



“El saber de mis hijos  
hará mi grandeza”

# UNIVERSIDAD DE SONORA

---

---

**FACULTAD INTERDISCIPLINARIA DE CIENCIAS  
EXACTAS Y NATURALES  
DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN EN FÍSICA  
Maestría en Ciencias en Electrónica**

**“Desarrollo de una celda solar a base de una unión  
CdS/CdTe por síntesis hidrotérmica asistida  
por microondas.”**

**TESIS**

que para obtener el grado de

**Maestro en Ciencias en Electrónica**

**Presenta:**

**Francisco Javier Chávez Salmon**

**Director: Dr. Dainet Berman Mendoza**

**Co-director: Dr. José Ricardo Rangel Segura**

**Hermosillo, Sonora.**

**Febrero de 2024**

# Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



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



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

# Índice

Índice de figuras .....	4
Índice de tablas.....	6
RESUMEN.....	7
CAPÍTULO I.....	8
INTRODUCCIÓN.....	8
CAPÍTULO II.....	10
ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	10
2.1 Antecedentes .....	10
2.1.1 Celda Solar .....	10
2.1.2 Materiales Usados en la Celda Solar.....	16
<b>2.1.2.1 Sulfuro de Cadmio</b> .....	16
<b>2.1.2.2 Teluro de Cadmio</b> .....	18
2.1.3 Métodos de Síntesis.....	19
<b>2.1.3.1 Deposito por Baño Químico</b> .....	19
<b>2.1.3.2 Síntesis Hidrotérmica Asistida por Microondas</b> .....	21
<b>2.1.3.3 Pulverización Catódica</b> .....	23
2.1.4 Técnicas de Caracterización.....	25
<b>2.1.4.1 Microscopía de Barrido Electrónico</b> .....	25
<b>2.1.4.2 Difracción de Rayos X</b> .....	26
<b>2.1.4.3 Espectroscopia de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X</b> .....	28
<b>2.1.4.4 Espectroscopía Ultravioleta Visible</b> .....	29
<b>2.1.4.5 Resistividad</b> .....	30
<b>2.1.4.6 Microscopia de Fuerza Atómica</b> .....	32
2.2 Justificación.....	33
CAPÍTULO III.....	35
OBJETIVOS.....	35
3.1 Objetivo General .....	35
3.2 Objetivos Particulares .....	35
CAPÍTULO IV .....	36
DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	36
4.1 Depósito por Baño Químico de Películas de CdS.....	36
4.2 Depósito Mediante Síntesis Hidrotérmica de Películas de CdTe.....	38
4.3 Depósito por Pulverización Catódica de Contacto Posterior .....	42
CAPÍTULO V.....	43
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	43

5.1 Caracterización de las películas de CdS .....	45
5.1.1 Caracterización Microestructural Mediante Microscopía de Barrido Electrónico .....	45
5.1.2 Caracterización Cristaloquímica Mediante Difracción de Rayos X.....	45
5.1.3 Caracterización Superficial Mediante Microscopía De Fuerza Atómica .....	47
5.1.4 Caracterización Química Mediante Espectroscopía de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X .....	48
5.1.5 Caracterización Óptica Mediante Espectroscopía Ultravioleta Visible .....	49
5.1.6 Caracterización Eléctrica Mediante Resistividad.....	50
5.2 Caracterizaciones microestructural y óptica de CdTe/CdS .....	52
5.2.1 Caracterización Microestructural Mediante Microscopía de Barrido Electrónico .....	52
5.2.2 Caracterización Cristaloquímica Mediante Difracción de Rayos X.....	53
5.2.3 Caracterización Óptica Mediante Espectroscopía Ultravioleta Visible .....	55
5.3 Caracterización de la Celda Solar con estructura FTO/CdS/CdTe/Au. ....	56
<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>62</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>64</b>

# Índice de figuras

Figura 1. Primera celda solar de silicio [20].....	11
Figura 2. Generaciones de celdas solares con ejemplos [21]. .....	12
Figura 3. Desarrollo de celdas solares a lo largo de los años [22]. .....	12
Figura 4. Diagrama de banda de una unión N-P [23].....	13
Figura 5. Esquema básico de una celda solar CdS/CdTe. ....	14
Figura 6. a) Celda conectada a una carga. b) Celda en corto circuito. c) Celda en circuito abierto [13]. .....	15
Figura 7. Grafica eficiencia vs energía de banda prohibida [25].....	16
Figura 8. Ejemplo de un depósito por baño químico.....	20
Figura 9. Espectro electromagnético [47].....	22
Figura 10. Comportamiento de las moléculas polares al interactuar con microondas [46].....	23
Figura 11. pulverización catódica, (a) esquema físico, (b) Sistema de depósito [49]. .....	24
Figura 12. Esquema básico de un equipo SEM [42]. .....	25
Figura 13. Representación de los rayos X interactuando con átomos [56]. .....	27
Figura 14. Esquema de un equipo de DRX [56].....	27
Figura 15. Esquema de un equipo XPS [59]. .....	29
Figura 16. Esquema de un equipo UV-VIS [62]. .....	30
Figura 17. Condición ideal de colocación de sondas [64].....	31
Figura 18. Esquema básico de un equipo AFM [68]. .....	32
Figura 19. Procedimiento resumido de la síntesis de CdS. ....	38
Figura 20. A) Microondas Anton Para, B) Recipiente de cerámica, C) Tubos de teflón, D) agitador magnético, E) Base de recipientes, F) Termómetro. ....	39
Figura 21. Procedimiento de síntesis de CdTe. ....	41
Figura 22. Tapa de la base montada, y colocado en microondas. ....	41
Figura 23. Celda colocada en el equipo de pulverización catódica.....	42
Figura 24. A) CdS y B) CdTe sintetizados con los procedimientos mencionados en el Capítulo 3. ....	43
Figura 25. A) CdS/CdTe en FTO, B) Imagen de CdS/CdTe por microscopio óptico, C) CdTe en vidrio.....	44
Figura 26. Imagen de SEM de CdS. ....	45
Figura 27. Grafica de DRX de la película de CdS.....	46
Figura 28. Imagen AFM de la superficie de una película de CdS.....	47
Figura 29. Espectro de XPS en la película de CdS.....	48
Figura 30. A) Medición de transmitancia de CdS en vidrio, B) Método de Tauc aplicado en caso anterior, C) Medición de transmitancia de CdS en FTO. ....	49
Figura 31. Película de CdS montada en el equipo de 4 puntas.....	51
Figura 32. A) Resistencia de hoja de CdS sin luz incidente, B) Misma medición, pero con luz incidente. ....	52
Figura 33. Imagen SEM de CdTe depositado A) sobre FTO, B) sobre vidrio.....	53
Figura 34. DRX de FTO/CdS/CdTe.....	54
Figura 35. Gráfico UV-VIS de FTO/CdS/CdTe y FTO/CdS .....	55
Figura 36. Simulador solar. ....	56
Figura 37. FTO/CdS/CdTe/Au con contraelectrodos colocados en cuatro posiciones diferentes. ....	57

Figura 38. Curvas características de I vs V de las celdas propuestas con la estructura FTO/CdS/CdTe/Au y variando la posición del contraelectrodo. ....	57
Figura 39. Gráfica de Potencia vs Voltaje. ....	58
Figura 40. Grafica de potencia y corriente vs Voltaje representativa de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au y la posición del contraelectrodo M4 sin tratamiento térmico. ....	59
Figura 41. Grafica de potencia y corriente vs Voltaje representativa de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au y la posición del contraelectrodo M4 con tratamiento térmico. ....	60

## Índice de tablas

Tabla I. Características superficiales de películas de CdS. ....	47
Tabla II. Características del XPS de película de CdS. ....	48
Tabla III. Parámetros principales de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au variando la posición del contraelectrodo. ....	59
Tabla IV. Parámetros principales de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au con la posición M4 del contraelectrodo con y sin tratamiento térmico. ....	60

## RESUMEN

Hoy en día el desarrollo de energías renovables es un tema de gran importancia, donde la energía solar juega un papel fundamental para el aprovechamiento de la energía electromagnética que el sol emana y que es aprovechada para generar electricidad en paneles solares. El presente proyecto de tesis se enfoca en el estudio y caracterización de semiconductores de sulfuro de cadmio (CdS) y telururo de cadmio (CdTe) para la fabricación de celdas solares. Lo anterior, con el propósito de mejorar la eficiencia de la celda mediante la optimización de las propiedades y desempeño de las películas y usando contactos óhmicos. La síntesis de películas delgadas de sulfuro de cadmio (CdS) y telururo de cadmio (CdTe) se realizó mediante el método de depósito por baño químico y la técnica de síntesis hidrotérmica asistida por microondas, respectivamente. Para comprender detalladamente las propiedades de los materiales sintetizados, se llevó a cabo una serie de caracterizaciones que abordarán aspectos microestructurales, ópticos, químicos y eléctricos. Para ello se utilizaron las técnicas de microscopía electrónica de barrido, difracción de rayos X, espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X, microscopía de fuerza atómica, espectroscopia ultravioleta-visible y el método de cuatro puntas con el fin de obtener información precisa sobre los materiales sintetizados bajo los parámetros experimentales establecidos en el presente trabajo. Cabe mencionar que la investigación incluyó el análisis de la unión de los dos materiales propuestos para su aplicación en celdas solares. En esta etapa de la investigación, se evaluaron los parámetros que caracterizan a una celda tales como la eficiencia y el factor de llenado, haciendo uso de un simulador solar y partiendo de los datos recabados de corriente contra voltaje, el tratamiento y el análisis de los datos obtenidos. Se destaca en este proyecto la obtención de eficiencias sobresalientes de celdas solares con estructura FTO/CdS/CdTe/Au empleando las técnicas de baño químico y síntesis hidrotérmica asistida por microondas.



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El objetivo de las celdas solares es realizar mediante el efecto fotovoltaico la conversión directa de la energía del sol en energía eléctrica. El sistema completo para la conversión se realiza utilizando paneles solares que a su vez están conformados generalmente por celdas solares, conexiones mecánicas y eléctricas, sistema de monitoreo y un inversor en la salida para hacer uso de esta electricidad de forma doméstica y/o industrial [1].

Una celda solar se construye a partir de una unión N-P de dos materiales y por medio del efecto fotoeléctrico convierte la radiación del sol en electricidad de corriente directa. El modelo de las celdas se suele representar como un diodo con una resistencia en paralelo, si la celda tiene un contacto óhmico, típicamente puede generar 0.5 a 0.8 V, según la unión N-P y la tecnología utilizada [2]. De los materiales disponibles, el CdTe es un semiconductor tipo p que ha mostrado ser un buen candidato para la fabricación de películas delgadas con aplicación en celdas solares, debido a la banda prohibida que presenta y que resulta ser casi ideal para la conversión de fotones. [3,4]. Por otro lado, el CdS es un semiconductor tipo n que al igual que el CdTe, ha mostrado ser un buen candidato para su implementación en celdas solares en forma de película delgada. Además, presenta un adecuado ancho de banda prohibida, una apropiada transmitancia óptica, gran fotoconductividad, buena afinidad electrónica, alta estabilidad y es de fácil fabricación [4,5]. Por todo lo anterior, la combinación CdTe/CdS resulta en una muy buena opción para el desarrollo de uniones N-P para la fabricación de celdas solares.

La fabricación de estructuras CdTe/CdS, se realiza mediante diferentes métodos como, sputtering, evaporación térmica, y depósito de vapor químico metal orgánico, entre otros. Pero todos los métodos mencionados suelen ser muy costosos y se necesita equipo especializado. Sin embargo, el método de depósito por baño químico (comúnmente referido como *Chemical Bath Deposition* o CBD, por sus siglas en inglés) para la síntesis de películas delgadas de calcogenuros se ha usado ampliamente [6,7]. El uso del método de CBD tiene las siguientes ventajas: es un proceso simple, de bajo costo, altamente escalable, se pueden fabricar muchas muestras simultáneamente y no requieren de un equipo especializado. En el caso de las películas

delgadas de CdS para celdas solares, el método de depósito por baño químico es muy conocido y ampliamente utilizado con ese propósito. Sin embargo, en el caso del CdTe por el método mencionado requiere un procesamiento más cuidadoso debido a algunos inconvenientes reportados en la literatura, tales como: poca disponibilidad y baja solubilidad de los precursores [4,8]. No obstante, recientemente se han hecho películas delgadas de CdTe a partir de películas de Cd(OH)<sub>2</sub> con solución de precursores de telururo y se ha logrado alcanzar valores de ancho de banda prohibida de 1.5 eV, característicos del CdTe. [6].

Considerando lo anterior, la presente propuesta se enfoca al diseño, fabricación y caracterización de una celda solar basada en películas delgadas de sulfuro de cadmio (CdS) y telururo de cadmio (CdTe) obtenidos por los métodos de baño químico y síntesis hidrotérmica asistida por microondas, respectivamente.

## **CAPÍTULO II**

### **ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN**

#### **2.1 Antecedentes**

##### **2.1.1 Celda Solar**

El comienzo de la celda solar se remonta al año 1839, cuando Edmond Becquerel descubre el efecto fotovoltaico de manera accidental al realizar un experimento, observando un aumento en la conductividad cuando se expone a la luz. Posteriormente, en 1873, un ingeniero inglés descubre que el selenio se vuelve conductor cuando absorbe o recibe luz. Algunos años después, otros científicos concluyen que el selenio puede generar electricidad a partir de la luz. Más adelante, un estadounidense crea las primeras celdas solares a base de selenio con una capa de oro, aunque resultaba costoso debido al oro y al selenio, y tenía una eficiencia del 1 al 2%. A pesar de esto, marcó un hito al demostrar que era posible obtener electricidad a partir de la luz solar.

En 1887, el físico alemán Hertz observa el efecto fotoeléctrico y concluye que una superficie sólida, generalmente metálica, libera electrones cuando se expone a la luz. Aunque no comprendía completamente el fenómeno, como por qué se producía más potencia con luz ultravioleta que con luz visible, hoy sabemos que la luz ultravioleta es más energética. Años después, Einstein retomaría la investigación y ganaría un premio Nobel por confirmar dicha teoría.

En 1953, físicos de los Laboratorios Bell descubren que el silicio es más eficiente que el selenio, creando la primera celda solar a base de silicio con una eficiencia del 6% (Figura 1). Con esto, se logró alimentar ciertos equipos eléctricos, marcando un avance significativo en la tecnología de celdas solares. [19,20].

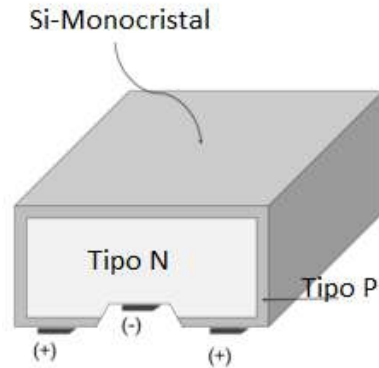


Figura 1. Primera celda solar de silicio [20].

Desde la primera celda solar de silicio, se han desarrollado varios tipos de celdas solares, utilizando diferentes materiales, y en algunos casos, diferentes tipos de disposiciones de materiales o la adición de materiales secundarios (colorantes o electrolitos) para el funcionamiento de diferentes celdas solares. Es así, que se han catalogado en diferentes generaciones. En la Figura 2 y 3 se presentan las diferentes generaciones de celdas solares y se puede observar que una celda solar de mayor generación no necesariamente tendrá una mayor eficiencia. Sin embargo, entre generaciones se presentan ventajas y desventajas, por ejemplo, pese a que la primera tiene una mayor eficiencia que la segunda, la primera generación requiere una mayor cantidad de material que la segunda para fabricar una celda solar y el proceso de síntesis de la celda solar de silicio suele ser más costoso que la de película delgada. Por otro lado, los materiales usados en las celdas solares de película delgada suelen ser tóxicos o cancerígenos.

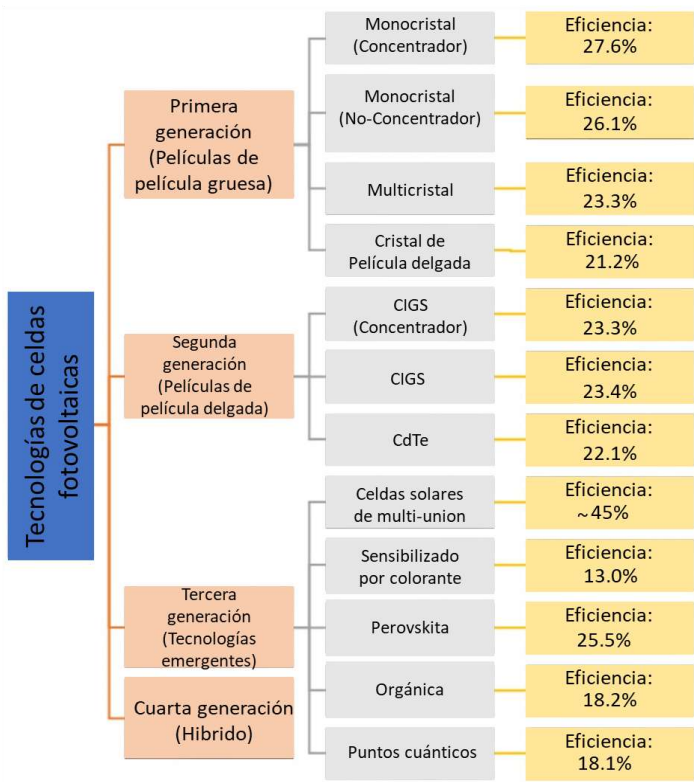


Figura 2. Generaciones de celdas solares con ejemplos [21].

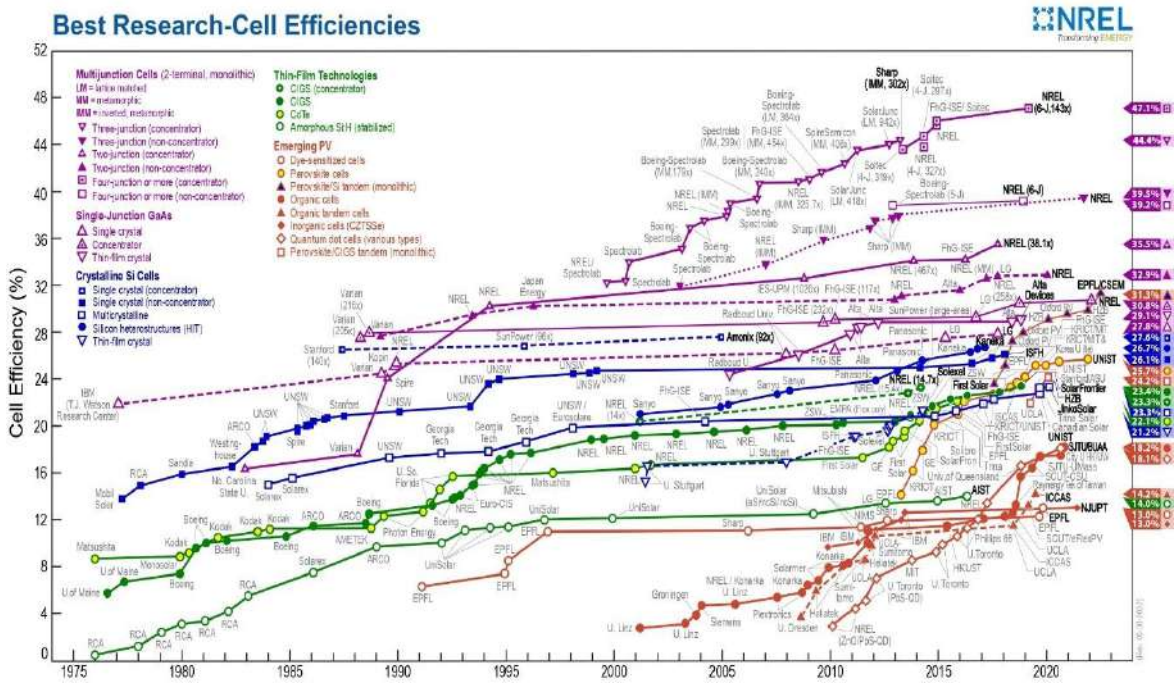


Figura 3. Desarrollo de celdas solares a lo largo de los años [22].

