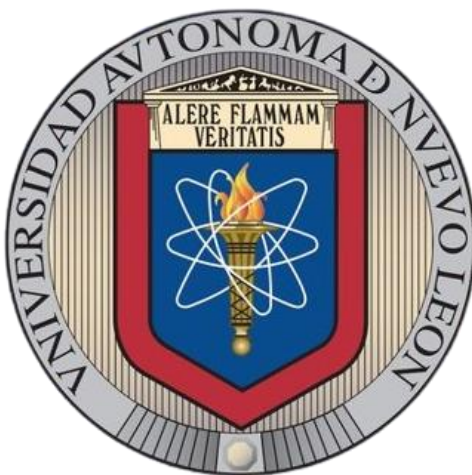


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS**



**Estudio de celdas solares incorporando películas delgadas de SnS como  
material absorbedor**

**Por:**

**I.S.E. Ramón Alberto Baeza Pérez**

**Como requisito para obtener el grado de:**

**Maestro en Ciencias con Orientación en Química de los Materiales**

**Febrero de 2025**

Estudio de celdas solares incorporando películas delgadas de SnS como material  
absorbedor

**Comité de aprobación de tesis:**

---

**Dra. Yolanda Peña Méndez**

Presidente

---

**Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente**

Secretaria

---

**Dra. Thelma Elizabeth Serrano Quezada**

Vocal

---

**Dra. María Elena Cantú Cárdenas**

Sub-Directora de Posgrado

Estudio de celdas solares incorporando películas delgadas de SnS como material  
absorbedor

**Comité de revisión de tesis:**

---

**Dra. Edith Osorio de la Rosa**

Co-Asesor

---

**Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente**

Revisora

---

**Dra. Thelma Elizabeth Serrano Quesada**

Revisora

---

**Dr. Alejandro Vázquez Dimas**

Revisor

---

**Dra. María Elena Cantú Cárdenas**

Sub-Directora de Posgrado

## Dedicatoria



mi  
madre

*Maribel Pérez Jiménez, porque a través de ella tengo la cercanía con Dios que tal vez de otra forma no tendría. Por ser una mujer fuerte que hoy que vive sus peores momentos no se deja vencer. Quien día tras día me tiene en sus pensamientos y como cada día al ir a trabajar, a la universidad, u hoy que estoy lejos espera a que regrese de mi aventura. Por su infinito amor le doy las gracias con lágrimas en los ojos justo ahora que escribo una de las secciones más importantes de este trabajo.*

*A mi padre, Florentino Baeza Blanco, quien todo el tiempo está al pendiente de su "Gordo" como me dice.*

*A mis hermanos, Víctor, Mónica, Amairani y Carlos, a los que nombro en orden de nacimiento y no de importancia. Porque se han convertido en lo más importante en mi vida.*

*A mis hermanos y hermanas por elección, Yasuri, Ángel y Alejandra, de quienes lo único que espero es que se sientan orgullosos de mí.*

## ***Agradecimientos***

Mi más profundo agradecimiento **a la Dra. Yolanda Peña**, por la orientación que recibí a lo largo de estos dos años de maestría, sin su dirección la llegada a buen puerto de este trabajo hubiera sido más complicada. Y a quien admiro no solo a nivel profesional si no también personal.

**A la Dra. Edith Osorio** por todo el apoyo que he recibido de su parte durante estos dos años y los años previos, y porque gracias a su excelente guía me ha llevado a buscar nuevos retos a nivel profesional.

**Al Dr. David Avellaneda** a quien debo mucho del conocimiento que tengo en el área de investigación desarrollada.

**A cada uno de los profesores de la Facultad de Ciencias Químicas de la UANL**, quienes han aportado su conocimiento para mi formación. Con una mención especial para **el Dr. Tomás Hernández** por brindarme un momento de relajación con sus pláticas repentinas.

**Al Dr. Sergio Gamboa** por la dirección en la estancia de investigación en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM. A la **Dra. Karina Zagal** por el apoyo y amistad brindada.

**A las gemelas Clary y Mary** por todo el apoyo que me ofrecieron, y por los momentos donde reíamos durante las clases y seminarios.

A mi gran amiga, **Jiliany**, por ser mi fortaleza durante los últimos dos años, a veces no tiene palabras amables para mí, pero lo que si tiene es una madurez admirable.

Especialmente a **“Épsilon”** mi mascotita, quien aguantó momentos de estrés de mi parte, pero firme cada noche en cada desvelo.

***“Por sobre todas las cosas a Dios”***

## Financiamiento

El presente trabajo que lleva por nombre “*Estudio de celdas solares incorporando películas delgadas de SnS como material absorbedor*” fue financiado por:

*El Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT)*

Con la aportación de instalaciones y equipos especializados por parte de:

El laboratorio de Materiales 1 del Centro de Laboratorios Especializados (CELAES) perteneciente a la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).

El Instituto de Energías Renovables (IER) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

El Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP) de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM).

La División de Ciencias, Ingeniería y Tecnología (DCIT) de la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo (UQROO).

# RESUMEN

I.S.E Ramón Alberto Baeza Pérez

Fecha de graduación:

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ciencias Químicas

**Título:** *Estudio de celdas solares incorporando películas delgadas de SnS como material absorbedor.*

Número de páginas: 129

Candidato para el grado de Maestro en  
Ciencias con Orientación en Química  
de los Materiales

**Área de estudio:** Química de Materiales y propiedades avanzadas de los materiales.

**Propósito y método de estudio:** Las celdas solares de tercera generación requieren materiales en forma de película delgada que permitan la fabricación de dispositivos de bajo costo, a partir de precursores abundantes, y que ofrezcan una alta eficiencia de conversión de energía. Las propiedades optoelectrónicas del *p*-SnS obtenido con una composición novedosa por la técnica de depósito por baño químico lo hacen adecuado para su uso como capa absorbente en celdas solares.

**Contribuciones y conclusiones:** Se desarrollaron celdas solares incorporando *p*-SnS como capa absorbidora, en una estructura de FTO/CdS/SnS/C/Ag. Se estudió el comportamiento de la interfaz CdS/SnS, determinando que el mecanismo de recombinación está influenciado por el factor de idealidad del diodo entre 1.24 y 1.62. Además, se observó la relación de la densidad de defectos y la disminución en la magnitud de la resistencia  $R_{sh} = 339 \pm 118 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ , lo cual fue corroborado por la corriente de saturación inversa  $I_0$  que se encuentra entre  $1.36 \cdot 10^{-7}$  y  $8.46 \cdot 10^{-6}$  A. El contacto metal-semiconductor SnS/C/Ag reveló una resistencia  $R_s = 242 \pm 49 \text{ k}\Omega$ . Las celdas solares presentaron una eficiencia  $\eta = 0.0161 \pm 0.0081\%$ . Previo a su incorporación en las celdas solares, se caracterizaron las propiedades estructurales y optoelectrónicas de los materiales utilizados.

Firma de la asesora:

---

# TABLA DE CONTENIDO

Sección	Página
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Problemática energética actual	2
1.2 Panorama de las energías no renovables	3
1.3 Panorama de las energías renovables	4
1.4 Energía solar fotovoltaica	5
1.5 Materiales semiconductores	5
1.5.1 Semiconductores intrínsecos	7
1.5.2 Semiconductores extrínsecos	8
1.5.3 Unión de semiconductores <i>tipo n</i> y <i>tipo p</i>	11
1.6 Evolución y generalidades de las celdas solares	13
1.7 Nuevos materiales para celdas solares	14
1.8 Celdas solares con materiales semiconductores en película delgada	15
1.8.1 Homouniones	15
1.8.2 Heterouniones	16
1.8.3 Capa ventana	17
1.8.4 Capa absorbedora	18



1.8.5	Funcionamiento de la celda en la interfaz generada por la capa ventana y la capa absorbadora	19
1.8.6	Configuración sustrato	21
1.8.7	Configuración superestrato	22
1.9	Técnicas de preparación de materiales en película delgada	23
1.10	Depósito por baño químico	24
1.11	Características y propiedades del SnS en película delgada	25
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES		26
2.1	Celdas solares con SnS como capa absorbadora	27
2.2	Análisis crítico de la literatura	40
2.3	Aportación científica	40
2.4	Hipótesis	40
2.5	Objetivos y metas	41
2.5.1	Objetivo general	41
2.5.2	Objetivos específicos	41
2.5.3	Metas	42
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA		43
3.1	Síntesis de películas delgadas	44

3.1.1	Películas delgadas de SnS	44
3.1.2	Películas delgadas de CdS	44
3.2	Tratamiento térmico	44
3.3	Fabricación de las celdas solares	45
3.4	Disposición de residuos	45
3.5	Métodos de caracterización	46
3.5.1	Difractometría de rayos X	46
3.5.2	Perfilometría mecánica de superficies	48
3.5.3	Espectroscopía ultravioleta visible (UV-Vis)	49
3.5.4	Microscopías	53
3.5.5	Caracterización eléctrica de las películas delgadas	57
3.5.6	Caracterización de los parámetros eléctricos de las celdas solares	62
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		66
4.1	Películas delgadas de SnS	67
4.1.1	Espesor de las películas delgadas del SnS	67
4.1.2	Estructura cristalina de las películas delgadas del SnS	68
4.1.3	Topografía de las películas delgadas de SnS	71
4.1.4	Propiedades ópticas de las películas delgadas de SnS	75
4.1.5	Propiedades eléctricas de las películas delgadas de SnS	79
4.2	Películas delgadas de CdS	81

4.2.1	Espesor de las películas delgadas de CdS	81
4.2.2	Estructura cristalina de las películas delgadas de CdS	82
4.2.3	Propiedades ópticas de las películas delgadas de CdS	84
4.2.4	Propiedades eléctricas de las películas delgadas de SnS	86
4.3	Perfil de sección transversal de la interfaz CdS/SnS	87
4.4	Celdas solares con estructura FTO/CdS/SnS/C/Ag	89
4.4.1	Parámetros eléctricos de las celdas	90
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		96
5.1	Trabajos futuros	99
REFERENCIAS		100

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Consumo de combustibles fósiles por combustible en el escenario de políticas declaradas, 2000-2050 [2].....	3
Figura 1.2. Adiciones de capacidad instalada con energías renovables [3]. .....	4
Figura 1.3. Bandas de conducción y de valencia de un semiconductor, a) en condiciones de equilibrio y b) excitado por efecto de la radiación solar [7].....	6
Figura 1.4. Electrón libre y hueco producido por la ionización térmica, a) previo al movimiento del electrón y b) después del movimiento del electrón [7]. .....	8
Figura 1.5. Estructura cristalina del Ge dopado con a) As y b) In [7]. .....	10
Figura 1.6. Diagrama de energía de una unión p-n en equilibrio térmico.....	12
Figura 1.7. Generaciones de las celdas solares [4, 13].....	14
Figura 1.8. Diagrama de bandas de un material absorbedor de a) banda prohibida indirecta y b) de banda prohibida directa [11].....	19
Figura 1.9. Mecanismo de generación de corriente túnel de una celda solar en un sistema de bandas ideal [18].....	20
Figura 1.10. Configuración substrato de una celda solar [21]. .....	21
Figura 1.11. Configuración superestrato de una celda solar [21]. .....	22
Figura 3.1. a) Diagrama simplificado del sistema de un difractómetro de rayos X; b) Difractómetro D2 Phaser [45].....	47
Figura 3.2. Perfilómetro Alpha-Step D-100: Tencor Instruments. ....	49
Figura 3.3. Reflexión de la luz en la interfaz entre dos medios con diferentes índices de refracción, para $n_2 > n_1$ [47].....	50

Figura 3.4. Interferencias de luz presentes en la interfaz de dos materiales. a). Interferencia constructiva de los haces reflejados. b) Interferencias destructiva de los haces reflejados [47]. .....	51
Figura 3.5. Espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu UV-1800. ....	53
Figura 3.6. a) Esquema del microscopio electrónico de barrido (SEM) [48]. b) Microscopio Hitachi S-5500 FE-SEM. ....	54
Figura 3.7. a) Esquema del funcionamiento de un AFM, b) Elementos que conforman un AFM [49].....	56
Figura 3.8. Microscopio de Fuerza Atómica Angstrom Advanced AA3000. ....	56
Figura 3.9. Esquema de medición de la fotorrespuesta [51]. ....	59
Figura 3.10. a) Pico amperímetro y b) Lámpara utilizados en las mediciones de fotorrespuesta. ....	60
Figura 3.11. Diagrama esquemático del método de la punta caliente [53]. ....	61
Figura 3.12. Esquema de los parámetros de las curvas I vs V y P vs V [54]. ....	62
Figura 3.13. Simulador solar Oriel LCS-100.....	65
Figura 4.1. a) Difractograma de rayos X y b) Coeficiente de textura de las películas delgadas de SnS a 3 ,5 y 7 h de depósito con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío.....	69
Figura 4.2. Topografía de las películas delgadas de SnS de a) 3 h, b)5 h y c) 7 h de tiempo de depósito con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío. ....	73
Figura 4.3. a) Transmitancia y b) Reflectancia óptica de las películas delgadas de SnS con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío.....	77

