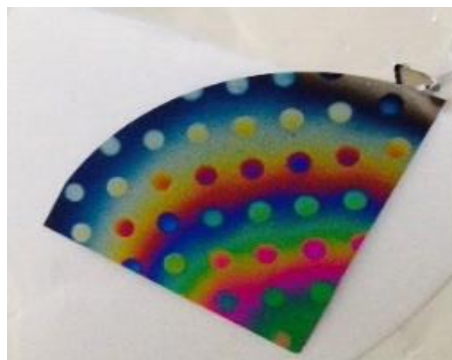


FIGURA 2.7 Dispositivo MOS con contactos de FTO

El primer paso para realizar los contactos, fue fabricar la solución de FTO que se redacta a detalle en el anexo , una vez obtenida la solución se colocó dentro de un matraz con doble boquilla el cual fue puesto en el Nebulizador para evaporar la solución, éste vapor fue impulsado por un flujo de aire a 30 sccm y transportado hasta una parrilla a 400°C, dentro de la parrilla se puso la placa y para realizar los patrones circulares en los dispositivos se colocó sobre ésta una mascarilla para evitar el depósito en áreas indeseadas, tal y como se muestra en la figura 2.8

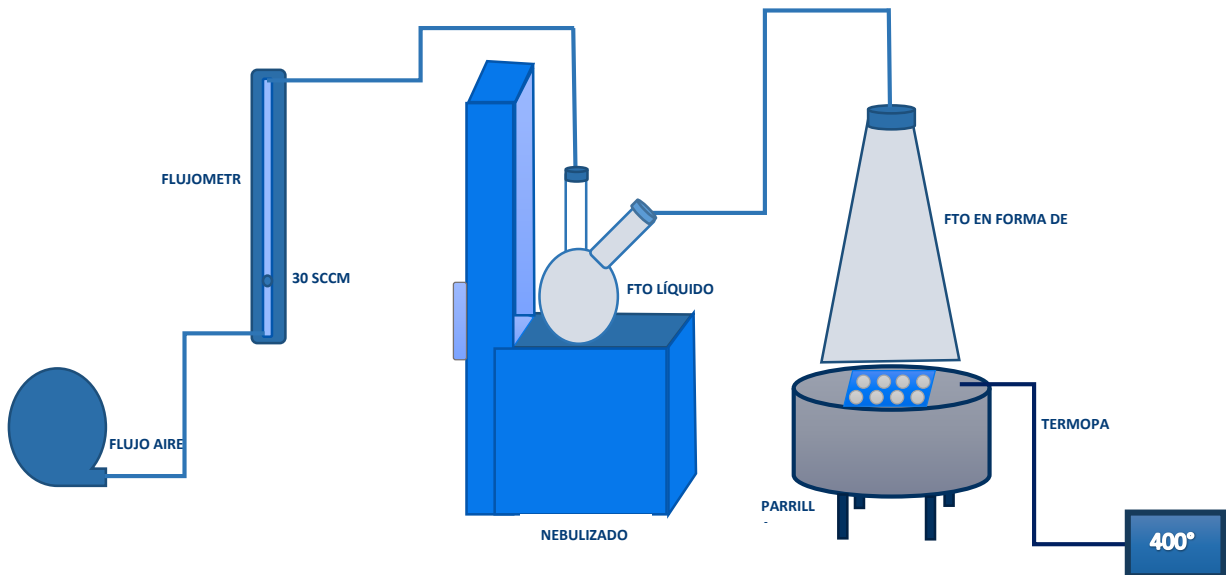


FIGURA 2.8 Proceso de depósito por medio de Spray Pyrolysis

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIONES ÓPTICAS, ELÉCTRICAS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Del proceso experimental, como ya se mencionó anteriormente, se obtuvieron un total de 74 dispositivos o placas (64 MOS y 10 MOM), a las cuales se les realizaron las caracterizaciones ópticas y eléctricas correspondientes.

En éste tercer capítulo se presentan los diferentes resultados obtenidos de las caracterizaciones, no mostrando aquellos dispositivos que no se realizaron (las estructuras MOM donde se tomaron solo las 10 mejores películas) y aquellos cuya aportación no fue significativa al presente trabajo, esto con el fin de no hacerlo más extenso, por lo tanto se presentan los resultados tal y como lo ilustra la tabla 3.1

DISPOSITIVOS (PLACAS)																
★ Presentados en Tesis ☆ No Presentados en Tesis ★ No realizados																
GRUPO	Tratamiento Térmico	A			B				C				D			
		AL	FTO	MOM	AL	FTO	MOM	AL	FTO	MOM	AL	FTO	MOM			
SIN	A1	★	★	★	A4	★	★	★	B5	★	★	★	B7	★	★	★
CON	A1	★	★	★	A4	★	★	★	B5	★	★	★	B7	★	★	★
SIN	A3	★	★	★	A2	★	★	★	B6	★	★	★	B8	★	★	★
CON	A3	★	★	★	A2	★	★	★	B6	★	★	★	B8	★	★	★
SIN	A5	★	★	★	A7	★	★	★	B1	★	★	★	B4	★	★	★
CON	A5	★	★	★	A7	★	★	★	B1	★	★	★	B4	★	★	★
SIN	A6	★	★	★	A8	★	★	★	B3	★	★	★	B2	★	★	★
CON	A6	★	★	★	A8	★	★	★	B3	★	★	★	B2	★	★	★

TABLA 3.1 Dispositivos realizados y presentados en el trabajo de tesis

3.1 Caracterizaciones Ópticas

Como caracterizaciones ópticas se realizaron pruebas de Fotoluminiscencia y Transmitancia, en primera instancia a las películas simples para poder seleccionar aquellas con mejores resultados, las cuales como ya se ha mencionado anteriormente fueron la base en las combinaciones que se realizaron de capas dobles.

3.1.1 Fotoluminiscencia.

Los resultados de Fotoluminiscencia nos sirven como un indicador del comportamiento emisor de los dispositivos, con lo cual se pueden obtener datos como la energía del GAP, que en este caso se calculó utilizando la relación de Einstein $E \text{ (eV)} = hc/\lambda$ y nos permite apreciar las diferencias o lo que ocurre con las películas frente al tratamiento térmico.

Para la caracterización por fotoluminiscencia los espectros de emisión se registraron con el espectrofluorímetro termostatzado Cary Eclipse Fluorescence Spectrophotometer, realizando un barrido de 400nm a 1000nm en el caso de las capas simples y en la dobles fue de 650nm a 900nm.

3.1.2 Resultados Fotoluminiscencia en Películas Simples

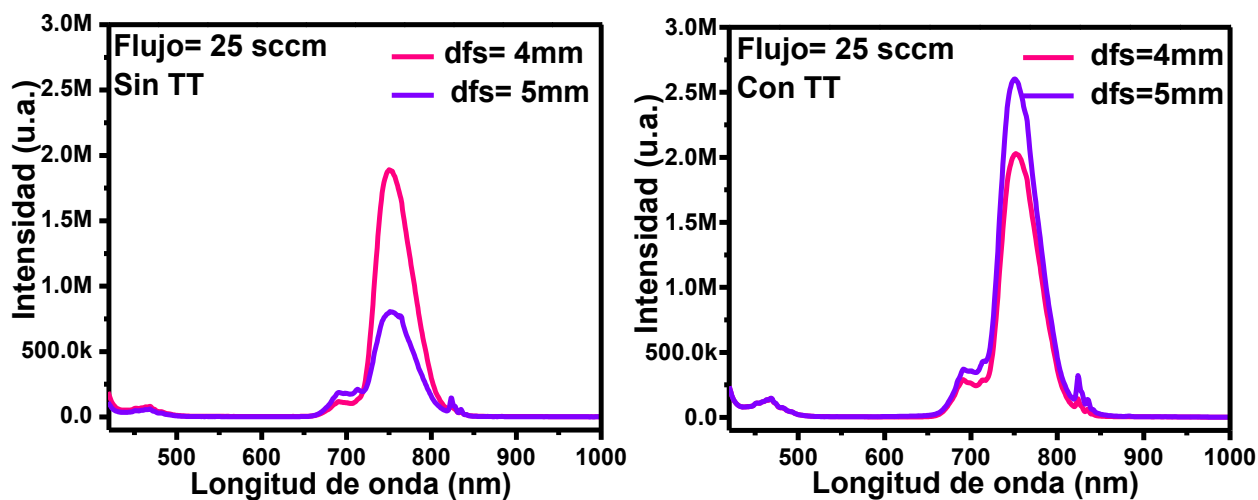


FIGURA 3.1 Fotoluminiscencia películas simples a un flujo de 25sccm con distancias fuente sustrato de 4 y 5mm
a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Las películas simples seleccionadas que se muestran en la figura 3.1 tienen un flujo de 25sccm y todas (con o sin tratamiento térmico) presentan un pico de emisión en una longitud de onda de aproximadamente de 750nm, lo cual nos indica que su energía del GAP es de aproximadamente 1.65eV.

En el caso de la intensidad de emisión, ésta es incrementada por el tratamiento térmico en ambas películas, de manera pequeña en la que tiene una distancia fuente sustrato de 4mm siendo la más notable aquella con una distancia fuente-sustrato de 5mm.

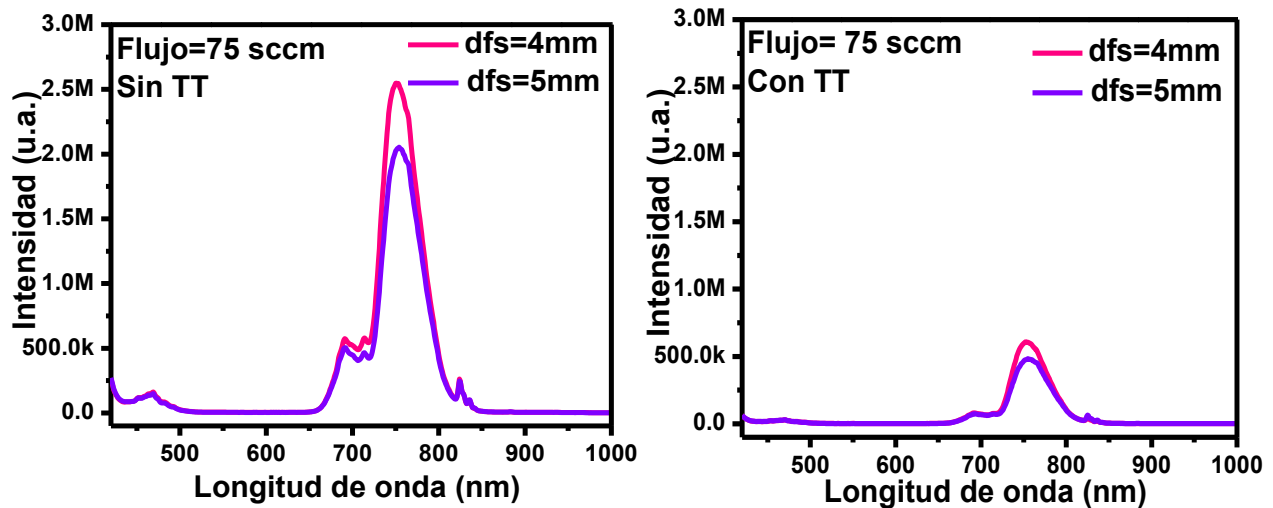


FIGURA 3.2 Fotoluminiscencia películas simples a un flujo de 75sccm con distancias fuente sustrato de 4 y 5mm
a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Las películas simples seleccionadas que se muestran en la figura 3.2 son las que tiene un flujo de 75sccm y todas al igual que en el caso anterior, presentan un pico de emisión en una longitud de onda de aproximadamente de 750nm, lo cual nos indica que su energía del GAP es de aproximadamente 1.65eV.

En el caso de la intensidad de emisión, ésta se ve disminuida por el tratamiento térmico en ambas películas siendo un comportamiento contrastante con en el flujo de 25sccm.

3.1.3 Resultados Fotoluminiscencia en Películas Dobles

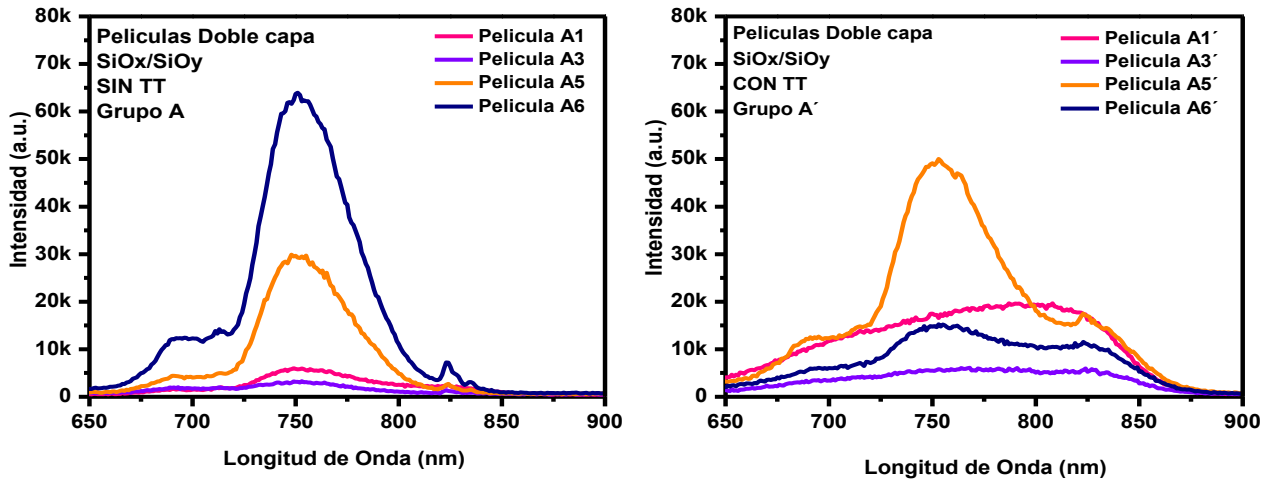


FIGURA 3.3 Fotoluminiscencia películas dobles Grupo A a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Los resultados de Fotoluminiscencia que se presentan en la figura son los del Grupo A y en ellos podemos observar un aumento pequeño de la intensidad, así como una amplitud del rango de emisión en todas las películas con tratamiento térmico, exceptuando el caso de la película A6 que sufre una disminución dramática en su intensidad. En el caso de la energía del GAP todas las películas presentan un GAP de 1.65eV, aunque esto no aplica para la placa A1' que tiene emisión en aproximadamente 850nm lo que nos da un GAP de 1.45eV

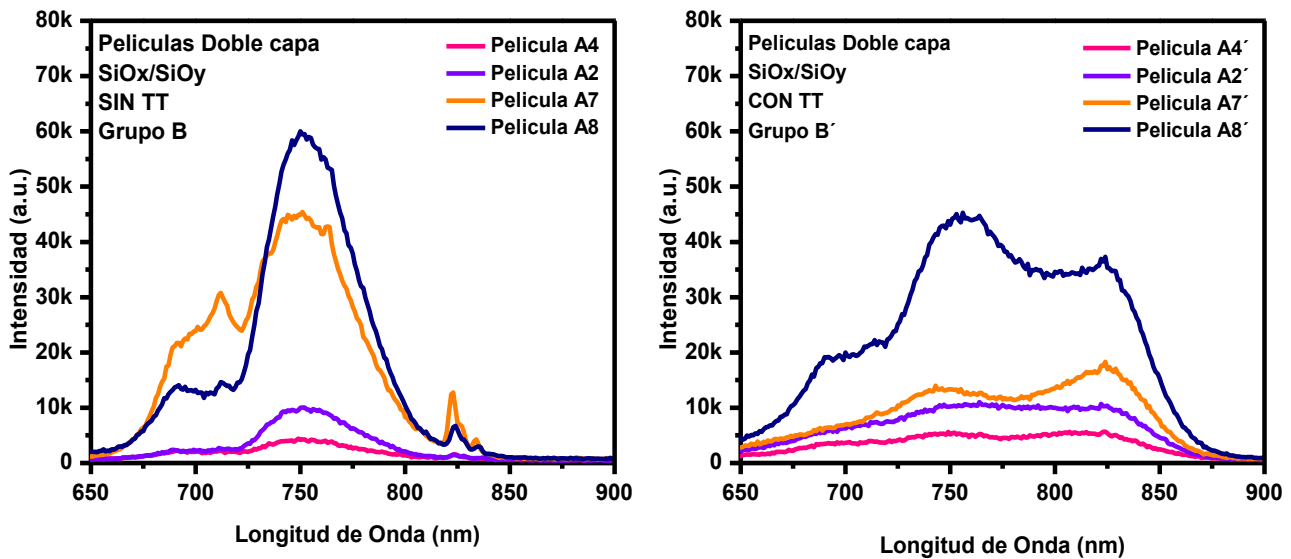


FIGURA 3.4 Fotoluminiscencia películas dobles Grupo B a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

En el Grupo B (figura) se puede apreciar un aumento pequeño de la intensidad, así como una amplitud del rango de emisión al aplicar tratamiento térmico en las películas A4 y A2 en el caso de la película A7 ésta sufre una disminución dramática en su intensidad y la película A8 disminuye pero se amplía bastante su rango de emisión. Para la energía del GAP todas las películas presentan un pico de emisión en una longitud de onda de aproximadamente de 750nm lo que da un GAP de 1.65eV, aunque esto no aplica para la película A7' (Con TT) pues su pico de emisión está en aproximadamente 850nm lo que nos da un GAP de 1.45eV.