Recordando que una celda solar básica es un dispositivo de unión N-P, al que no se le aplica una diferencia de potencial entre las terminales. La celda solar convierte la energía de la luz (fotones) en energía eléctrica mediante el fenómeno fotovoltaico [10]. Este fenómeno es el proceso mediante el cual se genera corriente eléctrica a partir de la energía de la luz. En una celda solar, la luz incidente llega hasta la región de agotamiento, generando parejas de electrones y huecos. Estas parejas de electrones y huecos son separadas por el campo eléctrico existente en la unión N-P, generando corriente eléctrica [9,13,15].

Uno de los semiconductores más usados para hacer celdas solares es el silicio y, comúnmente, se le suelen aplicar impurezas con el fin de crear una unión N-P. Cuando la luz incide sobre la celda solar, los electrones excitados son "empujados" hacia el lado N y los huecos hacia el lado P, como se muestra en la Figura 4, generando una diferencia de potencial eléctrico y una corriente eléctrica entre los terminales de la celda solar [9,13,15].

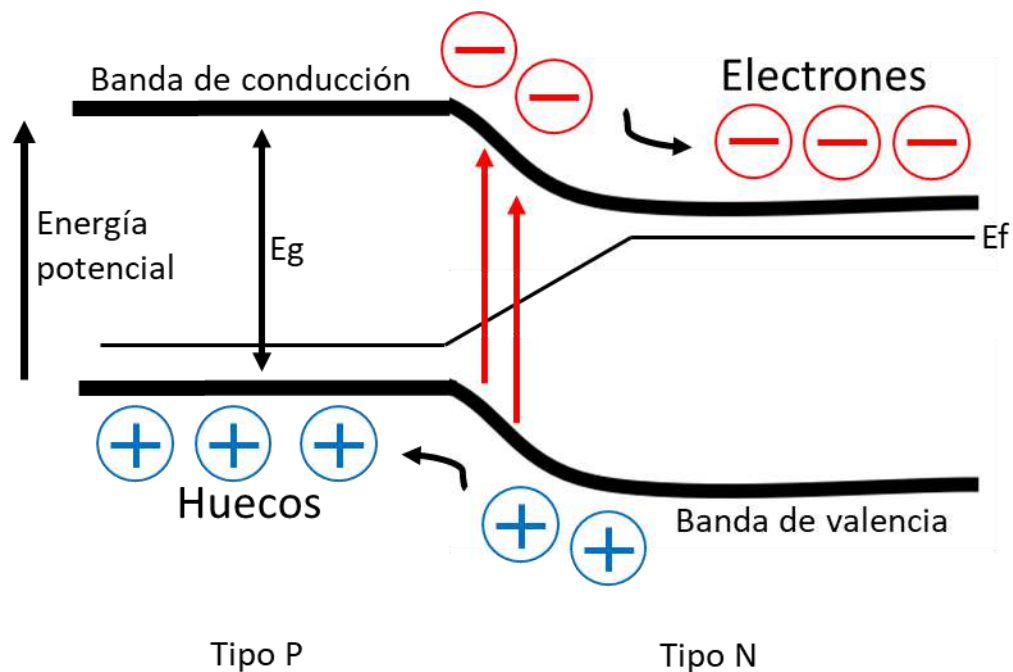


Figura 4. Diagrama de banda de una unión N-P [23].

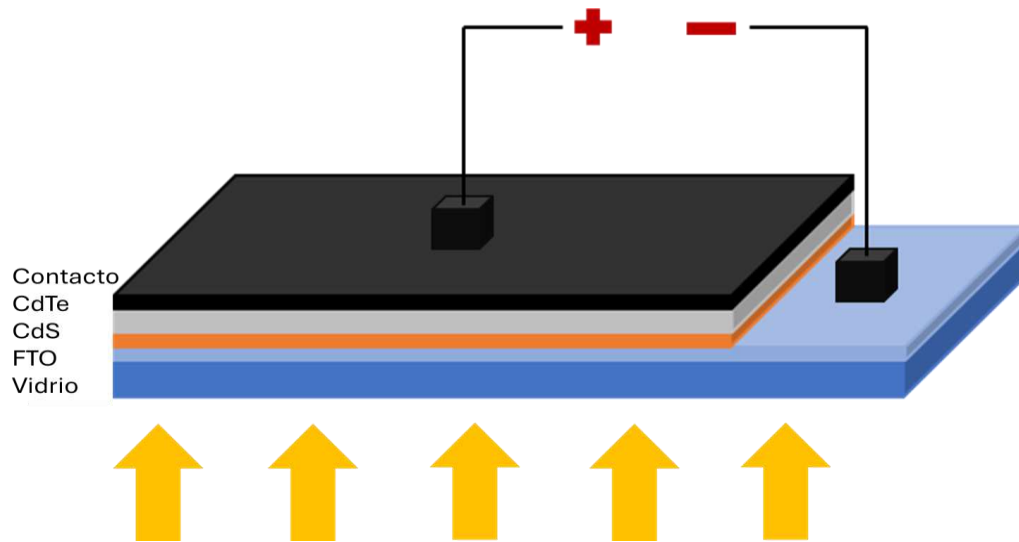


Figura 5. Esquema básico de una celda solar CdS/CdTe.

El semiconductor tipo N (CdS en la Figura 5) de una celda solar suele ser más delgado que el semiconductor tipo P. Esto se debe a que generalmente es en este semiconductor donde inciden los fotones. Una capa delgada permite una mayor transmitancia en el material. Por el contrario, el semiconductor tipo P (CdTe en la Figura 5) está diseñado de manera que los fotones no pasen fácilmente a través de esta capa. Esto asegura que una mayor cantidad de fotones llegue a la región de carga espacial, lo que provoca el flujo de los portadores. Es importante señalar que para que esto suceda, el fotón debe tener la suficiente energía para generar el par electrón-hueco.

En el proceso, los electrones se desplazan hacia el lado N y los huecos hacia el lado P, generando una fotocorriente. El exceso de electrones llega al lado N, se desplaza por el circuito externo, realiza trabajo y finalmente llega al lado P para recombinarse con los huecos sobrantes de este lado [13,15].

Sin embargo, el comportamiento de la celda solar varía según cómo esté conectada. Aunque no necesita de una fuente de voltaje como otros dispositivos semiconductores, suelen compararse diferentes tipos de conexiones para calcular la eficiencia de la celda [13].

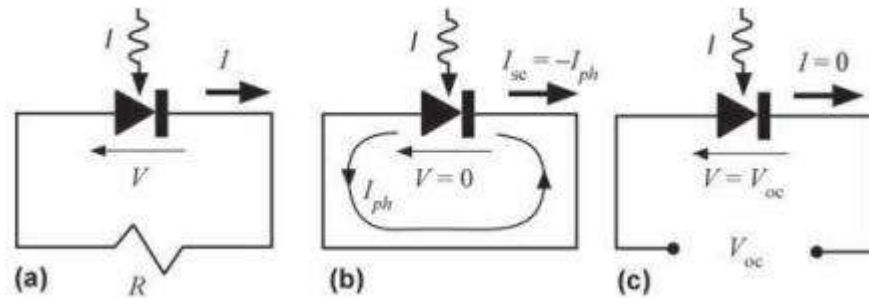


Figura 6. a) Celda conectada a una carga. b) Celda en corto circuito. c) Celda en circuito abierto [13].

En la Figura 6, se observa que en todos los esquemas aparece un diodo, donde este representa la celda, ya que al igual que el diodo, esta es una unión N-P. En la Figura 6(a), vemos que el dispositivo está conectado a una resistencia de carga. En (b), el circuito está en corto circuito sin ningún otro componente, por lo cual el voltaje es 0, y la corriente es la máxima que se puede obtener de la celda, es decir, la  $I_{sc}$  (corriente de corto circuito), obtiene su valor máximo junto con un voltaje de 0, dado que está en corto. Por otro lado, en la Figura 6(c), el circuito está abierto, por lo cual no hay corriente en este, pero el voltaje obtenido entre las dos puntas de la celda será el máximo que se pueda obtener, es decir,  $V_{oc}$  (voltaje de circuito abierto). Este se obtiene cuando no está conectado a nada, y aquí el voltaje es el máximo para el dispositivo, mientras que la corriente es 0 [13]. Estos dos valores son importantes para calcular la eficiencia de la celda.

La eficiencia de una celda solar se refiere a la cantidad de energía de la luz incidente que se convierte en energía eléctrica. La mayoría de las celdas solares modernas comerciales tienen una eficiencia del 15-20%, pero hay celdas solares con eficiencias más altas, como las de silicio híbrido y las de concentración, las cuales pueden alcanzar eficiencias del 30-40% [21,22,24].

En la Figura 12, se muestra la eficiencia teórica de varios semiconductores, simplemente tomando en cuenta la energía que hay entre las bandas de conducción y de valencia (banda prohibida). Sin embargo, la eficiencia de estas puede ser mayor como se ve en las Figuras 9 y 10, dependiendo de la estructura de la celda solar [24] y las características físicas de los semiconductores empleados en su fabricación, como se muestra en la Figura 7.



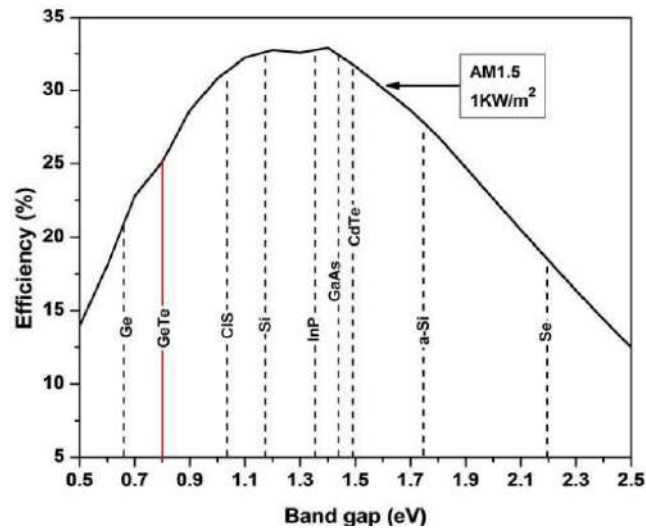


Figura 7. Grafica eficiencia vs energía de banda prohibida [25].

En las celdas solares, es necesaria la unión N-P, ya que es responsable de la generación de corriente eléctrica a partir de la energía de los fotones. A diferencia de otros dispositivos, esta unión no debe ser polarizada, ya que lo que hace es generar corriente eléctrica a partir de la energía de los fotones, cuando estos inciden sobre la celda y llegan a la región de agotamiento generando una separación de los electrones y huecos en esta región, y estos a su vez se desplazan hacia la terminal positiva y negativa respectivamente, generando corriente eléctrica [9,13].

## 2.1.2 Materiales Usados en la Celda Solar

### 2.1.2.1 Sulfuro de Cadmio

El sulfuro de cadmio es un compuesto químico inorgánico con la fórmula química CdS. Es un semiconductor que, de forma intrínseca, es de tipo N con una banda prohibida de 2.46 eV. Este semiconductor suele ser utilizado en diversos dispositivos electrónicos. Sin embargo, también se aplica en dispositivos optoelectrónicos debido a su gran coeficiente de transmitancia. En otras palabras, permite un gran paso de fotones a través de él, al mismo tiempo que disminuye su resistividad cuando está expuesto a la luz. Estas características hacen que sea uno de los semiconductores más empleados en celdas solares de segunda generación, utilizándolo como capa ventana, es decir, como el material donde inciden los fotones [26].

El sulfuro de cadmio desempeña un papel crucial en diversas aplicaciones tecnológicas gracias a sus propiedades fotosensibles. En el ámbito de la energía renovable, se utiliza en la fabricación de celdas solares, donde actúa como de capa ventana, en celdas solares de película delgada. Además, el CdS se usa en dispositivos como fotodiodos y fototransistores, esenciales en sistemas de detección de luz y control automático, así como fotorresistencia, el cual es un componente electrónico cuya resistencia se modifica, con el aumento de intensidad de luz incide [26].

El sulfuro de cadmio (CdS) tiene varias estructuras cristalinas conocidas, pero la más común es la estructura hexagonal, también conocida como estructura wurtzita. También se ha reportado la existencia de estructuras cristalinas de CdS conocida como estructura zincblende, que es una estructura cubica centrada en el cuerpo (FCC) [6].

En resumen, la estructura cristalina más común del CdS es la estructura hexagonal (wurtzita) conocida como la estructura estable, pero también se han reportado estructuras cristalinas como cúbica centrada en las caras del tipo zinc-blenda y muchas veces es referida como una estructura cristalina inestable y la orientación cristalográfica más conocida para el CdS del tipo zinc-blenda es la (111) [6,26,28].

El sulfuro de cadmio (CdS) tiene varias orientaciones cristalográficas, cada una conocida por sus índices Miller (h k l). [6,28]: Las orientaciones cristalográficas más comunes del CdS incluyen (100), (110), (111), son características de su estructura cristalina hexagonal y cubica. Cabe mencionar, que dentro de una película o material de CdS pueden encontrarse varios planos cristalográficos, y además puede haber varias estructuras en el mismo material. De hecho, al haber poca energía entre las estructuras hexagonal y cubica, puede que haya una combinación de estas en la misma película [6,28,29]. El hecho de saber esta información del material puede servir para que al momento de hacer la unión N-P con el otro material, se busque idóneamente uno que comparta la misma estructura y plano cristalográfico, así como el tamaño del grano, o que sea la más parecida posible para una mejor unión entre los materiales, en las celdas solares se ha reportado que cristales monocristalinos (un solo plano cristalográfico), tienen una mayor eficiencia con respecto a cristales policristalinos (varios planos cristalográficos), esto se puede

corroborar con las celdas solares a base de silicio donde las primeras presentan alrededor de un 5-7% mayor de eficiencia con respecto a las otras [20].

### **2.1.2.2 Telururo de Cadmio**

Entre sus aplicaciones más comunes se encuentra la fabricación de celdas solares. El CdTe es altamente eficiente en la conversión de la luz en energía eléctrica, con eficiencias de conversión de hasta el 21%. Además, tiene una gran absorción en el rango del espectro visible [20].

El CdTe también se utiliza en aplicaciones de detección óptica, debido a su sensibilidad a la radiación. Además, su alta reflectividad y su luminiscencia lo hacen útil en aplicaciones de óptica [30]. Aunque su implementación más notable es la que se mencionó antes, la cual sería en la industria fotovoltaica, donde se utiliza como material semiconductor en celdas solares de película delgada. Estas celdas solares basadas en CdTe ofrecen una alternativa eficiente y económica para la generación de energía solar, destacando por su capacidad para convertir la luz solar en electricidad como se observa en Figura 7.

El telururo de cadmio (CdTe), es un compuesto químico de cadmio y telurio con la fórmula química CdTe. Es un semiconductor de tipo II-VI con un punto de fusión alto de 1241 °C y un punto de ebullición de 1470 °C, con una banda prohibida aproximada de 1.51 eV. Con una estructura cristalina cúbica, con planos característicos como (111), (200) y (220) [6,29].

Como se mencionó anteriormente, el telururo de cadmio suele ser más complicado de sintetizar en comparación con el sulfuro de cadmio. Hay varias razones por las cuales los teluros son más difíciles de depositar mediante depósitos químicos que los sulfuros o seleniuros. Una de ellas es el potencial redox muy negativo ( $E_0 \approx -1.14$  V), lo que implica que se requiere una solución fuertemente reductora. Además, la inestabilidad del ion telurio (y posibles precursores de telurio) y la posibilidad de que este tenga varios electrones de valencia contribuyen a la dificultad. Incluso el oxígeno disuelto puede oxidar rápidamente el telurio. La solución fuertemente reductora deberá reducir el oxígeno disuelto, evitando esta reacción. Por lo tanto, una combinación de una fuente adecuada de telurio y un agente reductor fuerte, con la exclusión (o reducción) de oxígeno, puede tener éxito en la formación de telururo [6].

Aunque el cadmio y el telurio son considerados elementos tóxicos y en la mayoría de las ocasiones cancerígenos, eso no ocurre en el caso de los compuestos como el CdS y el CdTe. Ya que los semiconductores mencionados se encuentran en su estado más estable y presentan altos puntos de fusión [19,20].

### **2.1.3 Métodos de Síntesis**

Durante mucho tiempo se ha buscado un método de síntesis de materiales que tenga una contaminación limitada, sea fácil de operar, presente un excelente rendimiento del producto y tenga un bajo costo de producción [32,33]. Los métodos de síntesis de materiales inorgánicos se pueden clasificar en métodos de fase sólida, líquida o acuosa y gaseosa [34].

El método de fase sólida produce un alto rendimiento y es fácil de realizar para la producción industrial a gran escala. Sin embargo, debido a las limitaciones del equipo y del proceso en sí, es difícil controlar el tamaño de partícula, la pureza y la morfología del polvo utilizando el método de fase sólida [35].

El método de fase líquida incluye principalmente la precipitación [36], hidrotérmica [37], coloidal [38] y los métodos sol-gel [39]. Las ventajas del método de fase líquida son la operación conveniente, el proceso de síntesis simple y el tamaño de partícula controlable. Sin embargo, la mayoría de los métodos de fase líquida consumen más energía y tienen altos costos.

El proceso de fase gaseosa generalmente incluye la evaporación-condensación [40] y los métodos de reacción de fase vapor químico [41]. Las partículas preparadas mediante el método de fase gaseosa son pequeñas en tamaño, tienen una alta pureza uniforme, una alta actividad superficial, pero se requiere equipo y una gran cantidad de solvente durante el proceso de reacción, lo que dificulta su producción a gran escala.

#### **2.1.3.1 Deposito por Baño Químico**

La técnica de depósito por baño químico (*Chemical Bath Deposition*, CBD) es un método que generalmente se utiliza para depositar capas finas de materiales en un sustrato

mediante la reacción química de soluciones en un baño empleando regularmente valores de temperatura entre 50-100 °C; aunque esta temperatura podría aumentar al usar otro líquido diferente al agua, como medio de transporte de calor. Es un método sencillo y económico para depositar capas finas de materiales en una variedad de sustratos, como vidrio, plástico, metal y cerámica [6].

El proceso de CBD comienza con la preparación de una solución acuosa que contiene los reactivos o precursores necesarios para depositar la capa fina deseada. Se recomienda que la solución pase por un proceso de agitado para mantener una homogeneidad en la solución. El sustrato se sumerge en la solución, que esta a su vez está dentro del baño químico a una temperatura deseada y se deja allí durante un período de tiempo específico, durante el cual se lleva a cabo la reacción química, con la finalidad de poder obtener una capa fina del material deseado como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Ejemplo de un depósito por baño químico.

El CBD se ha utilizado para depositar una variedad de materiales, donde se han reportado varios semiconductores. Entre los más comunes se encuentran el CdS, CdSe, PbS, ZnS, ZnSe, entre otros [6,44].

Una de las principales ventajas del CBD es que es un método sencillo y económico para depositar capas finas o películas delgadas de materiales en una variedad de sustratos. Sin embargo, existen algunas desventajas en el uso del CBD. Una de las principales desventajas es que la calidad de la capa depositada puede ser variable debido a la naturaleza poco controlada de la reacción química. Además, el espesor de la capa depositada puede ser difícil de controlar y puede variar ampliamente dependiendo de las condiciones. Además de las ventajas y desventajas mencionadas anteriormente, existen algunas otras consideraciones importantes al utilizar el método de CBD. Una de ellas es la selección adecuada de los reactivos y las condiciones de reacción para depositar una capa fina de alta calidad. Por ejemplo, la elección de un pH inadecuado o la concentración de reactivos puede afectar la calidad de la capa depositada [43,44].

El método de depósito químico de baño (CBD) ha demostrado ser eficaz en la síntesis de algunos materiales. Por esta razón, este método se ha utilizado ampliamente en el desarrollo de celdas solares de segunda generación o en dispositivos de película delgada. Sin embargo, es importante señalar que algunos de los semiconductores utilizados en dispositivos de película delgada pueden ser complicados o difíciles de sintetizar mediante este método [6,43,44].