Figura 4.4. Gráfica de Tauc para: a) SnS 3 h, b) SnS 5 h, c) SnS 7 h con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío. ....	78
Figura 4.5. Fotorrespuesta de las películas delgadas de SnS, con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío. ....	80
Figura 4.6. a) Difractograma de rayos X y b) Coeficiente de textura de la película delgada de CdS. ....	83
Figura 4.7. Espectros de transmitancia y reflectancia de la película delgada de CdS. .	85
Figura 4.8. Gráfica de Tauc $(\alpha h\nu)^2$ vs $h\nu$ de la película delgada de CdS.....	86
Figura 4.9. Fotorrespuesta de las películas delgadas de CdS. ....	87
Figura 4.10. Microestructura del perfil transversal de la heterounión CdS/SnS para a) 3 h, b) 5 h y c) 7 h. ....	88
Figura 4.11. Estadísticas de la eficiencia de conversión de energía de las celdas M3, M4 y M7. ....	90
Figura 4.12. Parámetros eléctricos de las celdas solares, a) M3, b) M5 y c) M7. ....	91
Figura 4.13. Curvas características I–V (como fueron proporcionadas por el equipo), de las celdas solares en a) oscuridad y b) bajo iluminación equivalente a $100 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ , que demuestran un comportamiento rectificador de celdas solares de heterounión n-CdS/p-SnS. ....	93
Figura 4.14. Corriente de saturación contra voltaje directo de polarización con la temperatura en condiciones de laboratorio. ....	94

## LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 3.1. Ley de Bragg. ....	46
Ecuación 3.2. Tamaño del cristal por el método de Debye –Scherrer. ....	47
Ecuación 3.3. Densidad de dislocaciones. ....	47
Ecuación 3.4. Micro deformaciones por el método de Williamson-Hall. ....	47
Ecuación 3.5. Coeficiente de textura. ....	48
Ecuación 3.6. Ley de Snell. ....	50
Ecuación 3.7. Índice de refracción. ....	50
Ecuación 3.8. Energía de banda prohibida. ....	52
Ecuación 3.9. Coeficiente de absorción óptica. ....	52
Ecuación 3.10. Ley de Beer. ....	53
Ecuación 3.11. Ley de Ohm. ....	57
Ecuación 3.12. Resistencia eléctrica. ....	57
Ecuación 3.13. Resistividad eléctrica. ....	57
Ecuación 3.14. Conductividad eléctrica. ....	58
Ecuación 3.15. Conductividad eléctrica de películas delgadas. ....	58
Ecuación 3.16. Sensibilidad a la luz de materiales semiconductores. ....	59
Ecuación 3.17. Fator de Forma de una curva característica. ....	63
Ecuación 3.18. Densidad de corriente. ....	63
Ecuación 3.19. Eficiencia de conversión de energía de una celda solar. ....	63
Ecuación 3.20. Resistencia en serie de una celda solar. ....	64
Ecuación 3.21. Resistencia en paralelo de una celda solar. ....	64
Ecuación 3.22. Corriente inversa de saturación. ....	64

Ecuación 3.23. Factor de identidad como diodo Schottky..... 65



## LISTADO DE TABLAS

Tabla 4.1. Parámetros estructurales de las películas delgadas de SnS. ....	71
Tabla 4.2. Parámetros de rugosidad de la superficie de las películas de 3, 5 y 7 h. ....	74
Tabla 4.3. Conductividad eléctrica de las películas delgadas de SnS. ....	81
Tabla 4.4. Parámetros estructurales de las películas delgadas de CdS. ....	84
Tabla 4.5. Parámetros eléctricos complementarios de la estructura FTO/CdS/SnS/C/Ag. .....	92

## ABREVIATURAS

**CD.** Corriente directa  
**E.** Campo eléctrico  
**E<sub>g</sub>.** Energía de brecha o de banda prohibida  
**eV<sub>bi</sub>.** Campo eléctrico interno  
**FF.** Factor de Forma  
**I<sub>mp</sub>.** Corriente pico máximo  
**I<sub>o</sub>.** Corriente inversa de saturación  
**I<sub>sc</sub>.** Corriente de corto circuito  
**J<sub>sc</sub>.** Densidad de corriente de corto circuito  
**n<sub>i</sub>.** Factor de identidad  
**P<sub>mp</sub>.** Punto de máxima potencia  
**R<sub>s</sub>.** Resistencia en serie  
**R<sub>sh</sub>.** Resistencia en paralelo  
**V<sub>mp</sub>.** Voltaje pico máximo  
**V<sub>oc</sub>.** Voltaje en circuito abierto  
**wt.** *Weight* (Peso)  
**ε<sub>c</sub>.** Banda de conducción  
**ε<sub>F</sub>.** Nivel de Fermi  
**ε<sub>Fi</sub>.** Nivel de Fermi intrínseco  
**ε<sub>v</sub>.** Banda de valencia  
**κ.** Vector de momento  
**λ.** Longitud de onda  
**ρ.** Resistividad

## ACRÓNIMOS

**AFM.** *Atomic Force Microscopy* (Microscopía de Fuerza Atómica)  
**CBD.** *Chemical Bath Deposition* (Depósito por baño químico)  
**CVD.** *Chemical Vapor Deposition* (Depósito químico de vapor)  
**EDS.** *Energy Dispersive Spectroscopy* (Espectroscopía de Dispersión de Energía)

**FESEM.** *Field Emission Scanning Electron Microscope* (Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo)  
**FTO.** *Fluorine doped Tin Oxide* (Dióxido de estaño dopado con flúor)  
**PCE.** *Power Conversion Efficiency* (Eficiencia de conversión de energía)  
**PECVD.** *Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition* (Depósito químico en fase vapor mejorado por plasma)  
**PVD.** *Physical Vapor Deposition* (Depósito físico de vapor)  
**SEM.** *Scanning Electron Microscopy* (Microscopía electrónica de barrido)  
**TCO.** *Transparent Conductive Oxide* (Óxido Conductor Transparente)  
**UV-Vis.** Espectrofotometría Uv-Vis  
**VTD.** *Vapor Transport Deposition* (Depósito por transporte de vapor)  
**XRD.** *X-Ray Diffraction* (Difracción de rayos X)

## UNIDADES DE MEDIDA

**A·cm<sup>-2</sup>.** Amper por centímetro cuadrado  
**eV.** Electrón-volt  
**g.** Gramo  
**h.** Hora  
**K.** Kelvin  
**L.** Litro  
**min.** Minuto  
**Pa.** Pascal  
**s.** Segundo  
**V.** Volt  
**W.** Watt  
**W·cm<sup>-2</sup>.** Watt por centímetro cuadrado  
**Ω.** Ohm

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En el CAPÍTULO 1 se presenta la situación energética actual en conjunto con el panorama de los recursos no renovables y renovables. Así como, a partir de fuentes de energía renovables es posible contribuir a un manejo eficiente de la energía, reduciendo los niveles de contaminación de la actualidad. Abordando como mediante el estudio y uso de materiales semiconductores se pueden desarrollar celdas solares de tercera generación que provengan de precursores abundantes, de baja toxicidad y que alcancen eficiencias de conversión de energía altas. Así también se puedan obtener por métodos de depósito que no represente un alto costo, como lo puede ser el depósito por baño químico. Para finalmente centrarse en el SnS como un semiconductor en película delgada capaz de contribuir al desarrollo de celdas solares de segunda generación por su abundancia y baja toxicidad, y de tercera generación al alcanzar una alta eficiencia.

## **1.1 Problemática energética actual**

La energía es un componente fundamental del desarrollo humano, ya que está intrínsecamente ligada a la satisfacción de necesidades básicas y al funcionamiento de procesos vitales. En todo proceso que requiera cubrir una necesidad, la energía desempeña un papel crucial. Sin embargo, a pesar de que el ser humano es el principal beneficiario de los recursos energéticos provenientes de combustibles fósiles, también experimenta los efectos negativos de los procesos asociados con su extracción, generación y transporte.

El desafío que representa amortizar estos efectos adversos desencadenados por los combustibles fósiles implica revisar y reformar los modelos de gestión energética vigentes. Como es ampliamente conocido, estas fuentes de energía son finitas, lo que significa que su tasa de regeneración es significativamente inferior a su tasa de consumo, e inevitablemente en un corto periodo de tiempo se dejará de contar con este preciado recurso. Por lo tanto, la sociedad se encuentra en un período de transición energética, en el que se busca adoptar un enfoque hacia un consumo más eficiente, equitativo y respetuoso con el medio ambiente, centrándose en el uso de fuentes renovables, y lo que se espera es dejar atrás las energías no renovables [1].

## 1.2 Panorama de las energías no renovables

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía, en años recientes las tecnologías para el aprovechamiento de combustibles fósiles han ido perdiendo mercado, lo que quiere decir que el uso de estos recursos fósiles se está viendo reducido. De acuerdo con lo mostrado en la Figura 1.1 se espera que durante la década actual (2020-2030) el consumo de combustibles fósiles comience a desacelerar debido a que hacia el final de la década el petróleo, el gas natural y el carbón llegarán a su pico más alto. Por lo cual, se prevé que entre 2030-2050 el consumo de petróleo y gas natural se mantenga muy cercano al 100% de su capacidad total de uso, mientras que el consumo de carbón se verá reducido considerablemente llegando a mínimos equivalentes a lo registrado en el año 2000, de alrededor del 60% de su capacidad [2]. De tal manera que la producción de energía deberá ser sustituido paulatinamente hacia fuentes de generación de energía renovables.

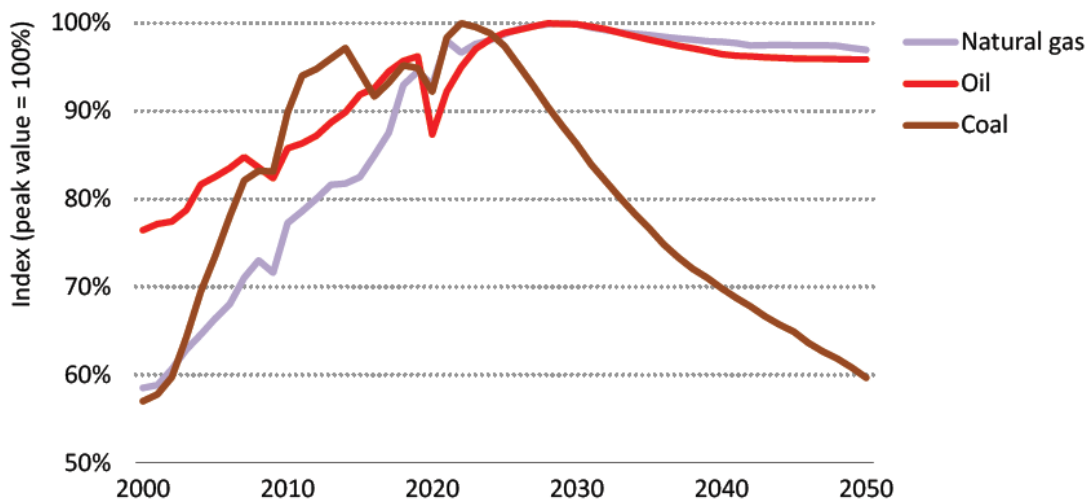


Figura 1.1. Consumo de combustibles fósiles por combustible en el escenario de políticas declaradas, 2000-2050 [2].

### 1.3 Panorama de las energías renovables

Como ya se ha descrito la desaceleración del desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de combustibles fósiles ha permitido que las energías renovables vayan ganando terreno. Prueba de ello es que para el 2023 se tenían previstos a nivel mundial 507 GW de capacidad instalada con energías renovables, lo que involucraba un incremento del 50% respecto al 2022. En la Figura 1.2 se muestran los principales aportes a la capacidad instalada, donde se destacan la solar fotovoltaica, la eólica e hidroeléctrica; así como en menor medida la bioenergía, geotermia, la oceánica, entre otras. Siendo la principal fuente de recurso renovable la energía solar fotovoltaica, de la cual se espera que para el 2028 las adiciones a la capacidad instalada de esta tecnología se dupliquen respecto al 2022, lo que se traduciría en un estimado de 650 GW instalados, implicando que esta tecnología representará el 70% del incremento de las energías renovables [3].

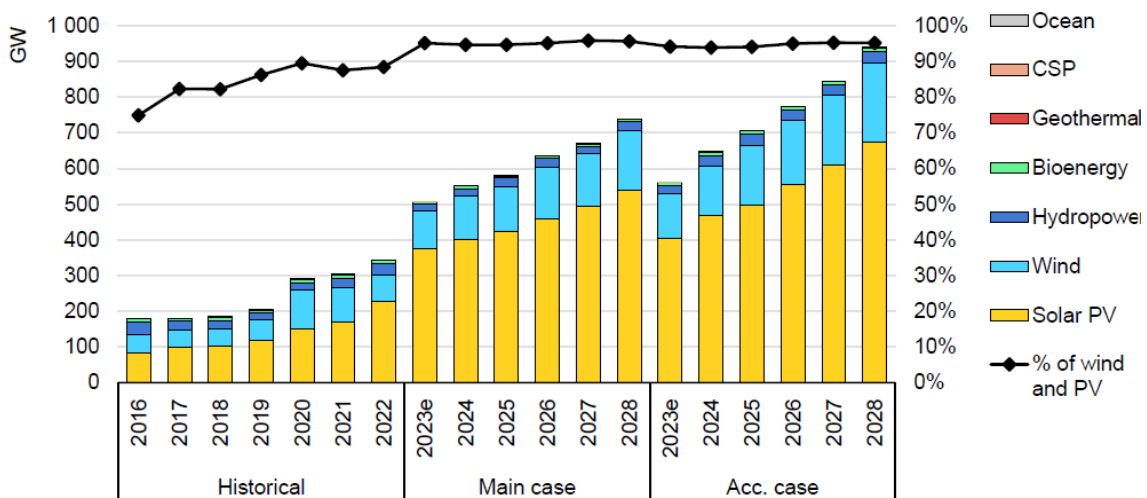


Figura 1.2. Adiciones de capacidad instalada con energías renovables [3].