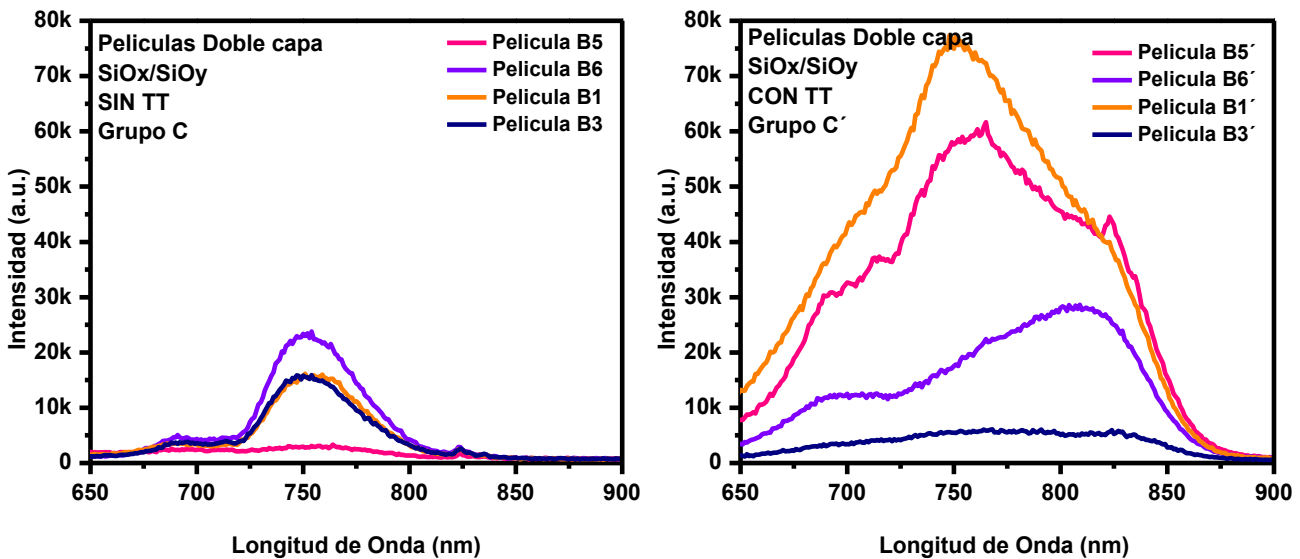


FIGURA 3.5 Fotoluminiscencia películas dobles Grupo C a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Para el Grupo C (Figura 3.5) se puede apreciar un aumento importante de la emisión en las películas con tratamiento térmico, además de una ampliación del espectro para todos los dispositivos exceptuando el caso de la película B6 donde el aumento es pequeño y en la película B3 donde baja un poco la intensidad. En el caso de la energía del GAP todas las películas presentan un pico de emisión en una longitud de onda de aproximadamente de 750nm lo que da un GAP de 1.65eV, aunque esto no aplica para B6' (Con TT) pues su pico de emisión está en aproximadamente 850nm lo que nos da un GAP de 1.45eV

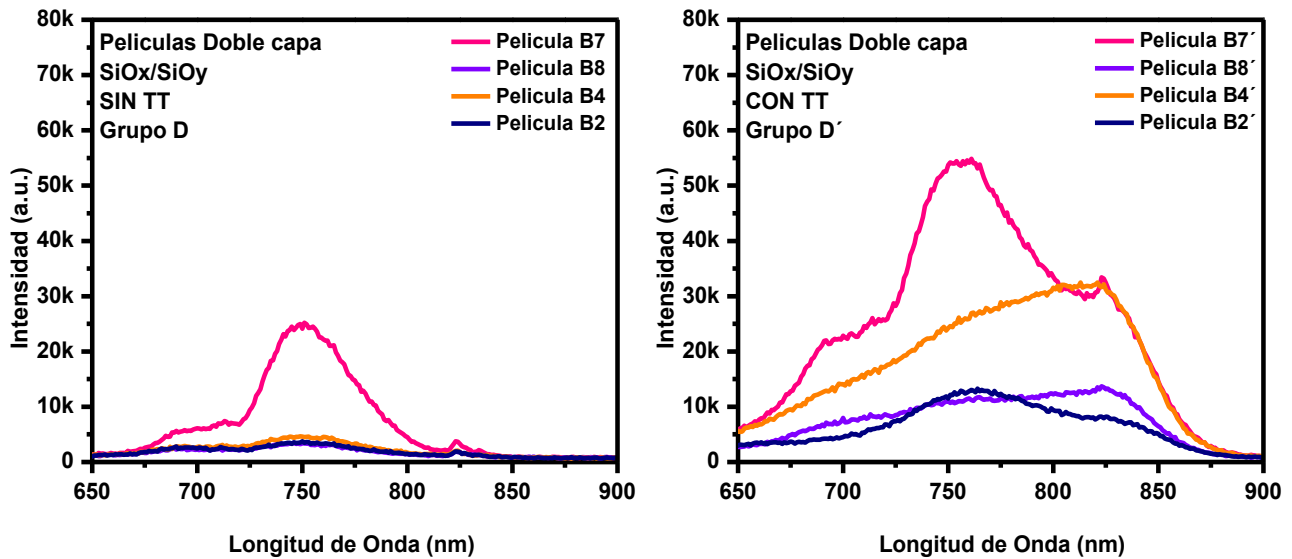


FIGURA 3.6 Fotoluminiscencia películas dobles Grupo D a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

En el Grupo D se puede observar un aumento de la emisión en todas las películas con tratamiento térmico, además de una ampliación del espectro para todos los dispositivos, en el caso de las películas B8 y B2 este aumento es pequeño. En el caso de la energía del GAP todas las películas presentan un pico de emisión en una longitud de onda de aproximadamente de 750nm lo que da un GAP de 1.65eV, aunque esto no aplica para B8' y B4' (Con TT) pues su pico de emisión está en aproximadamente 850nm lo que nos da un GAP de 1.45eV

3.1.4 Transmitancia

Los resultados de la caracterización por Transmitancia nos muestran el comportamiento referente a la cantidad de luz que penetra la película en determinada longitud de onda, y al igual que con la Fotoluminiscencia nos permite observar las diferencias entre películas con y sin tratamiento térmico

Para la caracterización por transmitancia se utilizó un Espectrofotómetro Cary 5000 realizando un barrido desde 200nm hasta 1000nm.

3.1.5 Resultados Transmitancia en Películas Simples

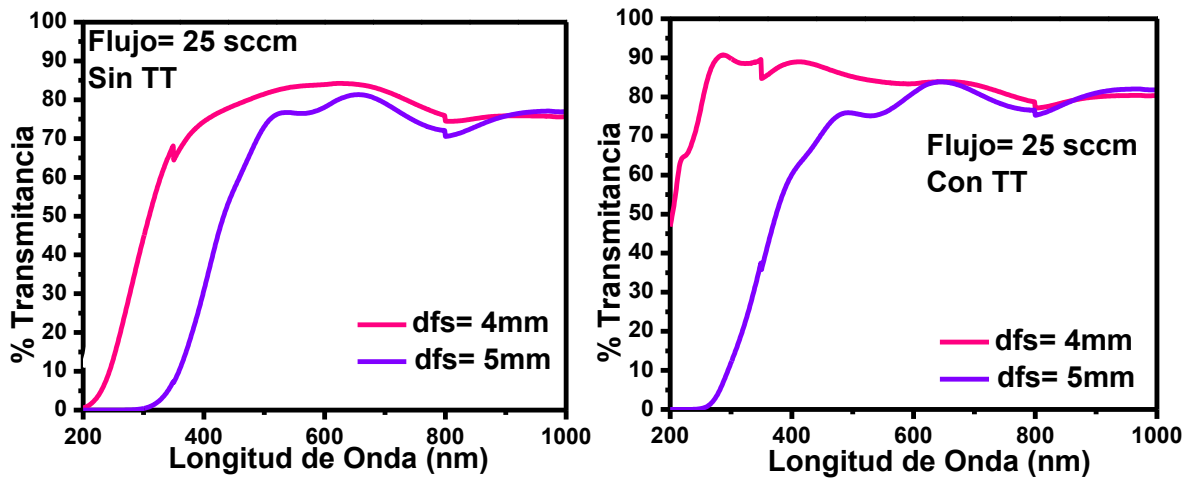


FIGURA 3.7 Transmitancia de películas simples a un flujo de 25sccm con distancias fuente sustrato de 4 y 5mm
a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Las películas simples seleccionadas que se muestran en la figura son las que tiene un flujo de 25sccm y podemos observar que al aplicar tratamiento térmico el porcentaje de transmitancia aumenta hasta casi un 90% además de ampliarse su espectro en el caso de la distancia fuente sustrato de 4mm, para la distancia fuente sustrato de 5mm solo hay un incremento pequeño tanto en la ampliación del espectro como en la transmitancia.

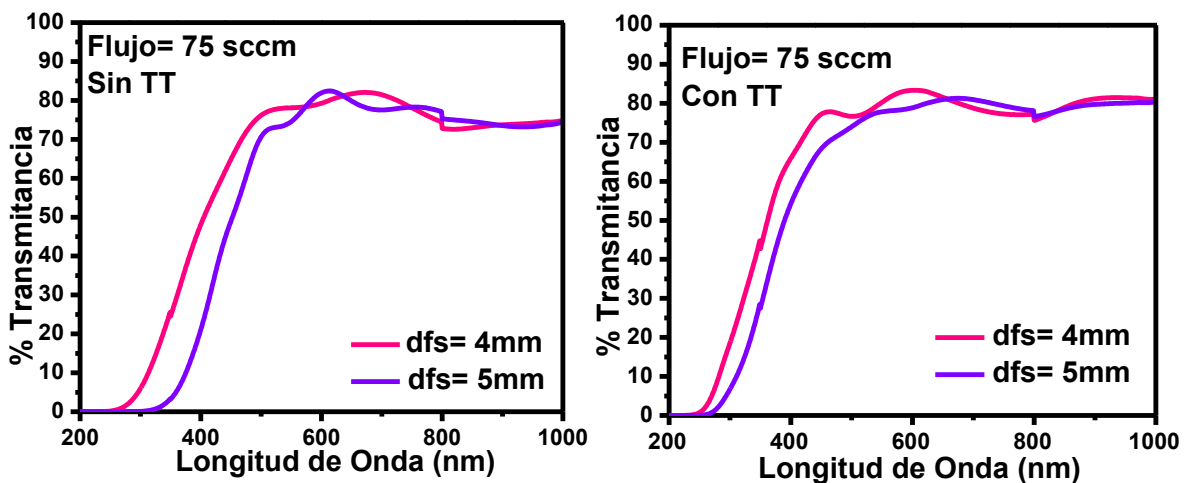


FIGURA 3.8 Transmitancia de películas simples a un flujo de 25sccm con distancias fuente sustrato de 4 y 5mm
a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Las películas simples seleccionadas que se muestran en la figura son las que tiene un flujo de 75sccm y podemos observar que al aplicar tratamiento térmico el porcentaje de transmitancia permanece casi igual en ambas películas.

3.1.6 Resultados Transmitancia en Películas dobles

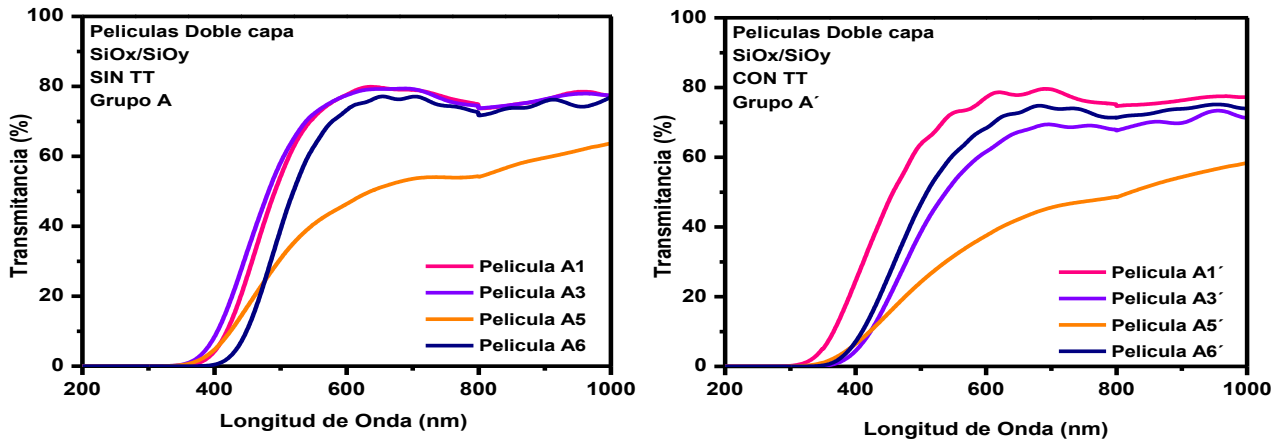


FIGURA 3.9 Transmitancia de películas dobles Grupo A a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

En el Grupo A (figura) se puede observar una ligera disminución en el porcentaje de luz que pasa la película, exceptuando el caso de la película A1 que se mantiene igual y que además con el tratamiento térmico ocurre una ligera ampliación de espectro de unos 25nm, pues comienza a pasar la luz en los 300nm. En contraparte la película A5 tiene el porcentaje más bajo ya sea con o sin tratamiento.

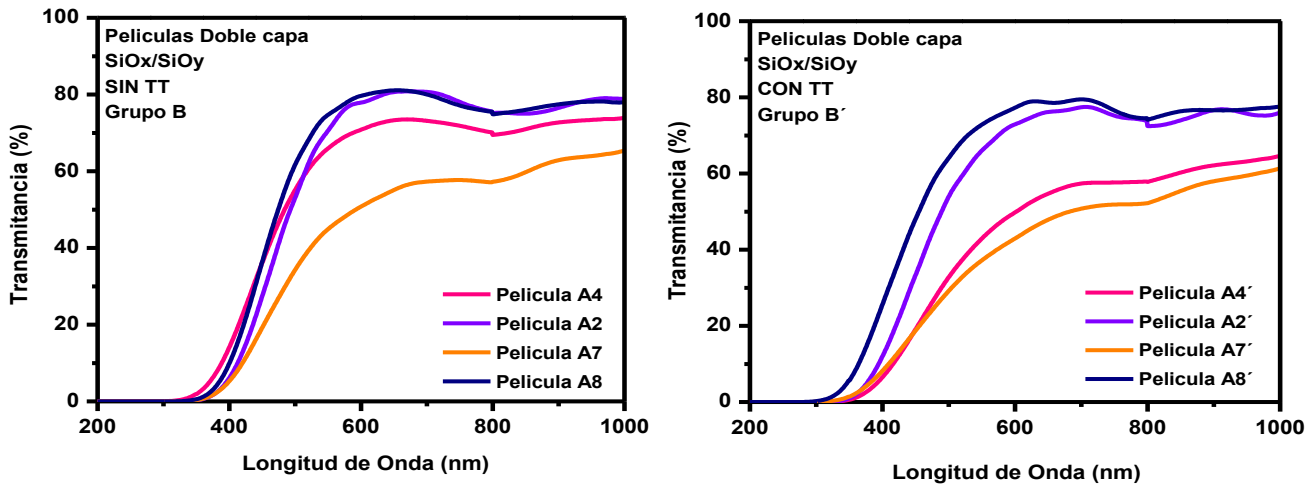


FIGURA 3.10 Transmitancia de películas dobles Grupo B a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Del Grupo B (figura 3.11) se puede ver una disminución en el porcentaje de luz que pasa la muestra para las películas A4 y A7 con tratamiento térmico, para las otras 2 películas no ocurre cambio alguno.

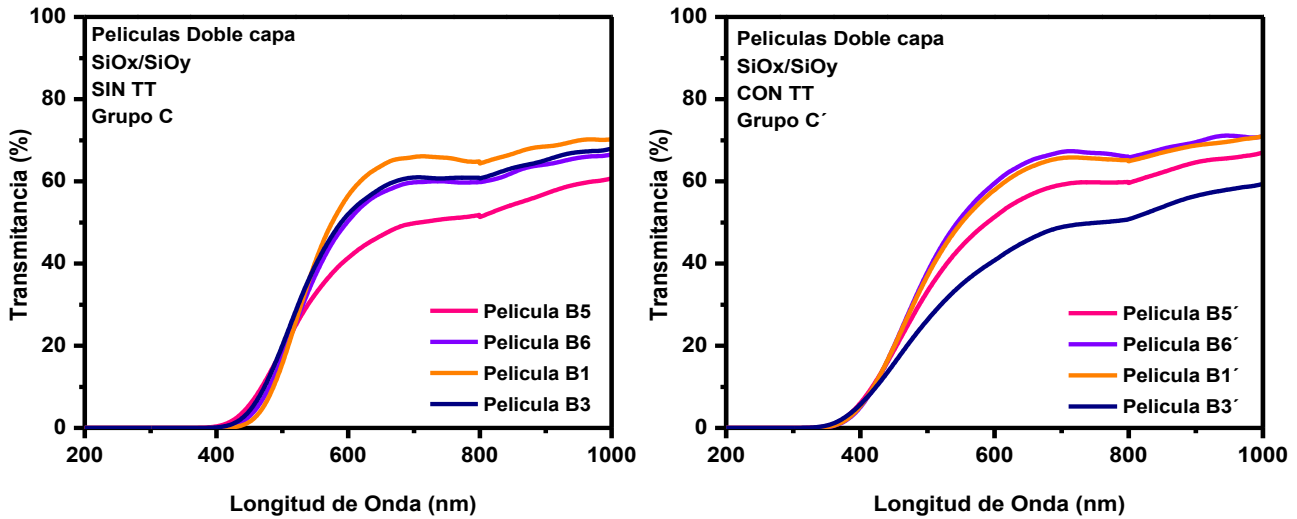


FIGURA 3.11 Transmitancia de películas dobles Grupo C a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Del Grupo C (figura) se puede ver una disminución en el porcentaje de luz que pasa la muestra para la película B3 y un ligero aumento para la película B5 con tratamiento térmico, para las otras 2 películas el cambio es muy pequeño.

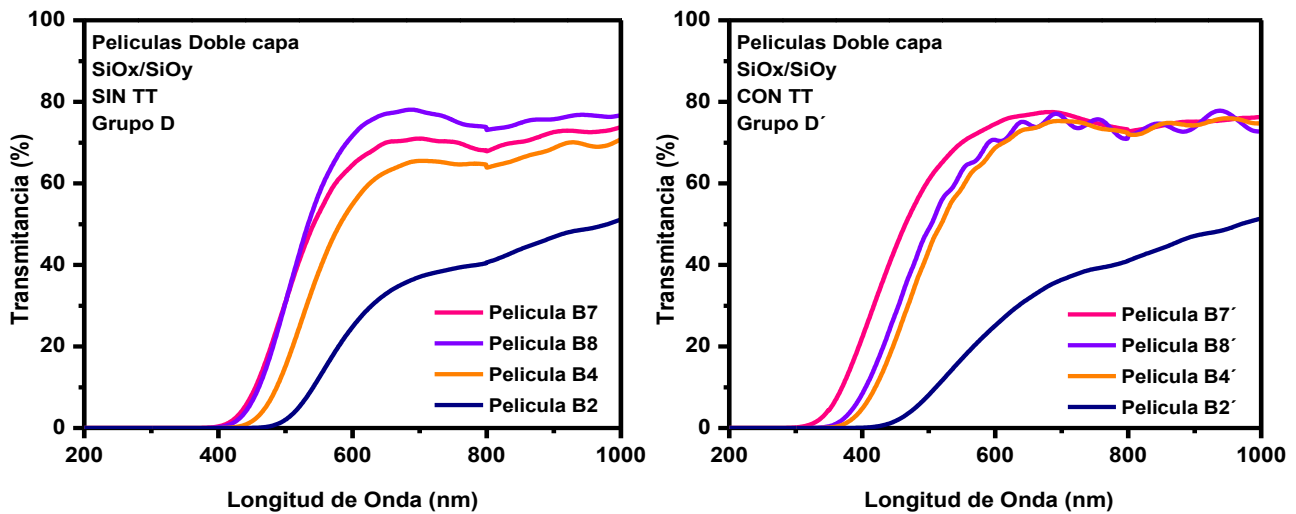


FIGURA 3.12 Transmitancia de películas dobles Grupo C a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico

Del Grupo D (figura) se puede ver una disminución en el porcentaje de luz que pasa la muestra para la película B2 y un ligero aumento para la película B7 con tratamiento térmico, para las otras 2 películas el cambio es muy pequeño.

3.2 Caracterizaciones Eléctricas

Como una breve explicación a la organización de todos los resultados presentados, la primera grafica (a) en todas las figuras siguientes, es la correspondiente a la medición I-V, en la que se muestran las mediciones de acumulación e inversión en oscuridad (azul), con luz blanca (amarillo), con luz UV de onda larga (verde) y con luz UV de onda corta (rosa). La segunda grafica (b) corresponde a la medición de I-T, donde nuevamente el azul representa la oscuridad, el verde la luz UV de onda larga y el rosa la luz UV de onda corta. Y la tercera grafica (c) corresponde a la medición C-V.

3.2.1 Mediciones Corriente-Voltaje (I-V), Corriente-Tiempo (I-T) y Capacitancia-Voltaje (CV)

La caracterización eléctrica Corriente-Voltaje (I-V) se ejecutó con un equipo Keithley 4200 realizando un barrido de voltaje el cual fue determinado por la respuesta que mostrara el dispositivo, y comienza del voltaje negativo al positivo.

El paso de voltaje para todas las mediciones fue de 0.0125V y los barridos se hicieron bajo las siguientes condiciones:

- Oscuridad
- Luz blanca incidida en el dispositivo
- Luz UV de onda larga (365nm) incidida en el dispositivo
- Luz UV de onda corta (254nm) incidida en el dispositivo

La caracterización eléctrica Corriente-Tiempo (I-T) se efectuó con un equipo Keithley 2400 haciendo pasar una corriente de 0.01V al dispositivo, durante un tiempo de 35 segundos bajo las siguientes condiciones:

- Oscuridad
- Luz UV de onda larga (365nm) incidida en el dispositivo
- Luz UV de onda corta (254nm) incidida en el dispositivo

La caracterización eléctrica Capacitancia-Voltaje (C-V) se obtuvo con un equipo Keithley 4200 realizando un barrido de voltaje el cual fue determinado por la respuesta que mostrara el dispositivo, y comienza del voltaje negativo al positivo, la frecuencia utilizada fue de 1MHz y todas las mediciones se hicieron bajo condición de oscuridad.