En resumen, la técnica de depósito por baño químico (CBD) es un método sencillo y económico para depositar capas finas de materiales en una variedad de sustratos. Aunque tiene algunas limitaciones, como la variabilidad en la calidad de la capa depositada, tiene una amplia gama de aplicaciones en las que ha demostrado ser eficaz. Es importante tener en cuenta las consideraciones mencionadas con anterioridad al utilizar el CBD para depositar capas finas.

### **2.1.3.2 Síntesis Hidrotérmica Asistida por Microondas**

Los estudios sobre el rendimiento de las microondas comenzaron en la década de 1930. Inicialmente, las aplicaciones de las microondas se limitaron al campo de la radio. Durante la década de 1960, los investigadores descubrieron los efectos termodinámicos de las microondas y desarrollaron un nuevo campo de investigación. A principios de la década de 1990, el Dr. Komarneni de la Universidad de Pensilvania se convirtió en pionero al comparar las diferencias

entre la síntesis hidrotérmica convencional y la síntesis hidrotérmica especial (síntesis hidrotérmica asistida por microondas) [45].

La síntesis hidrotérmica asistida por microondas (MW-HTS) es una técnica utilizada para depositar materiales como óxidos simples, perovskitas, bio-cerámicos, películas delgadas y vanadatos [46]. La síntesis hidrotérmica es un procedimiento que se sustenta en la reacción química entre los reactivos y las condiciones a las que se somete, permitiendo así depositar el material deseado de manera uniforme y controlada.

Las microondas (MW) son una forma de energía electromagnética asociada con campos electromagnéticos. Los microondas se refieren a una onda electromagnética con una longitud de onda entre 300 MHz y 300 GHz equivalente a el rango de longitudes de onda de 1 m a 1 mm como se ve en la Figura 9. Cuando se irradia sobre la superficie de un medio, una pequeña parte se reflejará y la mayor parte puede penetrar en el interior del medio y ser absorbida gradualmente por el mismo, convirtiéndose en energía térmica. Entre las ondas infrarrojas y las ondas de radio, solo las microondas con frecuencias concentradas en 900 MHz y 2.45 GHz pueden utilizarse para calentar [46].

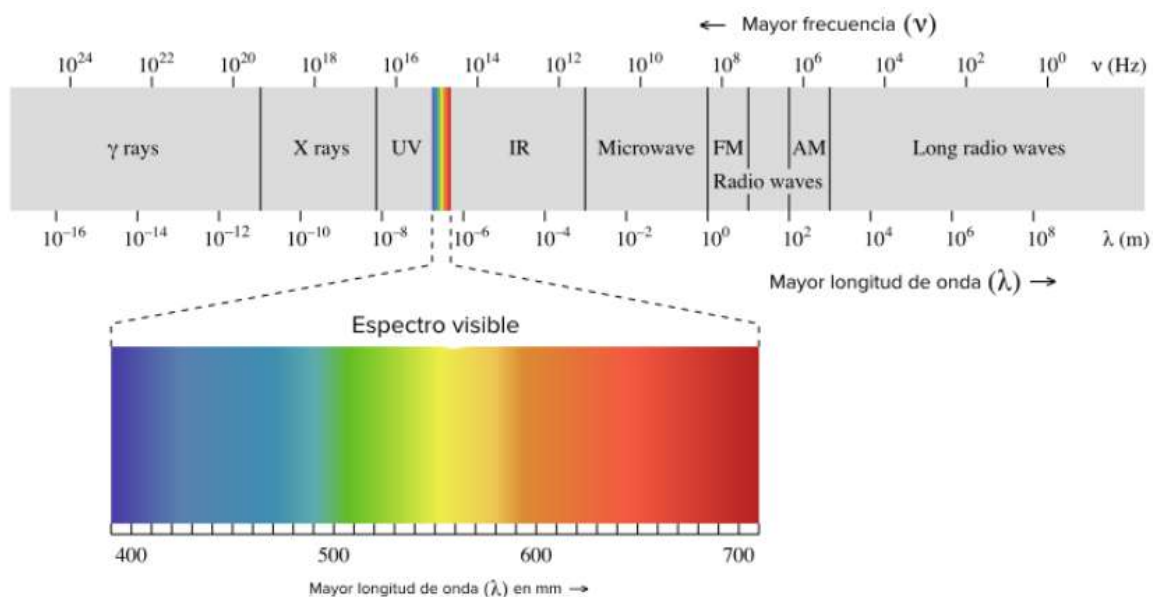


Figura 9. Espectro electromagnético [47].

El campo eléctrico de las microondas es responsable del calentamiento del medio. En el rango de frecuencia de las microondas, el calentamiento del medio se lleva a cabo principalmente mediante dos mecanismos de polarización dipolar y conducción iónica. Por ejemplo, las microondas se pueden utilizar en el campo de la síntesis química porque los reactivos involucrados en las reacciones químicas llevan diversas moléculas polares, como agua, alcoholes y ácidos carboxílicos. En circunstancias normales, estas moléculas están en un estado desordenado de movimiento. Cuando el magnetrón del horno de microondas irradia una microonda de frecuencia muy alta, el campo de energía de la microonda cambia continuamente cientos de millones de veces por segundo, y las polaridades positivas y negativas están a la misma frecuencia Figura 10. En consecuencia, el movimiento molecular experimenta cambios tremendos; desde una trayectoria de movimiento caótico original hasta una vibración de alta frecuencia ordenada, lo que resulta en colisiones, fricciones y extrusiones, de tal manera que la energía cinética-energía de microondas se convierte en energía térmica [46,48].

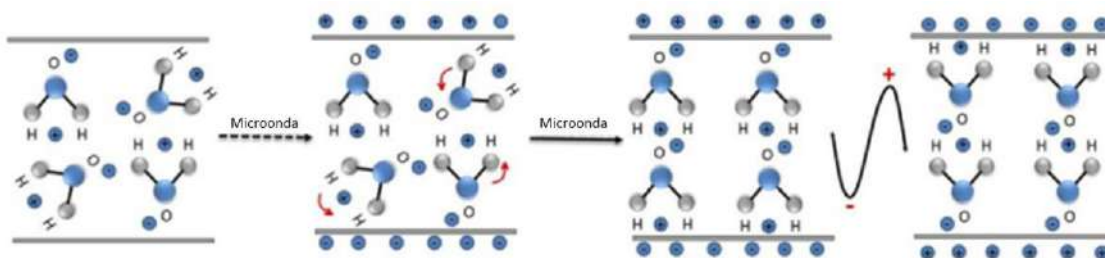


Figura 10. Comportamiento de las moléculas polares al interactuar con microondas [46].

En resumen, la síntesis hidrotérmica asistida por microondas es una técnica eficaz para depositar capas finas de materiales semiconductores en una variedad de sustratos. La combinación de ondas de microondas, temperatura y presión permite una mayor eficiencia en la reacción química y un mejor control de la estructura de la capa depositada.

### 2.1.3.3 Pulverización Catódica

El método de *Sputtering*, también conocido como pulverización catódica, es una técnica muy utilizada para depositar películas delgadas de materiales sobre sustratos. El depósito pulverización catódica es un procedimiento, se bombardea un objetivo, llamado cátodo, con iones de alta energía, generalmente argón, dentro de una cámara de vacío (Figura 11) [49].



El cátodo se coloca junto al sustrato en la cámara de vacío. Al aplicar un campo eléctrico, se genera un plasma en la cámara y los iones de argón son acelerados hacia el cátodo. Estos iones de alta energía impactan en el cátodo, liberando átomos o iones del material objetivo mediante el impacto iónico [49].

Los átomos o iones liberados del cátodo se dispersan en el plasma y se depositan en el sustrato, creando una película delgada. La energía de los iones de argón puede controlarse para lograr diferentes características en el proceso de depósito, como la adhesión, la estructura cristalina y la rugosidad de la película resultante [49].

El método de *Sputtering* ofrece varias ventajas. En primer lugar, permite depositar películas uniformes y conformes en sustratos de diversas formas y tamaños. Además, se pueden utilizar diferentes materiales, como metales, cerámicas y semiconductores, con una amplia gama de composiciones. Esta técnica también permite un control preciso del espesor de la película mediante la monitorización de la duración del depósito [50,51].

El *Sputtering* se utiliza en numerosas aplicaciones, como la fabricación de circuitos integrados, la producción de recubrimientos protectores, la fabricación de celdas solares y la creación de películas magnéticas en la industria de almacenamiento de datos [50].

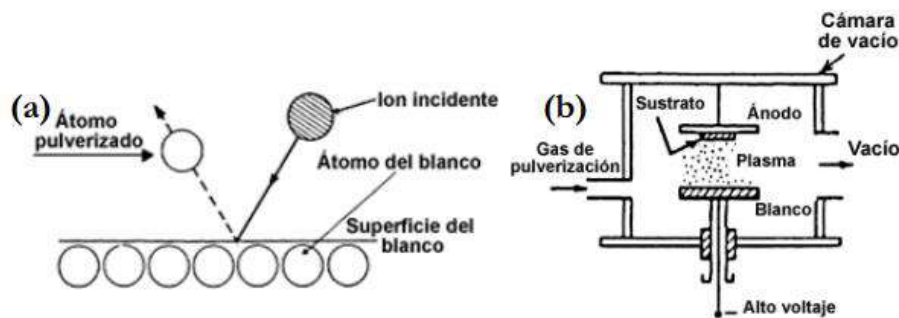


Figura 11. pulverización catódica, (a) esquema físico, (b) Sistema de depósito [49].

## 2.1.4 Técnicas de Caracterización

### 2.1.4.1 Microscopía de Barrido Electrónico

Microscopía de Barrido Electrónico (MBE) es una técnica utilizada para analizar la estructura y morfología de un material a un nivel más preciso que un microscópico óptico. El principio detrás de SEM es que es capaz de tomar una “imagen” de la muestra, aunque realmente lo que se detecta es la respuesta del material al impacto de un haz de electrones (electrones primarios) y recibir electrones por colisión en vez de registrar fotones (como en la microscopía óptica). Al ser impactada por el haz de electrones de alta energía, la muestra produce una serie de señales que son registradas en los diferentes detectores del equipo [52].

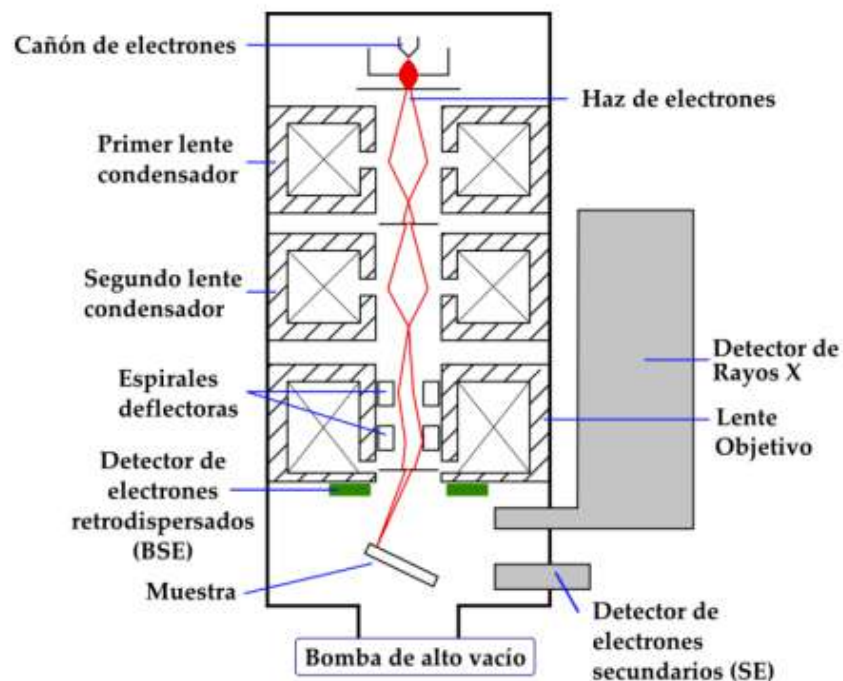


Figura 12. Esquema básico de un equipo SEM [42].

La idea básica de funcionamiento de un equipo de SEM como se observa en la Figura 12 es la siguiente: se genera un haz de electrones de alta energía (electrones primarios o incidentes, EI) y se usa un sistema de lentes para focalizar el haz y hacerlo incidir sobre una muestra, la cual generará, a su vez, electrones de varios tipos (llamados secundarios y retrodispersados con siglas SE y BSE, respectivamente), los cuales van a ser detectados en sus respectivos sensores. Los dispositivos para generar el haz de electrones son generalmente de dos tipos: Emisores termoiónicos o los cañones de emisión de campo (FEG, *Field Emission Gun*) [52,53].

Cabe mencionar que los electrones secundarios son los que se generan por colisión con los átomos superficiales de la muestra, son electrones de baja energía, y como estos provienen de la superficie, son lo que se usan para generar una imagen de la muestra. Por otro lado, los electrones retrodispersados son electrones que alcanzan a viajar mucho más al interior de la muestra y, aunque no choquen con ningún átomo, traen información acerca de la muestra debido a que son perturbados en su viaje por los campos magnéticos de los núcleos atómicos de la muestra. Es de aclarar que las imágenes a partir de SE tienen mucha mejor resolución que las generadas con BSE, debido a el número de electrones detectados, es mucho mayor en los SE, y a efectos de superficie y penetración de los electrones incidentes [52].

#### **2.1.4.2 Difracción de Rayos X**

La técnica de difracción de rayos X (DRX) se emplea principalmente para identificar las características cristalológicas de los materiales sólidos, incluyendo los planos cristalográficos del material. El principio detrás de DRX es que los rayos X incidentes en un cristal se difractan en ángulos específicos, lo que permite determinar la estructura cristalina del material (Figura 13). Existen dos principios fundamentales que dan lugar a la difracción de rayos X en materiales cristalinos. El primero es que la dispersión elástica (Thomson) de los fotones nos permite invocar las leyes de la reflexión especular y tratar los planos atómicos como espejos (esta afirmación no es estrictamente cierta, pero es una suposición útil para trabajar). El segundo es que la longitud de onda de los rayos X es del mismo orden de magnitud que las distancias interatómicas en los cristales (0.15 - 0.5 nm), lo que conduce a fenómenos de interferencia constructiva y destructiva [54,55].

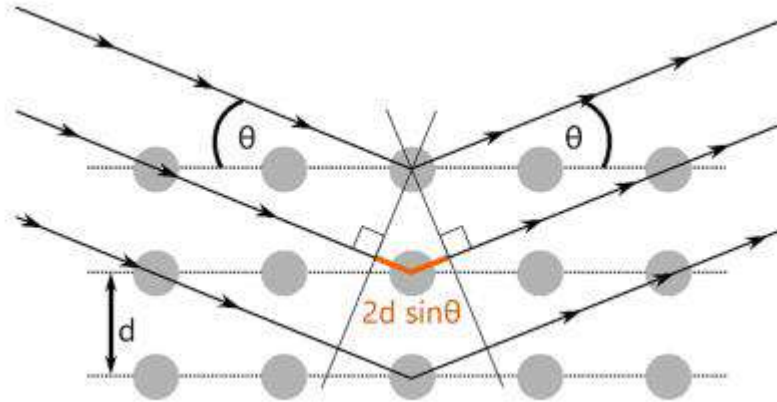


Figura 13. Representación de los rayos X interactuando con átomos [56].

La difracción de los rayos X se visualiza mejor como se muestra en la Figura 14, donde un haz de rayos X, de longitud de onda  $\lambda$ , incide en un ángulo  $\theta$  sobre una serie de planos atómicos con espaciado  $d$ . El haz de rayos X se dispersa de los planos en un ángulo  $\theta$  igual al ángulo incidente con respecto al plano cristalino. La diferencia de fase relativa entre los rayos X dispersados del primer y segundo planos está dada por la distancia marcada en naranja en la Figura 14. A partir de consideraciones geométricas, es fácil mostrar que la interferencia constructiva tendrá lugar para ciertos ángulos, dependiendo del espaciado interplanar,  $d$  [56].

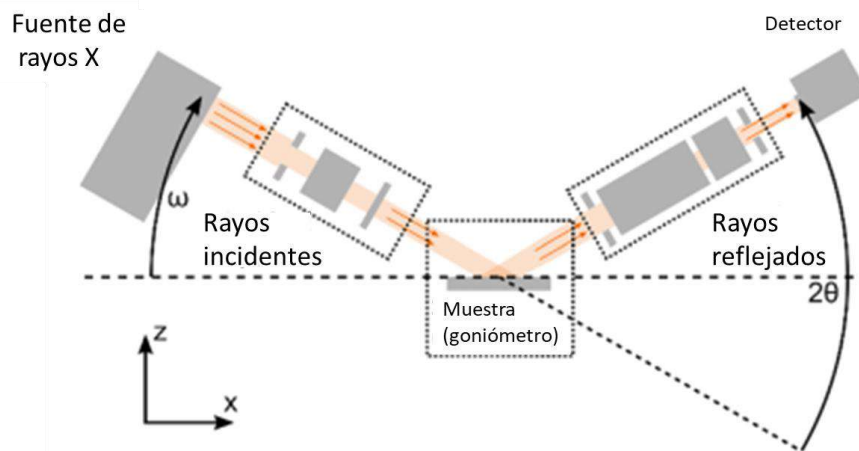


Figura 14. Esquema de un equipo de DRX [56].

Un difractómetro de rayos X consta de cinco componentes principales: la fuente de rayos X, el detector, la óptica del haz incidente (o primario), la óptica del haz recibido (o difractado) y el

goniómetro (goniómetro es un instrumento utilizado en difracción de rayos X para medir los ángulos de difracción de los rayos X reflejados por un cristal, consiste en una mesa giratoria que sostiene la muestra cristalina y permite que se rote en ángulos muy precisos mientras se bombardea con rayos X), como se muestra en la Figura 14. El difractómetro se encuentra dentro de un recinto de radiación y se controla mediante un equipo de cómputo [56].

En un difractómetro de laboratorio, los rayos X se producen en un tubo de rayos X evacuado, donde los electrones se generan mediante emisión termiónica desde un cátodo de tungsteno calentado, se aceleran a alta energía y chocan con un objetivo de ánodo hecho de un metal de alta pureza específico. El detector se utiliza para convertir los rayos X entrantes en una señal eléctrica. La unidad utilizada suele ser conteos por segundo (cps). Los detectores a menudo se definen por sus dimensiones y pueden ser detectores puntuales (0D), detectores de línea (1D) o detectores de área (2D). Los principios de funcionamiento también pueden variar entre diferentes detectores, y los tipos comunes incluyen contadores proporcionales, contadores de centelleo y detectores de estado sólido. El goniómetro es el componente del difractómetro que controla los ángulos de los haces de rayos X generados por la fuente de rayos X y los ángulos de los rayos difractados que llegan al detector. En su forma más básica, el goniómetro permite variar el ángulo entre la fuente y la muestra, llamado ángulo de incidencia, y el ángulo entre el haz incidente y el detector, llamado ángulo de difracción  $2\theta$ . Los difractómetros clásicos de laboratorio permiten diferentes ópticas para los haces incidentes y difractados. El intercambio de ópticas y el realineamiento generalmente requieren cierta experiencia, ya que implica cambios físicos en algunos accesorios delicados, como espejos o monocromadores de rayos X [56].

#### **2.1.4.3 Espectroscopia de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X**

La Espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos X, funciona de manera similar a los instrumentos SEM/EDS que utilizan un haz de electrones finamente enfocado para crear imágenes de alta resolución de la muestra y/o imágenes puntuales para el análisis de composición. Sin embargo, esta es una técnica utilizada para proporcionar la composición química de las superficies de los materiales dentro de 10 nm, junto con información elemental y una sensibilidad de detección de porcentaje atómico del 0.1 a 1 para todos los elementos

excepto H y He, lo que la convierte en una herramienta única para la caracterización de superficies [57-59].