## **1.4 Energía solar fotovoltaica**

La energía solar fotovoltaica es una fuente de energía renovable, sostenible y no contaminante, que tiene el potencial de desempeñar un papel significativo en la transición hacia sistemas energéticos más limpios y sostenibles a nivel mundial. La principal contribución de esta tecnología es dependencia de los combustibles fósiles, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y contribuye a la mitigación del cambio climático.

La tecnología fotovoltaica ha sido estudiada desde el año 1839, cuando el científico francés Edmond Becquerel sentó sus fundamentos. El principio de funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico, el cual, consiste en convertir energía proveniente del sol en energía eléctrica [4].

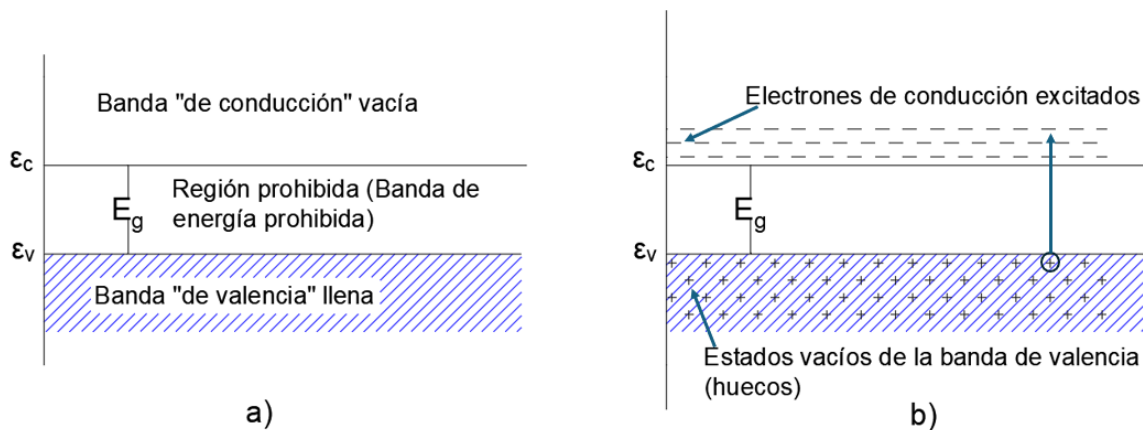
Al dispositivo base capaz de generar energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico es la celda solar, la cual requiere que se haga incidir sobre ella irradiación solar, generando de esta manera una separación de cargas entre dos materiales semiconductores [5].

## **1.5 Materiales semiconductores**

Un semiconductor es un material cristalino con propiedades eléctricas entre los conductores y aislantes. Se caracterizan por su estructura de bandas de energía, como se muestra en la Figura 1.3a), la primera de las bandas es conocida como banda de valencia ( $\epsilon_v$ ), y se encuentra separada de la segunda banda denominada banda de conducción ( $\epsilon_c$ ). Ambas bandas se encuentran en estado basal (sin estimulación externa por efecto de la radiación solar o voltaje aplicado), por lo que la banda de valencia está

completamente llena de los electrones disponibles y la de conducción completamente vacía.

La zona que se encuentra separando la banda de valencia de la banda de conducción se le conoce como región prohibida o banda de energía prohibida, esta región recibe ese nombre debido a la falta de estados energéticos disponibles, por lo que se requiere que los electrones de la banda de valencia absorban la energía suficiente para excitarse y pasar a la banda de conducción. A la energía necesaria para el salto entre bandas se le conoce como de brecha o banda prohibida ( $E_g$ ), y como se muestra en la Figura 1.3b) los electrones que inicialmente se encontraban en la banda de valencia pasan a la banda de conducción, creando portadores de carga que permiten la conducción de electricidad [6, 7].



*Figura 1.3. Bandas de conducción y de valencia de un semiconductor, a) en condiciones de equilibrio y b) excitado por efecto de la radiación solar [7].*

El mecanismo de conducción antes descrito funciona de manera similar en cualquier semiconductor, sin embargo, se debe diferenciar entre semiconductores intrínsecos y semiconductores extrínsecos.



### 1.5.1 Semiconductores intrínsecos

Un semiconductor intrínseco es un tipo puro de semiconductor sin impurezas añadidas el cual posee una conductividad eléctrica que se deriva exclusivamente de las propiedades del material semiconductor en sí. Mientras que, la generación de portadores de carga (electrones libres y huecos) se produce por la excitación térmica, donde los electrones pueden ganar suficiente energía para saltar de  $\epsilon_v$  hacia  $\epsilon_c$ .

En la Figura 1.4 se muestra la manera en la que se generaría esta conductividad eléctrica en la red cristalina del germanio, partiendo del hecho de que los electrones (inicialmente en un enlace covalente), se ionizan exclusivamente mediante excitación térmica alcanzando la  $E_g$ , lo que generaría un electrón libre y un hueco, tal como se muestra en la Figura 1.4a). Cuando el electrón se mueve hacia la derecha (Figura 1.4b), genera un hueco hacia la izquierda, el cual es ocupado inmediatamente por un electrón subyacente, y generando nuevamente un hueco. De tal manera que se presenta una conductividad eléctrica en sentido del movimiento de los electrones y un campo eléctrico  $\mathbf{E}$  en dirección contraria. Los electrones y huecos reciben el nombre de portadores intrínsecos de carga, su conductividad es una conductividad intrínseca, y de esto deriva que la concentración de electrones y huecos siempre deba de ser la misma, ya que la excitación térmica de un electrón origina inevitablemente sólo un hueco [7].

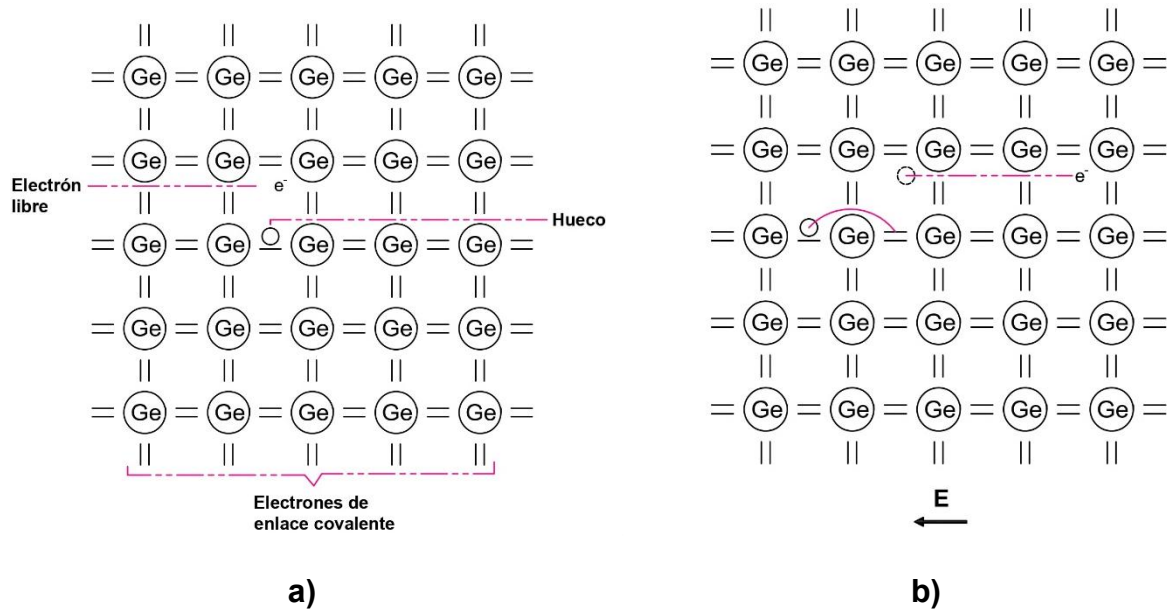


Figura 1.4. Electrón libre y hueco producido por la ionización térmica, a) previo al movimiento del electrón y b) después del movimiento del electrón [7].

La conductividad de un semiconductor intrínseco es relativamente baja comparada con los semiconductores dopados (extrínsecos), ya que la cantidad de portadores de carga disponibles para la conducción de electricidad es limitada y depende fuertemente de la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, también lo hace la cantidad de electrones que pueden superar la  $E_g$ , mejorando así la conductividad eléctrica del material [7, 8]. Estos materiales, cuando se dopan con impurezas específicas, pueden transformarse en semiconductores extrínsecos, cuyas propiedades eléctricas pueden ser precisamente controladas para aplicaciones específicas.

### 1.5.2 Semiconductores extrínsecos

En esta clase de semiconductores se introducen cantidades muy pequeñas de átomos dopantes a un material puro, a lo que se le conoce como impurezas sustitucionales o intersticiales, originándose dos grupos, los cuales se describen a continuación:

1. Semiconductores *tipo n*: Es un tipo de semiconductor que ha sido dopado con impurezas que tienen más electrones de valencia de los que necesita el semiconductor intrínseco. Este proceso de dopaje introduce átomos donantes en la estructura cristalina del semiconductor, como lo pueden ser átomos de As en la estructura cristalina del Ge mostrada en la Figura 1.5a).

Cuando estos átomos donantes se incorporan en la red cristalina del semiconductor, cuatro de sus electrones de valencia forman enlaces covalentes con los átomos de Ge vecinos, quedando un electrón desapareado que no se necesita para formar el enlace covalente y que puede moverse libremente dentro del cristal.

Este electrón extra contribuye a la conductividad eléctrica del material sin necesidad de una gran cantidad de energía para su liberación, como sería en el caso de un semiconductor intrínseco. En cristales que presentan este tipo de impureza existen más electrones que huecos y por esta misma razón tienen una carga mayoritaria negativa, por lo cual, el término "*tipo n*" proviene de la propia naturaleza de los portadores de carga, ya que son los propios electrones los que permiten la conducción de electricidad.

2. Semiconductores *tipo p*: Es un tipo de semiconductor extrínseco que se ha dopado con impurezas que tienen menos electrones de valencia de los que tiene el material semiconductor intrínseco. Este proceso de dopaje introduce átomos aceptores en la estructura cristalina del semiconductor, como el In en la red cristalina del Ge de la Figura 1.5b), de tal manera que el In posee tres electrones en su capa de valencia, uno menos que los cuatro requeridos para formar enlaces covalentes completos con los átomos de Ge vecinos.

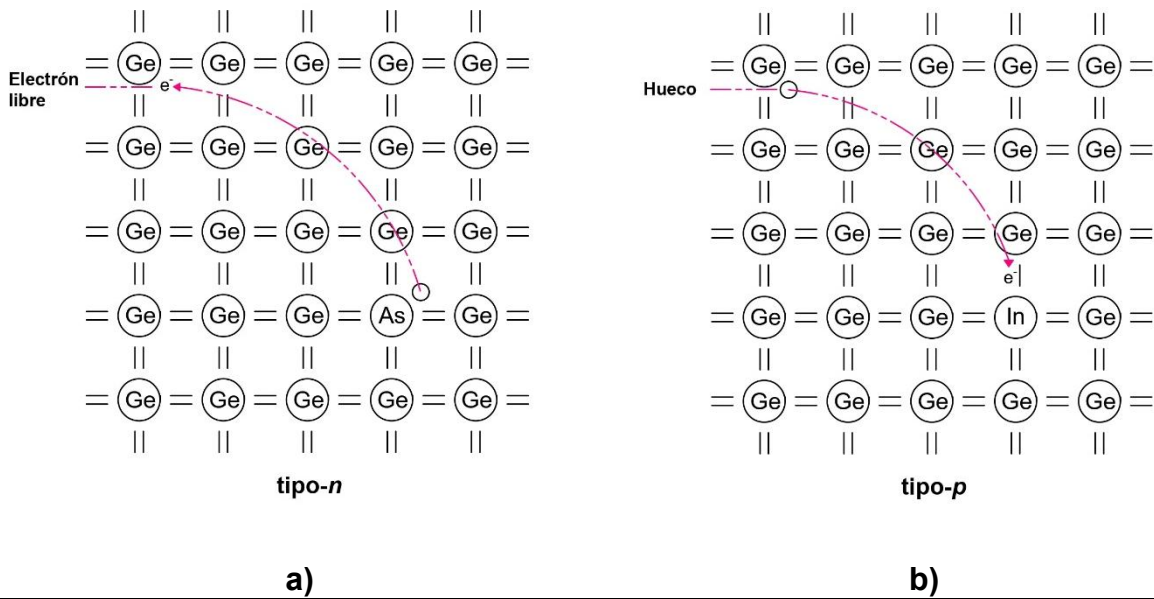


Figura 1.5. Estructura cristalina del Ge dopado con a) As y b) In [7].

La inserción de estos átomos aceptores crea "huecos" o ausencias de electrones, que se comportan como portadores de carga positivos dentro del material. Estos huecos pueden moverse a través del cristal cuando un electrón vecino salta para llenar el hueco, dejando a su vez otro hueco en su posición original. Este movimiento de huecos en respuesta a un campo eléctrico externo permite la conducción de electricidad en el semiconductor *tipo p* [7, 8]. En este tipo de semiconductores se pueden hacer uniones *p* y *n* que permitan la conducción de electrones.