Toda la caracterización eléctrica se hizo de manera vertical y las conexiones eléctricas correspondientes a cada dispositivo se realizaron como se muestra en la figura 3.13

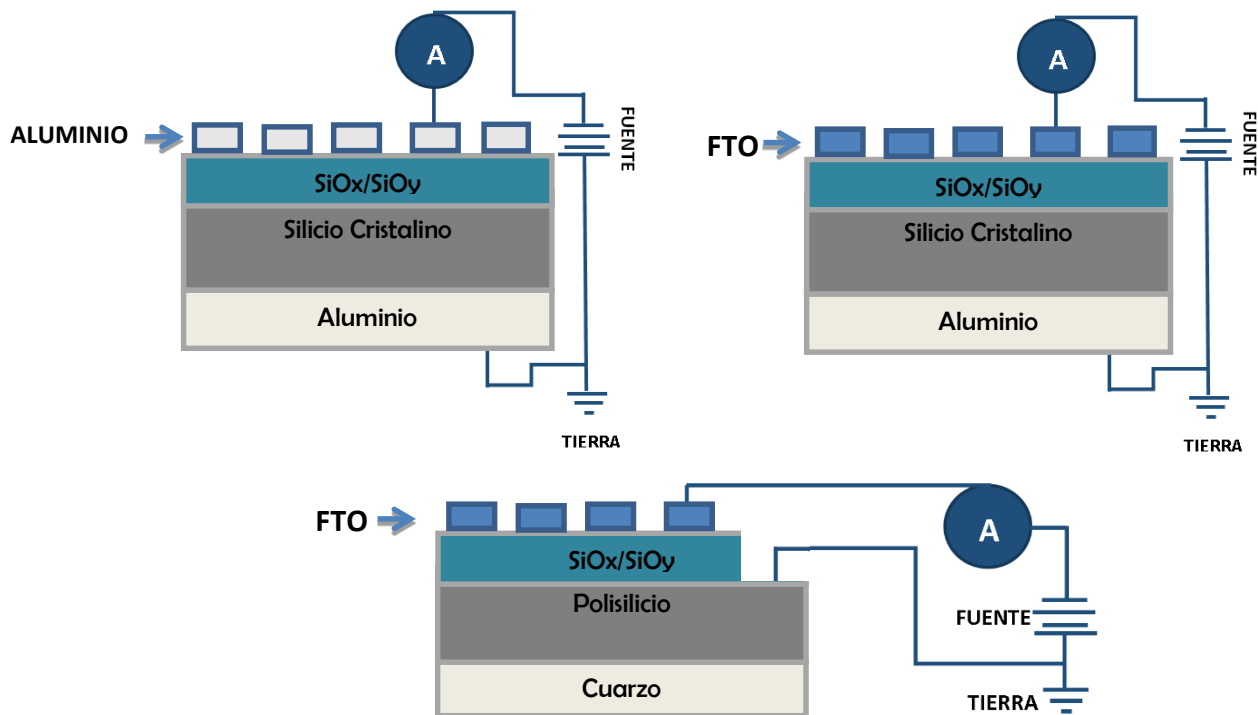


FIGURA 3.13 Conexiones eléctricas utilizadas para realizar las caracterizaciones eléctricas de los dispositivos
 a) Estructura MOS contactos de aluminio b) Estructura MOS contactos de FTO
 c) Estructura MOM contactos de FTO

3.2.2 Resultados Caracterizaciones Eléctricas Grupo A

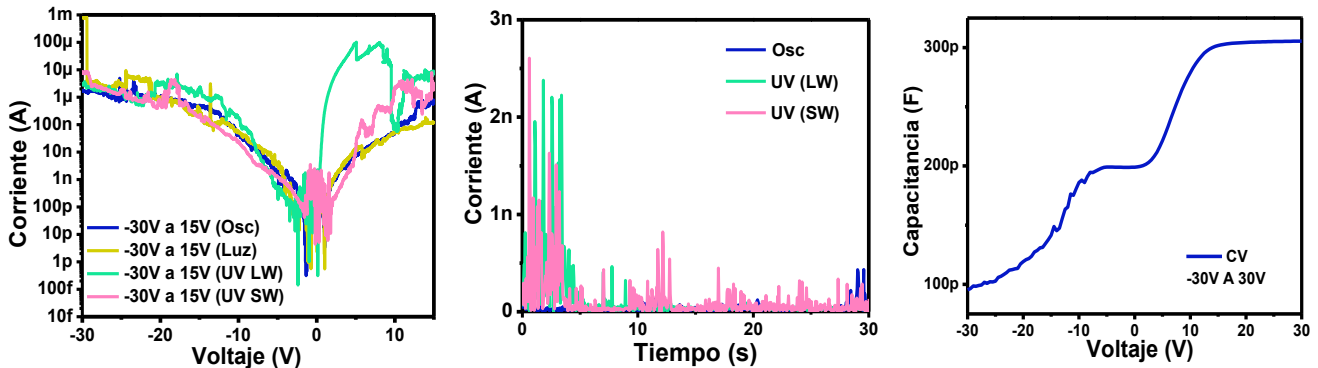


FIGURA 3.14 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A1 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.14 se observa un barrido de -30V a 15V en la medición I-V; la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA y en el voltaje positivo se alcanzó un máximo en el orden de los mA. Se aprecia un incremento de la corriente con la luz UV, especialmente en la de onda larga con un aumento de 4 órdenes de magnitud comparada con la luz blanca o la oscuridad. En la medición I-T ocurre un ligero incremento en la generación de corriente comparado con la oscuridad, especialmente al principio de la medición y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V donde podemos ver un comportamiento típico de Capacitor MOS con una zona de inversión comenzando en -10V y una zona de acumulación a los 10V.

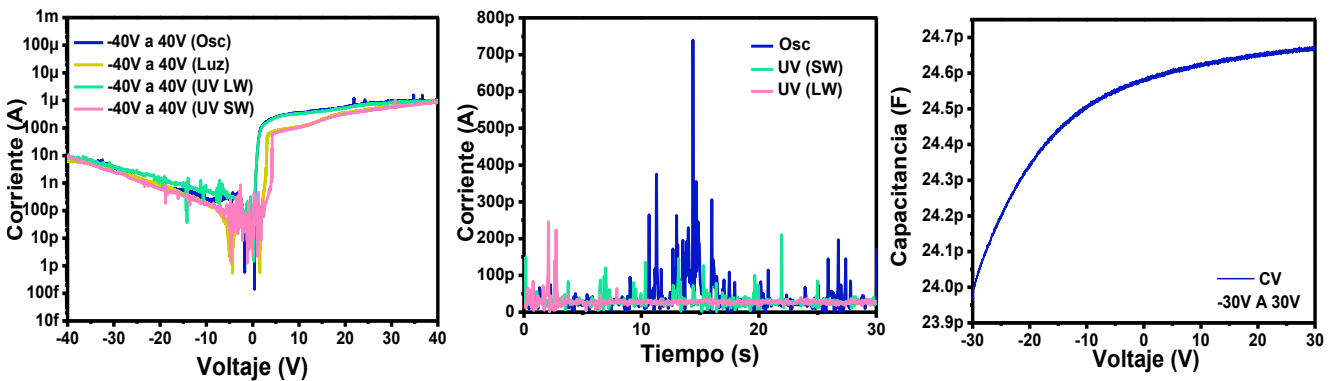


FIGURA 3.15 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A3 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.15 se observa un barrido de -40V a 40V en la medición I-V; la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los nA y en el voltaje positivo se alcanzó un máximo en el orden de los μA . Se aprecia un ligero decaimiento de la corriente con la luz UV de onda corta y la luz blanca, comparadas con la oscuridad y la luz UV de onda larga. En la medición I-T la generación de corriente se mantiene casi igual para todos los casos, lo que va acorde a lo visto en la gráfica de I-V y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V donde podemos ver el comienzo de la zona de acumulación a los 5V, no se puede apreciar la curva en su totalidad pues falta la zona de inversión, el motivo para este fenómeno es el grosor de la película y la capacidad del equipo de medición, pues el barrido alcanza un máximo de -30V a 30V y para llegar a la zona de inversión se requiere un mayor voltaje negativo.

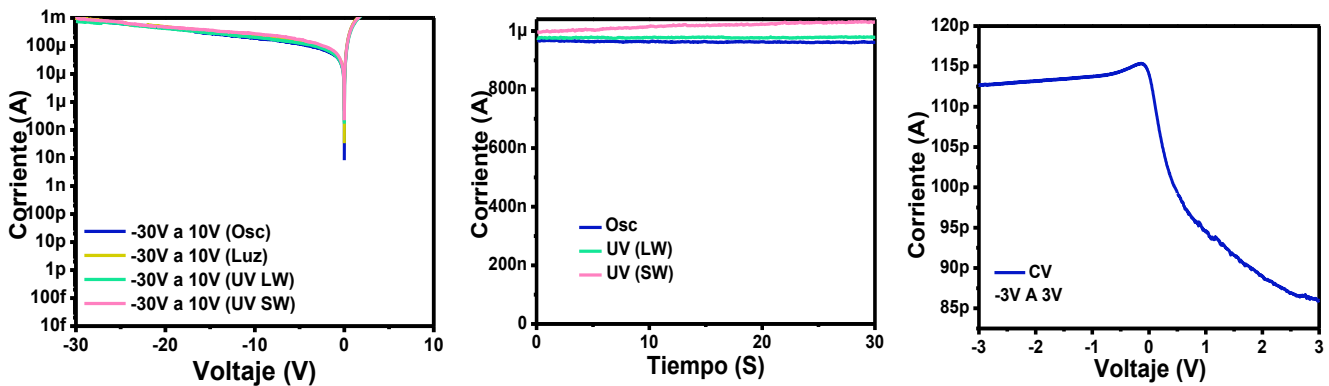


FIGURA 3.16 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A3 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.16 se observa un barrido de -30V a 10V en la medición I-V; la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo se alcanzó un máximo en el orden de los mA. Se aprecia un empalme de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV). En la medición I-T ocurre un incremento en la generación de corriente con luz UV comparado con la oscuridad, especialmente la luz UV onda corta y en menor grado la onda larga, esto se puede apreciar a los 0V de la medición I-V pues las corrientes de luz UV comienzan un orden de magnitud arriba. Esto quiere decir que hay una respuesta a los fotones incididos solo al principio de la medición. En la curva C-V se realiza un barrido de -

3V a 3V y podemos ver un comportamiento que no es típico de un Capacitor MOS con una zona de acumulación comenzando en -1V y sin una zona de inversión.

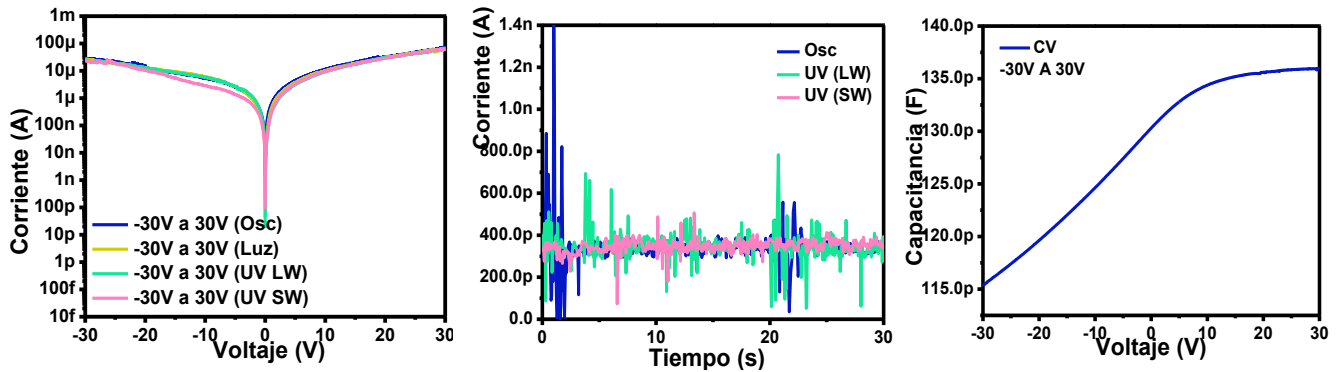


FIGURA 3.17 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A5 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.17 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un empalme de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV), la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente se mantiene casi igual para todos los casos, lo que va acorde a lo visto en la gráfica de I-V y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V donde se puede apreciar una zona de acumulación comenzando en 15V y una falta de zona de inversión como ya se había mencionado anteriormente debido a la película y el equipo de medición.

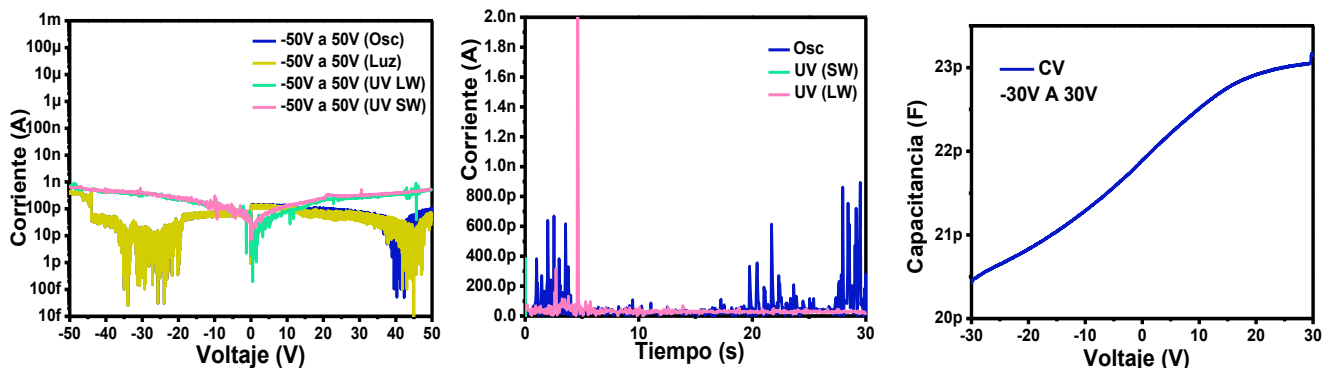


FIGURA 3.18 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A6 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.18 se observa un barrido de -50V a 50V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo y positivo llegó al orden de los nA. En esta grafica se aprecia un comportamiento totalmente diferente entre las luces UV y la luz blanca y de oscuridad, donde se puede destacar un aumento de corriente y mejor comportamiento con la luz UV. En la medición I-T ocurre un ligero incremento en la generación de corriente con luz UV y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V, pero no se alcanza a ver la curva típica C-V debido a que falta incidir más voltaje.

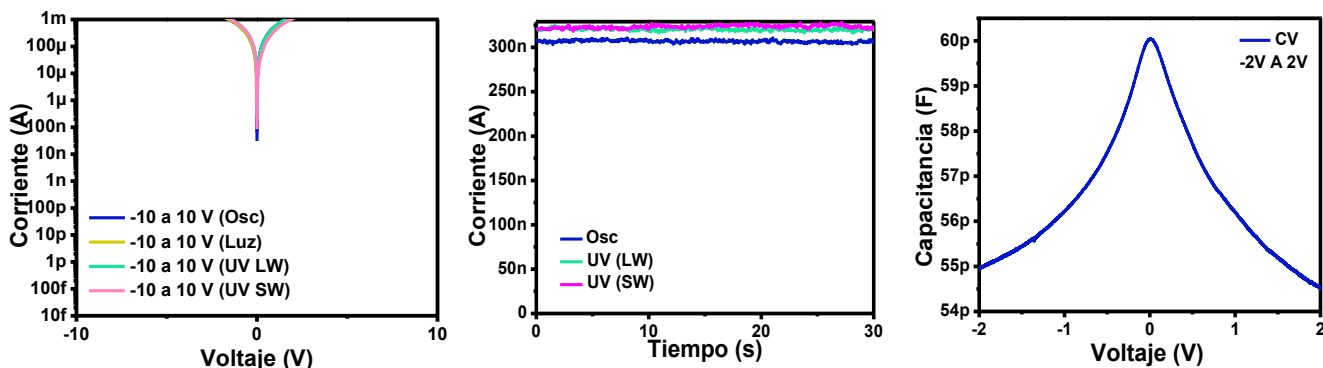


FIGURA 3.19 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A6 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.19 se observa un barrido de -10V a 10V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo al igual que en el positivo llegó al orden de los mA y se puede ver una clara sobreposición de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV). En la medición I-T ocurre un incremento en la generación de corriente con luz UV comparado con la oscuridad en la luz UV de onda corta y en menor grado la onda larga, esto se puede apreciar a los 0V de la medición I-V. En la curva C-V se realiza un barrido de -2V a 2V y podemos ver un comportamiento que no es típico de un Capacitor MOS con una máxima capacitancia a los 0V.

3.2.3 Resultados Caracterizaciones Eléctricas Grupo B

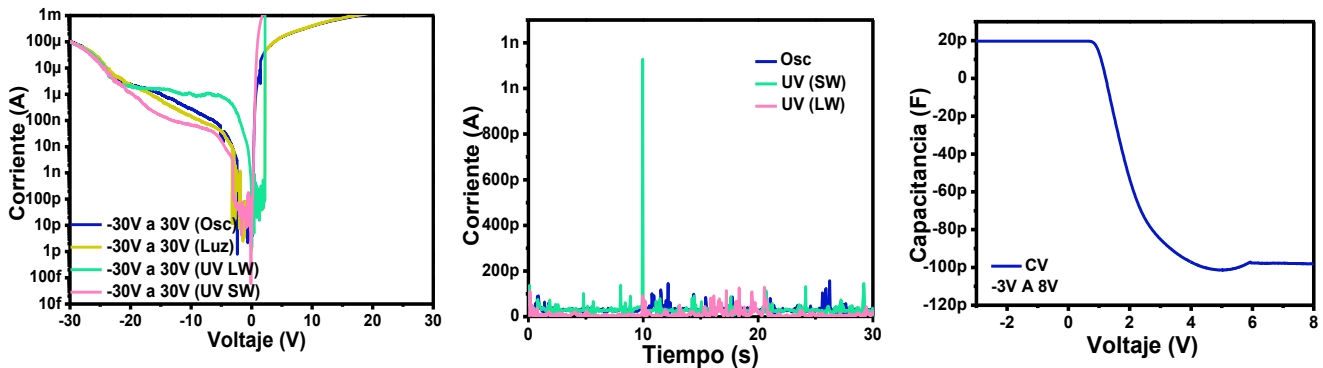


FIGURA 3.20 Caracterización eléctrica: Dispositivo A4 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.20 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo se alcanzó un máximo en el orden de los A. Se aprecia un incremento de la corriente con la luz UV, especialmente en el voltaje positivo con un aumento de casi 2 órdenes de magnitud comparada con la luz blanca o la oscuridad. En la medición I-T la generación de corriente se mantiene casi igual para todos los casos y en la curva C-V se realiza un barrido de -3V a 8V donde podemos ver la zona de acumulación de 0V a -2V y una zona de inversión de 6V a 8V.

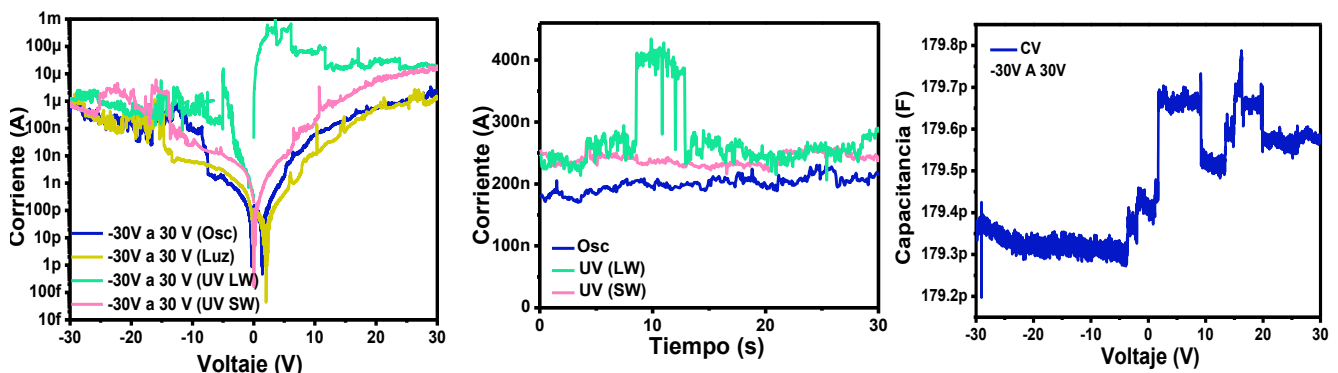


FIGURA 3.21 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOM A4 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.21 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μ A y en el voltaje

positivo se alcanzó un máximo en el orden de los mA. Se aprecia un incremento de hasta 6 órdenes de magnitud de la luz UV de onda larga, un ligero incremento con la luz UV de onda corta y un pequeño decaimiento de la luz blanca, todas respecto a la medición en oscuridad. En la medición I-T ocurre un incremento en la generación de corriente con luz UV comparado con la oscuridad, especialmente la luz UV onda larga, y en menor grado la onda larga. En la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos observar un comportamiento que no es típico de un Capacitor MOS con subidas y decaimientos en la capacitancia.