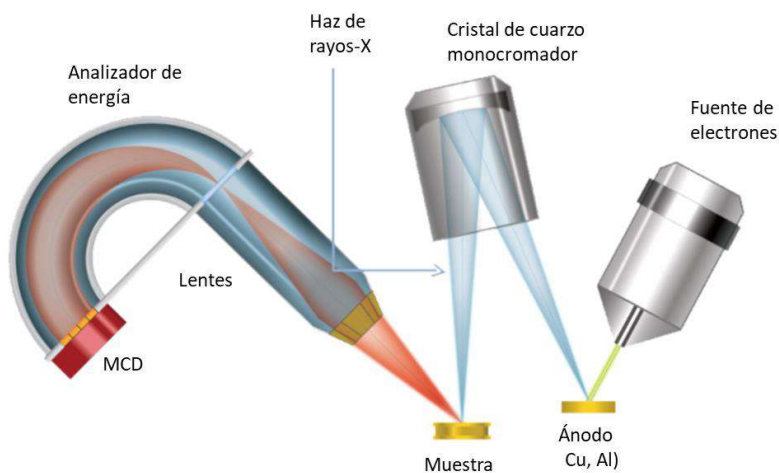


Figura 15. Esquema de un equipo XPS [59].

La espectroscopía de fotoelectrones por rayos X (XPS) se logra típicamente al irradiar la superficie de una muestra con rayos X monoenergéticos  $k\alpha$  (los más típicos de Cu y Al, y los rayos X  $k\alpha$  se generan cuando un electrón de la capa k es excitado a un nivel superior y luego regresa a su estado original, emitiendo un fotón de energía característica), lo que provoca la emisión de fotoelectrones de la superficie de la muestra como se observa en la Figura 15. Un analizador de energía de electrones se utiliza para medir la energía de los fotoelectrones emitidos. A partir de la energía de enlace y la intensidad de un pico de fotoelectrones, se puede determinar la identidad elemental, el estado químico y la cantidad de un elemento detectado [58].

#### 2.1.4.4 Espectroscopía Ultravioleta Visible

Espectroscopía ultravioleta visible es una técnica utilizada para analizar la absorción de luz en un material. El principio detrás de UV-Vis es la Ley de Lambert-Beer, también conocida como la Ley de Beer, la cual describe la relación entre la cantidad de luz que pasa a través de un medio y la concentración de la sustancia que el haz de luz atraviesa. La ley establece que la absorción de la luz es proporcional a la concentración de la sustancia y al espesor del medio. En términos matemáticos, la ley se puede expresar como  $A = \epsilon cl$ , donde A es la absorbancia,  $\epsilon$  es

la constante de absorción molar,  $c$  es la concentración de la sustancia y  $l$  es la longitud del camino óptico del haz de luz a través del medio. La Ley de Lambert-Beer se utiliza ampliamente en la espectroscopía y otras áreas de la química analítica para cuantificar la concentración de una sustancia en una muestra [60,61].

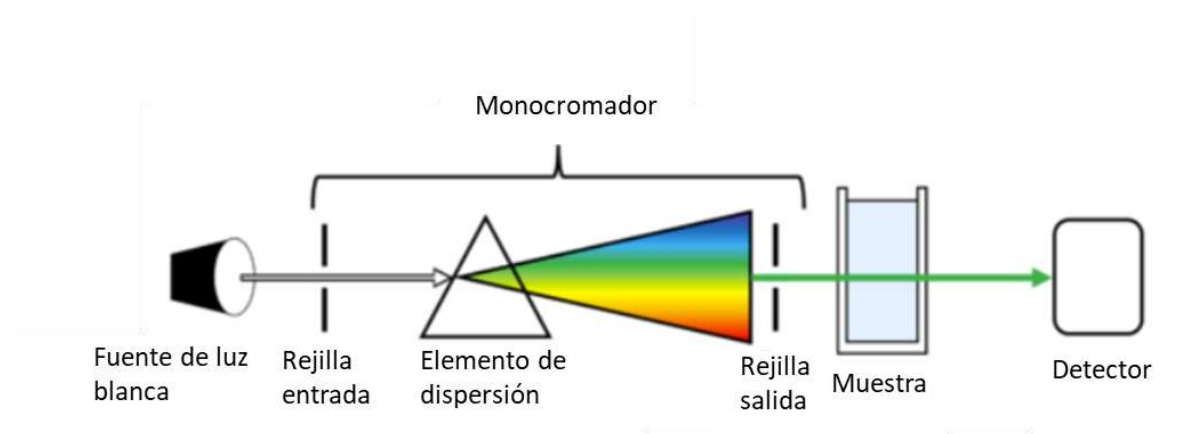


Figura 16. Esquema de un equipo UV-VIS [62].

En la Figura 16, se pueden observar los componentes básicos de un equipo de espectroscopia ultravioleta-visible, el cual consiste en una fuente de luz blanca (específicamente policromática), la cual generalmente esta será focalizada por un lente y una rejilla, para posteriormente impactar con un monocromador (es un dispositivo o componente que descompone la radiación policromática en diferentes longitudes de onda). El monocromador en cuestión será manipulado por el equipo para que todas las longitudes de onda pasen por la muestra, es decir haya un barrido de luz incidente con diferentes longitudes de onda a través de la muestra, una parte de la longitud de onda será absorbida por la muestra y otra parte será transmitida (y una ligera parte, comúnmente despreciable será reflejada), esta parte transmitida será la que el detector tome como señal y poder entregar una gráfica de longitud de onda contra absorbancia o transmitancia (generalmente los equipos tienen para entregar estos dos valores) del material o muestra [61].

#### 2.1.4.5 Resistividad

El método de cuatro puntas es una técnica utilizada para medir las propiedades eléctricas de un material a bajas temperaturas y en campos magnéticos extremadamente bajos, específicamente mide la resistencia de hoja, la resistividad se obtiene multiplicando el grosor

de la muestra con la resistencia de hoja obtenida solo para sustratos uniformemente impurificados. Para muestras no uniformemente impurificadas, el cálculo se complica [63,64].

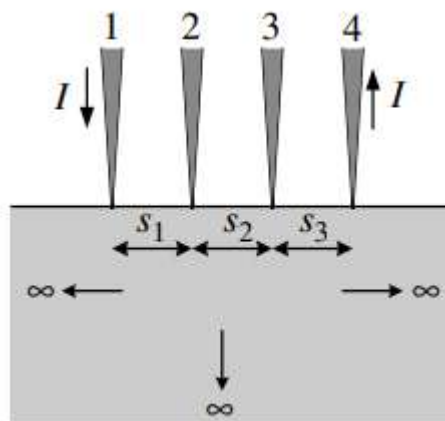


Figura 17. Condición ideal de colocación de sondas [64].

La medición consiste en aplicar corrientes por dos puntas y, al mismo tiempo, medir la tensión por las otras dos, como se observa en la Figura 17. Con esto, es posible medir la resistividad de la hoja. Sin embargo, el cálculo de esta resistividad es más complicado que simplemente aplicar la ley de Ohm y realizar la división entre la tensión medida y la corriente aplicada. La complejidad radica en la disposición de las puntas, siendo la forma más sencilla colocarlas de manera colineal y separadas por una distancia de 0.1588 cm, todas a la misma distancia. Según la teoría [64], esta disposición permite realizar la división de acuerdo con la ley de Ohm. Sin embargo, el valor obtenido no será el valor final, ya que se deben considerar factores de corrección. Para estos factores, también es relevante la disposición de las puntas, siendo nuevamente la forma más sencilla aquella en la que las puntas están dispuestas de forma colineal. En este caso, solo se necesitan investigar tres factores: grosor de la muestra, dimensiones laterales de la muestra y ubicación de las puntas con respecto al borde. Una vez considerados estos factores, se puede calcular una resistencia de hoja bastante precisa [64]. Para casos en los que se dispongan las puntas de otra manera y con diferentes distancias, es necesario investigar los distintos factores de corrección, así como el cálculo de la resistividad [64,65].



### 2.1.4.6 Microscopia de Fuerza Atómica

El microscopio de fuerza atómica (MFA) es una técnica de caracterización que se utiliza para obtener información detallada sobre la topografía y propiedades físicas de una superficie en una escala de nanómetros. El AFM consiste en una sonda extremadamente fina y afilada se mueve sobre la superficie de la muestra, lo que permite medir la fuerza interatómica entre la sonda y la superficie. A medida que la sonda se mueve sobre la superficie, una computadora registra los cambios en la fuerza interatómica, que se utilizan para crear una imagen de la topografía de la muestra. Además de la topografía, el AFM también puede medir otras propiedades físicas, como la dureza, la elasticidad y la conductividad eléctrica de la muestra. Esta técnica es ampliamente utilizada en la investigación y desarrollo de materiales, la nanotecnología, la biología y otras áreas donde se requiere una alta resolución espacial y una gran precisión en la medición [66,67].

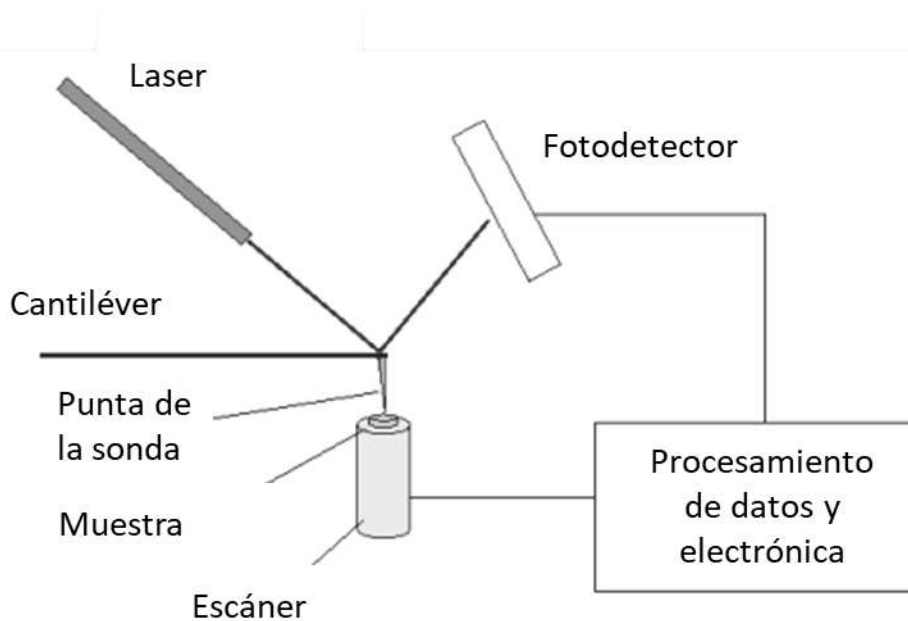


Figura 18. Esquema básico de un equipo AFM [68].

El AFM, o Microscopio de Fuerza Atómica, se basa en la ley de Hooke, esta ley establece que la fuerza necesaria para estirar o comprimir un objeto es proporcional a la deformación causada. En otras palabras, cuanto más se estire o comprima un objeto, mayor será la fuerza necesaria para hacerlo. Esta relación entre fuerza y deformación se expresa mediante una constante de

proporcionalidad conocida como constante elástica. Por lo el equipo funciona básicamente por el desplazamiento del cantiléver, el cual es una punta extremadamente fina y aguda, que se mueve a lo largo de una muestra a una distancia muy corta. A medida que la punta se mueve, se registra la interacción entre la punta y la superficie de la muestra en términos de fuerzas (utilizando la ley de Hooke, con la constante elástica del cantiléver y el desplazamiento que tiene a lo largo de la superficie), lo que permite obtener información sobre la topografía y propiedades mecánicas de la muestra a una escala de nanómetros [68].

Generalmente un láser se utiliza para detectar la posición del cantiléver (como se observa en la Figura 18) y así generar imágenes topográficas tridimensional a escala nanométrica, midiendo las fuerzas entre una sonda afilada (con un radio menor a 10 nm) y la superficie de la muestra a una distancia muy corta (0,2-10 nm de separación sonda-muestra). La sonda se sostiene en una palanca flexible y la punta del AFM toca suavemente la superficie y registra la pequeña fuerza entre la sonda y la superficie [67,69].

## **2.2 Justificación**

En los últimos años uno de los problemas más importantes a nivel mundial ha sido el cambio climático. Debido a ello, se buscan otras alternativas de generación de energía sin hacer uso de materiales contaminantes como el petróleo, gas natural y carbón. Con esto toma más relevancia un cambio hacia energías renovables y limpias, entre estas hay muchas opciones entre las que más destacan son los paneles solares, plantas hidroeléctricas y campos eólicos, entre otros menos comunes, que no tienen un impacto negativo al medio ambiente, pero su construcción e implementación suele ser costosa y difícil, además de puntos estratégicos donde se pueda hacer uso. En cambio, la implementación de paneles solares que generan energía eléctrica a partir de los rayos solares es mucho más sencilla, aunque puede variar la eficiencia de un panel de una región a otra.

Las celdas solares son utilizadas en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeños dispositivos como calculadoras y relojes, hasta sistemas de generación de energía eléctrica a gran escala. Estas celdas solares se pueden conectar en serie o paralelo para aumentar la corriente o el voltaje de salida respectivamente, formando un panel solar.

Aunque la generación de energía a partir de celdas fotovoltaicas es menor a otras, esta es más accesible, además de su fácil implementación en una casa/habitación, al mismo tiempo que se debe buscar o mejorar todas las alternativas de energía limpia para combatir el cambio climático. Esto conlleva a seguir avanzando tecnológicamente en la fabricación o sinterización de películas delgadas de materiales que tengan capacidad de hacer una buena conversión de fotones a energía, así como mejorar los otros componentes de los paneles solares.

Por ello, es de suma importancia continuar con la investigación de energías limpias. De ahí la relevancia de seguir realizando investigación sobre celdas solares, específicamente las celdas basadas en uniones N-P. Una de las tecnologías más prometedoras de las celdas solares, son las de segunda generación que constan de películas delgadas. Ya que se ocupa menos material que en las celdas de silicio y se puede utilizar sulfuro de cadmio como capa ventana de la celda. Un método de síntesis muy efectivo para el para la fabricación de CdS es el método de CBD. Por otro lado, para la capa absorbente uno de los materiales más prometedores es el telururo de cadmio, sin embargo, para el CdTe requiere de procesos de fabricación que suelen requerir de equipo muy sofisticado, por ello se plantea sintetizar el CdTe por un proceso poco reportado y sencillo denominado MW-HTS.

## **CAPÍTULO III**

### **OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo General**

Diseño, fabricación y caracterización de una celda solar **basadas en** películas delgadas de sulfuro de cadmio (CdS) telururo de cadmio (CdTe) por los métodos de baño químico y síntesis hidrotérmica asistida por microondas.

#### **3.2 Objetivos Particulares**

- Simular una unión N-P de sulfuro de cadmio y telururo de cadmio.
- Sintetizar películas delgadas de sulfuro de cadmio mediante depósito por baño químico.
- Sintetizar películas delgadas de telururo de cadmio mediante depósito por baño químico.
- Fabricación de celda fotovoltaica con base de las películas de sulfuro de cadmio y telururo de cadmio.
- Obtener la gráfica de voltaje contra corriente de la celda solar (I-V).
- Determinar la eficiencia de las celdas solares.

## **CAPÍTULO IV**

### **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

En el presente capítulo, se detalla la metodología empleada en la etapa experimental del presente proyecto, asociado al crecimiento de películas de CdS y CdTe por las técnicas de depósito por baño químico (CBD) y síntesis hidrotérmica asistida por microondas (MW-HTS), respectivamente: Así como a la caracterización y el estudio de propiedades eléctricas, ópticas, estructurales y morfológicas mediante las técnicas descritas en el Capítulo III para los semiconductores propuestos (CdS y CdTe). También, se muestran detalles de la metodología empleada para determinar los parámetros principales de la celda solar fabricada con CdS y CdTe y su desempeño.

#### **4.1 Depósito por Baño Químico de Películas de CdS**

Como se ha mencionado anteriormente, la síntesis del sulfuro de cadmio se realizó por medio de la técnica de CBD, para ello se utilizó un baño térmico de la marca Polyscience, en el baño térmico se colocan los vasos de precipitado con la solución y el sustrato, con el fin de sintetizar una película delgada de CdS.

Equipo utilizado:

- Baño térmico, de la marca Polyscience.
- Limpiador ultrasónico modelo VGT-16vo seti.
- Agitador magnético.
- Termómetro de laboratorio a base de mercurio.
- Micropipeta de 1-5 mL, Transferpette de la marca Brand.

Material utilizado:

- Nitrato de cadmio ( $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) de la marca Fermont.
- Tiourea ( $(\text{NH}_2)_2\text{CS}$ ) de la marca Productos Químicos Monterrey.
- Glicina – ( $\text{CH}_2(\text{NH}_2)\text{COOH}$ ) de la marca Faga Lab.
- Cloruro de amonio – ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) de la marca Fermont.
- Hidróxido de amonio (ACS –  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) de la marca Fermont.

- Agua desionizada.
- Alcohol etílico.
- Acetona.
- Detergente.
- Vidrio de porta muestras (25x75x1 mm) de la marca Corning.
- Vidrio con una capa de óxido de estaño impurificado con flúor (FTO).

El primer paso del experimento consiste en la limpieza del sustrato, el cual puede ser vidrio para las caracterizaciones o FTO para la construcción de las celdas de CdS/CdTe, en cualquiera de los casos el procedimiento de limpieza es el mismo.

El procedimiento de limpieza se realiza en el baño ultrasónico y considerando el procedimiento y condiciones siguiente:

- 1) 10 minutos con detergente.
- 2) 10 minutos con agua de desionizada.
- 3) 5 minutos con acetona.
- 4) Retirar el sustrato y rociar con agua desionizada.
- 5) 5 minutos con alcohol etílico.
- 6) Retirar el sustrato y rociar con agua desionizada.
- 7) 5 minutos con agua desionizada.

La preparación de la solución se basó en un trabajo reportado previamente [70], en el cual se menciona que se debe utilizar un agente acomplejante y un buffer pH=11 para obtener una buena calidad en la película, la cual consiste en:

Una mezcla de diferentes soluciones, añadidas a un vaso de precipitado en el siguiente orden. 31 mL de agua desionizada, 4 mL de nitrato de cadmio con una concentración molar de 0.1 M, 5 mL de glicina (agente acomplejante) a 0.1 M, 2 mL de buffer pH 11 (Cloruro e Hidróxido de amonio en relación 1:1), 5 mL de tiourea a 1M y finalmente 13 mL de agua desionizada. Por último, se procede a homogeneizar la solución, con ayuda de un agitador magnético durante 2 min.

Una vez preparada la solución se coloca el sustrato previamente sometido al proceso de limpieza en el vaso precipitado, para posteriormente colocarlo en el baño térmico a una temperatura de 70 °C durante 24 min. Una vez transcurrido el tiempo se retira del baño térmico y se deja enfriar en la solución a temperatura ambiente (30 °C), con el fin de evitar daños en la película por choques térmicos. Para finalizar con la película de CdS, se coloca el sustrato donde se depositó en un vaso de precipitados con agua desionizada y se coloca nuevamente en baño ultrasónico, el tiempo que esté se mantiene en el ultrasónico variar debido a que se deja hasta haber retirado el exceso del material que está ligeramente adherido a la película. El proceso completo se muestra en la Figura 19.

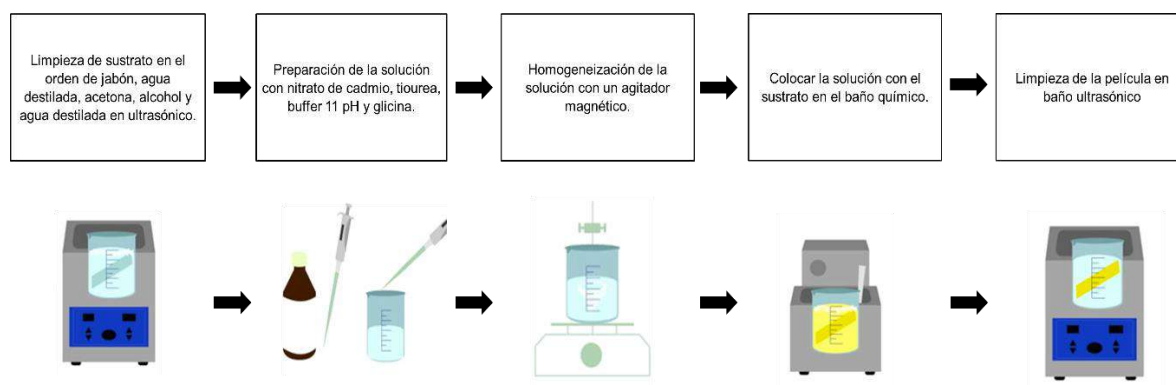


Figura 19. Esquema del procedimiento de la síntesis de CdS.