### 1.5.3 Unión de semiconductores *tipo n* y *tipo p*

Una unión *p-n* se forma al juntar materiales *tipo p* y *tipo n*, y cuando esto sucede los electrones y huecos cerca de la unión se recombinan. Esto resulta en una región de agotamiento donde hay falta de portadores de carga libres, creando un campo eléctrico interno que actúa para detener una mayor recombinación de portadores de carga. En la Figura 1.6 se esquematiza el diagrama de bandas de una unión *p-n* en equilibrio y se muestra una distribución de las energías de los electrones. Las tres regiones que se pueden observar se describen a continuación:

1. Banda de valencia: se sitúa por debajo de la banda de conducción y es el nivel de energía ocupado por los electrones bajo condiciones normales. En un material sin energía adicional, los electrones están en esta banda y no pueden moverse libremente, lo que impide la conducción de electricidad.
2. Banda de conducción: es el nivel de energía donde los electrones pueden moverse libremente y conducir electricidad a través del semiconductor. En el diagrama de bandas, esta se encuentra en la parte superior y está parcialmente vacía, permitiendo a los electrones moverse dentro de ella.
3. Nivel de Fermi ( $\epsilon_F$ ): Es una referencia teórica que indica el límite entre los niveles de energía ocupados y desocupados por los electrones a una temperatura de 0 K. En un semiconductor *tipo n*, el nivel de Fermi está más cerca de la banda de conducción, indicando una mayor probabilidad de encontrar electrones libres. En un semiconductor *tipo p*, el nivel de Fermi está más cerca de la banda de valencia, reflejando una mayor probabilidad de encontrar huecos.

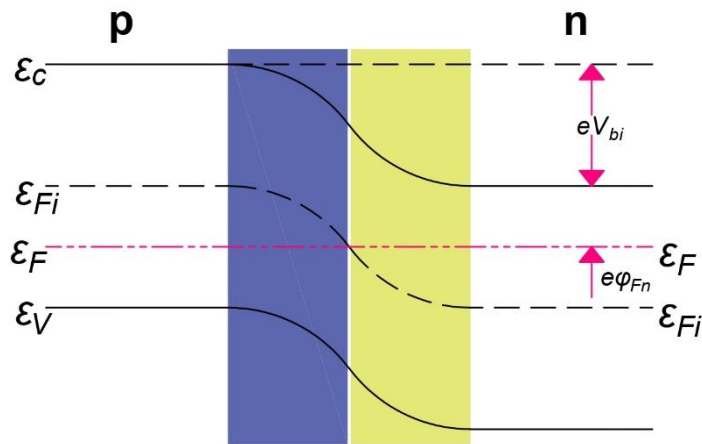


Figura 1.6. Diagrama de energía de una unión p-n en equilibrio térmico.

También es posible observar que la banda de conducción y la banda de valencia muestran una discontinuidad en la unión, debido al campo eléctrico interno ( $eV_{bi}$ ). El nivel de Fermi es constante a través de la unión, lo que indica que el sistema está en equilibrio térmico. Esto significa que, aunque el nivel de Fermi intrínseco ( $\epsilon_{Fi}$ ) de ambos materiales sea diferente cuando están separados, al formar la unión el sistema se reajusta hasta que  $\epsilon_F$  es el mismo a través de toda la unión. La diferencia de potencial creada por la región de agotamiento es evidente por la curvatura de las bandas cerca de la unión [9]. En aplicaciones fotovoltaicas para que ocurra el efecto fotovoltaico los semiconductores, de la unión p-n, son irradiados con luz solar, lo que provoca un estado excitado del material y al presentarse un campo eléctrico los electrones fotogenerados son direccionados, lo que induce una corriente eléctrica. El dispositivo que es capaz de generar esta corriente eléctrica se le denomina celda solar [10, 11].

## 1.6 Evolución y generalidades de las celdas solares

Las celdas solares tuvieron un destacado incremento en su eficiencia de conversión de energía entre el año 1970 y el año 2000, ya que pasó de tener eficiencias menores al 1% a tener eficiencias por encima del 24%. Este cambio de paradigma fue provocado principalmente por mejoras eléctricas y ópticas en el diseño de las celdas de Si. En la parte eléctrica mejoraron la pasivación de contacto en la región superficial de las celdas y ópticamente redujeron la reflexión e incrementaron el contacto de la luz dentro de la celda lo que tuvo un gran impacto [12].

Con el tiempo se han realizado otras mejoras, además de que comenzaron a estar disponibles otros materiales en película delgada, como es el Teluro de Cadmio (CdTe) y el Cobre, Indio, Galio y Selenio (SIGS), así como el propio Si pero en una fase amorfa del mismo. Sin embargo, en la actualidad se siguen desarrollando nuevos materiales para celdas solares, debido a que, si bien la eficiencia de conversión de energía de las celdas mejoró notoriamente, se deben de incluir otros factores, como el costo, proceso de obtención de los materiales precursores, así como la abundancia y la toxicidad. Con las características mencionadas se puede hacer una clasificación de los materiales con los que se han producido las celdas solares, lo que se ilustra en la Figura 1.7, mostrando los materiales de primera, segunda y tercera generación con los que se han fabricado las celdas solares [4, 12].

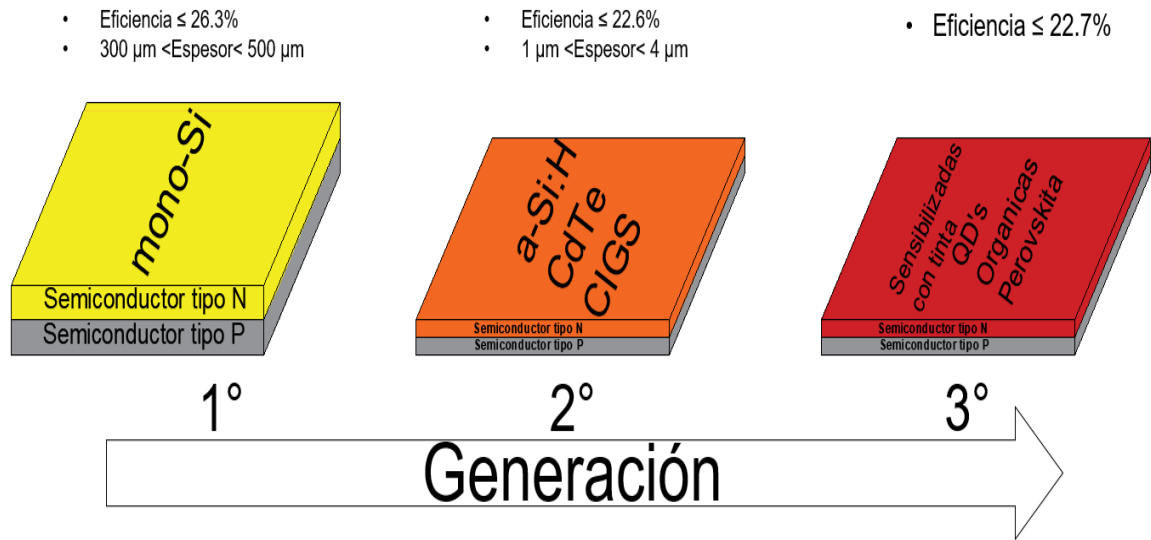


Figura 1.7. Generaciones de las celdas solares [4, 13].

## 1.7 Nuevos materiales para celdas solares

Los materiales semiconductores implementados en celdas solares deben cumplir con características como, propiedades eléctricas y ópticas apropiadas, y provenir de precursores que puedan reducir el costo de obtención [14]. En la actualidad, se ha apostado principalmente por la producción de semiconductores de película delgada para celdas solares que aporten a una tercera generación que pueda cumplir con las características antes mencionadas, destacando elementos como Cu, Sn, Zn, S, y los compuestos  $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ,  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$ ,  $\text{SnS}_2$  y  $\text{SnS}$  [15, 16].



## **1.8 Celdas solares con materiales semiconductores en película delgada**

Las celdas solares de película delgada se denominan de esta manera por que cumplen con la característica de que son fabricadas con materiales semiconductores que tienen un espesor por debajo de diez micrómetros, y que se consiguen por métodos de síntesis en donde el material es creado desde cero mediante un proceso de condensación de especies átomo por átomo, molécula por molécula o ion por ion.

En aplicaciones de celdas solares suelen utilizarse más de un tipo de material semiconductor en película delgada con características eléctricas distintas, y cuando estos se encuentran formando una unión se les conoce como capas, las cuales tienen funciones distintas y específicas dentro de una celda solar. Se puede distinguir entre los tipos de uniones, tipos de capas y la configuración que estén formando las capas, tal como se presenta a continuación.

### **1.8.1 Homouniones**

En una homounión, se establece una interfaz entre dos regiones del mismo material semiconductor para facilitar la separación de portadores de carga, lo que contribuye a la eficiencia de las celdas solares al permitir la conversión directa de la energía solar a electricidad. Al unir regiones de diferente tipo de dopaje en un mismo material, genera un campo eléctrico interno que promueve la separación de los portadores de carga, facilitando la generación de corriente eléctrica. El transporte de portadores de carga, electrón-hueco, se produce a través de la unión p-n del mismo material, y puede manifestarse de dos maneras:

- Por difusión, debido al gradiente de concentración causado por el movimiento aleatorio de los portadores de carga,
- Por deriva, que implica el movimiento de los portadores bajo la influencia de un campo eléctrico interno de la celda solar.

Estos mecanismos garantizan una recolección efectiva de los pares electrón-hueco generados durante el proceso de absorción de luz [17].

### **1.8.2 Heterouniones**

Las heterouniones están formadas por dos materiales semiconductores con diferentes bandas de energía. Que de manera similar a las homouniones se unen para facilitar la separación eficiente de portadores de carga generados por la absorción de luz. Estas uniones permiten la disociación de excitones en electrones y huecos libres, impulsando así la acción fotovoltaica. Con ventajas como la protección contra la recombinación de portadores y la generación de voltajes superiores al potencial electrostático.

El transporte de portadores de carga a través de una heterounión es crucial para la eficiencia de una celda solar. Los mecanismos de transporte incluyen la difusión de portadores a través de los materiales semiconductores y la migración bajo la influencia de campos eléctricos generados en la interfaz:

- La difusión de portadores se produce debido a la tendencia natural de los portadores de carga (electrones y huecos) a moverse desde regiones de alta concentración a regiones de baja concentración. En presencia de un gradiente de concentración, los portadores difunden a través de los materiales semiconductores en la interfaz.

- La migración de portadores se presenta por el movimiento direccional de los portadores de carga debido a la presencia de un campo eléctrico. Este campo eléctrico puede ser generado por diferencias de potencial en la heterounión y ayuda a dirigir los portadores hacia los contactos eléctricos, contribuyendo así a la generación de corriente en la celda solar [9]

### **1.8.3 Capa ventana**

Los tipos de uniones p-n mencionados anteriormente determinan las propiedades optoelectrónicas de una celda solar, de manera simple la  $E_g$  actúa como un filtro de la radiación solar, para lo cual si la energía del fotón es menor que la banda prohibida la radiación será transmitida dando lugar a las propiedades que se busca en una capa ventana. Por lo cual, la principal función de una capa ventana es la de admitir la máxima cantidad de luz, para que los fotones sean aprovechados por capas posteriores. Para obtener un rendimiento óptico con una pérdida resistiva mínima su  $E_g$  debe de ser lo más alta posible, sin que esto afecte la transparencia del material, lo que permitiría mantener una resistencia en serie baja [11].

Además, en esta región no se debe de generar fotocorriente (explicado en la sección 3.5.5.1), y es importante minimizar cualquier pico de potencial en la banda de conducción que se encuentra en la unión (también llamada interfaz) con capas posteriores, lo que permitirá un transporte óptimo de portadores minoritarios. Dicho de otra manera, los materiales semiconductores en esta capa presentan una conductividad tipo n, es decir, forman pares electrón-hueco, con mayor cantidad de electrones [11].

El sulfuro de cadmio (CdS) es una capa ventana ampliamente estudiada, y se ha utilizado en celdas de segunda generación de CdTe y CIGS, obteniendo eficiencias de alrededor del 22.6%. También se han utilizado otros materiales como alternativa al CdS, y de manera general se puede decir que existen capas ventana que presentan características adecuadas en la aplicación de celdas solares [11].

#### **1.8.4 Capa absorbedora**

Siguiendo la lógica del filtro de radiación solar causado por la  $E_g$  (mencionado en el apartado anterior), en la capa absorbedora la energía del fotón debe de ser mayor a la  $E_g$  para que pueda ser absorbida.

Sin embargo, la absorción de luz se da de manera mucho más compleja y esto se debe a la estructura de bandas del material absorbente, determinado principalmente por el espesor del material. De tal manera que dependiendo de si se tiene una estructura de banda directa o indirecta la absorción se generará de diferente forma.

En la Figura 1.8a) se muestra el diagrama de bandas de un absorbedor de banda indirecta, como es posible observar el pico máximo de la  $\epsilon_v$  y el mínimo de  $\epsilon_c$  se encuentran desalineados, por lo cual para que la absorción ocurra es necesario que se genere un cambio de momento en el vector  $\kappa$ , sin embargo, los fotones solo generan transiciones sin cambio de momento. De tal manera que este momento lo otorga la energía de red causada por la vibración (un fonón). Los materiales con estructura de banda directa (Figura 1.8b) no requieren de este cambio de momento ya que sus bandas se encuentran alineadas [11].