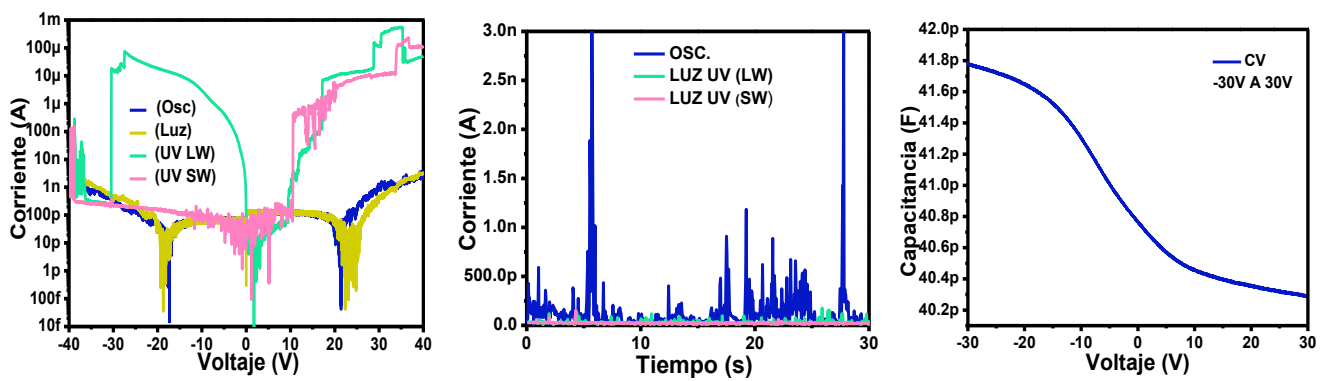


FIGURA 3.22 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A4 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.22 se observa un barrido de -40V a 40V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA al igual que en el voltaje positivo. Se aprecia un incremento de casi 6 órdenes de magnitud y comportamiento totalmente diferente entre las luces UV y la luz blanca y oscuridad. En la medición I-T se aprecian unos picos muy grades de la corriente de oscuridad, en cambio con las luces UV se ve un comportamiento mucho más estable en cuanto a la generación de corriente. En la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos observar una tendencia al comportamiento típico de un Capacitor MOS, sin embargo no se alcanza a apreciar la curva en su totalidad, debido a la necesidad de más voltaje en la fuente.

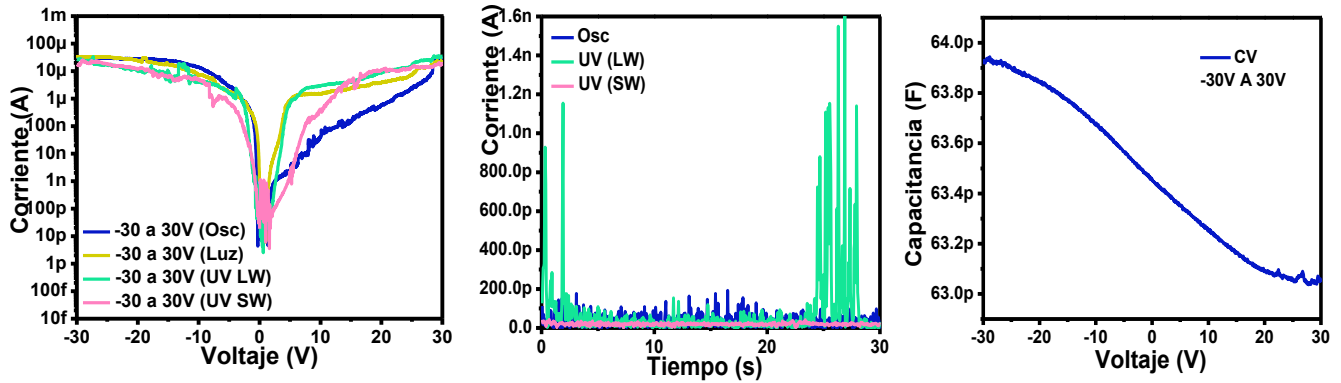


FIGURA 3.23 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A4 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.23 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo y se puede observar un aumento ligero de la corriente de oscuridad respecto a las de luz blanca y UV en el voltaje negativo y lo contrario en el positivo. En la medición I-T se aprecian unos picos muy grades de la corriente UV de onda larga, en cambio con la oscuridad y UV de onda corta donde se ve un comportamiento mucho más estable en cuanto a la generación de corriente. En la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos observar una tendencia al comportamiento típico de un Capacitor MOS, sin embargo no se alcanza a apreciar la curva en su totalidad.

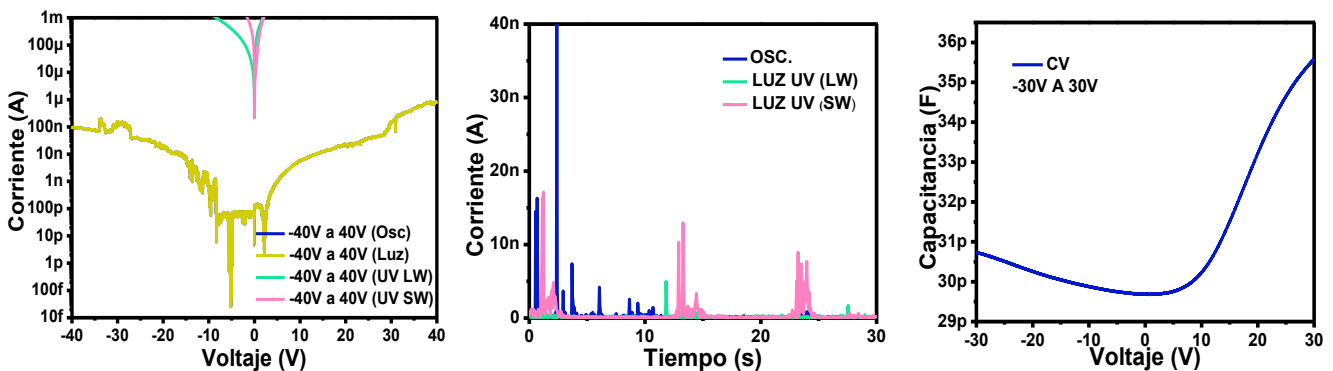


FIGURA 3.24 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A2 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.24 se observa un barrido de -40V a 40V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los A al igual que en el voltaje positivo y se puede observar una alta corriente para los casos UV y decaimiento de 5 órdenes de magnitud en luz blanca y oscuridad. En la medición I-T se aprecia un comportamiento casi igual entre todas las corrientes. En la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V pero no se alcanza a apreciar la curva en su totalidad, debido a la necesidad de más voltaje en la fuente.

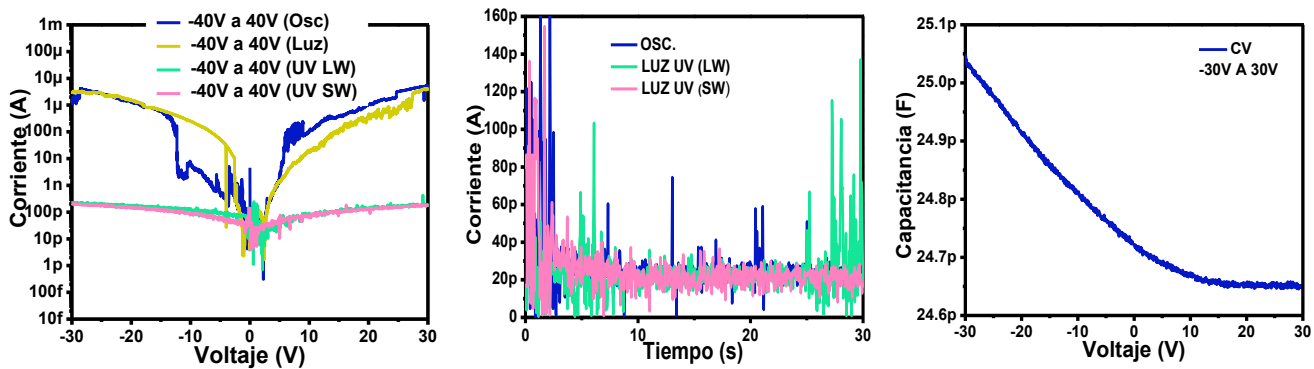


FIGURA 3.25 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A7 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.25 se observa un barrido de -40V a 40V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo y se puede observar un incremento de 4 órdenes de magnitud para los casos de luz blanca y oscuridad respecto al UV. En la medición I-T se aprecia un comportamiento con bastantes oscilaciones pero casi igual entre todas las corrientes. En la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V pero no se alcanza a apreciar la curva en su totalidad, debido a la necesidad de más voltaje en la fuente.

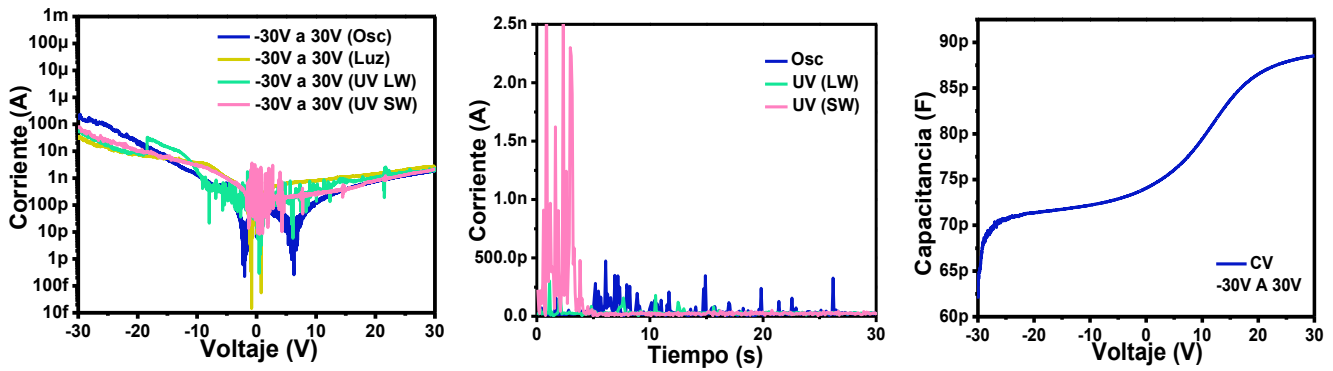


FIGURA 3.26 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A8 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.26 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un ligero incremento en la corriente al aplicar las luces UV y blanca, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA y en el voltaje positivo a los nA. En la medición I-T la generación de corriente se mantiene casi igual para todos los casos, y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V donde podemos ver una zona de inversión comenzando en -5V y el inicio de zona de una zona de acumulación a los 30V.

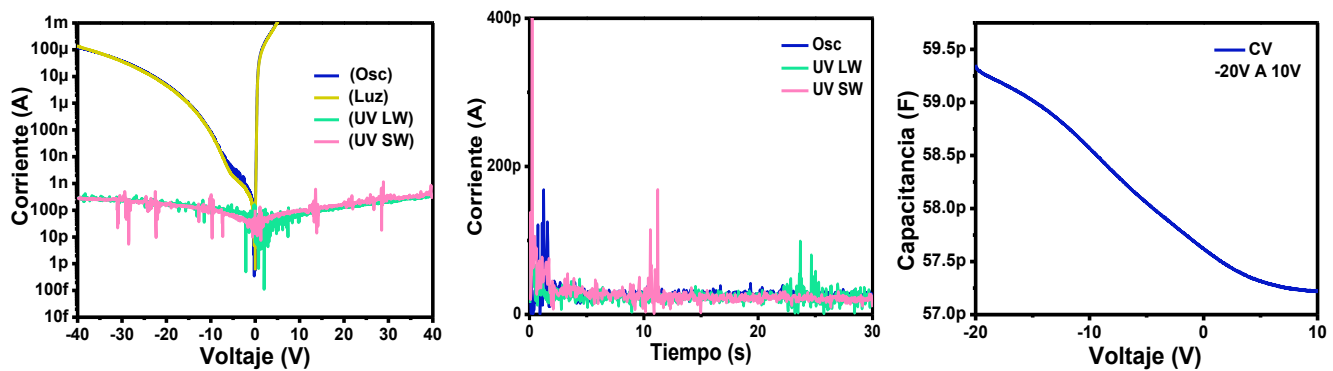


FIGURA 3.27 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A8 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.27 se observa un barrido de -40V a 40V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y a los A en el voltaje positivo, se puede apreciar un incremento de 5 órdenes de magnitud para los casos de luz blanca y oscuridad respecto al UV que presenta decaimiento. En la medición I-T se aprecia un comportamiento casi igual entre todas las corrientes

y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V pero no se alcanza a apreciar la curva en su totalidad, debido a la necesidad de más voltaje en la fuente.

3.2.4 Resultados Caracterizaciones Eléctricas Grupo C

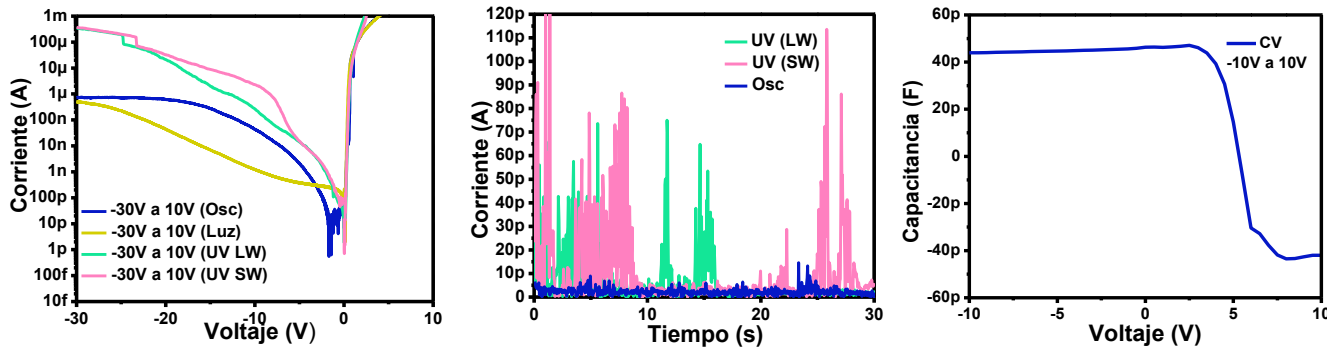


FIGURA 3.28 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B5 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.28 se observa un barrido de -30V a 10V en la medición I-V, con un empalme de todas las corrientes del lado del voltaje positivo y un marcado desfase en el lado negativo donde se observa una corriente un poco más elevada con las luces UV, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA y en el voltaje positivo a los mA. En la medición I-T la generación de corriente se eleva con bastantes oscilaciones en el caso de las luces UV de onda corta y larga. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -10V a 10V y podemos ver una zona de acumulación de 2V a -10V y el comienzo de la zona de inversión en 7V.

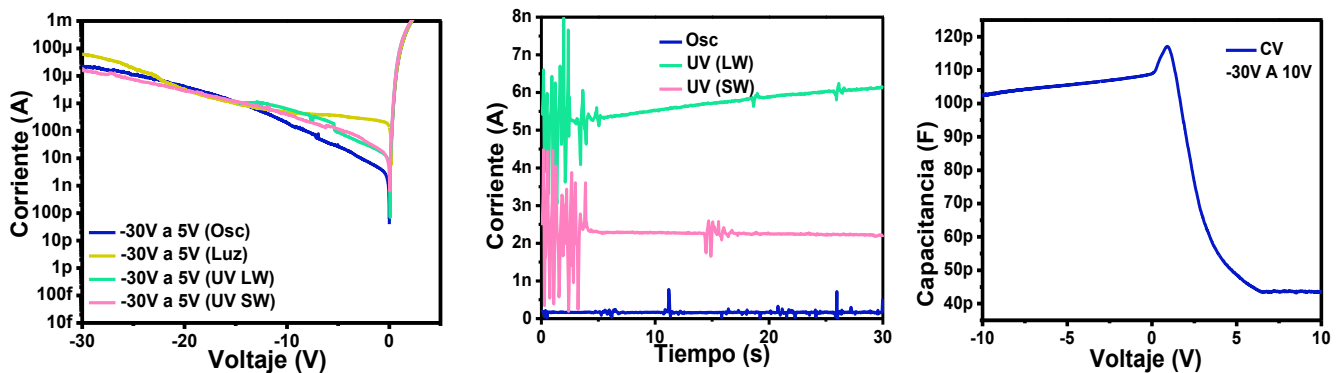


FIGURA 3.29 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B5 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.29 se observa un barrido de -30V a 5V en la medición I-V, con un empalme de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV) del lado del voltaje positivo y un ligero desfase en el lado negativo donde se observa una corriente un poco más elevada con luz blanca, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo a los A. En la medición I-T la generación de corriente se eleva con oscilaciones al comienzo en el caso de las luces UV de onda larga y corta, donde se puede ver también un marcado incremento entre cada una de ellas, siendo la más elevada la de onda larga y en la curva C-V se realiza un barrido de -10V a 10V y podemos ver una zona de acumulación de 0V a -10V y el comienzo de la zona de inversión en 7V.

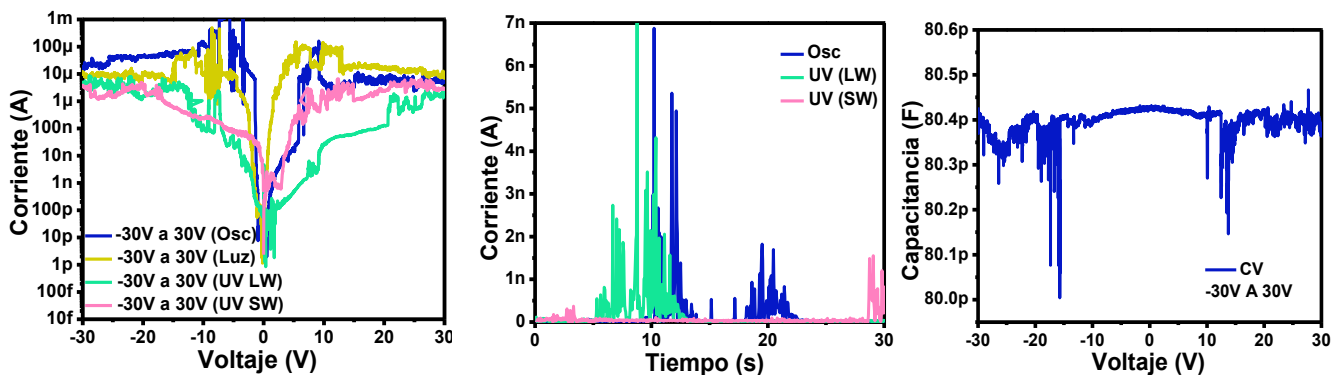


FIGURA 3.30 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOM B5 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.30 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un decaimiento con luz blanca y las luces UV, siendo la de onda larga la que presenta una corriente más baja, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo a los mA. En la medición I-T la generación de corriente presenta oscilaciones en diferentes puntos con picos más altos con la luz UV de onda larga. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos ver un comportamiento no definido con bastantes oscilaciones.