#### 4.2 Depósito Mediante Síntesis Hidrotérmica de Películas de CdTe

Como se ha mencionado anteriormente el desarrollo de telururo de cadmio se hizo mediante la síntesis hidrotérmica asistida por microondas, por lo cual se usó el siguiente equipo:

- Horno de microondas Synthos 3000, marca Anton Paar (Figura 20 A).
- Recipientes cerámica como se observa en la Figura 20 B).
- Tubos de teflón como se muestra en la Figura 20 C).
- Agitador magnético.
- Pipetas con mínimo 20 mL de volumen, modelo Transferpette de la marca Brand.
- Base de recipientes (Figura 20 E)).

- Termómetro (Figura 20 F)).

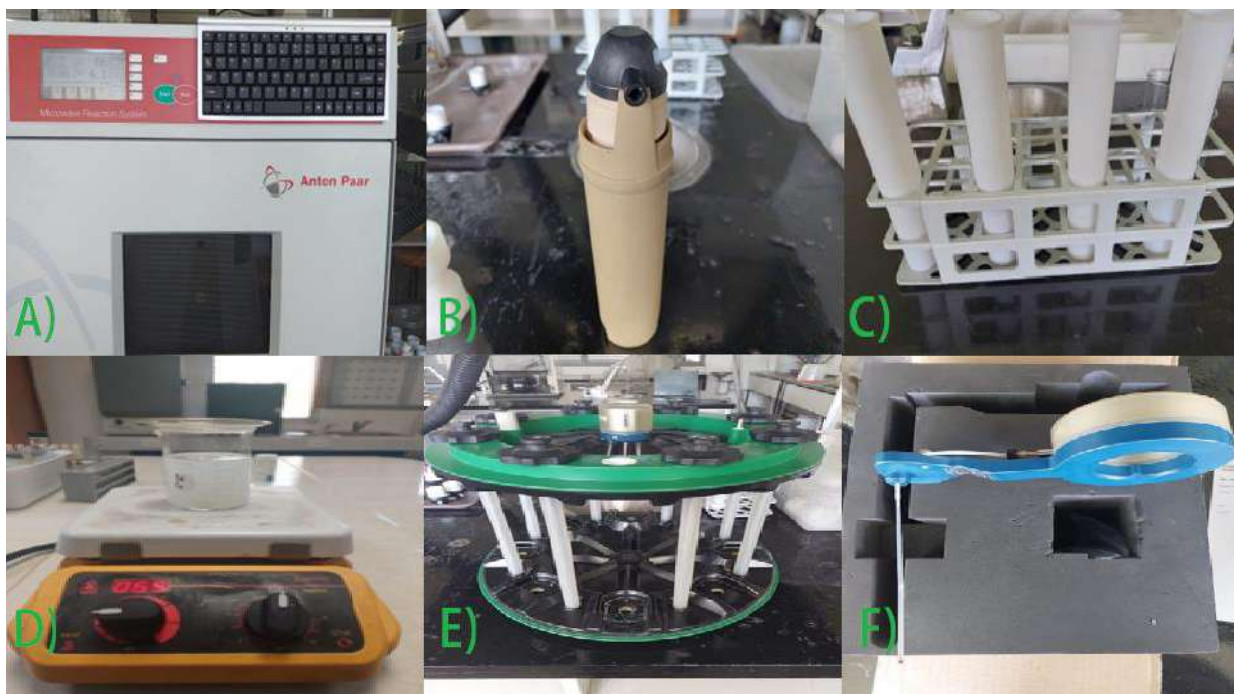


Figura 20. A) Microondas Anton Par, B) Recipiente de cerámica, C) Tubos de teflón, D) agitador magnético, E) Base de recipientes, F) Termómetro.

Material utilizado:

- Acetato de cadmio – ( $C_4H_6CdO_4$ ).
- Tetracloruro de telururo – ( $TeCl_4$ ).
- Dioctil sulfosuccinato sódico (AOT).
- Agua desionizada.
- Etanol.
- Vidrio de porta muestras (25x75x1 mm) de la marca Corning.
- Vidrio con una capa de óxido de estaño impurificado con flúor (FTO).

A diferencia del sulfuro de cadmio que es un material ampliamente estudiado y que ha sido sintetizado por múltiples métodos, el telururo de cadmio es un material recientemente estudiado y de síntesis complicada. El crecimiento de las películas de CdTe, se hizo experimentando sin



tener una referencia muy clara respecto a las condiciones de síntesis como lo fue en el caso del sulfuro de cadmio. Para ello, se variaron los precursores de cadmio (acetato de cadmio y sulfato de cadmio), los disolventes (agua desionizada y etanol), los agentes acomplejantes (dioctil sulfosuccinato sódico y ácido nítrico), la concentración molar (0.05, 0.1 y 0.2 M) y el volumen total de la solución (20 y 60 mL), así como también los sustratos (vidrio y vidrio-FTO).

Después de estudios experimentales preliminares, se encontró que los parámetros óptimos son los siguientes: 20 mL de acetato de cadmio con una concentración molar de 0.1 M, fuente de átomos de cadmio y como fuente de telurio se emplearon 20 mL de tetracloruro de telurio 0.05 M disuelto en etanol para mejorar la solubilidad del  $\text{TeCl}_4$  en la solución. Por último, se agregaron 5 mL de dioctil sulfosuccinato sódico 0.1 M que tiene como función bajar la tensión superficial del líquido.

El procedimiento de síntesis hidrotérmica para el CdTe (Figura 21) consiste en:

1. La preparación de las soluciones mencionadas se llevó a cabo sobre una placa de calentamiento con agitador magnético a una temperatura de 50 °C como se ve en la Figura 20 D). Lo anterior, con el propósito de obtener soluciones homogéneas.
2. Después mezclar las soluciones con las cantidades mencionadas. Las soluciones se colocaron dentro de los tubos de teflón, los cuales se observan en la Figura 20 C).
3. Luego, se colocaron los sustratos en contacto con las soluciones con cuidado. Los tubos de teflón pusieron dentro de los tubos de cerámica (Figura 20 B) y se sellaron de manera apropiada.
4. Después colocar los vasos de cerámica en la base que se observa en Figura 20 E) balanceando su peso (esto para no dañar el equipo) se procedió a colocar el termómetro dentro de uno los vasos de cerámica (tiene un orificio especial para termómetro).
5. Por último, se colocó la tapadera mostrada en la Figura 22 y se dejó en el horno durante 30 minutos a una temperatura de 180 °C.

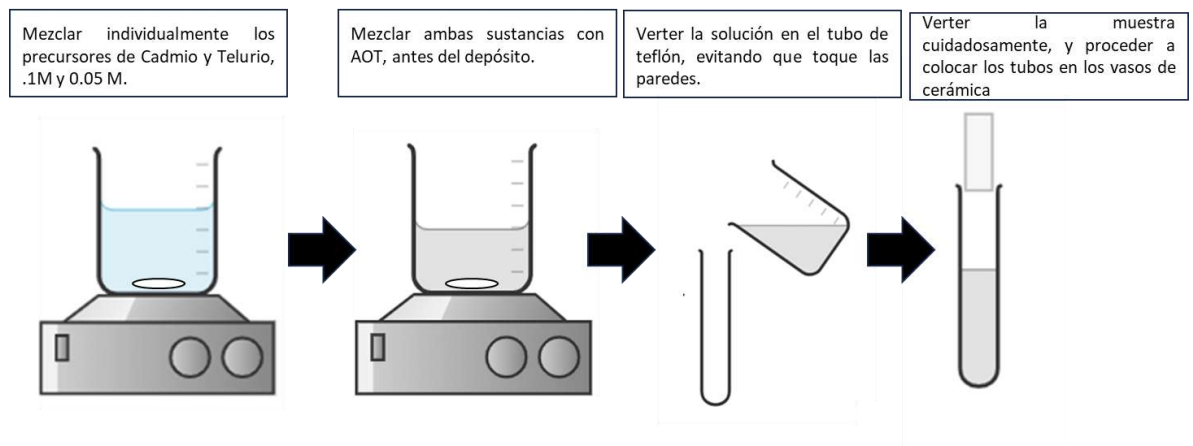


Figura 21. Procedimiento de síntesis de CdTe.

En la Figura 22, se observa el interior del microondas, junto con el recipiente que contiene las muestras, es necesario colocar este con cuidado, ya que es necesario que el recipiente quede de forma correcta.



Figura 22. Taba de la base montada, y colocado en microondas.

La celda solar se diseñó conforme a la estructura propuesta y detallada en la Figura 5. Se procedió a depositar ambos materiales siguiendo el orden especificado. Previo al depósito de la capa de CdTe, se depositó el CdS sobre la capa conductora transparente de FTO. Posteriormente, se llevó a cabo el depósito de una capa metálica (oro) sobre el CdTe. El metal actuará como contacto inferior, encargándose de recolectar los portadores, similar a la función desempeñada por la capa conductora de FTO (óxido de estaño impurificado con flúor).

### 4.3 Depósito por Pulverización Catódica de Contacto Posterior

Para finalizar el proceso de fabricación de la celda solar, se realizó el depósito de los contactos inferiores sobre la película de CdTe. Para ello se utilizó el depósito por pulverización catódica (*Sputtering*, en inglés) con la finalidad de depositar una capa de oro en la parte trasera de la celda. El depósito de los contactos de oro se realizó empleando tiempos de 30 minutos para conseguir un grosor de 100 nm aproximadamente con parámetros previamente caracterizados por el equipo empleado (Figura 23). Es importante mencionar que el gas pulverizador utilizado durante el proceso depósito fue argón.



Figura 23. Celda colocada en el equipo de pulverización catódica.

## CAPÍTULO V

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el capítulo V se presentan y discuten los resultados de la caracterización morfológica, química, estructural y eléctrica de las películas de CdS y CdTe mediante las técnicas de MEB/EDS, DRX, XPS, MFA y método de cuatro puntas. Así mismo, se describen y discuten los resultados de las celdas de CdS/CdTe desarrolladas.

En los siguientes párrafos, se describen y se muestran las imágenes de las películas de CdS y CdTe sintetizadas mediante las técnicas de baño químico y síntesis hidrotérmica, respectivamente. Cabe mencionar que la fabricación de las películas de CdS y CdTe que fueron implementadas para el desarrollo de las celdas solares y para su selección se consideraron los parámetros óptimos de procesamiento, tales como: temperatura, tiempo y formulación de las soluciones empleadas.

En la Figura 24, se pueden observar películas de CdS (amarillo) y CdTe (gris oscuro), en ambas se observa el color característico reportado para los materiales sintetizados.

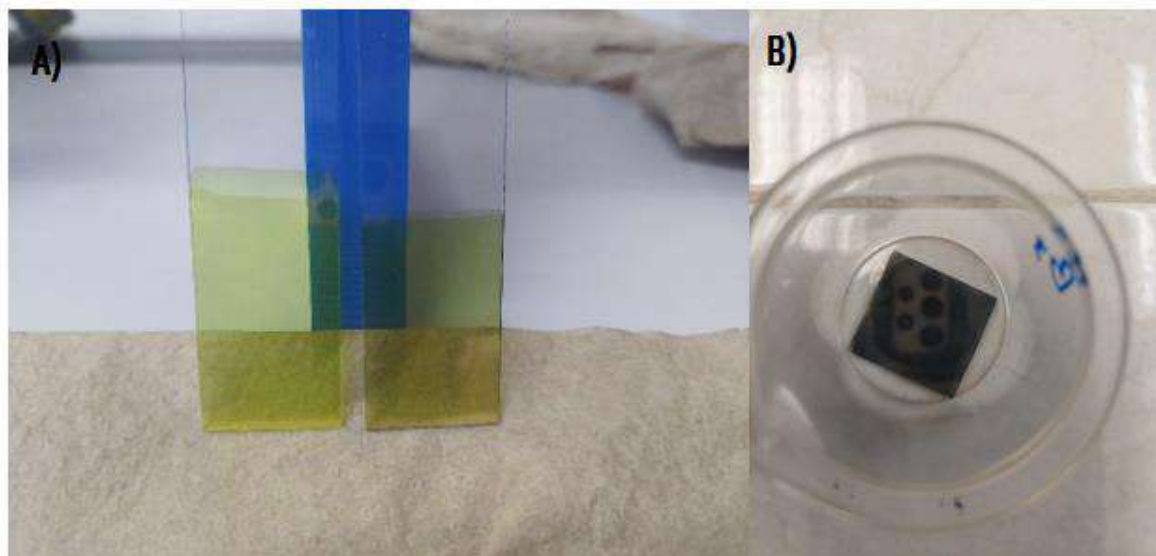


Figura 24. A) CdS y B) CdTe sintetizados con los procedimientos mencionados en el Capítulo

III.

Por otra parte, en la Figura 25 se puede observar la unión entre los dos semiconductores que forman la unión N-P. La Figura 25 A y B permiten distinguir el color amarillo característico del CdS y el gris oscuro del CdTe. Adicionalmente, un análisis detallado (Figura 25 B) mediante microscopía óptica permite confirmar la unión del CdS y CdTe. En la figura 25 C se puede observar la película de CdTe sobre vidrio, con su color gris característico.

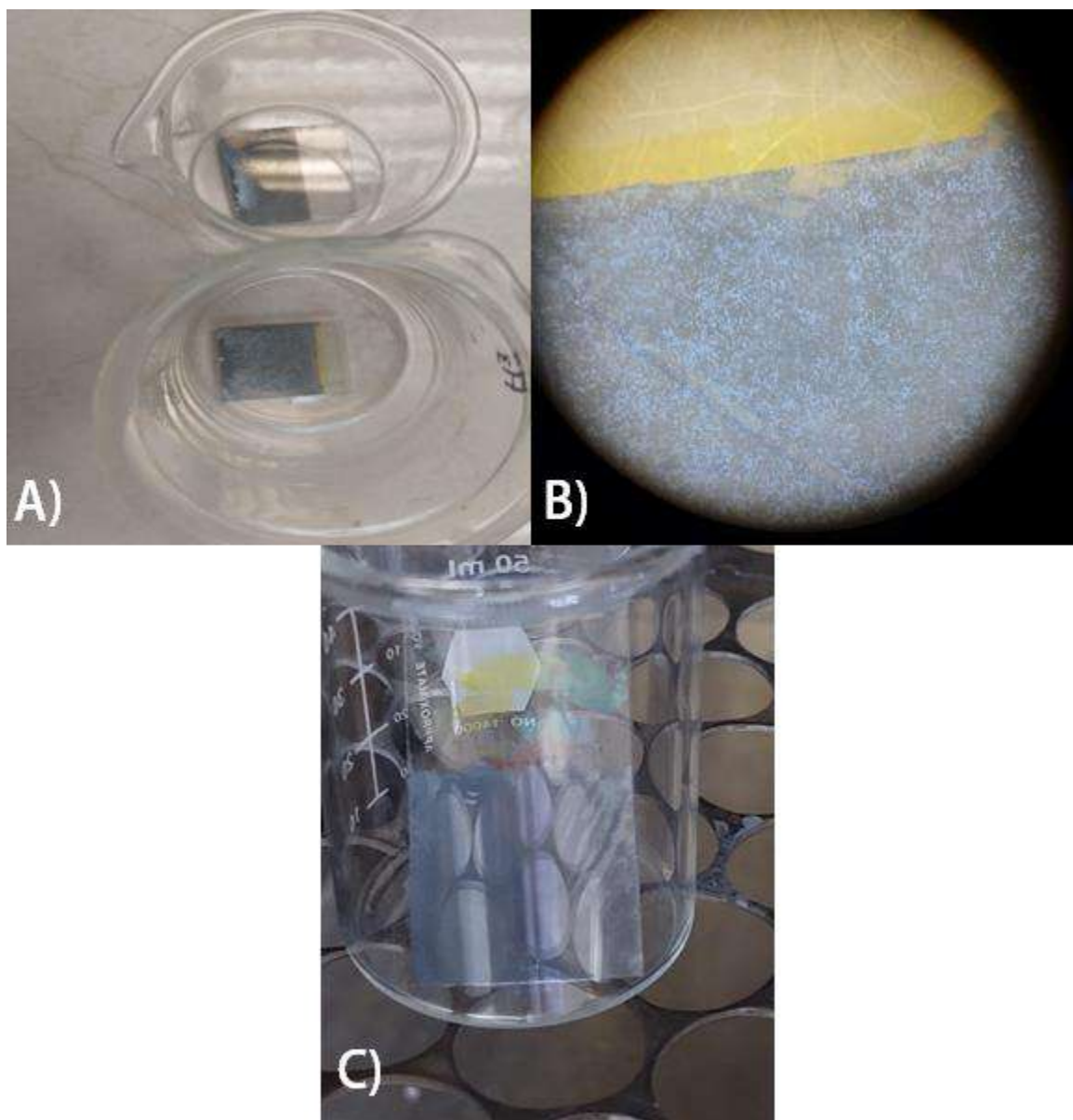


Figura 25. A) CdS/CdTe en FTO, B) Imagen de CdS/CdTe por microscopía óptica, C) CdTe en vidrio.

## 5.1 Caracterización de las películas de CdS

### 5.1.1 Caracterización Microestructural Mediante Microscopía de Barrido Electrónico

En la Figura 26 se pueden observar las características superficiales de una película representativa de CdS, la cual fue tomada con un microscopio electrónico de barrido (SEM) con una resolución de 50 000x. En la imagen, se puede observar que la película CdS está constituida por gránulos con tamaño promedio de 100 nm. Cabe mencionar que en la imagen se muestra una distribución uniforme de los granos y no se observa porosidad aparente. Por lo tanto, se puede asumir que el método de síntesis, los parámetros utilizados, así como, los precursores, el agente acomplejante y buffer funcionan de manera adecuada para el depósito de películas de CdS orientadas al desarrollo de celdas solares.

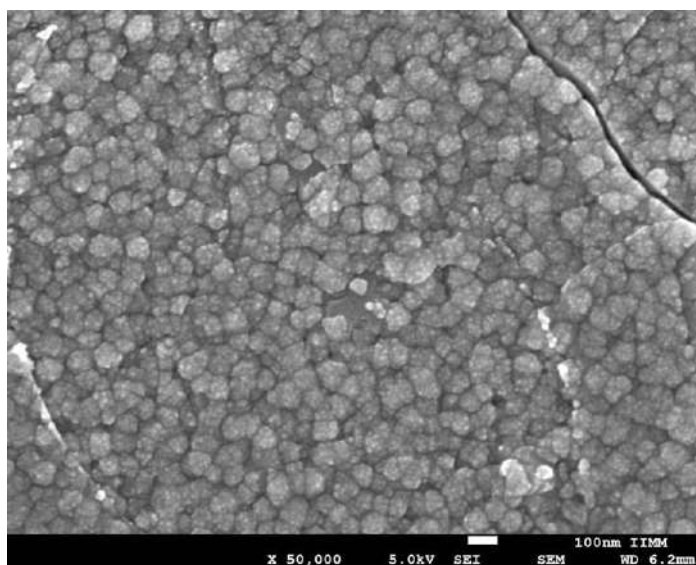


Figura 26. Imagen de SEM de CdS.

### 5.1.2 Caracterización Cristaloquímica Mediante Difracción de Rayos X

El método de difracción por rayos X (DRX) es una técnica de caracterización que sirve para determinar los parámetros o características cristalográficas de un material. En la Figura 27 se tiene un patrón de DRX correspondiente a una muestra de CdS sintetizado con los parámetros mencionados en el Capítulo 3, en la cual se puede ver un pico bien definido y tres picos más débiles. El primero de ellos se encuentra aproximadamente en  $27^\circ$  y que está asociado el pico

de mayor intensidad corresponde a plano (002) de estructura cristalina hexagonal del CdS.