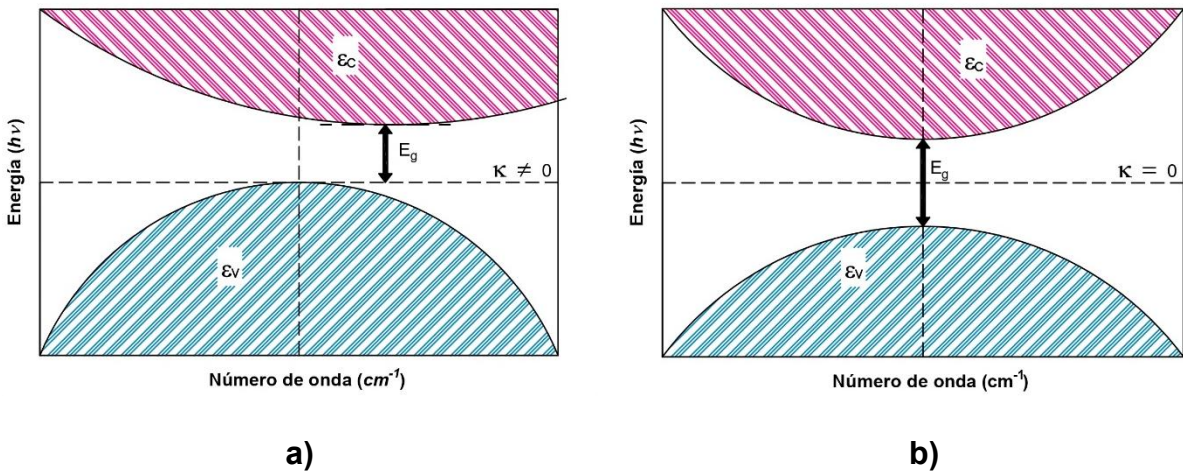


Figura 1.8. Diagrama de bandas de un material absorbedor de a) banda prohibida indirecta y b) de banda prohibida directa [11].

En la interfaz de la unión  $p$ - $n$  la capa absorbedora tiene mayor movilidad de huecos que de electrones, por lo cual actúa como un semiconductor tipo  $p$ . Siendo el Si un material ampliamente utilizado, que puede presentar una  $E_g$  de banda indirecta, como en el caso del Si policristalino y de banda directa para el Si amorfo [11].

### 1.8.5 Funcionamiento de la celda en la interfaz generada por la capa ventana y la capa absorbedora

Como se mencionó en la sección 1.5.3, cuando dos semiconductores se unen generan una región de agotamiento por la formación abrupta de la interfaz dada por la unión de la región  $n$  y la región  $p$ , como se muestra en la Figura 1.6 y a su vez se forma un cristal continuo. De manera similar a lo ocurrido en el absorbedor la transferencia electrónica de la banda de valencia a la banda de conducción se puede dar de manera directa o indirecta, ya que se requiere que los electrones pasen de la región  $n$  hacia la región  $p$ .

La movilidad del electrón se lleva a cabo cuando los electrones alcanzan la  $E_g$  necesaria para superar la región de agotamiento generando una corriente túnel [18].

La Figura 1.9 ilustra el sistema ideal de generación de corriente túnel de una celda solar. Un electrón A, que se encuentra en el punto  $X_1$  al ser polarizado por un campo eléctrico  $\mathbf{E}$ , puede ser descompuesto en sus componentes longitudinal  $k_{//}$  y transversal  $k_{\perp}$ . Cuando el electrón entra en la unión la componente  $k_{//}$ , decrece hasta desvanecerse en el punto  $X_2$  por el efecto restrictivo del  $qV_1$  en la unión. Cuando el electrón supera la región  $qV_1$ , se dice que cruza el túnel, y la componente  $k_{\perp}$  conserva su momento y el electrón ahora en un estado B aparece en  $X_3$ . Por lo que idealmente el punto más bajo del valle  $\epsilon_{Cn}$  y el más alto del valle  $\epsilon_{Vp}$  deberían de estar alineados conservando el momento  $k_{\perp}$  [18].

Cuando los valles mencionados no se encuentran alineados la banda de valencia y la de conducción no tienen el mismo momento cristalino y al no ocurrir un proceso de dispersión que conserve momento, el transporte de electrones no se da bajo la polarización  $V_1$ , ya que requiere que se genere momento adicional mediante un fonón causado por la vibración de la red cristalina [19, 18].

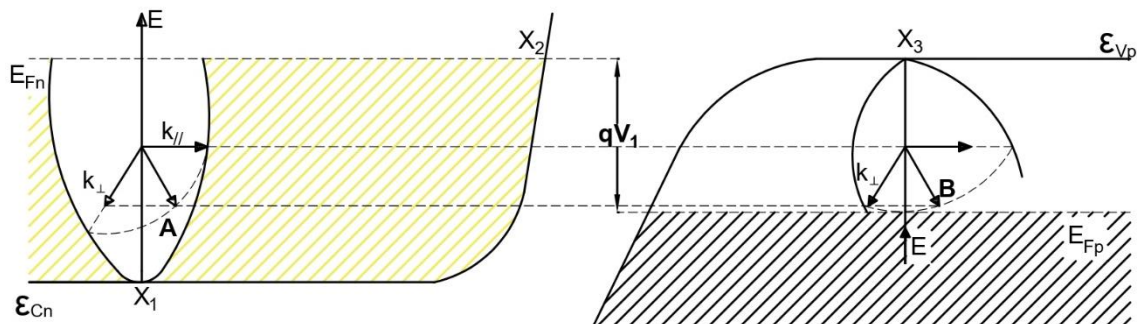


Figura 1.9. Mecanismo de generación de corriente túnel de una celda solar en un sistema de bandas ideal [18].

### 1.8.6 Configuración sustrato

Una celda solar en esta configuración consta típicamente de un sustrato base, como silicio, vidrio o metal, como se ilustra en la Figura 1.10, para el caso en donde el sustrato es vidrio se le coloca Mo el cual actúa como contacto, sobre este se deposita una capa absorbidora seguida por una capa ventana. Por último, se coloca óxido conductor transparente (TCO, por sus siglas en inglés) cerrando el circuito. Este tipo de configuración tiene la característica de ser iluminada desde la parte superior del sustrato [20, 21].



Figura 1.10. Configuración sustrato de una celda solar [21].

### 1.8.7 Configuración superestrato

La configuración superestrato de la Figura 1.11 en una celda solar se refiere a una disposición específica de las capas semiconductoras y el sustrato utilizado en la construcción del dispositivo fotovoltaico. En este diseño, las capas semiconductoras se depositan sobre un sustrato transparente, como vidrio, lo que permite que la luz solar penetre a través del sustrato llegando a la capa ventana de la celda, y activando posteriormente la capa absorbedora, sobre la cual se encuentra un contacto metálico que cerrará el circuito. Contrario a la configuración sustrato, este tipo de celdas es iluminado desde la parte inferior del sustrato [20, 21].



Figura 1.11. Configuración superestrato de una celda solar [21].



## 1.9 Técnicas de preparación de materiales en película delgada

La fabricación de películas delgadas emplea una variedad de técnicas de deposición, cada una con sus propias características y aplicaciones específicas en la industria y a nivel laboratorio. Entre estas técnicas se encuentran la deposición química de vapor (CVD), que implica la introducción de precursores gaseosos en un reactor a alta temperatura para la formación de películas uniformes y controladas. La evaporación física (PVD) se basa en el calentamiento de materiales en un ambiente de vacío, permitiendo la deposición de capas delgadas con alta pureza. El depósito químico en fase vapor mejorado por plasma (PECVD) utiliza precursores gaseosos y plasma para generar películas delgadas, especialmente útiles para materiales como el silicio amorfo. La técnica de *spray-pyrolysis* implica la pulverización de una solución química sobre un sustrato caliente para la deposición de películas delgadas, mientras que en el depósito por baño químico se sumerge el sustrato en una solución precursora para la formación de la película, este método en particular se explica en la sección 1.10 más a profundidad, ya que es mediante el cual se obtiene el material de interés [22].

## 1.10 Depósito por baño químico

La técnica de depósito por baño químico (CBD) es un método simple, con un alto grado de replicabilidad, escalamiento y por ello con mayor producción comercial, que se utiliza para depositar materiales en película delgada sobre sustratos sólidos, el cual se encuentra dentro de un grupo de técnicas de deposición química. Entre las bondades del método se encuentra que se pueden controlar variables como el tiempo y la temperatura.

El medio de deposición requiere de una o más sales metálicas ( $M^+$ ), una fuente de calcogenuro ( $X$ : O, S, Se), y un agente complejante (ej.: amoníaco) obteniendo el compuesto por precipitación, sin solubilidad en la solución usada, estable y controlando la precipitación, si la reacción procede por un ion cargado negativamente dada la reducción de un elemento. Cuando se obtiene la solución, la reacción se lleva a cabo en tres pasos:

- (i). Creación de especies atómicas, moleculares o iónicas,
- (ii). Transporte de estas especies a través del medio
- (iii). y finalmente la condensación de las especies.

La deposición se da mediante la inmersión de los sustratos inmediatamente después de haber conseguido la solución, para que la película se deposite en dos etapas:

- Nucleación: Cuando se lleva a cabo la reacción sobre un sustrato, los núcleos en la solución que está precipitando se insertan en el sustrato sustituyendo los iones  $OH^-$  por los metálicos, formando la primera capa de la película delgada.

- Crecimiento: Al generarse la nucleación continúa el crecimiento, esto se da por la absorción de especies iónicas de la solución al núcleo, favoreciendo el crecimiento de la película, debido al aumento en la aglomeración de granos.

Con el paso del tiempo de depósito se llega a una barrera en donde la película deja de crecer por el agotamiento de los precursores.

Los sustratos mencionados requieren una preparación previa que involucra frotar a fondo con detergente líquido por alrededor de 10 min, enjuagar continuamente con agua destilada, repetir el proceso en varias ocasiones según lo requiera el sustrato, para finalmente enjuagar con un solvente, agua destilada y secar durante un periodo de tiempo establecido en el horno, placa calefactora o pistola de calor [23].

### **1.11 Características y propiedades del SnS en película delgada**

El SnS cuenta con estructura cristalina ortorrómbica, e intrínsecamente presenta por lo regular una conductividad tipo  $p$ , ya que las vacancias generadas generan los huecos en el material, su ancho de banda prohibida va de 1-2 eV y tiene un coeficiente de absorción por encima de  $1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ , lo que confiere su característica como absorbedor [16, 24]. Con eficiencias teóricas en celdas solares de hasta el 30%, pero experimentalmente se reportan eficiencias de entre 1-4.8% [25, 26]. Los principales métodos de síntesis utilizados para obtener SnS son deposición electroquímica, deposición por transporte de vapor, deposición física de vapor, o por la técnica de CBD, sin embargo, no son los únicos [24, 26, 27, 28, 29, 30].

## **CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES**

El CAPÍTULO 2 contiene información de las principales aportaciones científicas que se han realizado al desarrollo de celdas solares en configuración superestrato y sustrato que incorporan SnS como capa absorbadora. Con un análisis crítico de las investigaciones realizadas previo al desarrollo de este proyecto, planteando las aportaciones que se esperan aportar en el ámbito científico con el trabajo realizado. Por último, se mencionan los objetivos y metas que se esperan alcanzar en este proyecto.

## 2.1 Celdas solares con SnS como capa absorbedora

P. Sinsermsuksakul *et al.*, (2014) fabricaron una celda solar utilizando SnS como material absorbente mediante la técnica de deposición de vapor, seguida de un recocido a 400 °C durante una hora en una atmósfera de N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. Mediante SEM, determinaron que el espesor de la película de SnS estaba entre 0.4 y 0.5 μm, mientras que los análisis de XPS confirmaron la ausencia de contaminación por oxígeno, indicando una fase pura. La caracterización por UV-Vis mostró un rango de absorción de 300 a 1,100 nm. Finalmente, las propiedades eléctricas de la celda solar incluyeron un V<sub>oc</sub> de 372 mV, una J<sub>sc</sub> de 20.2 mA·cm<sup>2</sup>, un factor de llenado (FF) de 58.0% y una eficiencia (η) del 4.36% en un área de 0.232 cm<sup>2</sup> [29].

S. Rahaman *et al.* (2018) sintetizaron y caracterizaron puntos cuánticos de SnS utilizando la técnica de deposición química en baño (CBD), con SnCl<sub>2</sub> como precursor, trietanolamina como fuente de azufre, NH<sub>4</sub>OH para ajustar el pH a 11, y ácido oleico en diferentes concentraciones como solvente y agente complejante. La mezcla se agitó a temperaturas entre 75 y 95 °C, con tiempos de deposición de 40, 60 y 80 min. Mediante SEM, observaron tamaños de grano de 3-5 nm en la muestra de 40 min, y el análisis por XRD reveló una estructura cristalina ortorrómbica. Concluyeron que el SnS obtenido tiene potencial como capa absorbente en celdas solares, debido a su capacidad para absorber luz en las regiones visible e infrarroja [25].

M. Minbashi *et al.* (2018) realizaron la deposición de películas delgadas de SnS mediante la técnica de deposición de ángulo oblicuo y deposición física de vapor, aplicadas como materiales absorbentes en celdas solares. El material se depositó en ángulos de  $\theta = 0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$ ,  $65^\circ$ ,  $75^\circ$  y  $85^\circ$ , seguido de un recocido en atmósfera de sulfuro de hidrógeno. Reportaron valores de  $E_g$  entre 1.23 y 1.39 eV y un índice de refracción de 2.7 a 1.27. La estructura de la celda solar incluía ITO/ZnO/Zn(O,S)/SnO<sub>2</sub>/SnS/Mo/vidrio, y la simulación de la curva J-V se realizó con SCAPS-1D, obteniendo el mejor resultado en  $\alpha = 85^\circ$ , con un  $V_{oc}$  de 419.4 mV,  $J_{sc}$  de 27.99 mA·cm<sup>-2</sup>, un FF de 67.97%, y una eficiencia ( $\eta$ ) de 7.68% [28].