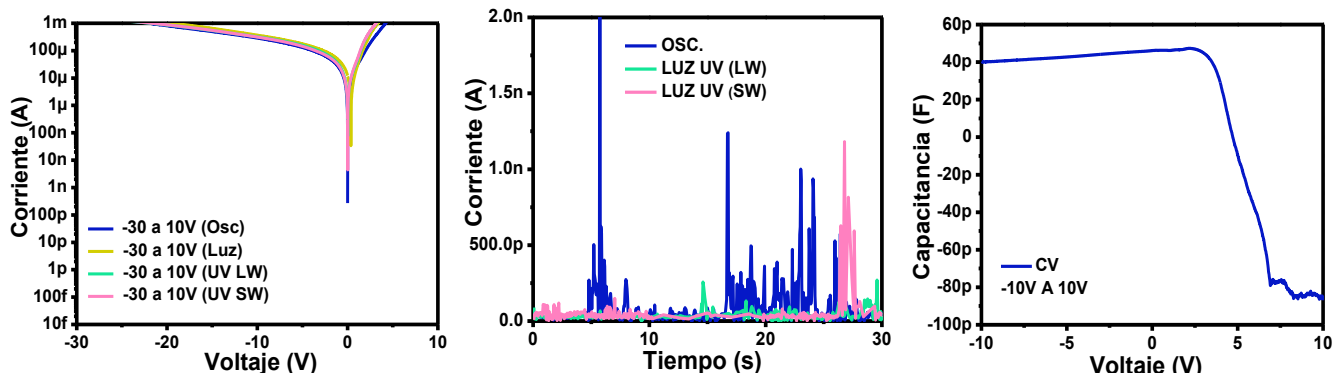


FIGURA 3.31 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B5 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.31 se observa un barrido de -30V a 10V en la medición I-V, con un comportamiento casi igual en todas las corrientes (oscuridad, luz, UV), la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente se mantiene casi igual para todos los casos, lo que va acorde a lo visto en la gráfica de I-V y en la curva C-V se realiza un barrido de -10V a 10V y podemos ver una zona de acumulación en 2V hasta -10V y el comienzo de una zona de inversión a los 7V.

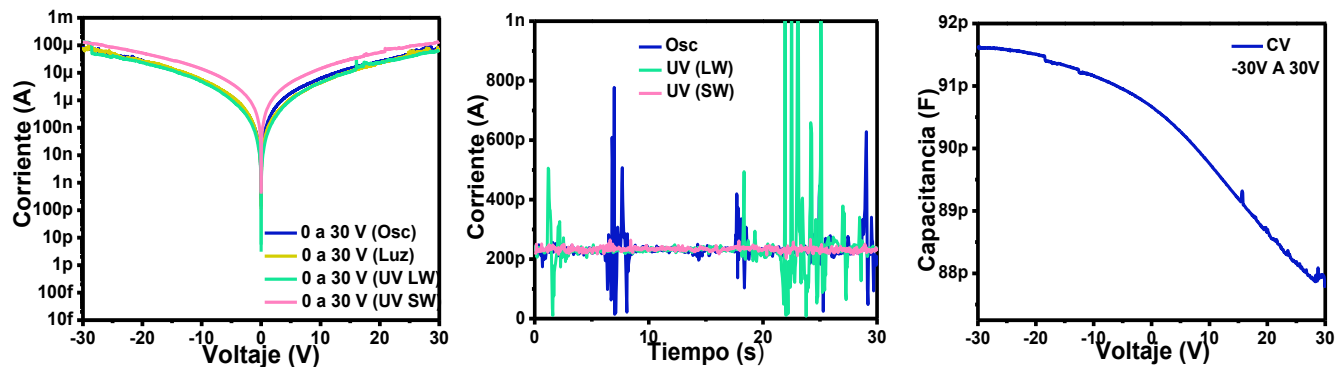


FIGURA 3.32 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B5 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.32 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un empalme de todas las corrientes exceptuando la de UV de onda corta que presenta un ligero incremento, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente se mantiene casi igual para todos los casos y se presentan

picos altos con la luz UV de onda larga y una corriente más uniforme con la luz UV de onda corta. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos ver un comportamiento que tiende al del capacitor MOS, pero como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, se necesita una fuente con mayor voltaje.

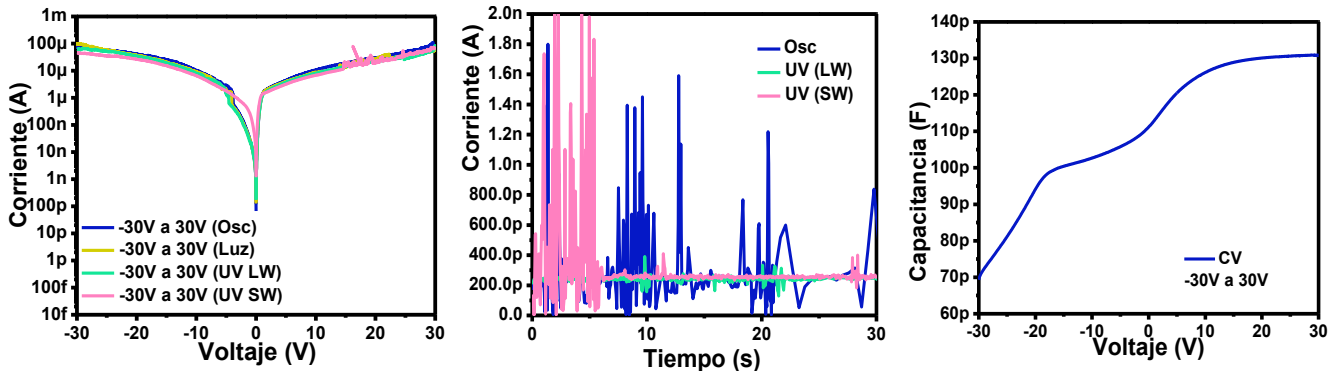


FIGURA 3.33 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B6 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.33 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un empalme de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV), la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente presenta oscilaciones grandes y variadas para las 3 corrientes. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V, se observa una zona de acumulación comenzando en 15V y una zona de inversión en -5V, además de una posible formación de otra zona de inversión, que no se alcanzó a ver en la gráfica.

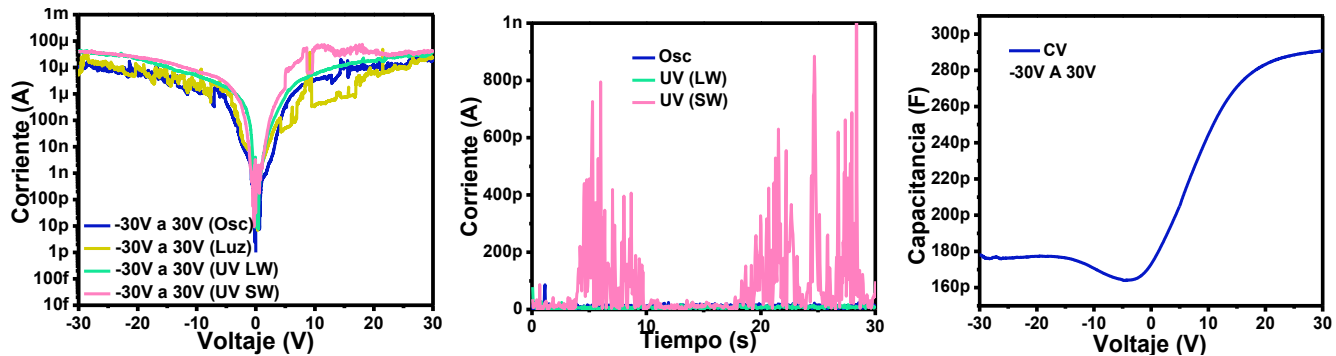


FIGURA 3.34 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B6 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.34 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un desfase ligero de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV), la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente presenta oscilaciones grandes y variadas para la luz UV de onda corta. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V, se observa un comportamiento típico MOS con una zona de acumulación comenzando en 20V y una zona de inversión en -15V a 30.

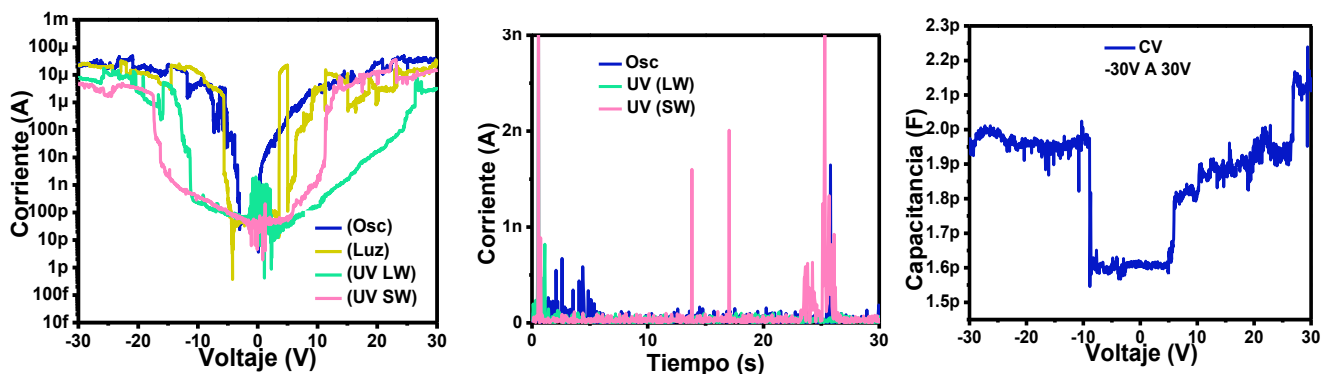


FIGURA 3.35 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOM B1 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.35 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un decaimiento con luz blanca y las luces UV, siendo la de onda larga la que presenta una corriente más baja, la corriente en el voltaje negativo y positivo llegó al orden de los μA . En la medición I-T la generación de corriente presenta puntos con picos más altos con la luz UV de onda corta y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos ver un comportamiento no definido con bastantes oscilaciones.

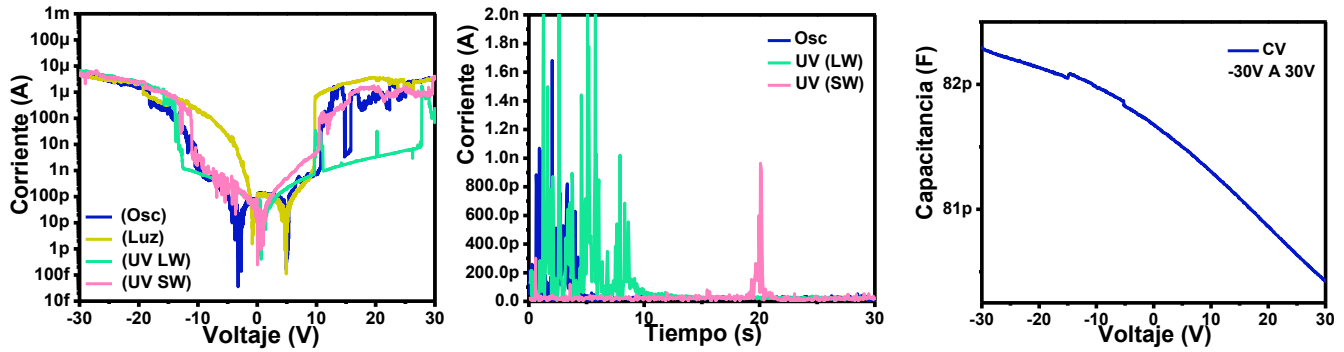


FIGURA 3.36 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B1 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.36 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un ligero desfase con todas las corrientes, siendo la de luz blanca la corriente más alta, la corriente en el voltaje negativo y positivo llegó al orden de los μA . En la medición I-T la generación de corriente presenta puntos con picos más altos al inicio con la luz UV de onda larga y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos ver un comportamiento no definido, debido a la necesidad de aplicar más voltaje en la prueba.

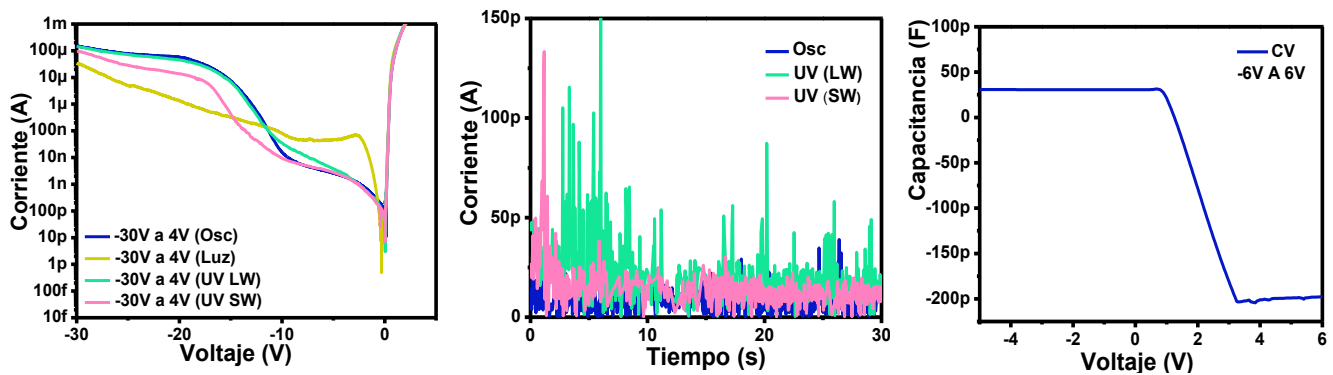


FIGURA 3.37 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B3 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.37 se observa un barrido de -30V a 5V en la medición I-V, con un empalme de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV) del lado del voltaje positivo y un ligero desfase en el lado negativo donde se observa una corriente un poco más elevada con luz UV onda larga y oscuridad, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo a los A. En la

medición I-T la generación de corriente se eleva con oscilaciones al comienzo en el caso de las luces UV de onda larga y corta, donde se puede ver también un pequeño incremento entre cada una de ellas, siendo la más elevada la de onda larga. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -5V a 6V y podemos ver una zona de acumulación de 0V a -5V y el comienzo de la zona de inversión en 3V.

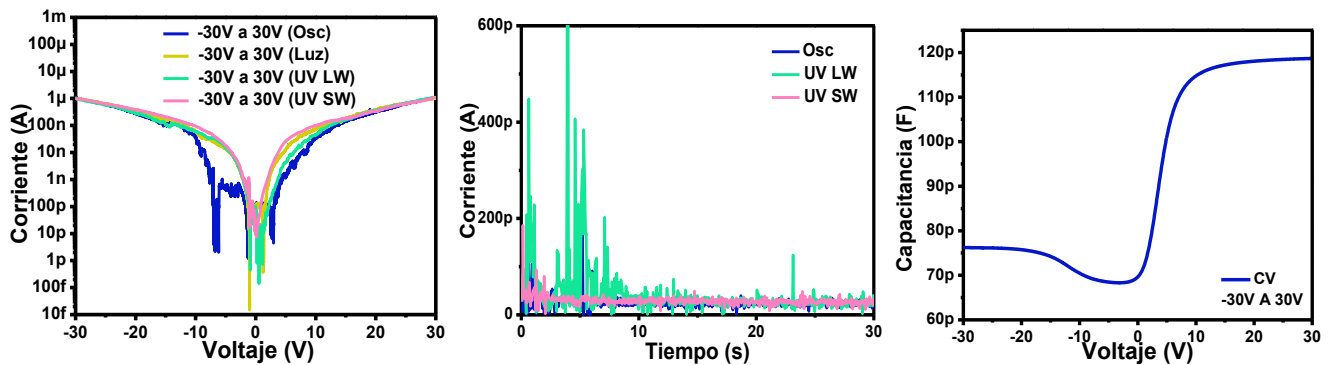


FIGURA 3.38 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B3 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.38 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un decremento ligero de la corriente oscuridad la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente presenta puntos con picos más altos al inicio con la luz UV de onda larga y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V, se observa un comportamiento típico MOS con una zona de acumulación de 10V a 30V y una zona de inversión en -15V a 30V.

3.2.5 Resultados Caracterizaciones Eléctricas Grupo D

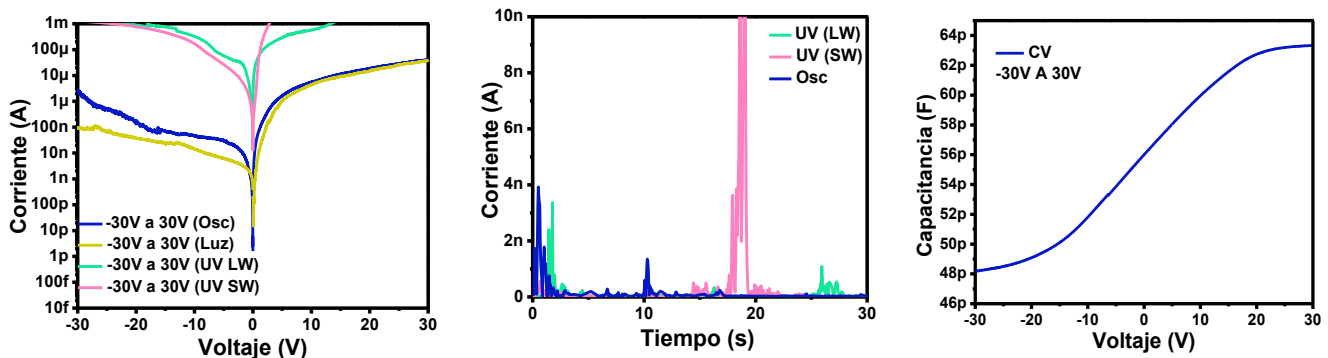


FIGURA 3.39 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B7 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.39 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo se alcanzó un máximo en el orden de los A. Se aprecia un incremento de hasta 3 órdenes de magnitud de la luz UV. En la medición I-T ocurre un pico de corriente con luz UV de onda corta y las demás corrientes se empalman. En la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos observar la tendencia a un comportamiento típico de un Capacitor MOS con inversión en -25V y acumulación en 25V.

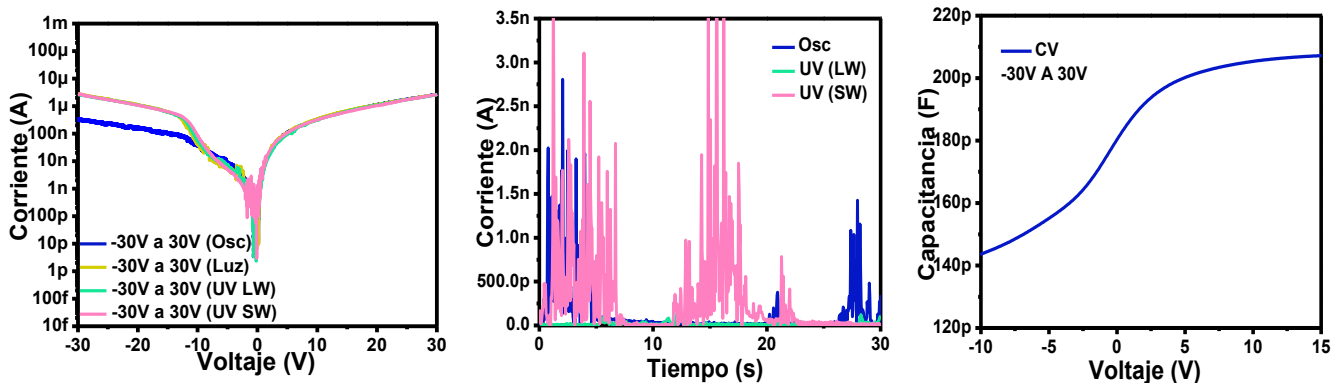


FIGURA 3.40 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B7 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.40 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un decremento ligero de la corriente oscuridad, en el lado del voltaje negativo y la corriente llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente presenta puntos con picos más altos con la luz UV de onda corta. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -10V a 15V, se observa un comportamiento típico MOS con una zona de acumulación de 7V a 15V y el comienzo de la zona de inversión en -7V.

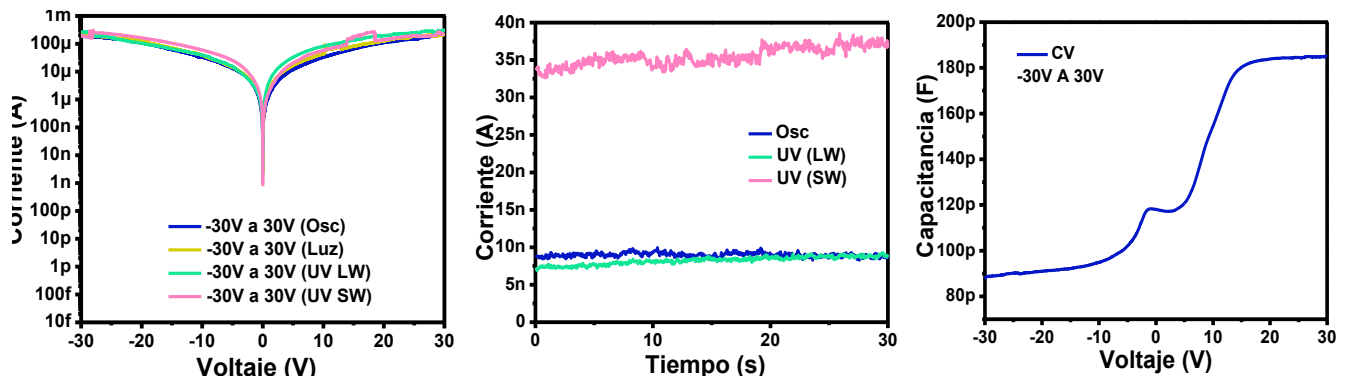


FIGURA 3.41 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B7 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.41 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con comportamiento casi igual para todas las corrientes (oscuridad, luz, UV), solo mostrando un ligero incremento con las luces UV la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente presenta corriente más elevada con la luz de onda corta. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V, se observa una zona de acumulación pequeña en 0V y otra comenzando en 15V y una zona de inversión en -15V.