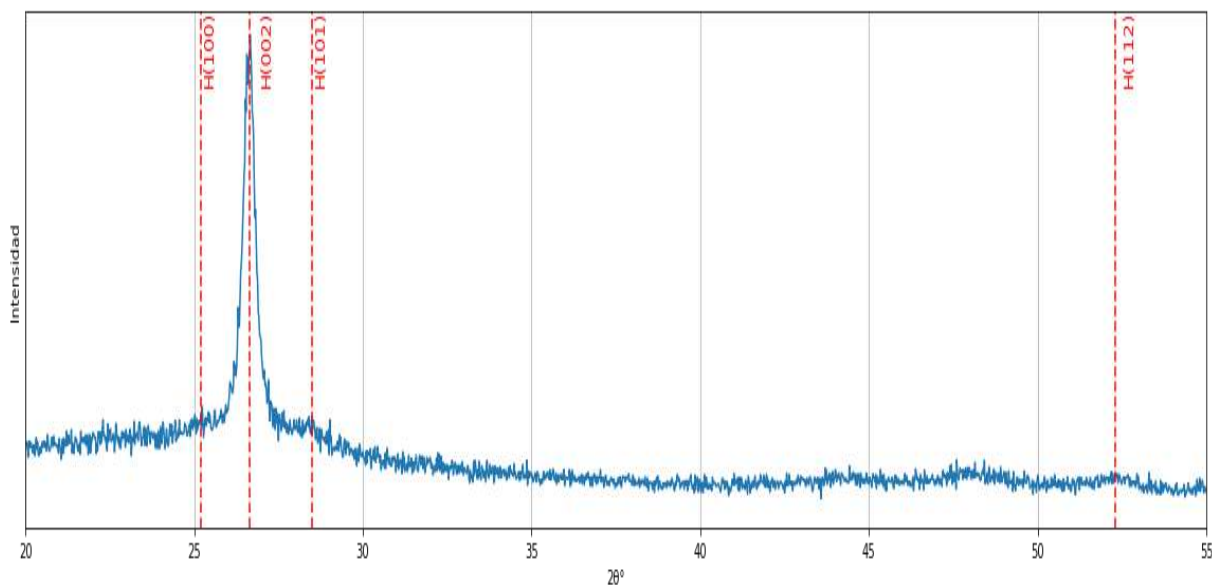


Figura 27. Grafica de DRX de la película de CdS.

Los picos adicionales observados y ubicados aproximadamente en  $25^\circ$ ,  $28^\circ$  y  $52^\circ$  corresponden a la estructura hexagonal del CdS asociadas a los planos cristalográficos (100), (101) y (112), aunque estos tienen una intensidad muy pequeña a comparación del pico asociado al plano (002), es suficiente para corroborar la presencia de la fase cristalina hexagonal del CdS.

Además, con la información que se obtiene de la Figura 27, se puede hacer uso de la ecuación de Scherrer ( $\beta = K\lambda/L\cos \theta$ ) para calcular el tamaño de la cristalita de la película de CdS [71]. Para ello, es necesario conocer la siguiente información: el factor de forma ( $K=0.94$ ), la longitud de onda de la fuente de rayos X ( $\lambda_{Cu} = 0.15406$  nm), el FWHM del pico deseado y el ángulo en radianes, El valor del factor de forma usado es de 0.94 para estructuras cúbicas y hexagonales y  $\lambda$  está asociado al uso de un cátodo de cobre en la emisión de rayos X. Por otra parte, el FWHM para este caso específico del pico de 13.314345 radianes ( $26.62^\circ$ ) es de 0.412715519 y con esto podemos obtener el valor promedio de cristalita de 27.43 nm.

De acuerdo con las cartas cristalográficas (00-002-0563) correspondiente a la estructura cristalina hexagonal del CdS, parámetros de red son  $a=b=4.14$  Å y  $c=6.72$  Å. Además, los picos

observados en los difractogramas obtenidos de la muestra coinciden a los picos principales relacionados con la fase hexagonal del CdS. Resultados que permiten corroborar la presencia de la fase de hexagonal cristalina del CdS en los deposito procesados por baño químico.

### 5.1.3 Caracterización Superficial Mediante Microscopia De Fuerza Atómica

En la Figura 28 se tiene la imagen representativa obtenida mediante microscopia de fuerza atómica de las películas de CdS, la cual permitirá determinar las características superficiales como la rugosidad de la película.

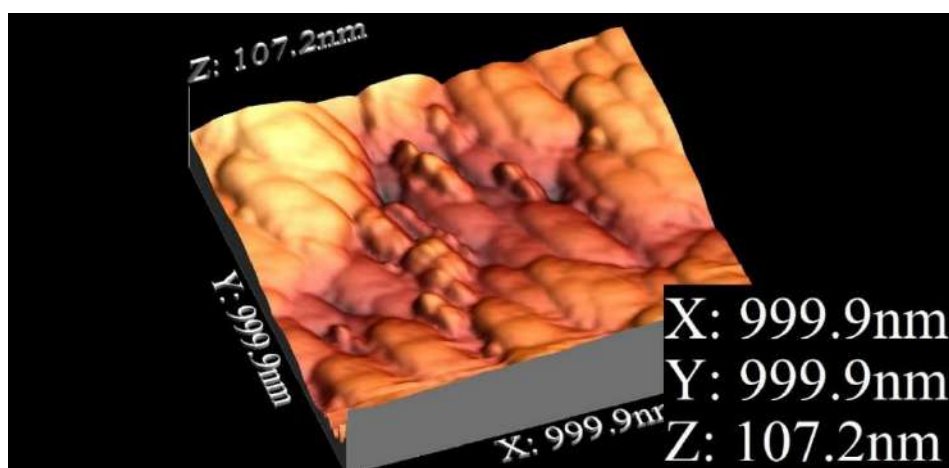


Figura 28. Imagen AFM de la superficie de una película de CdS.

Tabla I. Características superficiales de películas de CdS.

Rugosidad RMS	12.9565
Valor mínimo	0
Valor máximo	107.1636
Pico a pico	107.1636
Rugosidad promedio	9.9641

La información obtenida en la Figura 28 y Tabla I, puede ser útil para saber si la película está distribuida de manera uniforme con respecto al eje z, es decir, la variación de rugosidad que hay en la superficie.

En la Tabla I se presentan las características de rugosidad de la película de CdS, donde se



observa una rugosidad promedio aproximadamente de 9.96 nm. El valor de rugosidad al compararlo con los que se han reportado en la literatura está dentro del margen para películas de CdS [71].

### 5.1.4 Caracterización Química Mediante Espectroscopia de Fotoelectrones Emitidos por Rayos X

La Figura 29 muestra los resultados representativos de la caracterización de XPS de películas de CdS. Los enfoques de XPS permiten diferenciar entre los estados energéticos de Cd y S, así como identificar posibles cambios en la estructura electrónica debido a interacciones con el ambiente.

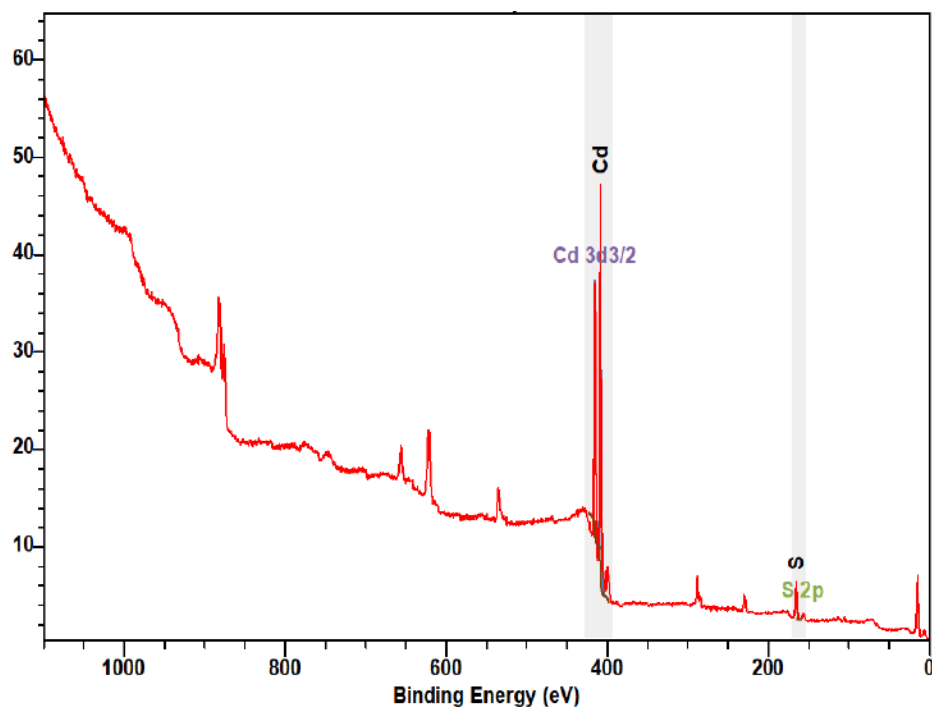


Figura 29. Espectro de XPS en la película de CdS.

Tabla II. Características del XPS de película de CdS.

Elemento	Posición (eV)	FWHM	Área	Concentración (% atómica)	Concentración Total (% atómicos)
S-2p3/2	165.77	2.33	10458.46	33.24	46.63
S-2p1/2	156.95	3.12	2110.95	13.19	
Cd-3d5/2	408.60	1.77	81613.23	29.05	53.37
Cd-3d3/2	415.39	1.50	45540.82	24.32	

La Figura 29 muestra la presencia de los elementos como el cadmio y el azufre, alrededor de los 410 y 160 eV, respectivamente. Esto permite confirmar la presencia de CdS. Cabe mencionar que los demás picos observados son debido a la presencia de elementos como oxígeno y silicio correspondientes al substrato de vidrio. Además, de la Tabla II, donde se muestra el análisis cuantitativo de los elementos involucrados, se puede ver una aproximación de un 50 en % atómico de ambos elementos que conforman el CdS, permitiendo inferir que presenta una composición estequiométrica.

### 5.1.5 Caracterización Óptica Mediante Espectroscopía Ultravioleta Visible

La medición de espectroscopia UV-VIS se hizo en un equipo spectrophotometer Lambda 19 de la marca Perkin Elmer y se hizo un barrido de medición desde los 380-840 nm con el fin de obtener el porcentaje de transmitancia de las dos muestras de CdS depositadas sobre substratos de vidrio Corning y de vidrio con FTO.

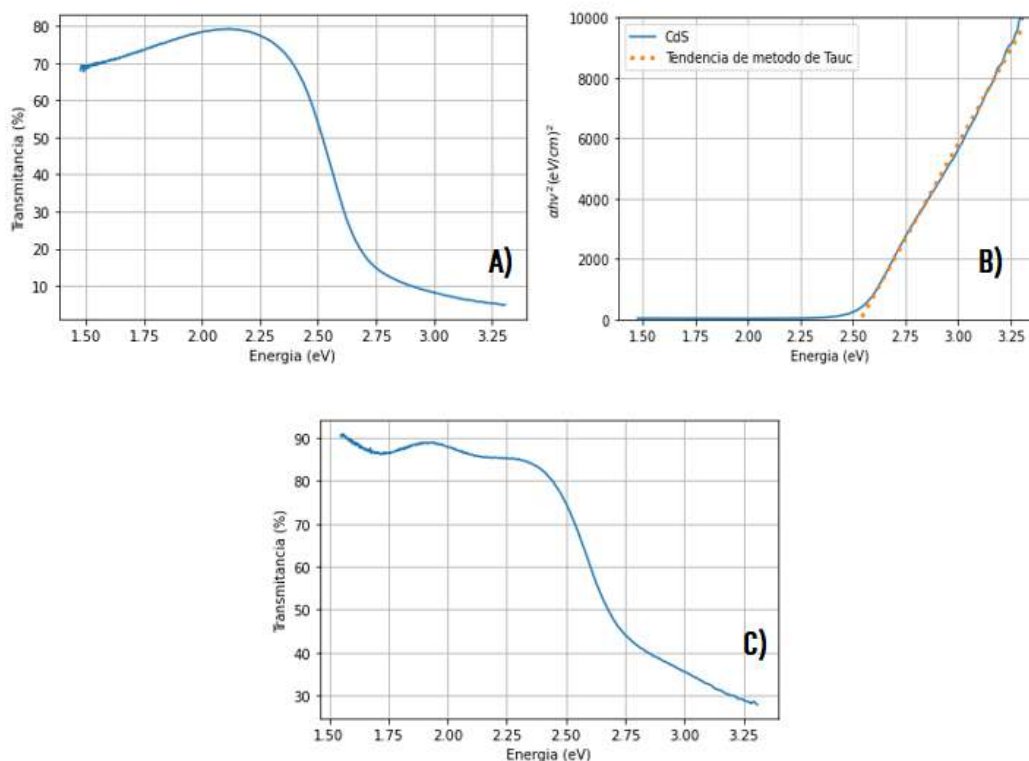


Figura 30. A) Medición de transmitancia de CdS en vidrio, B) Método de Tauc aplicado en caso anterior, C) Medición de transmitancia de CdS en FTO.

La primera imagen es la que se muestra en la Figura 30 A), donde la región relevante a observar sería aproximadamente desde los 1.50 a 2.25 eV. En la región mencionada, se puede observar que el mayor porcentaje de transmitancia que supera el 70% y alcanza un máximo del 80%. En la Figura 30 B) se presenta la gráfica de Tauc [68] y está relacionada con el método gráfico utilizado para calcular el ancho de banda prohibida óptico de las películas delgadas CdS y se obtienen valores muy aproximados. Para las películas de CdS se tienen reportados en la literatura valores del ancho de banda prohibida de 2.40 a 2.52 eV, para el caso de la película de CdS medida se determinó un valor aproximado de 2.51 eV y se encuentra en concordancia con los valores reportados en la literatura para películas de CdS.

La Figura 30 C) corresponde a la medición de transmitancia del CdS depositado sobre el vidrio con FTO, donde se ve un incremento considerable del porcentaje de transmitancia del rango de 1.50 a 2.25 eV en comparación con lo reportado en la Figura 30 A. Una de las razones por la cual pasa esto, es debido a que la película depositada en vidrio Corning tiene CdS por ambos lados y no contribuiría con el efecto fotoeléctrico, debido que se tiene como muestra de referencia. Mientras que, el sustrato de FTO depositado por un lado que se utilizara para la fabricación de la celda. En el rango de 1.50 a 2.25 eV para la película de CdS crecida sobre FTO, se observa un porcentaje de transmitancia mayor al 80%, con esto podemos corroborar el uso de las películas de sulfuro de cadmio como material de ventana en celdas solares de segunda generación.

#### **5.1.6 Caracterización Eléctrica Mediante Resistividad**

Por medio del método de 4 puntas o también conocido como Van Der Pauw, se calculó la resistencia de hoja de las películas de CdS. Se utilizó una estación de 4 puntas como se observa en la Figura 31 junto con el equipo Keithley serie 4200-SCS, el cual permite hacer barridos de voltaje entre dos puntas y tomar la medición de la corriente entre las otras 2 puntas restantes de forma correcta y sencilla.

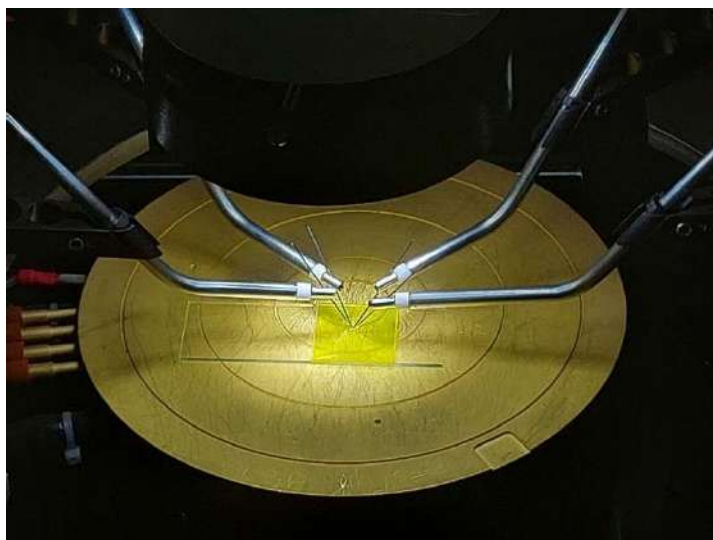


Figura 31. Película de CdS montada en el equipo de 4 puntas.

En la Figura 32 A) se presentan las curvas características de I-V de película de CdS en condiciones de oscuridad. En la gráfica observamos que en esta tiende a una línea en paralelo con el eje X, la razón por la que pasa esto es que la resistividad de la película es tan alta que el equipo necesita usar una mayor cantidad de potencia. Por cuestiones de seguridad no se decidió incrementar los parámetros iniciales de la caracterización. Sin embargo, el equipo da una aproximación de la resistencia de hoja y aunque en la gráfica no se muestre una función de grado 1 como indica el método de Van Der Pauw [72] es posible generar un valor aproximado con el equipo de  $116 \text{ M}\Omega$ . Para el caso de la Figura 32 B), los parámetros de medición de la película de CdS y la posición de puntas es igual que en el caso anterior, solo que esta ocasión se hizo con iluminación. La comparación de los resultados de las curvas características I-V exhiben un gran cambio, principalmente porque la gráfica muestra una tendencia lineal. La resistencia de hoja medidas en condiciones de iluminación es de aproximadamente  $5.8 \text{ M}\Omega$  (Figura 35 B).

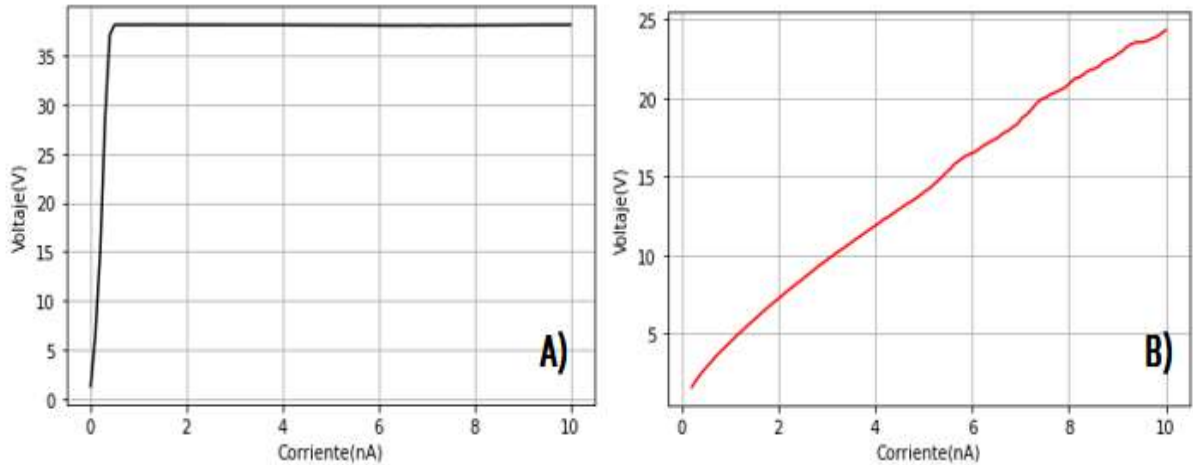


Figura 32. A) Resistencia de hoja de CdS sin luz incidente, B) Misma medición, pero con luz incidente.

El cambio de resistividad entre el grafico 32 A) y 32 B), se debe a una de las propiedades o fenómenos que tiene el sulfuro de cadmio de fotoconductividad que hace que la corriente sea mayor cuando hay luz incidente en esta o dicho de otra forma que la resistencia sea menor con luz incidente. Esta propiedad es de gran utilidad para el material o semiconductor de capa ventana en una celda solar, o incluso en dispositivos optoelectrónicos, ya que facilita la movilidad de portadores de carga.

## 5.2 Caracterizaciones microestructural y óptica de CdTe/CdS

### 5.2.1 Caracterización Microestructural Mediante Microscopía de Barrido Electrónico

En la Figura 33 se observan dos imágenes SEM obtenidas a la misma magnificación y ambas imágenes son de CdTe, una depositado en FTO y otro sobre vidrio Corning respectivamente. Las condiciones de depósito fueron las mismas en ambas muestras.