A. Voznyi *et al.* (2018), fabricaron celdas solares con la estructura ITO/CdS/SnS/Sn, donde la capa de SnS se obtuvo mediante tratamiento térmico al vacío de películas de SnS<sub>2</sub> depositadas por sublimación en un espacio semicerrado, utilizando un polvo estequiométrico de SnS<sub>2</sub>. La evaporación se realizó con un crisol de molibdeno a 17 cm del sustrato, con el sustrato a 250 °C y el evaporador a 675 °C. Para obtener la fase deseada, se realizaron tratamientos térmicos al vacío a 300, 400 y 500 °C durante 30, 60 y 90 min, y una prueba adicional a 600 °C durante 30 min. El análisis mediante FESEM mostró tamaños de grano menores a 100 nm, y XRD y espectroscopía Raman confirmaron una fase ortorrómbica pura de SnS a 500 °C y 90 min. Las curvas J-V mostraron un  $V_{oc}$  de 370 mV,  $J_{sc}$  de 34.08  $\mu$ A·cm<sup>-2</sup>, una resistencia ( $\rho$ ) de  $1.01 \times 10^5 \Omega$ , un FF de 0.42 y una eficiencia de 0.005% [26].

J. Cho *et al.*, (2019) depositaron películas de SnS por transporte de vapor, con una presión de 2 Torr en flujo de Ar a 600 °C durante 30 min. Además, depositaron una capa de amortiguamiento de CdS mediante CBD, con tiempos de horneado de 15, 18, 20, 22 y 25 min. La caracterización por FESEM y XRD confirmó la estructura ortorrómbica del SnS. La estructura de la celda solar fue Ni-Ag/AZO/i-ZnO/CdS/SnS/Mo/SLG, con un SnS policristalino ortorrómbico. Los resultados eléctricos incluyeron un  $V_{oc}$  de  $280 \pm 17$  mV,  $J_{sc}$  de  $19.50 \pm 0.70$  mA·cm<sup>-2</sup>, un FF de  $52.70 \pm 1.1\%$ , y una eficiencia de  $2.88 \pm 0.17\%$  [27].

V. González *et al.*, (2019) presentaron tres estructuras de celdas solares: TCO/CdS/SnS-CUB/C, TCO/CdS/SnS-ORT/C y TCO/CdS/SnS-CUB/SnS-ORT/C, utilizando SnS depositado por CBD. En la primera síntesis, emplearon cloruro de estaño (II) y tioacetamida, con un tiempo de deposición de 3 h a 17 °C, seguido de 21 h a 8 °C. La segunda síntesis incluyó SnCl<sub>2</sub> anhidro en acetona, ácido cítrico, trietanolamina, polivinilpirrolidona, tiosulfato de sodio y agua desionizada, con un tiempo de 6 h a 55 °C y 0.2 MPa. Los análisis por EDS indicaron una proporción Sn/S de 0.9. El SEM mostró partículas de hasta 30 nm, y el XRD no evidenció fases secundarias. La banda prohibida estimada para el SnS-ORT fue de 1.33 eV. La estructura TCO/CdS/SnS-CUB/SnS-ORT/C alcanzó un  $V_{oc}$  de 488.00 mV y una eficiencia de 1.38% [31].

S. Gedi *et al.*, (2019) estudiaron la optimización de celdas solares con estructura Vidrio/Mo/SnS/CdS/i-ZnO/Al: ZnO/Ni/Ag, la capa absorbadora de SnS la realizaron por el método de baño químico, en el cual variaban la temperatura de depósito de 40-80 °C. Por XRD determinaron la estructura cristalina ortorrómbica de las películas de SnS, mostrando un crecimiento preferencial en el plano (111) y una mayor cristalinidad en la película realizada a 80 °C de temperatura. Por SEM determinaron la distribución del tamaño de grano de cada una de las películas obtenidas, en promedio el tamaño de grano lo encontraron entre 45.5 y 220.4 nm. Mientras que la  $E_g$  la obtuvieron por espectrofotometría, y la establecieron entre 1.30 y 1.41 eV. El estudio de resistividad eléctrica que realizaron reveló una mayor resistividad en las películas con baño químico a 40, 50, 60 y 80 °C. Mediante curvas I-V determinaron como variaba la eficiencia de conversión de energía con los diferentes tiempos de depósito, encontrando eficiencias entre 0.35-0.94%. La mejor celda que obtuvieron fue la realizada a 70 °C, con un  $V_{oc} = 250$  mV, una  $J_{sc} = 9.9$  mA·cm<sup>-2</sup>, un FF = 39% y la eficiencia mencionada de 0.94% [32].

V. Reddy *et al.*, (2019) estudiaron la influencia de la temperatura de sulfuración de la capa absorbadora en una celda solar con estructura Vidrio/Mo/SnS/CdS/i-ZnO/ZnO:Al/Ni/Ag en la eficiencia de conversión de energía, en un rango entre 250 y 500 °C. El estudio de XRD que realizaron reveló la estructura cristalina ortorrómbica de las películas obtenidas, sin embargo, entre 250 y 430 °C fueron observadas fases secundarias, mientras que las películas de 450 y 470 °C no presentaban fases secundarias. Las películas obtenidas a 450 y 470 °C fueron evaluadas por curvas I-V para determinar los parámetros eléctricos; a 450 °C el  $V_{oc}$  fue de 227.00 mV, la  $J_{sc}$  de 8.98 mA·cm<sup>-2</sup>, un FF de 32.1% y una PCE de 0.80%; a 470 °C el  $V_{oc}$  fue de 280.00 mV,



la  $J_{sc}$  de  $20.30 \text{ mA cm}^{-2}$ , un FF de 40% y una PCE de 2.28%. Por una vista de sección transversal de SEM observaron que existía una mejor interacción en la interfaz del Mo y la capa absorbadora de SnS en la celda con temperatura de sulfuración de  $470 \text{ }^\circ\text{C}$ , lo que benefició a los parámetros eléctricos [33].

H. S. Lee *et al.*, (2020) establecieron la influencia que tiene en una celda solar con heterounión CdS/SnS la rampa de aumento de temperatura en el depósito de la capa absorbadora por la técnica de transporte de vapor. Las rampas de temperatura para llegar a  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  de síntesis fueron  $5, 6.7, 10$  y  $20 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , manteniendo el tiempo de depósito en 30 min. La celda solar que fabricaron tenía como estructura SLG/Mo/SnS/CdS/i-ZnO/Al:ZnO/Al. Por SEM fue caracterizada la morfología superficial y la morfología de la sección transversal del SnS sobre SLG/Mo, mostrando una morfología en forma de granos para las muestras analizadas. Por XRD encontraron un SnS ortorrómbico policristalino sin presencia de fases secundarias, con los datos obtenidos por XRD evalúan el coeficiente de textura que brinda información sobre la orientación aleatoria de las películas delgadas, y dado que el coeficiente es mayor que 1 en el plano (111) en las películas con  $5$  y  $6.7 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$ , confirma su orientación preferencial en este plano. Para  $10$  y  $20 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^{-1}$  el plano que se ve favorecido es el (120). Por otra parte, las películas delgadas las incorporaron en una celda solar obteniendo celdas con eficiencias de entre 2.45-3.98% e incrementando conforme incrementan la rampa de temperatura. La mejor celda obtenida tenía un  $V_{oc} = 340 \text{ mV}$ , una  $J_{sc} = 20.16 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  y un FF = 58% [34].

R. Shashidha y N. Choudhary, (2020) evaluaron la heterounión SnS/n-Si, la capa de SnS la obtuvieron por el método de pirólisis por pulverización a 270 °C, para conseguir películas de 37 y 63 nm de espesor. Por XRD determinaron la fase ortorrómbica del material con tendencia a cristalizar en el plano (111) y un tamaño de grano de 15 nm. Los tamaños de grano obtenidos por XRD fueron comparados con los obtenidos por SEM mostrándose un poco mayores de alrededor de 24 nm, lo cual asocian con un mayor crecimiento del grano sobre la superficie. El análisis de EDS muestra una mayor presencia de Sn del 96.58 %wt, con 3.42 %wt de S. Mostraron la vista de sección transversal de la heterounión SnS/n-Si, que muestra que el espesor alcanzado por la película de SnS fue de 16.33 nm. La estructura de celda solar que reportaron fue Ag/p-SnS/n-Si/Al. Realizan un estudio del contacto metal-semiconductor para Ag/SnS, que reveló una corriente de saturación inversa de  $3.05 \cdot 10^{-10} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ , un factor de calidad del diodo de 1.5225, una barrera de potencial de 0.7669 eV y un desorden energético de 0.084 eV. Mientras que las celdas fueron evaluadas con p-SnS de 37 y 63 nm de espesor, utilizando las curvas I-V para determinar principalmente la resistencia en serie que iba de 47.68 k $\Omega$  en oscuridad y 41.44 k $\Omega$  en iluminación para la celda con SnS de 37 nm, y 62.12 k $\Omega$  en oscuridad y 16.66 k $\Omega$  en iluminación para la celda con SnS de 63 nm [35].

D. Jeong *et al.*, (2020) compararon el desempeño de celdas solares al obtener la capa de SnS mediante dos etapas de depósito, la primera con evaporación catódica y la segunda con evaporación con celda de efusión. La evaporación catódica para el depósito de Sn se realizó en una cámara a 5 mTorr y una potencia en CD de 150 W en una atmosfera de Ar, variando el tiempo de depósito para alcanzar espesores de 300, 500 y 700 nm. Posteriormente se prepararon las películas de SnS con los distintos espesores de Sn por evaporación por celda de efusión a 5 mTorr en atmosfera de N<sub>2</sub> y usando una fuente de 5 g de S a 170 °C. El análisis estructural que presentan reveló un sistema cristalino ortorrómbico, con fases secundarias en la muestra con el espesor de Sn-300 nm correspondientes a Sn<sub>2</sub>S<sub>3</sub> y SnS<sub>2</sub>, desapareciendo estas fases para las películas de Sn-500 y Sn-700 nm. El análisis morfológico que obtuvieron por FESEM mostró que el incremento del tamaño de grano es proporcional al aumento del espesor, y se presenta una morfología homogénea para Sn-500, Sn-700 y no así para Sn-300, lo que atribuyeron a la formación de poros causada por el poco espesor. De igual manera realizaron los estudios de reflectancia difusa con los cuales pudieron calcular los  $E_g$  de las películas que se encontraban entre 1.45-1.31 eV. Finalmente, la celda que presentaron tenía una estructura de SLG/Mo/SnS/CdS/i-ZnO/Al:ZnO/Ni/Ag, y obtuvo un  $V_{oc} = 267$  mV, una  $J_{sc} = 8.47$  mA·cm<sup>-2</sup>, un FF = 54.16% y una  $\eta = 0.74\%$  [36].

R.K. Yadav *et al.*, (2021) reportan una estructura de celda solar conformada por SLG/Mo/SnS/CdS/i-ZnO/AZO/Al. Las películas de SnS se depositaron por deposición de vapor térmico (VTD), utilizando como sustrato un vidrio sodocálcico recubierto con Mo (SLG/Mo), el cual fue previamente limpiado con alcohol isopropílico y secado con flujo de nitrógeno ( $N_2$ ). El SnS en forma de polvo, obtenido al moler 0.3 g del material en un mortero, se colocó en la zona de calentamiento del horno bajo una presión constante de 2.0 Torr. Sobre el material absorbente se depositó una fina capa de CdS mediante deposición química en baño (CBD), y para optimizar el rendimiento, se aplicó por sputtering una capa de i-ZnO con espesores que variaron entre 45 y 73 nm. Los tiempos de deposición fueron de 1200, 1600, 1800, 2000, 2200, 2400 y 2600 s, a una temperatura de 600 °C. Para la caracterización, el análisis por XRD confirmó una fase pura de ZnO, y el SEM mostró que el espesor de las películas de ZnO estaba entre 39 y 73 nm. Usando un espectrofotómetro UV-Vis, se determinó un rango de absorción de 300 a 800 nm, y las energías de banda prohibida se estimaron entre 3.14 y 3.29 eV, observándose que el aumento en la banda prohibida correspondía con el incremento en el espesor de la capa de i-ZnO. La celda solar que contenía la película de i-ZnO con un espesor de 45 nm presentó una eficiencia de conversión de energía ( $\eta$ ) de 3.5%, con un  $V_{oc}$  de 334 mV, una  $J_{sc}$  de  $18.9 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  y un FF de 55.5% [37].