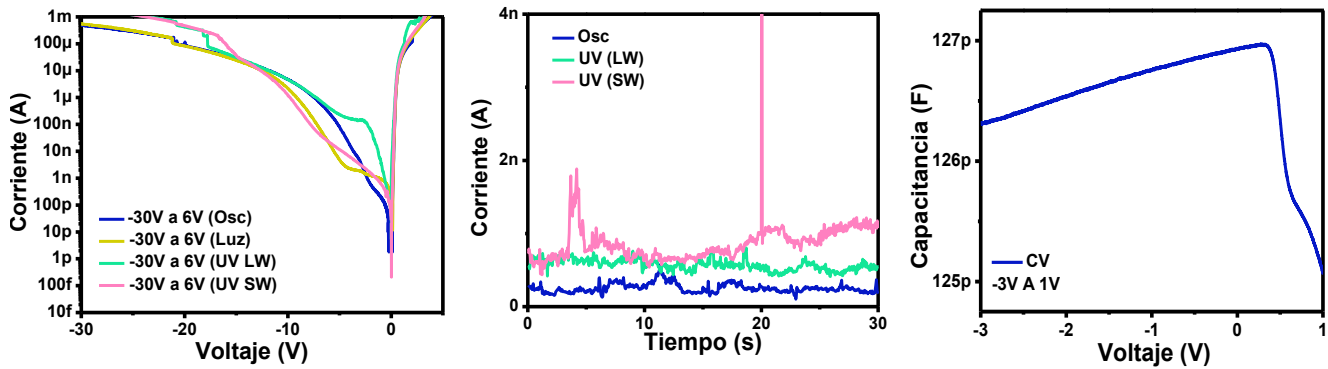


FIGURA 3.42 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B8 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.42 se observa un barrido de -30V a 5V en la medición I-V, con un empalme de todas las corrientes del lado del voltaje positivo y un ligero desfase en el lado negativo donde se observa una corriente un poco más elevada con luces UV, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo a los A. En la medición I-T la generación de corriente se nota un ligero desfase de todas las corrientes, siendo más altas las generadas por la luz UV. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -3V a 1V y podemos ver un comportamiento no definido con un aumento y caída de capacitancia.

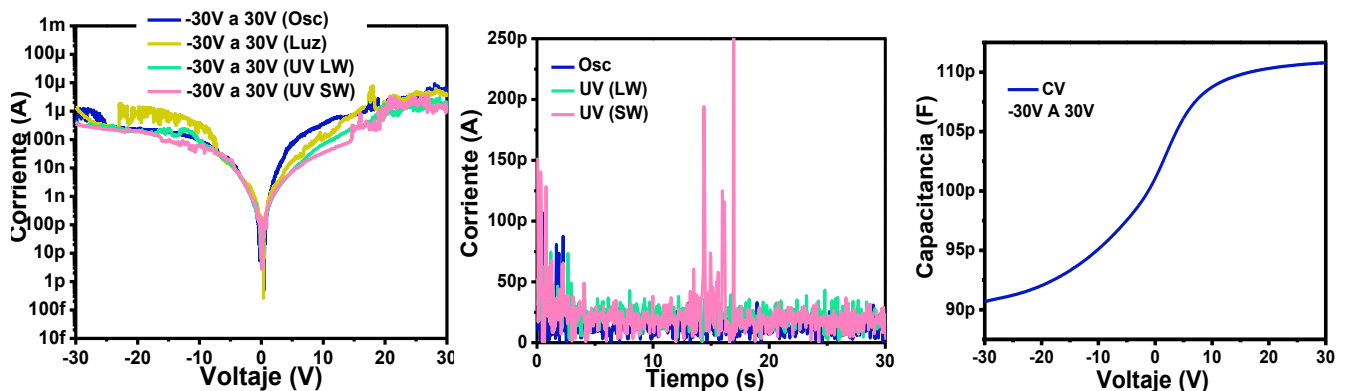


FIGURA 3.43 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B8 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.43 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con comportamiento casi igual para todas las corrientes (oscuridad, luz, UV), solo

mostrando un ligero decaimiento con las luces, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo.

En la medición I-T la generación de corriente se presenta casi igual para todas las corrientes. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y se observa un comportamiento típico MOS con una zona de acumulación en 10V y el comienzo de una zona de inversión en -20V .

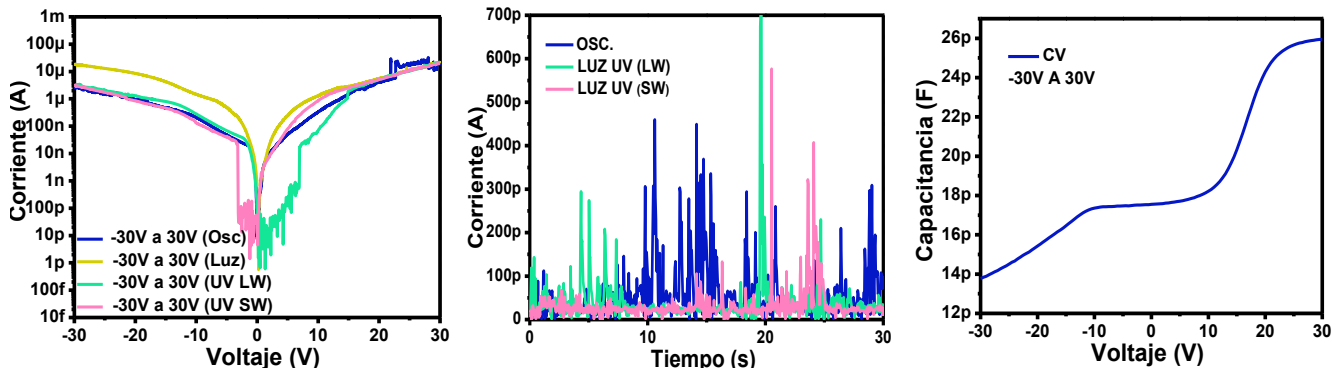


FIGURA 3.44 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B8 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la [figura 3.44](#) se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un desfase de todas las corrientes, y una corriente más baja con las luces UV la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente presenta oscilaciones grandes y variadas para todas las corrientes y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V , se observa un comportamiento típico MOS con una zona de acumulación comenzando en 25V y una zona de inversión en -10V a 10 .

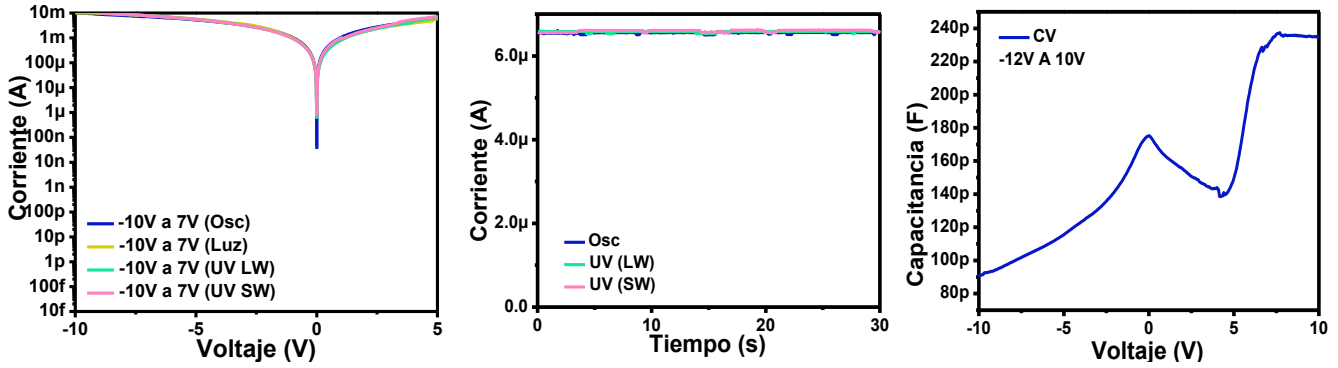


FIGURA 3.45 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B8 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.45 se observa un barrido de -11V a 8V en la medición I-V; la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo se alcanzó un máximo en el orden de los A. Se aprecia un acoplamiento de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV). En la medición I-T ocurre un incremento en la generación de corriente con luz UV comparado con la oscuridad, especialmente la luz UV onda corta y en menor grado la onda larga, esto se puede apreciar a los 0V de la medición I-V pues las corrientes de luz UV comienzan un orden de magnitud arriba. Esto quiere decir que hay una respuesta a los fotones incididos solo al principio de la medición. En la curva C-V se realiza un barrido de -10V a 10V y podemos ver un comportamiento que no es típico de un Capacitor MOS con una zona de acumulación comenzando en 9V y sin una zona de inversión clara.

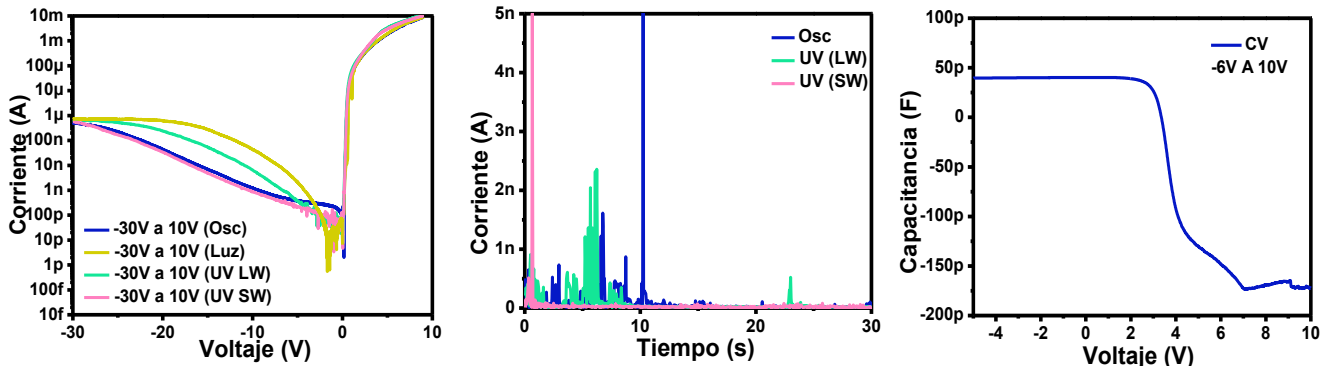


FIGURA 3.46 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B4 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.46 se observa un barrido de -30V a 10V en la medición I-V, con un acoplamiento de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV) del lado del voltaje positivo y un ligero desfase en el lado negativo donde se observa una corriente un poco más elevada con luz blanca y luz UV de onda larga, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA y en el voltaje positivo a los A. En la medición I-T la generación de corriente se eleva con oscilaciones al comienzo en todos los casos, normalizándose después y en la curva C-V se realiza un barrido de -6V a 10V y podemos ver una zona de acumulación de 2V a -6V y el comienzo de la zona de inversión en 7V.

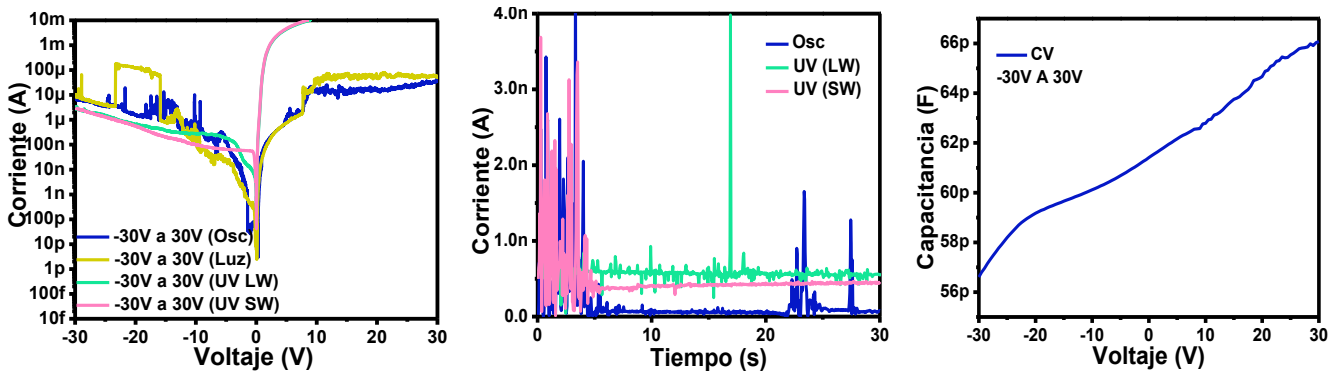


FIGURA 3.47 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B4 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.47 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los nA y en el positivo a los A. En esta grafica se aprecia un comportamiento totalmente diferente entre las luces UV y la luz blanca y de oscuridad, donde se puede destacar un aumento en el lado positivo de corriente de 3 órdenes de magnitud y mejor comportamiento con la luz UV. En la medición I-T ocurre un ligero incremento en la generación de corriente con luz UV y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V, pero no se alcanza a ver la curva típica C-V debido a que falta inducir más voltaje.

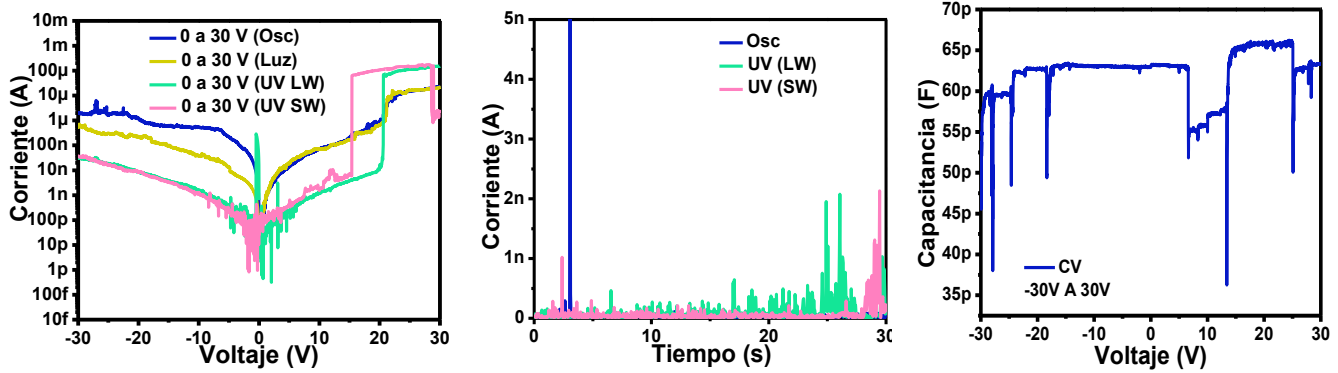


FIGURA 3.48 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOM B4 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.48 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un desfase de todas las corrientes, y una corriente más baja al inicio con las luces UV la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA y en el voltaje positivo llegó a lo mA. En la medición I-T la generación de corriente presenta picos grandes y variados para todas las corrientes y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V, se observa un comportamiento que no está bien definido con caídas y subidas uniformes de capacitancia.

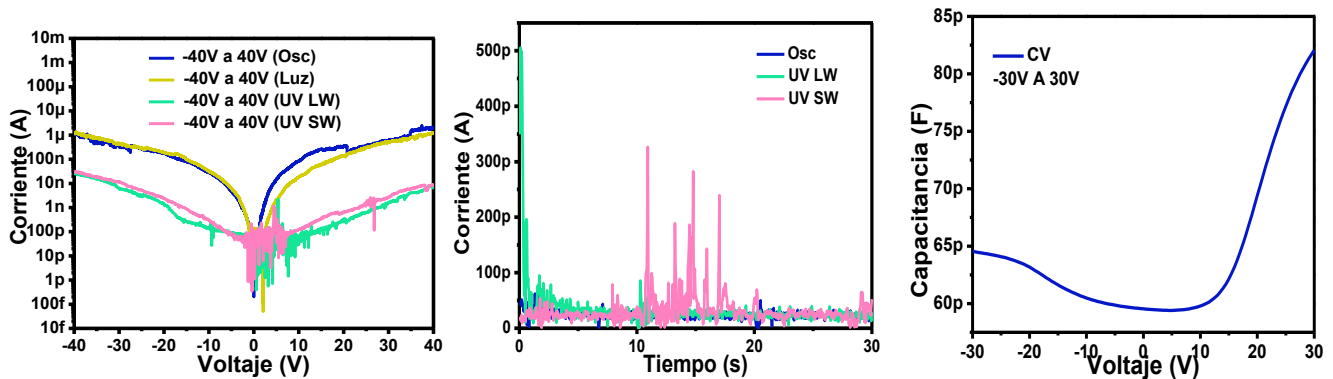


FIGURA 3.49 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B4 con contactos de Aluminio y Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.49 se observa un barrido de -40V a 40V en la medición I-V, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μA al igual que en el voltaje positivo y se puede observar un incremento de 2 órdenes de magnitud para los casos de luz blanca y oscuridad respecto al UV. En la medición I-T se

aprecia un comportamiento con bastantes oscilaciones pero casi igual entre todas las corrientes. En la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V pero no se alcanza a apreciar la curva en su totalidad.

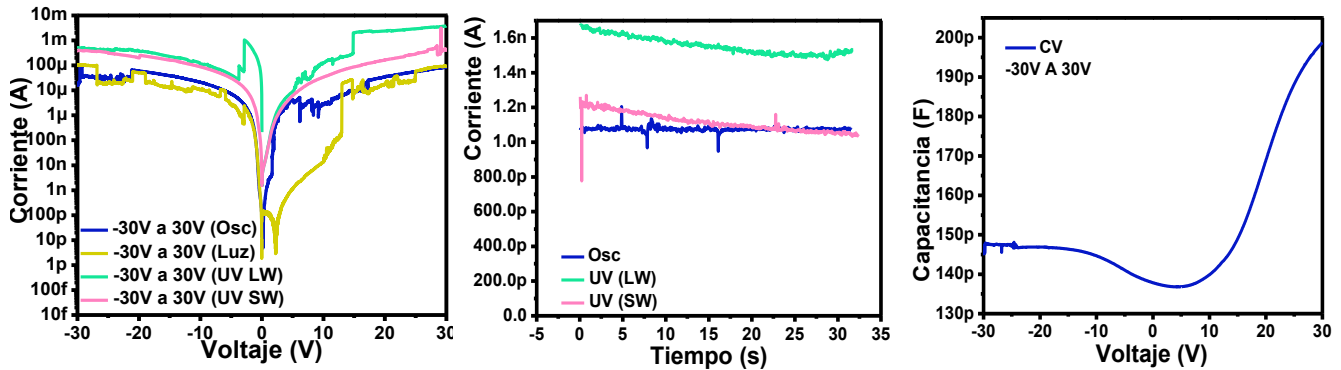


FIGURA 3.50 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B4 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.50 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V, con un desfase ligero de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV), pero donde se aprecia una corriente mayor en los casos de luz UV, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA al igual que en el voltaje positivo. En la medición I-T la generación de corriente presenta un aumento considerable de la corriente con luz UV de onda larga respecto a la de onda corta y de oscuridad. Y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V, se observa una zona de inversión en -10V a 30 y no se alcanza a ver la zona de acumulación.