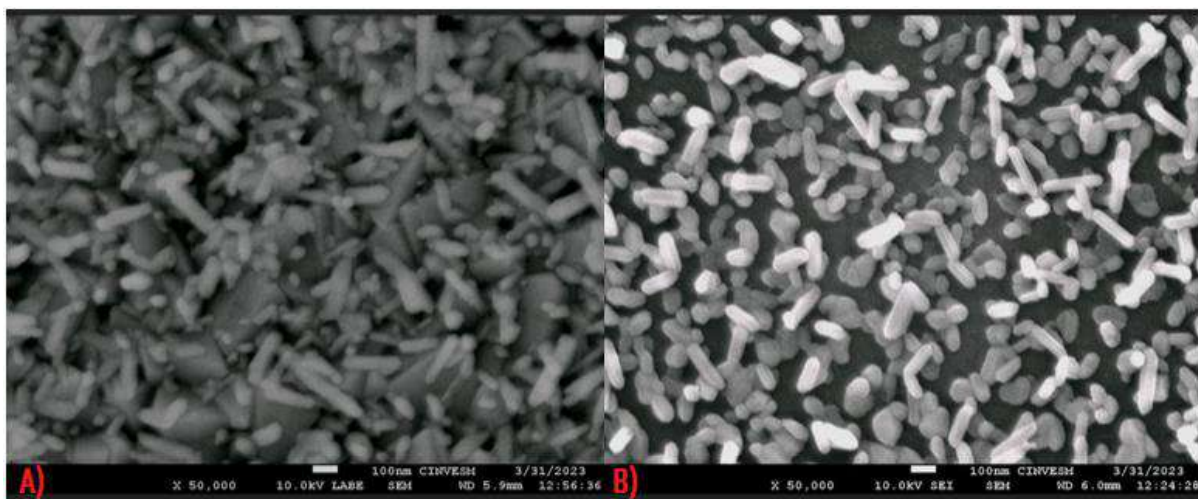


Figura 33. Imagen SEM de CdTe depositado A) sobre FTO, B) sobre vidrio.

Como se había mencionado brevemente en el capítulo anterior, en la parte del depósito de CdTe, se había comentado que el sustrato afecta el depósito, por lo menos así se observaba a simple vista al comparar las películas. Sin embargo, con la Figura 33 se puede corroborar que hay una diferencia significativa entre los dos depósitos variando el tipo de sustrato. En el primero corresponde al depósito sobre sustrato de vidrio con FTO y se observan dos tipos de estructuras, unas con forma piramidal y es un tipo de estructura comúnmente reportada para el CdTe obtenido por otros métodos [73]. Además, se pueden visualizar columnas alargadas con diámetros menores a 100 nm. Por otro lado, en la Figura 33 B), solamente se observan estructuras columnares, con tamaño similar al que se observa de la imagen asociada con la película de CdS depositada sobre sustratos de vidrio con FTO.

### 5.2.2 Caracterización Cristaloquímica Mediante Difracción de Rayos X

En el caso de DRX, se caracterizaron dos muestras representativas de FTO/CdS/CdTe y de vidrio Corning/CdS/CdTe, a diferencia de las caracterizaciones de CdS donde simplemente se midió sobre vidrio Corning, exceptuando el UV-VIS.

En la Figura 34 se presenta el patrón de difracción de rayos X de la muestra de FTO/CdS/CdTe, donde se observan varios picos relacionados con el CdTe y algunos que se identificaron en las películas de CdTe depositado sobre vidrio (Figura 35). Sin embargo, con respecto al resultado de DRX de la capa CdS y los resultados obtenidos de la muestra de FTO/CdS/CdTe se observar

que mantiene el mismo pico alrededor de los  $27^\circ$  relacionado con el CdS. Además, se observan nuevos picos atribuibles al CdS que pueden indicar un aumento en el grado de cristalinidad del CdS depositado, ya que se observan nuevos picos. Con respecto al CdTe, se observan múltiples picos asociados a la fase hexagonal del CdTe. Además, el patrón de DRX para la muestra de FTO/CdS/CdTe presenta una forma bastante parecida a lo reportado en la literatura [74] para estructuras similares crecidas por otros métodos de depósito.

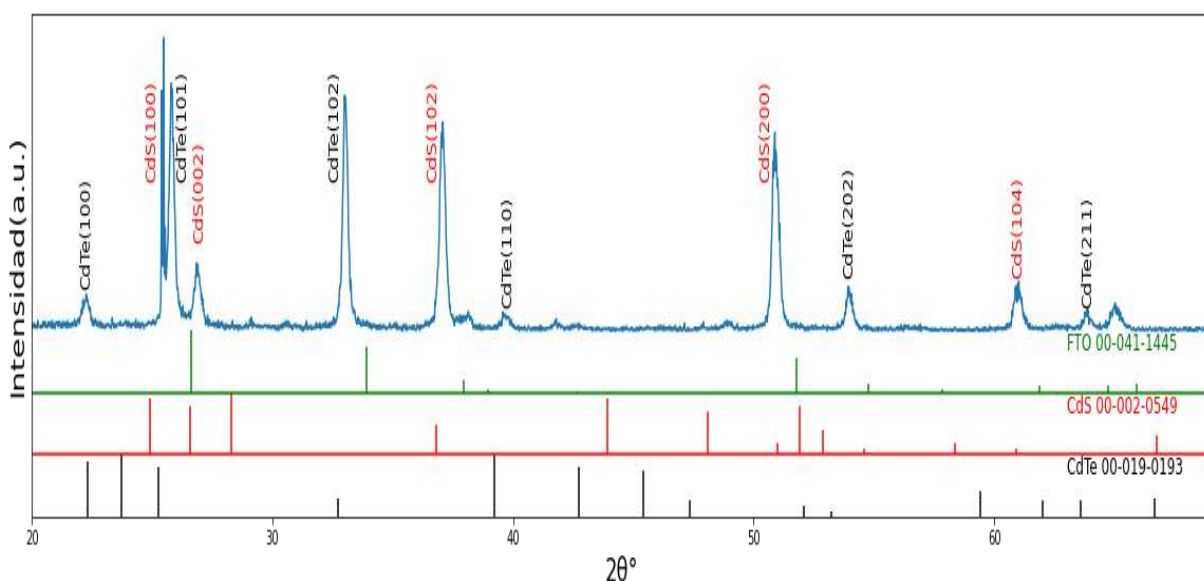


Figura 34. DRX de FTO/CdS/CdTe.

En el patrón de DRX de la Figura 34, se muestran algunos picos que no corresponden al CdS y CdTe, es importante mencionar que estos picos están asociados a los planos cristalográficos del conductor óxido transparente (FTO) que actúa como contacto y forma parte del sustrato utilizado para la fabricación de las celdas.

De acuerdo con las cartas cristalográficas, la estructura cristalina hexagonal del CdTe (00-019-0193) presenta los siguientes parámetros de red:  $a=b=4.58 \text{ \AA}$ ,  $c=7.50 \text{ \AA}$ . Mientras que el CdS hexagonal con la carta cristalográfica (00-002-0549) usada tiene los siguientes parámetros de red:  $a=b=4.14 \text{ \AA}$ ,  $c=6.72 \text{ \AA}$ . Posteriormente al depósito de CdTe y conforme a los planos cristalográficos principales y observados en las Figura 34 y Figura 27, se puede establecer que el CdS conserva su estructura hexagonal y que al ser expuesto a un proceso de síntesis adicional

no se generan cambios significativos, lo cual garantiza la estabilidad de la fase CdS durante el proceso de fabricación. Por otra parte, los picos cristalográficos en el patrón de DRX pertenecientes al CdTe obtenido por síntesis hidrotérmica están relacionado con la fase hexagonal, similar a la estructura identificada para el CdS obtenido por baño químico.

### 5.2.3 Caracterización Óptica Mediante Espectroscopía Ultravioleta Visible

La medición de las propiedades ópticas de CdTe empleando la técnica de espectroscopia UV-VIS se realizó bajo las mismas condiciones que el CdS (Ver Sección 5.1.5) y los resultados se muestran en los siguientes párrafos. La Figura 35 muestra los resultados de transmitancia para el FTO/CdS y FTO/CdS/CdTe.

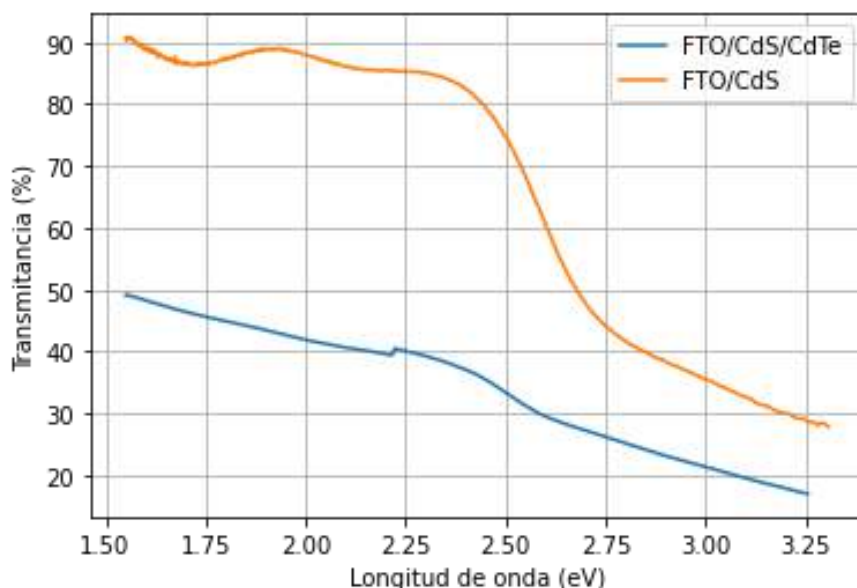


Figura 35. Gráfico UV-VIS de FTO/CdS/CdTe y FTO/CdS

De la Figura 35 se observa una diferencia de transmitancia entre las muestras de FTO/CdS y FTO/CdS/CdTe, donde la primera muestra con CdS presenta una mayor transmitancia comparada con la muestra que tiene las capas de CdS y CdTe. Esto permite concluir en que un porcentaje de luz pasaba a través de la muestra de FTO/CdS ahora está siendo retenida o absorbida por parte de la película de CdTe y es de esperarse que los fotones retenidos participen en el proceso fotovoltaico, haciendo que haya una generación de fotocorriente a partir de un par electrón-hueco en la región de agotamiento a partir de los fotones absorbidos en la celda



propuesta con la estructura FTO/CdS/CdTe/Au. Sin embargo, es necesario corroborar lo anterior mediante la caracterización de las celdas fabricadas.

### 5.3 Caracterización de la Celda Solar con estructura FTO/CdS/CdTe/Au.

Por último, se presentan los resultados de la caracterización de la celda propuesta con la estructura FTO/CdS/CdTe/Au, es importante mencionar que los contactos de oro se depositaron mediante la técnica de pulverización catódica. Para determinar los parámetros de la celda propuesta, se empleó un equipo Keithley y un simulador solar (Figura 36) y las mediciones se realizaron bajo condiciones estándar: irradiancia de  $1000 \text{ W / m}^2$ , distribución espectral de AM 1.5, incidencia normal y temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .



Figura 36. Simulador solar.

La Figura 37 corresponde a una de las celdas caracterizadas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au, donde se observan los contactos empleados para la caracterización de la celda solar.

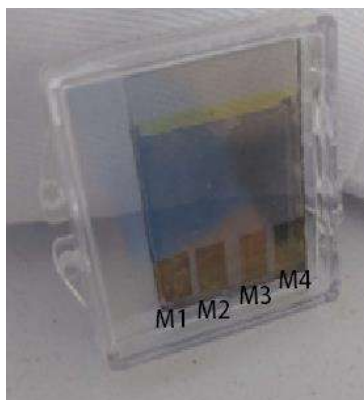


Figura 37. FTO/CdS/CdTe/Au con contraelectrodos colocados en cuatro posiciones diferentes.

En la Figura 38 se muestran las curvas características de las celdas propuestas con la estructura FTO/CdS/CdTe/Au y variando la posición de los contraelectrodos con dimensiones de 0.3 cm \* 0.3 cm y una separación aproximada de 0.1 cm entre ellos.

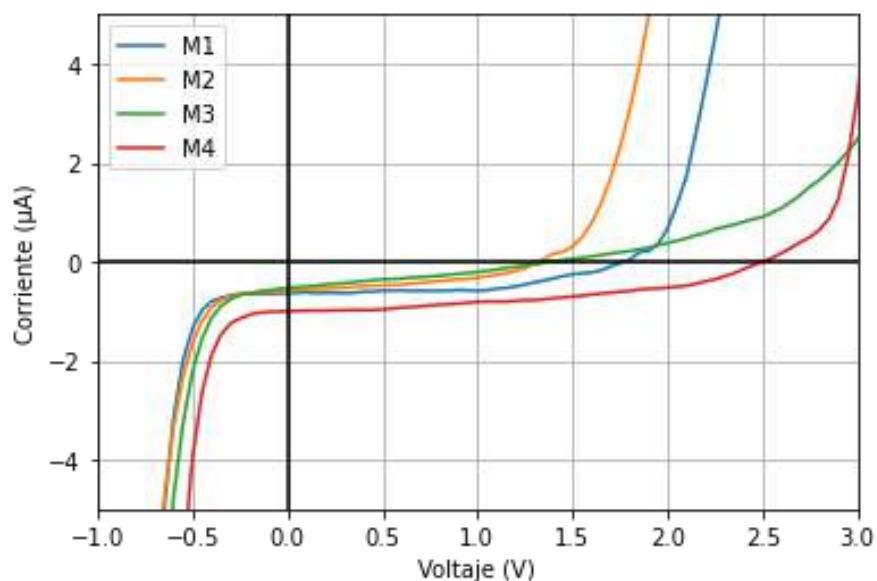


Figura 38. Curvas características de I vs V de las celdas propuestas con la estructura FTO/CdS/CdTe/Au y variando la posición del contraelectrodo.

De la Figura 38 que muestra los resultados de las curvas características de I vs. V de las celdas propuestas con la estructura FTO/CdS/CdTe/Au y variando la posición de los contraelectrodos, permite observar cambios significativos en la respuesta de corriente contra voltaje cuando se varia la posición de los contraelectrodos. Adicionalmente, es posible inferir que las curvas

coinciden con las curvas características de I-V de una celda solar. De las condiciones probadas se puede inferir que empleando el fotoelectrodo con la posición M2 se logra la respuesta más débil, en las curvas I-V, mientras que la mejor respuesta se alcanza con el fotoelectrodo con la posición M4. Por lo tanto, se espera que sea la configuración que presente los mejores parámetros de celda y por ende la mayor eficiencia.

La Figura 39 corresponde a las curvas de potencia contra voltaje de las celdas propuestas con la estructura FTO/CdS/CdTe/Au, a partir de dichas curvas se pueden obtener valores de los parámetros principales de las celdas propuestas, tales como: la corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ), el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), la corriente máxima ( $I_{max}$ ) y el voltaje máximo ( $V_{max}$ ).

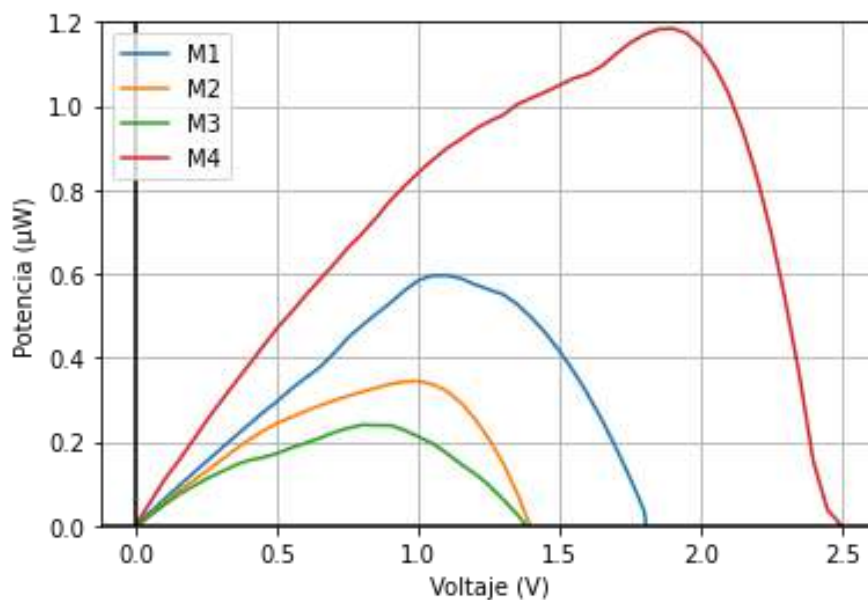


Figura 39. Gráfica de Potencia vs Voltaje.

De la Figura 39, se observa que la respuesta obtenida con el contacto M4 es la que más potencia genera, por lo cual, se infiere que es la que tendrá mayor eficiencia y para corroborarlo cuantitativamente se deberá calculará la eficiencia y el factor de llenado (F.F). Adicionalmente, se llevó a cabo un tratamiento térmico a 100 °C por una hora para mejorar las características eléctricas de la celda y se evaluaron nuevamente los parámetros principales de la celda.

De los resultados anteriores, se determinaron los principales parámetros eléctricos de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au variando la posición del contraelectrodo y sin tratamiento

térmico, mismos que se describen en la Tabla III.

Tabla III. Parámetros principales de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au variando la posición del contraelectrodo.

Muestra	Vmax (V)	Imax (μA)	Voc (V)	Isc (μA)	F.F. (%)	Eficiencia (%)
M1	1.05	0.595	1.75	0.610	58.51	0.62
M2	1.00	0.308	1.40	0.601	36.62	0.31
M3	0.80	0.480	1.40	0.500	39.83	0.28
M4	2.50	0.365	2.60	0.390	88.39	0.91

Las Figuras 40 y 41 corresponden a las curvas de potencia contra voltaje de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au y la posición del contraelectrodo M4, con y sin tratamiento térmico, respectivamente.

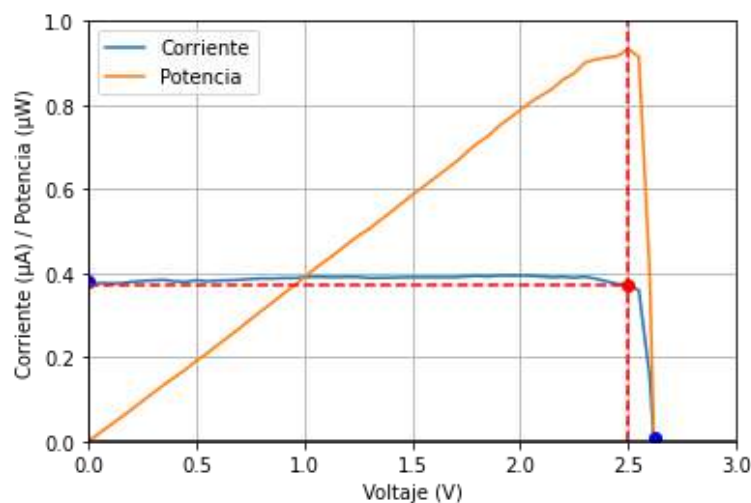


Figura 40. Grafica de potencia y corriente vs Voltaje representativa de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au y la posición del contraelectrodo M4 sin tratamiento térmico.

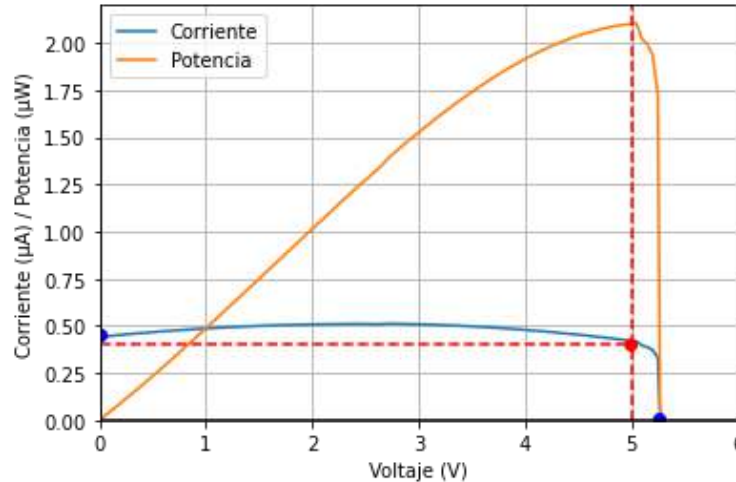


Figura 41. Grafica de potencia y corriente vs Voltaje representativa de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au y la posición del contraelectrodo M4 con tratamiento térmico.