T. Ho *et al.*, (2022) mejoraron las propiedades fotovoltaicas de celdas solares con estructura Mo/SnS/CdS/ZnO/ITO/Ag, el estudio lo realizaron cambiando la orientación cristalográfica del SnS, la técnica utilizada fue transporte de vapor y controlaron el ángulo de inclinación del sustrato y la tasa de aumento de temperatura durante el depósito. Por XRD se confirmó la fase cristalina ortorrómbica del SnS, en la que se observa un crecimiento preferencial del plano (101), y la presencia del plano (040) que en este material se asocia a una baja eficiencia, por lo cual al variar el ángulo de depósito de 0 a 60 ° observaron una disminución en el plano mencionado. Con la finalidad de seguir disminuyendo este plano, variaron la tasa de aumento de temperatura entre 13 y 50 °C/min, lo que obtuvieron fue una señal muy baja a 50 °C/min del plano (040). En una vista de sección transversal de SEM, observaron que con una tasa de 13 °C/min y una inclinación de 60 ° se presentaban granos de menor tamaño incrustados entre los granos de mayor tamaño, estos granos de menor tamaño fueron disminuyendo conforme se aumentaba la tasa de temperatura hasta 50 °C/min y manteniendo la inclinación en 60 °. La celda construida bajo estos últimos parámetros mencionados presentó los mejores valores con una  $J_{sc}$  de 13 mA·cm<sup>-2</sup>, una  $\rho$  de 5 Ω·cm<sup>2</sup>, un FF de 53% y una eficiencia del 2% [38].

R. K. Yadav *et al.*, (2023) estudiaron las propiedades de una bicapa absorbadora híbrida de SnSe/SnS para aplicación en celdas solar, utilizando como método la deposición por transporte de vapor, evaluando tres muestras, SnS, SnSe y SnSe/SnS. Por SEM observaron que en la bicapa SnSe/SnS se mostraba un incremento en el tamaño de grano respecto a las muestras con las capas individuales, mientras que por un análisis de sección transversal determinaron que tenían películas compactas, con granos verticales en forma de estaca para las películas de SnS, con un crecimiento aleatorio con SnSe con la misma forma que las de SnS y con una inclinación en los granos de SnSe/SnS respecto a los granos de SnS y SnSe. Los difractogramas que presentan muestran una estructura policristalina (JCPDS, 00-048-1224:SnS; 00-048-1225: SnSe; 01-075-1844:SnSe/SnS), mostrando un coeficiente de textura que indica que en planos comparables existe una mayor cristalinidad en la bicapa. Para las celdas solares utilizaron las tres películas descritas, con estructura, SLG/Mo/Capa absorbadora/CdS/i-ZnO/Al:ZnO/Al. Utilizando la capa de SnS obtuvieron una eficiencia del 2.87%, con SnSe una eficiencia de 1.40%, y con SnSe/SnS del 3.32% [39].

S. John *et al.*, (2023) estudiaron la influencia de la temperatura de recocido en las propiedades de las películas delgadas de SnS preparadas por CBD, la película que presentó las mejores propiedades fue evaluada en una celda solar con estructura ITO/SnS/CdS/Ag. Por XRD determinaron la fase cristalina ortorrómbica del SnS, observando un crecimiento preferencial en el plano (110). El recocido lo realizaron entre 0 y 250 °C, presentando un incremento en la cristalinidad de 0 a 200 °C, y un material amorfo a 250 °C. Mediante el espectro de absorción óptica de luz y la gráfica de Tauc determinaron el ancho de banda entre 1.52 y 1.12 eV. Por curvas I-V determinaron los

parámetros eléctricos, presentando un  $V_{oc}$  de 435 mV, una  $I_{sc}$  de 0.0024 mA, un FF de 28.5% y una eficiencia de 0.015% [40].

R. K Yadav *et al.*, (2024) estudiaron el comportamiento de una celda solar al modificar las vacancias de azufre y la rugosidad superficial de la capa absorbadora de SnS, como continuación a su trabajo realizado en 2021. La celda estudiada tenía una estructura de SLG/Mo/SnS/CdS/i-ZnO/AZO/Al. La capa de SnS fue obtenida por VTD, agregando previamente una concentración de 0.015 g de S a 0.32 g de SnS, y dando un tratamiento térmico previo a la deposición con dos temperaturas distintas de 600 y 650 °C, teniendo como finalidad enriquecer la muestra con azufre y reducir la rugosidad. Encontraron que a 600 °C se beneficiaban los planos cristalinos (131) y (021) del SnS ortorrómbico, lo que resultaba en un crecimiento compacto y uniforme. Mientras que por SEM se analizó el perfil de sección transversal y obtuvieron un mejor crecimiento horizontal y vertical de los cristales. Mediante un análisis Raman encontraron la relación de Sn:S reduciendo de 1.5 a 1.3 dicha relación, y por EDS confirmaron un 5% más de azufre que con la muestra sin tratamiento previo. Para evaluar las películas en una celda solar variaron los tiempos de tratamiento térmico previo de 15-45 min, lo que dio eficiencias desde 3.39% para la celda que incorporaba SnS sin tratamiento previo, hasta 4.82% para la celda con 25 min de tratamiento térmico a 600 °C. El resto de los parámetros eléctricos para la mejor celda los encontraron con un  $V_{oc} = 339$  mV, una  $J_{sc} = 25.87$  mA·cm<sup>-2</sup>, y un FF = 55% [41].

M. I. Khan *et al.*, (2024) investigaron sobre la eficiencia de conversión de energía de una celda solar al conseguir la heterounión TiO<sub>2</sub>/SnS con un método químico simple. El método al que hicieron referencia fue sol-gel con una celda con estructura vidrio/FTO/TiO<sub>2</sub>/SnS/P3HT/Au. Por XRD determinaron la fase anatasa del TiO<sub>2</sub> y la estructura cristalina ortorrómbica del SnS, así como señales características de estas dos estructuras en la unión TiO<sub>2</sub>/SnS en los planos (101), (210), (311), (112) y con un crecimiento preferencial en el plano (111). La energía de banda prohibida para el SnS la determinaron en 1.6 eV, la del TiO<sub>2</sub> en 3.2 eV, y la de la unión TiO<sub>2</sub>/SnS alrededor de 2.75 eV. Mediante un estudio de fotoluminiscencia determinan la recombinación que presenta el SnS, la cual se encuentra en el infrarrojo cercano alrededor de 800 nm, la señal que obtienen la asocian con vacancias de Sn y S, y presenta un ancho pronunciado indicativo de distintos tamaños de cristal; en cuanto a la fotoluminiscencia en la unión TiO<sub>2</sub>/SnS la señal se observa en el mismo rango del espectro y presenta una señal más intensa, es decir, existe una mayor recombinación en la heterounión. Por último, realizan la evaluación de los parámetros eléctricos de la celda solar comparando los resultados con solo SnS y en la unión TiO<sub>2</sub>/SnS, obteniendo una eficiencia de 1.88% para la celda con SnS y del 2.37% para la celda de TiO<sub>2</sub>/SnS, para esta última celda el resto de los parámetros fueron:  $V_{oc} = 660$  mV,  $J_{sc} = 4.67$  mA·cm<sup>-2</sup>, y  $FF = 79\%$  [42].



A. B. Hijal *et al.*, (2024) estudiaron la influencia del potencial de deposición y de las características del sustrato en la eficiencia de conversión de energía de la capa absorbadora de SnS. El método por el cual depositaron y el cual querían evaluar fue deposición electroquímica utilizando como electrodos de trabajo ITO y FTO, por lo que son estos dos los que funcionan como sustratos para la deposición, mientras que el potencial lo mantuvieron en un rango de -0.7 V a -0.9 V, en un tiempo de 45 min. Por otro lado, las estructuras de celda utilizadas fueron Vidrio/n-ITO/p-SnS/Cu y Vidrio/n-FTO/p-SnS/Cu. Por XRD determinaron la estructura cristalina ortorrómbica del SnS en tres potenciales, -0.7, -0.8 y -0.9 V, así como con los sustratos antes mencionados. Encontraron que en ITO a -0.7 V se beneficiaba el crecimiento en el plano (111) y se reduce la presencia de fases secundarias como SnS<sub>2</sub> y SnO<sub>2</sub>, mientras que con FTO la mayor intensidad del plano (111) se presentaba a -0.9 V, sin embargo, tenía una mayor presencia de las fases secundarias mencionadas. Por SEM determinaron que el ITO/SnS a -0.7 V exhibía una distribución compacta y con buenas características mostrando uniformidad de tamaño y forma de grano, y algunos poros en las muestras de -0.8 y 0.9 V. De manera similar los resultados de FTO/SnS mostraron películas delgadas homogéneas, con presencia de granos de mayor tamaño sobre la película conseguida a -0.7 V lo que asociaron a la presencia de SnO<sub>2</sub>, y desapareciendo por completo a -0.8 y -0.9 V. De tal manera que al tomar como base los estudios de XRD y SEM optaron por evaluar los parámetros eléctricos de las uniones ITO/SnS a -0.7 V y FTO/SnS a -0.9 V. Con una irradiación de 100 mW·cm<sup>-2</sup> la eficiencia para ITO/SnS fue de 2.28% y la de FTO/SnS la encontraron en 1.47%. Para la mejor celda de ITO/FTO a -0.7 V, tuvieron un  $V_{oc} = 201$  mV, una  $J_{sc} = 24.75$  mA·cm<sup>-2</sup> y un  $FF = 46.36\%$  [43].

## **2.2 Análisis crítico de la literatura**

De acuerdo con la literatura consultada el SnS presenta diferentes propiedades como material semiconductor, como conductividad tipo  $p$ , estructuras cristalinas ortorrómbicas y cúbicas, una energía de banda prohibida estimada entre 1 y 2 eV y un coeficiente de absorción por encima de  $1 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-1}$ . Es posible obtener películas delgadas de SnS por distintos métodos de síntesis como deposición electroquímica, deposición por transporte de vapor, depósito por baño químico, entre otros. Mientras que las películas obtenidas han sido utilizadas como material absorbedor en celdas solares con eficiencias de entre 0.005% a 4.8%, mientras que teóricamente se menciona que el material puede alcanzar hasta un 30% de eficiencia. Se menciona que la baja eficiencia puede deberse a la presencia de fases secundarias y a la alineación de banda desfavorable respecto con las capas ventana típicas.

## **2.3 Aportación científica**

Contribuir al campo de la energía solar fotovoltaica desarrollando celdas solares de bajo costo utilizando SnS como material absorbedor obtenido por precursores asequibles.

## **2.4 Hipótesis**

Las propiedades ópticas y eléctricas de las películas delgadas de SnS obtenidas mediante una composición novedosa por el método de depósito por baño químico permitirán la obtención de celdas solares con una eficiencia de conversión de energía del 5%.

## 2.5 Objetivos y metas

### 2.5.1 Objetivo general

Incorporar como capa absorbedora en celdas solares películas delgadas de  $p$ -SnS obtenidas mediante una composición novedosa por el método de depósito por baño químico para obtener eficiencias de conversión de energía del 5%.

### 2.5.2 Objetivos específicos

- (i) Preparar películas delgadas de SnS mediante la técnica de CBD.
- (ii) Realizar tratamiento térmico a 400 °C para mejorar la cristalinidad de las películas delgadas.
- (iii) Caracterizar estructuralmente las películas obtenidas de SnS por XRD.
- (iv) Determinar las propiedades ópticas de transmitancia y reflectancia mediante la caracterización por espectroscopía UV-vis.
- (v) Calcular la conductividad del material con los datos obtenidos de corriente mediante la caracterización de la fotorrespuesta.
- (vi) Desarrollar celdas solares utilizando las películas preparadas con la siguiente estructura: FTO/CdS/SnS/C/Ag.
- (vii) Caracterizar morfológicamente la interfaz CdS/SnS de las celdas solares por SEM.
- (viii) Caracterizar las celdas obtenidas mediante las curvas características de J-V, en sus valores de voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ), densidad de corriente de corto circuito ( $J_{sc}$ ), factor de forma (FF) y la eficiencia ( $\eta$ ).

### **2.5.3 Metas**

- (i) Obtener celdas solares con una eficiencia de conversión de energía igual o mayor al 5%.
- (ii) Presentar el trabajo realizado en al menos un congreso internacional.
- (iii) Publicar un artículo científico en una revista indexada.

## **CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA**

El CAPÍTULO 3 se centra en determinar la metodología para poder conseguir la celda solar con estructura FTO/CdS/SnS/C/Ag. Partiendo de la obtención de películas delgadas de SnS y CdS por CBD, con la caracterización estructural, morfológica y optoelectrónica correspondiente. Así como los diversos cálculos considerados para un mejor entendimiento de estas propiedades. Finalizando con la forma de obtención de la celda solar y la determinación de los parámetros eléctricos a partir de curvas I-V.

## 3.1 Síntesis de películas delgadas

### 3.1.1 Películas delgadas de SnS

Los precursores del SnS utilizados fueron  $\text{SnCl}_2$  (99.9%) y el  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  (99.9%), utilizando como agente complejante el  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ . Para la síntesis llevada a cabo por depósito por baño químico, a la cual se le añade en un vaso de precipitado determinada cantidad de  $\text{SnCl}_2$  disuelto en acetona, seguido de  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ . A la solución se le agrega  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , y  $\text{NH}_4\text{OH}$ . Una vez obtenida la solución se colocan los sustratos de vidrio *Corning* en el vaso de precipitado y son llevadas a un baño de recirculación a 40 °C, con muestras de 3, 5 y 7 h.

### 3.1.2 Películas delgadas de CdS

La composición utilizada para la obtención de las películas delgadas de CdS fue reportada por M. Nair et al., [44]. Para la preparación de la solución del baño químico de CdS, se utilizan como precursores el Nitrato de Cadmio ( $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ , 99.6%) y la Tiourea ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ , 99%). En un vaso de precipitados de 100 mL, se añaden 25 mL de  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$  (0.1 M), 15 mL de citrato de sodio ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ , 1 M), 2 mL de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (14 M), 5 mL de  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$  (1 M), y se completa con agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Los sustratos se sumergen en la solución y se lleva a cabo el baño químico a 75 °C durante 3 h.