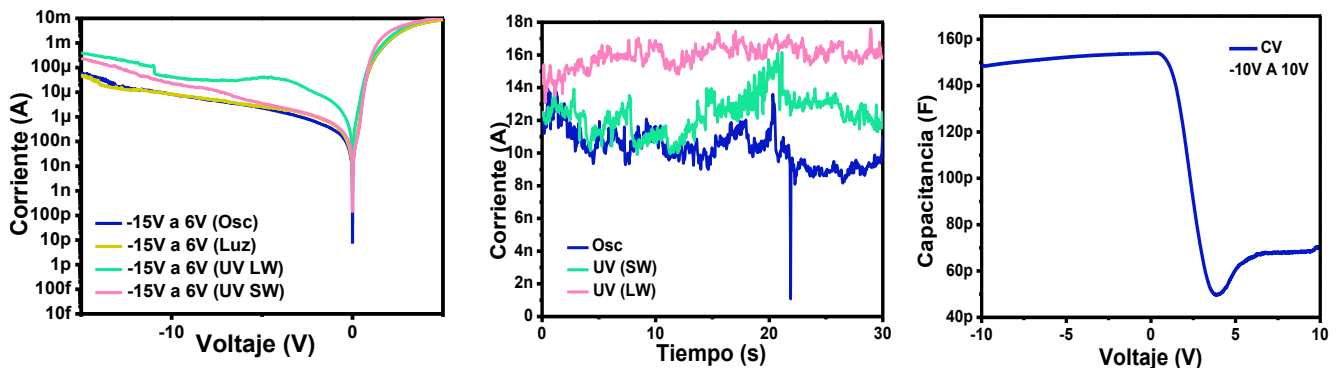
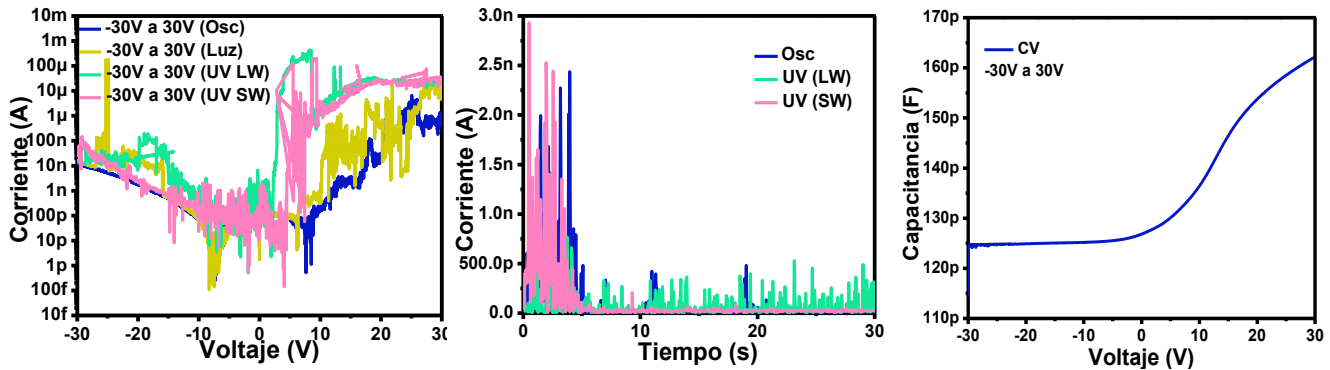


FIGURA 3.51 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B2 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.51 se observa un barrido de -15V a 5V en la medición I-V, con un comportamiento idéntico de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV) del lado del voltaje positivo y un desfase en el lado negativo donde se observa una corriente un poco más elevada con las luces UV, la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los mA y en el voltaje positivo a los A. En la medición I-T la generación de corriente se eleva con bastantes oscilaciones en el caso de las luces UV de onda corta y larga y en la curva C-V se realiza un barrido de -10V a 10V y podemos ver una zona de acumulación de 0V a -10V y el comienzo de la zona de inversión en 6V.



. FIGURA 3.52 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B2 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico
 a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.52 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V; la corriente donde se aplicó el voltaje negativo llegó al orden de los μ A y en el voltaje positivo se alcanzó un máximo en el orden de los mA. Se aprecia un incremento de la corriente con la luz UV, especialmente en la de onda larga con un aumento de 4 órdenes de magnitud comparada con la luz blanca o la oscuridad. En la medición I-T ocurre un comportamiento con picos muy altos al comienzo de la medición para todas las corrientes y en la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos ver un comportamiento típico de Capacitor MOS con una zona de inversión comenzando en -10V y una zona de acumulación que no se alcanza a ver por falta de voltaje en el equipo.

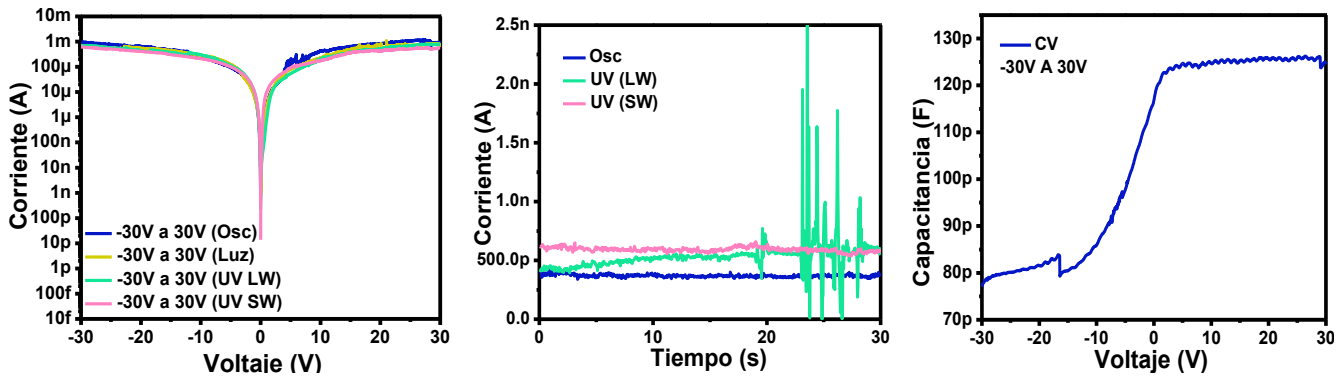


FIGURA 3.53 Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B2 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

En la figura 3.53 se observa un barrido de -30V a 30V en la medición I-V; la corriente donde se aplicó el voltaje negativo y positivo llegó al orden de los mA. Se aprecia una sobreexposición de todas las corrientes (oscuridad, luz, UV). En la medición I-T ocurre un incremento muy pequeño en la generación de corriente con luz UV comparado con la oscuridad. En la curva C-V se realiza un barrido de -30V a 30V y podemos ver una zona de acumulación comenzando en 5V y una zona de inversión en -20V

CAPÍTULO 4: ANALISIS DE RESULTADOS

Se puede observar en los resultados de las curvas I-V presentados en el capítulo anterior, que los dispositivos reportan comportamientos eléctricos diferentes entre los que podemos destacar los siguientes:

Alta conducción a bajos niveles de Voltaje.

Los estados de alta conducción en bajos voltajes están relacionados con la presencia de caminos conductivos en las películas de óxido de silicio, que conectan la compuerta de FTO o Aluminio al sustrato de silicio casi de manera directa, esto es causado por la alta densidad de las nanopartículas de silicio y defectos en la película SRO. Estos caminos conductivos se forman también en la capa de deplexion en el sustrato de silicio lo que forma una unión pn inducida. [18]

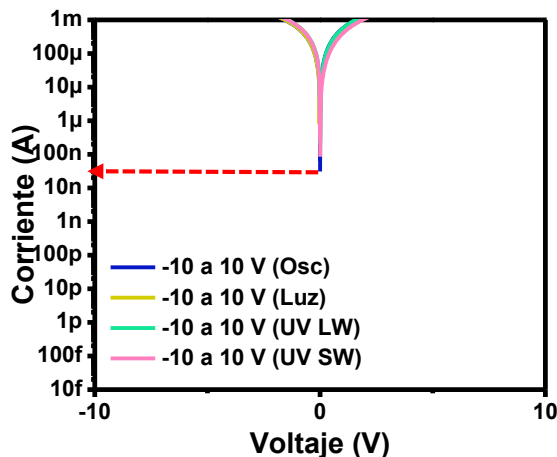


FIGURA 4.1

Grafica I-V tomada de la figura 3.19 para ilustrar el comportamiento de alta conducción, señalado con rojo.

Resistencia diferencial negativa.

Esta es una propiedad de algunos circuitos eléctricos y dispositivos en los que un aumento de la tensión a través de las terminales resulta en una disminución de la corriente eléctrica a través de él.

La disminución de la corriente también es atribuida a la destrucción de los caminos conductivos, es decir que cuando tenemos subidas y bajadas de corriente (saltos) ocurre una creación y aniquilación de caminos conductivos. [18]

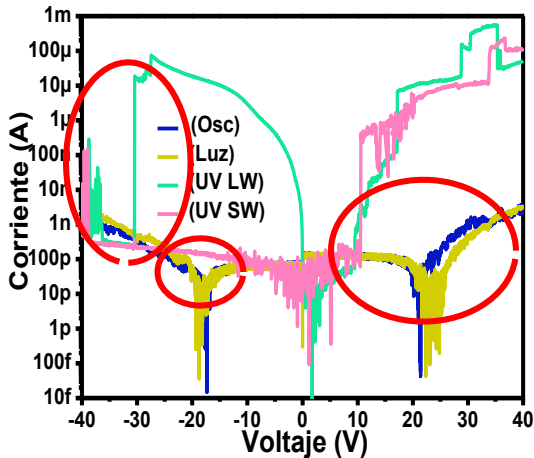


FIGURA 4.2

Grafica I-V tomada de la figura 3.22 para ilustrar el comportamiento de resistencia diferencial negativa, señalado con rojo.

Transpuesta unipolar

El comportamiento en el que la corriente por ambos lados (polarización directa o inversa) es la misma, es llamado transpuesta unipolar donde la corriente no depende de la polarización, solo del voltaje y lo que nos indica es que el dispositivo puede conducir en corriente directa e inversa a diferencia de un diodo, se pone como ejemplo de éste fenómeno la figura 4.3

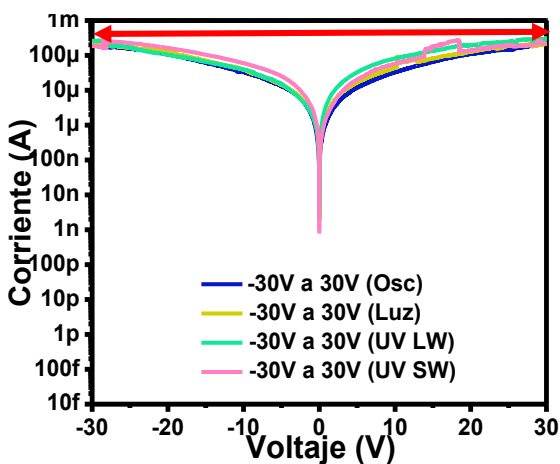


FIGURA 4.3

Grafica I-V tomada de la figura 3.41 para ilustrar el comportamiento de transpuesta unipolar, señalado con rojo.

Bloqueo coulombico

El comportamiento de la curva I-V parecido al de una escalera puede ser explicado por el bloqueo coulombico pues es el aumento de la resistencia a las pequeñas tensiones de polarización, es decir, no fluye corriente en intervalos de voltaje lo que da la forma de escalera, que se puede apreciar en las figuras

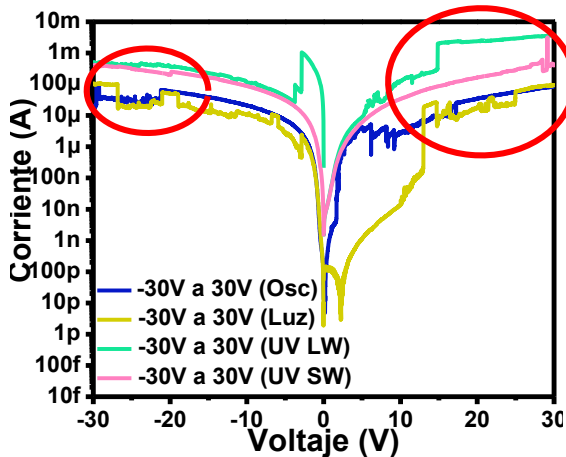


FIGURA 4.4

Gráfica I-V tomada de la figura 3.50 para ilustrar el comportamiento de bloqueo coulombico, señalado con rojo.

En el caso de las gráficas C-V los comportamientos son variados, para la caracterización de C-V no se logró ver el comportamiento total de la curva en algunos casos, y en otros el comportamiento no presentaba tendencia a un comportamiento típico MOS.

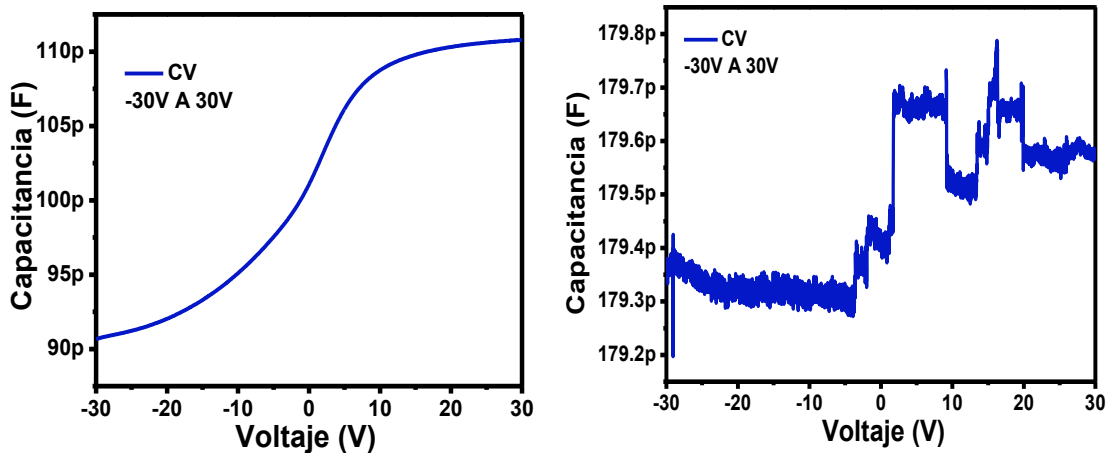


FIGURA 4.5 Gráfica I-V tomada de las figuras 3.43 y 3.21 para ilustrar:
a) Curva C-V incompleta b) Curva C-V sin tendencia a comportamiento MOS

Hubo también casos en los que se puede apreciar bien la zona de acumulación e inversión, con variaciones como deserción profunda y posible formación de doble inversión.

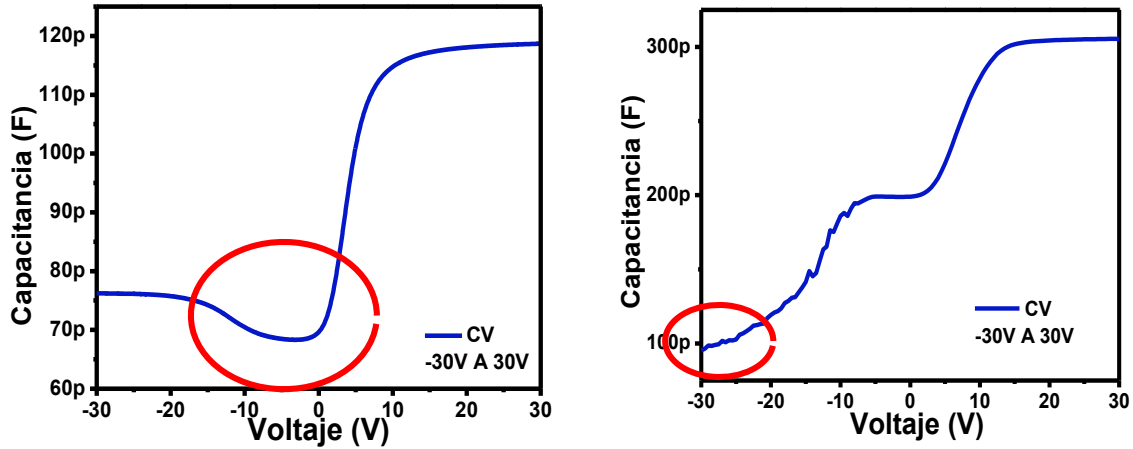


FIGURA 4.5 Grafica I-V tomada de las figuras 3.38 y 3.14 para ilustrar:

- a) Curva C-V con deserción profunda marcada con rojo b) Curva C-V con tendencia a una doble inversión

Lo anterior fue un análisis muy general de los principales comportamientos eléctricos de las caracterizaciones realizadas, el cual tuvo como base conductas ya descritas en diversas investigaciones, para profundizar un poco más en estos comportamientos se recomienda revisar los artículos [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24]

4.1 Muestras que presentan efecto fotoeléctrico y fotovoltaico

Cuando existe un aumento en la generación de corriente al incidirse una luz podemos decir que tenemos un **efecto fotoeléctrico**, como ya se mencionó en el marco teórico del presente trabajo.

La mayoría de los dispositivos realizados presentan éste efecto, sin embargo muchas veces es muy pequeño como para establecer que merece la pena un estudio más profundo al respecto, es por ello que se puede seleccionar como dispositivos con resultados sobresalientes los siguientes:

- ✚ *Dispositivo MOS A1 contacto de aluminio, sin tratamiento térmico (Figura 3.14)*
- ✚ *Dispositivo MOM A4 contacto de FTO, sin tratamiento térmico (Figura 3.21)*
- ✚ *Dispositivo MOS A4 contacto de aluminio, con tratamiento térmico (Figura 3.22)*
- ✚ *Dispositivo MOS A2 contacto de aluminio, con tratamiento térmico (Figura 3.24)*
- ✚ *Dispositivo MOS B7 contacto de aluminio, sin tratamiento térmico (Figura 3.39)*
- ✚ *Dispositivo MOS B4 contacto de FTO, sin tratamiento térmico (Figura 3.47)*
- ✚ *Dispositivo MOS B4 contacto de FTO, con tratamiento térmico (Figura 3.50)*

Los dispositivos que presentan un incremento en la corriente con luz contrastada con la oscuridad a 0V son aquellos que se puede decir presentan un **efecto fotovoltaico**, pues están generando corriente al incidir un haz de luz sin la necesidad de que tengan un voltaje aplicado.

Al aparecer un efecto fotovoltaico importante en un dispositivo o película, podemos decir que se tienen las bases para trabajar en el mejoramiento y posteriormente aplicación de esta tecnología a la creación de celdas solares más eficientes, por lo tanto el hallar el efecto fotovoltaico en los dispositivos creados, es el principal móvil para esta investigación.

A continuación se mencionan los dispositivos que presentan un efecto fotovoltaico importante y se hace un análisis de sus características.

✚ ***Dispositivo MOM A4 contacto de FTO, sin tratamiento térmico (Figura 3.21)***

Éste dispositivo presenta un incremento a 0V de hasta 6 órdenes de magnitud al aplicarse la luz UV de onda larga y un ligero incremento con la luz UV de onda corta. Las condiciones de depósito de la película fueron (4mm-75sccm) / (4mm-25sccm), la película presenta una energía del GAP de 1.65eV y una transmitancia de aproximadamente el 70%. La estructura de éste dispositivo es [FTO/SiO_x-SiO_y/PoliSilicio]

✚ *Dispositivo MOS A2 contacto de aluminio, con tratamiento térmico*
(Figura 3.24)

Éste dispositivo presenta un incremento a 0V de hasta 5 órdenes de magnitud al aplicarse la luz UV de onda larga y de onda corta. Las condiciones de depósito de la película fueron (4mm-75sccm) / (4mm-75sccm), la película presenta una energía del GAP de 1.45eV y una transmitancia de aproximadamente el 80%. La estructura de éste dispositivo es [AL/SiOx-SiOY/cSi/AL]

✚ *Dispositivo MOS B7 contacto de aluminio, sin tratamiento térmico*
(Figura 3.39)

Éste dispositivo presenta un incremento a 0V de hasta 4 órdenes de magnitud al aplicarse la luz UV de onda larga y de onda corta. Las condiciones de depósito de la película fueron (5mm-75sccm) / (4mm-25sccm), la película presenta una energía del GAP de 1.45eV y una transmitancia de aproximadamente el 75%. La estructura de éste dispositivo es [AL/SiOx-SiOY/cSi/AL]

4.2 Conclusiones

A lo largo del presente trabajo de investigación, se fabricaron 74 dispositivos tipo MOS y MOM bajo el sistema HFCVD con diferentes configuraciones y diversas películas, las cuales fueron tomadas en base a investigaciones realizadas por personas con más experiencia en el tema y que obtuvieron resultados favorables con otro sistema de depósito.