Considerando los valores de los parámetros determinados para cada celda, con y sin tratamiento térmico de las Figuras 40 y 41, respectivamente; se puede visualizar que existe una mejora significativa en la potencia de 0.91 a 2  $\mu\text{W}$  al realizar el tratamiento térmico a 100 °C por una hora. También, se observan cambios en los parámetros principales calculados para las celdas con y sin tratamiento térmico, mismo que se describen en la Tabla IV.

Tabla IV. Parámetros principales de las celdas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au con la posición M4 del contraelectrodo con y sin tratamiento térmico.

Muestra	Vmax (V)	I <sub>max</sub> (µA)	Voc (V)	I <sub>sc</sub> (µA)	F.F. (%)	Eficiencia (%)
M4 sin TT	2.5	0.365	2.6	0.39	88	0.91
M4 con TT	5.0	0.400	5.2	0.45	85	2.00

\* TT: tratamiento térmico.

De acuerdo con los resultados del presente trabajo de investigación se establece que las celdas propuestas con estructura FTO/CdS/CdTe/Au pueden operar adecuadamente bajo las condiciones consideradas en su diseño y fabricación y que las condiciones más adecuadas para su mayor eficiencia bajo experimentales son las siguientes:

Crecimiento de capa de ventana de CdS bajo las siguientes condiciones: Proceso con duración de 24 minutos a 70 °C mediante depósito por baño químico. Utilizando los siguientes precursores; 4 mL de nitrato de cadmio con una concentración molar de 0.1 M, 5 mL de glicina

(agente acomplejante) a 0.1 M, 2 mL de buffer pH 11 (Cloruro e Hidróxido de amonio en relación 1:1), 5 mL de tiourea a 1M

Crecimiento de capa de absorbente CdTe mediante métodos hidrotérmicos bajo las condiciones siguientes: Con una duración de 30 minutos a una temperatura de 180 °C por síntesis hidrotérmica asistida por microondas. Utilizando los siguientes precursores; 20 mL de acetato de cadmio con una concentración molar de 0.1 M, 20 mL de tetracloruro de telurio 0.05 M disuelto en etanol para mejorar la solubilidad del  $\text{TeCl}_4$  en la solución, 5 mL de dioctil sulfosuccinato sódico 0.1M. Tratamiento térmico a 100°C por una hora.

## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES

El crecimiento de las películas de CdS empleando depósito por baño químico permitió la formación de depósitos de forma homogénea y con las siguientes características: porcentaje de transmitancia siempre mayor a 70% en el intervalo de 550 a 800 nm, el cual es el intervalo en donde se tiene mayor eficiencia una celda basada en el compuesto CdTe. En cuanto a la estructura del CdS, se determinó mediante difracción de rayos-X la fase hexagonal con orientación preferencial en el plano (002). Así mismo, los resultados de SEM muestran que el depósito se hizo de manera uniforme a lo largo de la película, lo cual se corroboró con la caracterización mediante AFM. Por otra parte, la composición atómica del CdS obtenida por XPS muestra una relación 1:1 de los elementos Cd y S, correspondiente a su composición estequiométrica y mediante DRX se determinó la obtención de una única fase que corresponde al CdS.

En cuanto al depósito de CdTe, se puede mencionar que fue depositado exitosamente sobre CdS empleando la técnica de síntesis hidrotérmica asistida por microondas, mediante el procedimiento y parámetros propuestos (Capítulo 4). Con el procedimiento propuesto se logró adherir el CdTe al CdS sin que se desprendiera. Adicionalmente, se observó que el CdTe se deposita de manera más efectiva en las películas sobre sustratos de FTO que en aquellas donde se empleó vidrio sin FTO. Las películas de CdTe obtenidas mediante la técnica de síntesis hidrotérmica asistida por microondas, corresponden a una mezcla de estructuras piramidales y barras de CdTe con estructura cristalina hexagonal y con orientación preferencial en el plano cristalográfico (002).

Se logró la fabricación de celdas solares con estructura FTO/CdS/CdTe/Au empleando las técnicas de baño químico y síntesis hidrotérmica asistida por microondas para el crecimiento de las capas de ventana (CdS) y absorbentes (CdTe), respectivamente. Logrando satisfactoriamente la formación de las uniones N-P y su aplicación adecuada en las celdas solares con estructura FTO/CdS/CdTe/Au propuestas, obteniendo los siguientes parámetros de celda: voltaje máximo ( $V_{max}$ ) de 5.0 V, corriente máxima ( $I_{max}$ ) de 0.4  $\mu$ A, voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) de 5.2,

corriente de corto circuito de ( $I_{sc}$ ) de  $0.45 \mu A$ , factor de llenado de 85 % y eficiencia de 2%. Se observó que la aplicación de tratamiento térmico post depósito a las películas que forman la unión N-P mejora la eficiencia de la celda solar. En general se puede concluir que la metodología propuesta en este proyecto de investigación para llevar a cabo la preparación de las celdas solares con estructura FTO/CdS/CdTe/Au arrojó resultados interesantes y se considera exitosa.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Parida, B., Iniyar, S., & Goic, R. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3), 1625-1636.
- [2] Granda-Gutiérrez, E. E., Orta, O. A., Díaz-Guillén, J. C., Jimenez, M. A., Osorio, M., & González, M. A. (2013). Modelado y simulación de celdas y paneles solares. In *Congreso Internacional de Ingeniería Electrónica* (Vol. 35, pp. 17-22).
- [3] Kumar, S., Khan, Z. H., Khan, M. M., & Husain, M. (2005). Studies on thin films of lead chalcogenides. *Current Applied Physics*, 5(6), 561-566.
- [4] Britt, J., & Ferekides, C. (1993). Thin-film CdS/CdTe solar cell with 15.8% efficiency. *Applied physics letters*, 62(22), 2851-2852.
- [5] Rabenok, E. V., Gapanovich, M. V., Bocharova, S. I., Meteleva-Fischer, Y., Bocharov, K. V., & Novikov, G. F. (2013). Effect of annealing on the loss kinetics of charge carriers in CdS films. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 5(1), 011206.
- [6] G. Hodes, "Chemical Solution Deposition of Semiconductor Films," Marcel Dekker Inc., New York, 2002.
- [7] Niesen, T. P., & De Guire, M. R. (2001). Deposition of ceramic thin films at low temperatures from aqueous solutions. *Journal of Electroceramics*, Vol. 6, No. 3, 2001
- [8] Gouda, L., Aniruddha, Y. R., & Ramasesha, S. K. (2012). Correlation between the solution chemistry to observed properties of CdTe thin films prepared by CBD method. *Journal of Modern Physics*, 3(12), 1870.
- [9] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2007). *Materials science and engineering: an introduction* (Vol. 7, pp. 665-715). New York: John Wiley & Sons.
- [10] Castro, I. D. J. S., Oyama, A. B. L., & González, E. R. (2021). La termoelectricidad: convirtiendo el calor en electricidad. *Revista Digital Universitaria*, 22(4).
- [11] Neamen, D. A. (2003). *Semiconductor physics and devices: basic principles*.

McGraw-hill.

- [12] Schmickler, W., & Santos, E. (2010). Interfacial electrochemistry. Springer Science & Business Media.
- [13] Kasap, S. O. (2013). Optoelectronics and photonics. Pearson Education UK.
- [14] Filippin, F. A., & Fasoli, H. J. (2021, April). Sistemas fotofísico y fotoquímico con semiconductores para la conversión de energía solar. In Anales (Asociación Física Argentina) (Vol. 32, No. 1, pp. 22-31). Asociación Física Argentina.
- [15] Bardia, R. B. (1999). CIRCUITOS Y DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS. FUNDAMENTOS DE ELECTRÓNICA (PT) (Vol. 5). Univ. Politèc. de Catalunya.
- [16] Tyagi, M. S. (2008). Introduction to semiconductor materials and devices. John Wiley & Sons.
- [17] Pierret, R. F. (1996). Semiconductor device fundamentals. Pearson Education India.
- [18] Molina-Ruiz, H. D., Pérez-Cortez, O., González-Vidal, J. L., & Gómez-Pozos, H. Fabricación y caracterización eléctrica de diodos de unión pn de arseniuro de galio Fabrication and electrical characterization of gallium arsenide pn junction diodes.
- [19] Fraas, L. M. (2014). Low-cost solar electric power (p. 97). New York: Springer.
- [20] Bosio, A., Pasini, S., & Romeo, N. (2020). The history of photovoltaics with emphasis on CdTe solar cells and modules. Coatings, 10(4), 344.
- [21] Hegedus, S., & Luque, A. (Eds.). (2011). Handbook of photovoltaic science and engineering. John Wiley & Sons.
- [22] National Renewable Energy Laboratory. [En línea, última vez: 10 de enero de 2023] disponible en: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- [23] Dimroth, F., Tibbits, T. N., Niemeyer, M., Predan, F., Beutel, P., Karcher, C., ... & Signamarcheix, T. (2015). Four-junction wafer-bonded concentrator solar cells. IEEE Journal of Photovoltaics, 6(1), 343-349.
- [24] Portela Carlosena, D. (2015). Síntesis y caracterización de materiales

fotovoltaicos para paneles solares de bajo coste y alta eficiencia.

- [25] Noman, M. A. A., Abden, M. J., & Islam, M. A. (2018, February). Germanium telluride absorber layer, a proposal for low illumination photovoltaic application using AMPS 1D. In 2018 International Conference on Computer, Communication, Chemical, Material and Electronic Engineering (IC4ME2) (pp. 1-5). IEEE.
- [26] Zheng, X., Liu, Y., Yang, Y., Song, Y., Deng, P., Li, J., ... & Tian, X. (2023). Recent Advances in Cadmium Sulfide-Based Photocatalysts for Photocatalytic Hydrogen Evolution. *Renewables*, 1-18.
- [27] Khimani, A. J., Chaki, S. H., Malek, T. J., Tailor, J. P., Chauhan, S. M., & Deshpande, M. P. (2018). Cadmium sulphide (CdS) thin films deposited by chemical bath deposition (CBD) and dip coating techniques—a comparative study. *Materials Research Express*, 5(3), 036406.
- [28] Senthil, K., Mangalaraj, D., & Narayandass, S. K. (2001). Structural and optical properties of CdS thin films. *Applied surface science*, 169, 476-479.
- [29] Ortuño-López, M. B., Sotelo-Lerma, M., Mendoza-Galván, A., & Ramirez-Bon, R. J. T. S. F. (2004). Chemically deposited CdS films in an ammonia-free cadmium–sodium citrate system. *Thin Solid Films*, 457(2), 278-284.
- [30] Major, J. D. (2016). Grain boundaries in CdTe thin film solar cells: a review. *Semiconductor Science and Technology*, 31(9), 093001.
- [31] Hosseini, S. M. (2008). Optical properties of cadmium telluride in zinc-blende and wurzite structure. *Physica B: Condensed Matter*, 403(10-11), 1907-1915.
- [32] Anyalebechi, P. (2006). *Essentials of materials science and engineering*. Padnos College of Engineering and Computing, Grand Rapids, MI, USA.
- [33] Cahn, R. W. (2001). *The coming of materials science*. New York.
- [34] White, R. J., Luque, R., Budarin, V. L., Clark, J. H., & Macquarrie, D. J. (2009). Supported metal nanoparticles on porous materials. *Methods and applications*. *Chemical Society Reviews*, 38(2), 481-494.
- [35] Ye, X. R., Jia, D. Z., Yu, J. Q., Xin, X. Q., & Xue, Z. (1999). One-Step Solid-State Reactions at Ambient Temperatures—A Novel Approach to Nanocrystal Synthesis. *Advanced Materials*, 11(11), 941-942.

- [36] Ghorbani, H. R., Mehr, F. P., Pazoki, H., & Rahmani, B. M. (2015). Synthesis of ZnO nanoparticles by precipitation method. *Orient. J. Chem*, 31(2), 1219-1221.
- [37] Kappis, K., Papadopoulos, C., Papavasiliou, J., Vakros, J., Georgiou, Y., Deligiannakis, Y., & Avgouropoulos, G. (2019). Tuning the catalytic properties of copper-promoted nanoceria via a hydrothermal method. *Catalysts*, 9(2), 138.
- [38] Morán-Lázaro, J. P., Guillen-López, E. S., López-Urias, F., Muñoz-Sandoval, E., Blanco-Alonso, O., Guillén-Bonilla, H., ... & Olvera-Amador, M. D. L. L. (2018). Synthesis of ZnMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanoparticles by a microwave-assisted colloidal method and their evaluation as a gas sensor of propane and carbon monoxide. *Sensors*, 18(3), 701.
- [39] Ismail, I., Md Jani, A. M., & Osman, N. (2018). Preparation of nano-structured cathode for proton-conducting fuel cell by dispersing agent-assisted sol-gel method. In *Materials Science Forum* (Vol. 917, pp. 78-82). Trans Tech Publications Ltd.
- [40] Sasaki, Y., Hyakkai, M., Kita, E., Tasaki, A., Tanimoto, H., & Iwamoto, Y. (1997). Magnetic properties and Mössbauer study of Fe nanocrystals prepared by the gas-deposition method. *Journal of applied physics*, 81(8), 4736-4738.
- [41] Reina, A., Jia, X., Ho, J., Nezich, D., Son, H., Bulovic, V., ... & Kong, J. (2009). Large area, few-layer graphene films on arbitrary substrates by chemical vapor deposition. *Nano letters*, 9(1), 30-35.
- [42] Myers, T. H., Edwards, S. W., & Schetzina, J. F. (1981). Optical properties of polycrystalline CdTe films. *Journal of Applied Physics*, 52(6), 4231-4237.
- [43] Pawar, S. M., Pawar, B. S., Kim, J. H., Joo, O. S., & Lokhande, C. D. (2011). Recent status of chemical bath deposited metal chalcogenide and metal oxide thin films. *Current Applied Physics*, 11(2), 117-161.
- [44] Hodes, G. (2007). Semiconductor and ceramic nanoparticle films deposited by chemical bath deposition. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 9(18), 2181-2196.
- [45] Sutton, W. T. (1989). Microwave processing of ceramic materials. *Am.*

- Ceram. Soc. Bull., 68(2), 376-386.
- [46] Yang, G., & Park, S. J. (2019). Conventional and microwave hydrothermal synthesis and application of functional materials: A review. *Materials*, 12(7), 1177.
- [47] LibreText. [En línea, última vez: 5 febrero de 2023]. Disponible en: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Spectroscopy/Fundamentals\\_of\\_Spectroscopy/Electromagnetic\\_Radiation](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Fundamentals_of_Spectroscopy/Electromagnetic_Radiation).
- [48] Sun, J., Wang, W., & Yue, Q. (2016). Review on microwave-matter interaction fundamentals and efficient microwave-associated heating strategies. *Materials*, 9(4), 231.
- [49] Angarita Gutiérrez, L. G. (2017). Síntesis de películas delgadas por la técnica de magnetron Sputtering a partir de blancos de Renio y Boro (Doctoral dissertation, Universidad EAFIT).
- [50] Seshan, K. (2002). *Handbook of thin film deposition techniques principles, methods, equipment and applications*, second editon. CRC Press.
- [51] Mattox, D. M. (1999). Physical vapor deposition (PVD) processes. *Metal Finishing*, 97(1), 417-430.
- [52] Vilá, A., Comerma, A., Trenado, J., Arbat, A., Gascon, D., Garrido, L., & Diéguez, A. (2010). SEM/FIB for characterization of nanosized imagers. *Procedia Engineering*, 5, 697-700.
- [53] Penagos, J. I. C. (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 3(3), 133-146.
- [54] Perovic, D. D., Castell, M. R., Howie, A., Lavoie, C., Tiedje, T., & Cole, J. S. W. (1995). Field-emission SEM imaging of compositional and doping layer semiconductor superlattices. *Ultramicroscopy*, 58(1), 104-113.
- [55] Yasaka, M. (2010). X-ray thin-film measurement techniques. *The Rigaku Journal*, 26(2), 1-9.
- [56] Pietsch, U., Holy, V., & Baumbach, T. (2004). *High-resolution X-ray scattering: from thin films to lateral nanostructures*. Springer Science &

Business Media.

- [57] Harrington, G. F., & Santiso, J. (2021). Back-to-Basics tutorial: X-ray diffraction of thin films. *Journal of Electroceramics*, 47(4), 141-163.
- [58] Jain, V., Biesinger, M. C., & Linford, M. R. (2018). The Gaussian-Lorentzian Sum, Product, and Convolution (Voigt) functions in the context of peak fitting X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) narrow scans. *Applied Surface Science*, 447, 548-553.
- [59] Krishna, D. N. G., & Philip, J. (2022). Review on surface-characterization applications of X-ray photoelectron spectroscopy (XPS): Recent developments and challenges. *Applied Surface Science Advances*, 12, 100332.
- [60] X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) Surface Analysis Technique. (s. f.). <https://www.phii.com/surface-analysis-techniques/xps-esca.html>
- [61] Perkampus, H. H. (2013). *UV-VIS Spectroscopy and its Applications*. Springer Science & Business Media.
- [62] Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins by UV-visible spectroscopy. *Current protocols in food analytical chemistry*, (1), F1-2.
- [63] Instrumentation of a UV-Visible Spectrophotometer - JASCO. (2023, 18 enero). JASCO Inc. <https://jascoinc.com/learning-center/theory/spectroscopy/uv-vis-spectroscopy/instrumentation/>
- [64] Buehler, M. G. (1967). A Hall four-point probe on thin plates: Theory and experiment. *Solid-State Electronics*, 10(8), 801-812.
- [65] Schroder, D. K. (2015). *Semiconductor material and device characterization*. John Wiley & Sons.
- [66] Yamashita, M. (1986). Geometrical correction factor for resistivity of semiconductors by the square four-point probe method. *Japanese journal of applied physics*, 25(4R), 563.
- [67] Binning, G., Quate, C. F., & Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. *Physical Review Letters*.
- [68] Meyer, E., Hug, H. J., Bennewitz, R., Meyer, E., Hug, H. J., & Bennewitz, R.

- (2004). Introduction to scanning probe microscopy. *Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip*, 1-13.
- [69] De Oliveira, R. R. L., Albuquerque, D. A. C., Cruz, T. G. S., Yamaji, F. M., & Leite, F. L. (2012). Measurement of the nanoscale roughness by atomic force microscopy: basic principles and applications. *Atomic force microscopy-imaging, measuring and manipulating surfaces at the atomic scale*, 3.
- [70] COHEN CANCIO, F. J. (2018). Fabricación y caracterización de la celda solar con estructura PbS/CdS depositada por el método de baño químico (Master's thesis, COHEN CANCIO, FRANCISCO JAVIER).
- [71] Kim, M. J., Kim, H. T., Kang, J. K., Kim, D. H., Lee, D. H., Lee, S. H., & Sohn, S. H. (2010). Effects of the surface roughness on optical properties of CdS thin films. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 532(1), 21-437.
- [72] Langford, J. I., & Wilson, A. J. C. (1978). Scherrer after sixty years: a survey and some new results in the determination of crystallite size. *Journal of applied crystallography*, 11(2), 102-113.
- [73] Dolgonos, A., Mason, T. O., & Poepelmeier, K. R. (2016). Direct optical band gap measurement in polycrystalline semiconductors: A critical look at the Tauc method. *Journal of solid state chemistry*, 240, 43-48.
- [74] Ding, C., Ming, Z., Li, B., Feng, L., & Wu, J. (2013). Preparation and characterization of pulsed laser deposited CdTe thin films at higher FTO substrate temperature and in Ar+ O<sub>2</sub> atmosphere. *Materials Science and Engineering: B*, 178(11), 801-806.
- [75] Venkatesh, R., Banapurmath, N. R., Palrecha, A., & Ramesh, K. (2020, June). On the effect of thickness of Te Interlayer on output characteristics of CdTe thin-film solar cell. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 872, No. 1, p. 012189). IOP Publishing.
- [76] Shaaban, E. R., Afify, N., & El-Taher, A. (2009). Effect of film thickness on microstructure parameters and optical constants of CdTe thin films. *Journal of Alloys and Compounds*, 482(1-2), 400-404.