Lo anterior se realizó con el propósito de caracterizar, hallar el efecto fotoeléctrico, fotovoltaico y determinar con ello las estructuras idóneas para futuras mejoras y aplicaciones en la creación de celdas solares más eficientes, baratas y fáciles de fabricar.

Al analizar los resultados del capítulo anterior para la caracterización por fotoluminiscencia podemos concluir que la energía del GAP presente en las películas es un mecanismo importante que permite un mayor aprovechamiento del espectro solar, pues según lo reportado en la literatura, semiconductores con un GAP cercano a 1eV-1.5eV tienen el potencial para formar celdas solares más eficientes. Además de esto cabe destacar un patrón encontrado en el que podemos observar que las muestras con una intensidad baja de la película pero con un amplio rango de emisión presentan mejores resultados en cuanto a efectos fotoeléctricos y fotovoltaicos, contrastando con aquellas que presentan un pico con alta intensidad de emisión pero con un rango disminuido.

En cuanto a la composición de las películas podemos concluir que los mejores resultados de fotocorriente y efecto fotovoltaico se obtuvieron en general con un flujo base de 75sccm y un flujo superior de 25sccm (exceptuando el caso de A2 que tiene un flujo 75sccm-75sccm) y en lo que se refiere a la distancia fuente substrato hay una mejora pequeña para aquellas depositadas a 4mm.

También podemos mencionar que la respuesta del tratamiento térmico depende directamente de la película depositada y que no se tuvo una marcada diferencia entre estructuras, es decir que las estructuras con contacto de aluminio, contrario a lo que se pudiera pensar y a pesar de opacar la película responden tan bien como aquellas que tienen contactos de FTO, que es un contacto transparente.

Lo que podemos decir de las estructuras MOM, es que tienen un gran potencial para mejorar los efectos de las películas, sin embargo se requiere realizarlas nuevamente, teniendo más cuidado en su fabricación, pues se usó HF para hacer las ventanas de conducción entre el Polisilicio y el FTO, lo que puede dañar los contactos y alterar los resultados de su caracterización.

Y para finalizar, de la caracterización eléctrica podemos concluir que se obtuvieron buenos resultados de éste trabajo, pues efectivamente se halló el efecto

fotovoltaico y en unas pocas muestras fue muy satisfactorio, esto nos permite, en un trabajo futuro mejorar los parámetros y hallar los mecanismos en la estructura que conducen a la creación de él efecto, además de que se pueden realizar análisis y caracterizaciones más detalladas para este fin.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Giancoli Douglas C. (2009). *Física para ciencias e ingeniería con física moderna*. México: Pearson Educación.
- [2] Young Hugh y Roger A. Freedman. (2009). *Física universitaria, con física moderna volumen 2*. México: Pearson Educación.
- [3] A. Agarwall, J. H. Lang. (2005). *Foundations of analog and digital electronic circuits*. San Francisco, CA: Elsevier.
- [4] Wolfgang Bauer y Gary D. Westfall. (2011). *Física para ingeniería y ciencias, con física moderna*. Volumen 2. México: McGraw-Hill.
- [5] Mendoza-Pérez R. Desarrollo de celdas solares prototipo de CdTe con CdS procesado por baño químico. Tesis Doctoral, IPN (2007)
- [6] <http://hispravila.com/total/3ds/atmega/mosfets.html>
- [7] Luna-López J.A. *Investigación de las características estructurales, ópticas y eléctricas del SRO para su posible aplicación a dispositivos*. Tesis doctoral, INAOE
- [8] López-Estopier R. E. *Estudio del efecto del Nitrógeno en la Fotoluminiscencia de películas de SRO depositadas por LPCVD*. Tesis de Maestría, INAOE (2005)
- [9] Vázquez-Valerdi D. E. *Estudio de las propiedades morfológicas y ópticas de películas de óxido de silicio no estequiométrico depositado mediante HFCVD*. Tesis de Maestría, CIDS BUAP
- [10] ASTM Designation F76. *Standard Test Methods for Measuring Resistivity and Hall Coefficient and Determining Hall Mobility in Single-Crystal Semiconductors*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 10.05 (2000).
- [11] Benítez-Lara A. *Estudio de las propiedades Estructurales y ópticas de óxido de silicio fuera de estequiometría, depositado por HFCVD*. Tesis Doctoral, CDIS BUAP (2015)
- [12] <https://prezi.com/szq2p6foqjh2/efecto-fotoelectrico-y-fotovoltaico/>
- [13] <http://www.electricityandenergy.com/2016/01/photovoltaic-cells.html>
- [14] Fernández-Ferichola J. *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*. Tesis de Ingeniería en Electricidad, Universidad Carlos III de Madrid (2009)
- [15] Kalpakjian Serope. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México: Pearson Educación.
- [16] Walter Umrath. (2007). *Fundamentals of Vacuum Technology*. Leybold Vacuum, 90, 199.
- [17] Robert L. Boylestad y Louis Nashelsky. (2009). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos*

electrónicos. México: Pearson Educación.

[18] J. A. Luna-López, D.E. Vázquez-Valerdi, G. García-Salgado, A. D. Hernández de la Luz, J. Carrillo-López, F. G. Nieto-Caballero, M. A. Domínguez. *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 (2015).

[19] M. Aceves-Mijares, A. A. Gonzalez-Fernandez, R. Lopez-Estopier, A. Luna-López, D. Berman-Mendoza, A. Morales, C. Falcony, C. Domínguez, R. Murphy-Arteaga. *On the Origin of Light Emission in Silicon Rich Oxide Obtained by Low-Pressure Chemical Vapor Deposition*. *Journal of Nanomaterials*, **12**, 1-11 (2012).

[20] Z. Yua, M. Aceves-Mijares. *A Ultraviolet-visible-near Infrared Photodetector using nanocrystalline Si superlattice*. *Applied Physics Letters*, **95**, 081101 (2009).

[21] J. A. Luna-López, M. Aceves-Mijares, J. Carrillo-López, A. Morales-Sánchez. *Photoconduction in silicon rich oxide films obtained by low pressure chemical vapor deposition*. *American Vacuum Society*, **A 28(2)**, 170-174 (2010).

[22] J. A. Luna-López, M. Aceves-Mijares, J. Carrillo-López, A. Morales-Sánchez, J. Martínez-Juárez, G. Juárez-Díaz, M. López-Torres. *A simple Al/SRO/Si Structure with Silicon Nanoparticles as a UV and Vis Photodetector*. *Procedia Chemistry*, **1**, 1171-1174 (2009).

[23] J. A. Luna-López, J. Carrillo-López, A. Morales-Sánchez, M. García-Ortega, D.E. Vázquez-Valerdi, G. García-Salgado. *Twofold SRO films: Investigation of the photoelectric properties of MOS-like Structures*. *Sensors and Actuators*, **A 186**, 178-183 (2012).

[24] J. A. Luna-López, J. Carrillo-López, I. Vivaldo-De la Cruz, G. García-Salgado, F. Flores-Gracia, M. Aceves-Mijares. *Optical properties of solar cells with SiO₂ and silicon rich oxide with silicon nanoparticles*. *Superficies y Vacío*, **23**, 40-44 (2010).

[25] <http://electricalsmarts.com/introduction-to-light/>

[26] https://es.wikipedia.org/wiki/Estructura_MOS

[27] Ipiña-Cabrera M. A. *Atrapamiento y transporte de carga en SRO utilizando el modelo de un solo electrón*. Tesis de Maestría, INAOE (2005)

[28] Dieter K. Schroder (1998) *Semiconductor Material and Device Characterization*. Arizona State University: John Wiley & Sons.

ÍNDICE DE TABLAS

Estructuras MOS y MOM	TABLA 2.1 pág. 28
Condiciones de Depósito Películas Simples (SiOx)	TABLA 2.2 pág. 31
Condiciones de Depósito Películas dobles (SiOx/SiOy)	TABLA 2.3 pág. 31
División de las películas realizadas para la fabricación de los dispositivos en sustrato de silicio	TABLA 2.4 pág. 33
Dispositivos realizados y presentados en el trabajo de tesis	TABLA 3.1 pág. 38

ÍNDICE DE FIGURAS

Curva I-V que representa el comportamiento normal de un diodo en polarización directa e inversa	FIGURA 1.1 pág. 12
Representación gráfica de la brecha de energía prohibida (GAP) en aislantes, semiconductores y conductores.	FIGURA 1.2 pág. 14
Longitudes de onda y espectro	FIGURA 1.3 pág. 15
Curva I-V característica de celdas fotovoltaicas y su comportamiento	FIGURA 1.4 pág. 18
Representación de la estructura del Capacitor MOS	FIGURA 1.5 pág. 19
Curva Capacitancia-Voltaje característica del capacitor MOS	FIGURA 1.6 pág. 22
Reacción química dentro del equipo HFCVD durante el proceso de crecimiento o depósito de la película SiOx	FIGURA 1.7 pág. 24
Perfilometro Dektak 150	FIGURA 1.8 pág. 25
Espectrofluorímetro Cary 50	FIGURA 1.9 pág. 26
Espectrofotómetro Cary 500	FIGURA 1.10 pág. 26
Sistema medidor de efecto Hall	FIGURA 1.11 pág. 27
Estructura MOS en sustrato de Silicio	FIGURA 2.1 pág. 28
Estructura MOM en sustrato de Cuarzo	FIGURA 2.2 pág. 29
	FIGURA 2.3 pág. 32

Grafica de la relación entre la temperatura del filamento, variación de la distancia entre fuente-substrato y temperatura del substrato	FIGURA 2.4 pág. 34
Dispositivo MOS con contactos de aluminio	FIGURA 2.5 pág. 34
Proceso de metalización al Alto vacío	FIGURA 2.6 pág. 36
Resultados de la caracterización del FTO con depósito de 1 minuto a) Transmitancia b) Efecto Hall	FIGURA 2.7 pág. 36
Dispositivo MOS con contactos de FTO	FIGURA 2.8 pág. 37
Proceso de depósito por medio de Spray Pyrolysis	FIGURA 3.1 pág. 39
Fotoluminiscencia películas simples a un flujo de 25sccm con distancias fuente substrato de 4 y 5mm a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.2 pág. 40
Fotoluminiscencia películas simples a un flujo de 75sccm con distancias fuente substrato de 4 y 5mm a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.3 pág. 41
Fotoluminiscencia películas dobles Grupo A a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.4 pág. 41
Fotoluminiscencia películas dobles Grupo B a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.5 pág. 42
Fotoluminiscencia películas dobles Grupo C a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.6 pág. 43
Fotoluminiscencia películas dobles Grupo D a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.7 pág. 44
Transmitancia de películas simples a un flujo de 25sccm con distancias fuente substrato de 4 y 5mm a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.8 pág. 44
Transmitancia de películas simples a un flujo de 25sccm con distancias fuente substrato de 4 y 5mm a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.9 pág. 45
Transmitancia de películas dobles Grupo A a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.10 pág. 45
Transmitancia de películas dobles Grupo B a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.11 pág. 46
Transmitancia de películas dobles Grupo C a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.12 pág. 46
Transmitancia de películas dobles Grupo C a) Sin tratamiento térmico b) Con tratamiento térmico	FIGURA 3.13 pág. 48
Conexiones eléctricas utilizadas para realizar las caracterizaciones eléctricas de los dispositivos a) Estructura MOS contactos de aluminio b) Estructura MOS contactos de FTO c) Estructura MOM contactos de FTO	FIGURA 3.14 pág. 49
Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A1 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V	FIGURA 3.15 pág. 49

- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A3 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.16 pág. 50
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A3 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.17 pág. 51
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A5 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.18 pág. 51
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A6 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.19 pág. 52
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A6 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.20 pág. 53
- Caracterización eléctrica: Dispositivo A4 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.21 pág. 53
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOM A4 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.22 pág. 54
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A4 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.23 pág. 55
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A4 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.24 pág. 55
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A2 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.25 pág. 56
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A7 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.26 pág. 57
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A8 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.27 pág. 57
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS A8 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.28 pág. 58
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B5 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.29 pág. 58
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B5 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.30 pág. 59
- Caracterización eléctrica: Dispositivo MOM B5 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V
FIGURA 3.31 pág. 60

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B5 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.32 pág. 60

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B5 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.33 pág. 61

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B6 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.34 pág. 61

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B6 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.35 pág. 62

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOM B1 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.36 pág. 63

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B1 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.37 pág. 63

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B3 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.38 pág. 64

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B3 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.39 pág. 65

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B7 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.40 pág. 65

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B7 con contactos de FTO sin Tratamiento
Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.41 pág. 66

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B7 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.42 pág. 67

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B8 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.43 pág. 67

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B8 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.44 pág. 68

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B8 con contactos de Aluminio con Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.45 pág. 69

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B8 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a)
Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.4 pág. 69

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B4 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico
a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V

FIGURA 3.47 pág. 70

Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B4 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V	FIGURA 3.48 pág. 71
Caracterización eléctrica: Dispositivo MOM B4 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V	FIGURA 3.49 pág. 71
Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B4 con contactos de Aluminio y Tratamiento Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V	FIGURA 3.50 pág. 72
Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B4 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V	FIGURA 3.51 pág. 72
Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B2 con contactos de Aluminio sin Tratamiento Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V	FIGURA 3.52 pág. 73
Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B2 con contactos de FTO sin Tratamiento Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V	FIGURA 3.53 pág. 74
Caracterización eléctrica: Dispositivo MOS B2 con contactos de FTO con Tratamiento Térmico a) Medición I-V b) Medición I-T c) Medición C-V	FIGURA 4.1 pág. 75
Grafica I-V tomada de la figura 3.19 para ilustrar el comportamiento de alta conducción, señalado con rojo	FIGURA 4.2 pág. 76
Grafica I-V tomada de la figura 3.22 para ilustrar el comportamiento de resistencia diferencial negativa, señalado con rojo	FIGURA 4.3 pág. 76
Grafica I-V tomada de la figura 3.41 para ilustrar el comportamiento de transpuesta unipolar, señalado con rojo	FIGURA 4.4 pág. 77
Grafica I-V tomada de la figura 3.50 para ilustrar el comportamiento de bloqueo coulombico, señalado con rojo	FIGURA 4.5 pág. 77
Grafica I-V tomada de las figuras 3.43 y 3.21 para ilustrar: a) Curva C-V incompleta b) Curva C-V sin tendencia a comportamiento MOS	FIGURA 4.5 pág. 78
Grafica I-V tomada de las figuras 3.38 y 3.14 para ilustrar: a) Curva C-V con deserción profunda marcada con rojo b) Curva C-V con tendencia a una doble inversión	FIGURA ANEXO pág. 89
Componentes del sistema HFCV	

ANEXO 1: Procesos de limpieza

1A: Eliminación de grasas en la superficie para substratos

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.

1B: Eliminación del óxido nativo de la superficie para las obleas de silicio

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

1C: 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. [9]

ANEXO 2: Sistema HFCVD

A continuación se muestran los elementos más importantes que conforman al sistema HFCVD



FIGURA ANEXO Componentes del sistema HFCVD

Proceso experimental

1. Revisar la hermeticidad del sistema, verificando la presión del reactor en 58cmHg, lo cual nos indica vacío, esto con la finalidad de asegurar que no exista alguna fuga.
2. Revisar todas las llaves de paso del hidrógeno, la del tanque, la de paso al laboratorio y la de paso al reactor, la cuales deben estar cerradas.
3. Abrir la llave del tanque de hidrógeno revisando la presión del mismo en el manómetro, para verificar que el tanque contenga hidrógeno.
4. Abrir la llave de paso del tanque de hidrógeno al laboratorio hasta una presión de 15 psi.
5. Abrir el reactor, retirando los tornillos para poder desmontar la tapa de acero inoxidable.
6. Deslizar el porta muestras y limpiarlo con metanol.
7. Limpiar con metanol el escalón que se desea utilizar dependiendo de la distancia que se requiera entre la fuente y el sustrato, colocándolo en la base del reactor.
8. Limpiar con metanol las pinzas con la cuales se colocará el sustrato en el escalón.
9. Colocar el sustrato sobre el escalón utilizando pinzas.
10. Colocar las fuentes (SP y cuarzo) utilizando pinzas.
11. Deslizar el porta muestras con cuidado para evitar la caída de las fuentes dentro del reactor.

12. Cerrar el reactor colocando el aro sello con la tapa de acero inoxidable y los tornillos.

13. Medir la distancia entre la fuente y el sustrato.

14. Revisar que la distancia entre el filamento y la fuente sea de 2mm.

15. Revisar el manómetro, el cuál debe marcar una presión atmosférica de 0psi.

16. Revisar la llave de vacío, la cual debe estar cerrada; una vez verificado encender la bomba y abrir totalmente la llave de vacío marcando así 58cmHg, el cual indica vacío en el reactor.

17. Revisar el burbujeador el cuál debe después de aproximadamente 5min dejar de burbujear, lo cual nos indica que se mantiene un vacío, entonces podemos cerrar la llave y posteriormente apagar la bomba.

18. Abrir la llave de hidrógeno que da paso al reactor hasta obtener una presión de 10psi, poco antes de que esto ocurra cerrar la llave.

19. Realizar nuevamente vacío en el reactor (pasos 16 y 17).

20. Abrir la llave de hidrógeno hasta una presión de 0psi, poco antes de que esto ocurra cambiar la llave de 3 vías hacia el medio ambiente, (girar 180°) y revisar el burbujeador, el cuál debe tener un burbujeador constante, aproximadamente durante 5min.

21. Revisar el multímetro, el cuál debe tener batería suficiente, puntas bien conectadas y estar en la opción de voltaje alterno.

- 22.** Encender el variac y girar la perilla hasta que el multímetro indique 83.4V, que según la caracterización del filamento equivale a $\sim 2000^{\circ}\text{C}$, en este momento se debe medir el tiempo de depósito con ayuda de un cronómetro.
- 23.** Concluido el tiempo de depósito de 5min se debe apagar el variac, así como el multímetro.
- 24.** Regresar la llave de 3 vías (180°) y cerrar la llave de hidrógeno cuando la presión sea de aproximadamente 10psi.
- 25.** Realizar de nueva cuenta vacío en el reactor (pasos 16 y 17).
- 26.** Esperar que el reactor se enfríe.
- 27.** Abrir el reactor, retirando los tornillos para poder desmontar la tapa de acero inoxidable.
- 28.** Deslizar el porta muestras y cambiar la fuente de silicio poroso con ayuda de las pinzas.
- 29.** Repetir los pasos (11-27) para realizar el segundo depósito a la película.
- 30.** Retirar las fuentes y la película con pinzas, colocando la película en un recipiente, describiendo sus condiciones de crecimiento, (fecha, # de muestra, dff, dfs, td, fuentes sólidas, substrato).
- 31.** Cerrar el reactor colocando el aro sello con la tapa de acero inoxidable y los tornillos.
- 32.** Realizar vacío en el reactor (pasos 16 y 17).
- 33.** Cerrar la llave del tanque de hidrógeno y la llave de paso del tanque al laboratorio. [9]

ANEXO 3: Preparación del FTO

Para preparar una solución de 50ml se requiere de:

- + 3.57 gramos de Pentahidratado Cloruro de Estaño
- + 0.19 gramos de Fluoruro de Amonio
- + Etanol
- + Agua destilada
- + Matraz aforado de 50ml
- + Limpiador ultrasónico

Se requiere pesar el Pentahidratado Cloruro de Estaño y el Fluoruro de Amonio, una vez pesado el material se procede a vaciar el Pentahidratado Cloruro de Estaño en el Matraz aforado de 50ml y se agregan 30ml de Etanol.

Después de esto se coloca el matraz en el limpiador ultrasónico hasta que el Pentahidratado Cloruro de Estaño se disuelva totalmente en el Etanol.

Lo siguiente a realizar es colocar el Fluoruro de Amonio en un recipiente y agregarle gota a gota agua destilada moviendo constantemente para disolver los cristales, entre menos agua se coloque es mejor y lo ideal es que no rebase las 10 gotas de agua. Una vez disueltos los cristales de Fluoruro de Amonio se procede a colocar ésta solución en el matraz que contiene el Pentahidratado Cloruro de Estaño disuelto en el Etanol y se llena el matraz hasta los 50ml agregando más Etanol. Una vez que la solución se encuentra en el matraz aforado de 50ml se coloca el matraz en el limpiador ultrasónico hasta que quede una solución homogénea y totalmente transparente.

Por último se debe dejar reposar la solución 24 horas antes de su depósito.