## 3.2 Tratamiento térmico

Las películas delgadas de SnS se sometieron a tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y una presión de 20 mTorr, en un horno de vacío VBF-1200X de MIT Corp. A las películas delgadas de CdS se les realizó tratamiento térmico a 300 °C durante 30 min en aire con una mufla de la marca Thomas Scientific.

### **3.3 Fabricación de las celdas solares**

Para las celdas solares se utilizó una configuración superestrato, con FTO como vidrio conductor, para posteriormente añadirle la película delgada de CdS que actúa como capa ventana y después la capa absorbadora de SnS, la cual es objetivo de este estudio, y por último añadir electrodos de C y Ag, para finalmente obtener la estructura FTO/CdS/SnS/C/Ag.

Para optimizar la estructura se utilizaron los tres tiempos de depósito mencionados de 3, 5 y 7 h, y se realizó tratamiento térmico a 400 °C. Lo que permitió observar el comportamiento de tres celdas solares con diferentes espesores.

### **3.4 Disposición de residuos**

Los residuos materiales de SnS y CdS serán filtrados para obtener los precipitados y colocados en el contenedor B de sólidos inorgánicos. Mientras que las soluciones filtradas de SnS se depositaron en el contenedor A de soluciones inorgánicos y las de CdS se colocaron en el contenedor E correspondiente a Cancerígenos Inorgánicos. Todo de acuerdo con la legislación vigente de residuos peligrosos de la Facultad de Ciencias Químicas.

## 3.5 Métodos de caracterización

### 3.5.1 Difractometría de rayos X

La XRD es una técnica común para el estudio de estructuras cristalinas y espaciamiento atómico. Se basa en la interferencia constructiva de los rayos X monocromáticos incidentes sobre una muestra cristalina, que de acuerdo con la ley de Bragg se puede expresar según la Ecuación (3.1):

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (3.1)$$

Donde,  $n$  es un entero que indica el número de orden,  $\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X,  $d$  es el espaciamiento interplanar generado por la difracción y  $\theta$  es el ángulo de difracción.

La ley de Bragg relaciona la longitud de onda de la radiación electromagnética al ángulo de difracción y el espaciamiento de red, que, mediante un barrido sobre la muestra, en un rango  $2\theta$  angular, todas las posibles direcciones de difracción de la red son obtenidas y cuantificadas por un detector.

De acuerdo con lo descrito hasta ahora un difractómetro de rayos X se encuentra compuesto por tres elementos básicos: un tubo de rayos X, un porta muestras y un detector, estos componentes se muestran en la Figura 3.1a) [45].



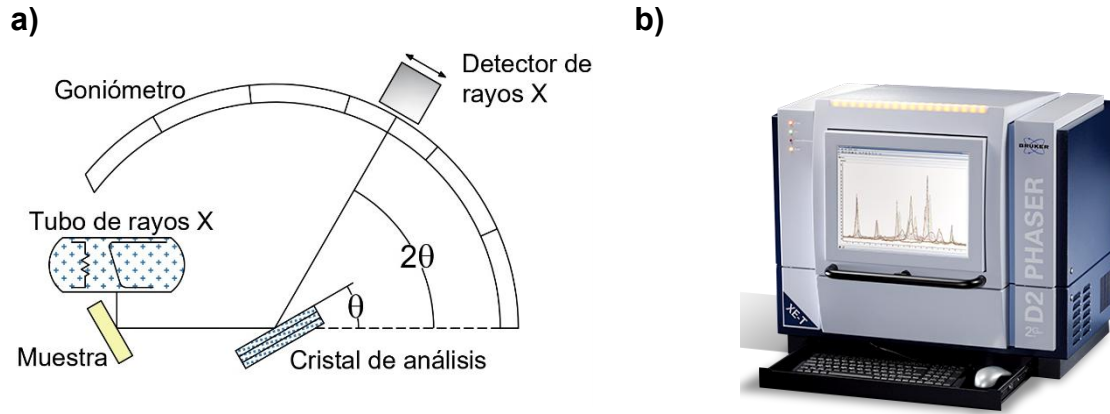


Figura 3.1. a) Diagrama simplificado del sistema de un difractómetro de rayos X; b) Difractómetro D2 Phaser [45].

La intensidad de la señal registrada que se genera por la difracción del haz incidente sobre los planos cristalográficos (hkl), permite calcular de manera aproximada el tamaño de cristal y la densidad de dislocaciones por el método de Debye –Scherrer, de las Ecuaciones (3.2) y (3.3), respectivamente. Así como las microdeformaciones por el método de Williamson-Hall, de la Ecuación (3.4).

Donde intervienen variantes propias del análisis como la anchura de la señal a media altura  $\beta$ , la longitud de onda del haz incidente  $\lambda$ , ángulo de difracción  $\theta$ , y un factor arbitrario K entre 0.9-1.

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (3.2)$$

$$\delta = \frac{1}{D^2} \quad (3.3)$$

$$\epsilon = \frac{\beta}{4 \tan \theta} \quad (3.4)$$

Es posible comprobar el ordenamiento preferencial de los cristales a lo largo de un plano comparándolo contra una muestra sin textura dada por los patrones de difracción de la ficha cristalográfica PDF, y se realiza a partir del coeficiente de textura [39]. El cual se puede calcular a partir de la Ecuación (3.6).

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)}{I_o(hkl)} / \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{I(h_i k_i l_i)}{I_o(h_i k_i l_i)} \right) \quad (3.5)$$

En este proyecto se utilizó el difractómetro D2 Phaser de la marca Bruker mostrado en la Figura 3.1b).

### 3.5.2 Perfilometría mecánica de superficies

Un perfilómetro mecánico mide espesores de películas o capas comparando alturas entre diferentes puntos de la superficie de la muestra. El proceso comienza con la preparación de la muestra, que se coloca en una plataforma estable y nivelada, asegurando una superficie de referencia plana para obtener mediciones precisas. La punta del perfilómetro, montada en un cantilever flexible, se alinea con la superficie de la muestra y se baja hasta tocar ligeramente un punto de referencia conocido. Luego, la punta se mueve horizontalmente siguiendo un camino predeterminado, detectando cambios de altura debido a capas adicionales o variaciones en el espesor. Las desviaciones verticales se miden mediante un transductor de desplazamiento que convierte los movimientos de la punta en señales eléctricas. Estas señales se registran y convierten en datos de altura que representan las variaciones a lo largo del recorrido de la punta [46].

El espesor de una capa específica se determina comparando la altura medida en la superficie de la capa con la altura en la superficie de referencia. Los datos recolectados se procesan y visualizan gráficamente, mostrando las variaciones de altura que permiten calcular el espesor en diferentes puntos [46]. El espesor de las películas se midió utilizando el perfilómetro Alpha-Step D-100 de la marca Tencor Instruments, mostrado en la Figura 3.2.



---

*Figura 3.2. Perfilómetro Alpha-Step D-100: Tencor Instruments.*

### **3.5.3 Espectroscopía ultravioleta visible (UV-Vis)**

La técnica de espectroscopía UV-Vis consiste en proyectar hacia una muestra determinada intensidad de luz, es decir, en diferentes longitudes de onda. Sobre la muestra se pueden presentar diversos fenómenos asociados a la dispersión óptica de la luz, que de acuerdo con las leyes de Snell (Figura 3.3), cuando la luz se mueve de un medio con índice de refracción  $n_1$ , a otro con índice de refracción  $n_2$ , en un ángulo de

incidencia  $\theta_1$  normal a la superficie, el ángulo de refracción  $\theta_2$  se puede calcular a partir de la Ecuación (3.6):

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.6)$$

El índice de refracción  $n$  de un medio óptico es la relación entre la velocidad de la luz en vacío  $c$  y la velocidad de la fase  $v$ , la cual representa la velocidad a la cual se mueve la fase de la onda, es decir:

$$n = c/v \quad (3.7)$$

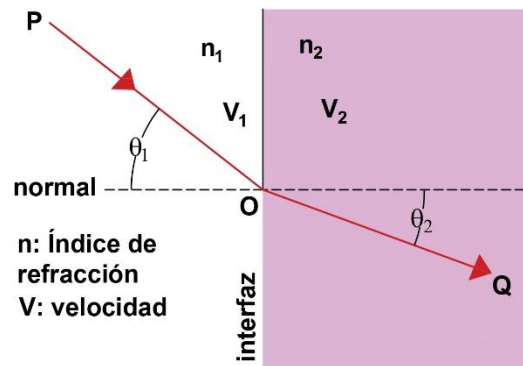


Figura 3.3. Reflexión de la luz en la interfaz entre dos medios con diferentes índices de refracción, para  $n_2 > n_1$  [47].

De acuerdo con lo anterior, por teoría de ondas se pueden predecir las propiedades de transmisión y reflexión de la luz, ya que las propiedades ondulatorias de la luz exhiben efectos de interferencia. Considerando como referencia la muestra presentada en la Figura 3.4, la cual está contenida sobre un sustrato, lo que implica que en el sistema se

encuentren tres medios con índices de refracción diferentes ( $n_0$ ,  $n_1$  y  $n_2$ ), las ondas de luz que están en fase entre sí experimentan interferencia constructiva y sus amplitudes se suman, situación mostrada en la Figura 3.4a).

Mientras que las ondas que están fuera de fase Figura 3.4b) en exactamente  $180^\circ$ , es decir,  $R_1$  más  $R_2$ , experimentan interferencias destructivas, lo cual ocurre cuando  $R_1$  y  $R_2$  se recombinan en la primera interfaz. Sin embargo, para cuando el espesor óptico de la película  $d$  se ajusta de tal manera que las ondas sinusoidales de  $R_1$  y  $R_2$  no experimentan un desfase de  $180^\circ$  la onda resultante se encontrará en  $1/2$  de la longitud de onda original.

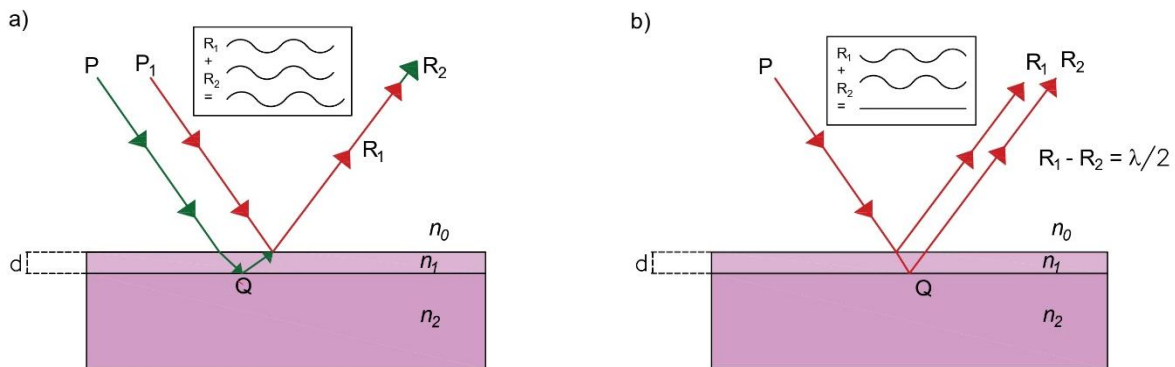


Figura 3.4. Interferencias de luz presentes en la interfaz de dos materiales. a). Interferencia constructiva de los haces reflejados. b) Interferencias destructiva de los haces reflejados [47].

De esta manera que los principales fenómenos ópticos presentes para materiales en película delgada son los siguientes:

- Transmitancia ( $T$ ) y reflectancia ( $R$ ) óptica de semiconductores en película delgada,

- índice de refracción ( $n$ ),
- espesor de la película ( $d$ ),
- absorbancia ( $A$ ) y coeficiente de absorción ( $\alpha$ ),
- y energía de banda prohibida ( $E_g$ ) de película delgada [47].

En este proyecto se utilizó el espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu UV-1800, el cual se muestra en la Figura 3.5, en este equipo se hicieron mediciones de reflectancia y transmitancia espectral en un rango de 250 - 1100 nm de longitud de onda [47], y se calculó la energía de banda prohibida de las películas delgadas obtenidas a partir de:

$$\alpha(h\nu) = A(h\nu - E_g)^n \quad (3.8)$$

Donde,

- $h\nu$  es la energía del fotón incidente,
- y  $\alpha$  fue calculado a partir de la siguiente ecuación [47],

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln 1/T(\lambda) \quad (3.9)$$

Mientras que la transmisión de la luz a través del semiconductor se da por la ley de Beer mostrada en la Ecuación (3.10), ignorando las pérdidas por reflexión. Siendo  $I(\lambda)$  la intensidad transmitida de la luz,  $I_0(\lambda)$  la intensidad de luz incidente, ambas en función de la longitud de onda [11].

$$\frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = e^{-\alpha(\lambda)d} \quad (3.10)$$



---

*Figura 3.5. Espectrofotómetro UV-Vis Shimadzu UV-1800.*

### **3.5.4 Microscopías**

#### *3.5.4.1 Microscopía electrónica de barrido*

Un SEM utiliza un proceso de formación de imágenes donde un haz de electrones barre la superficie de la muestra, recogiendo electrones que han interactuado con esta para construir una imagen píxel por píxel. En la Figura 3.6a) se muestran los elementos que conforman el microscopio, el cual cuenta con una fuente emisora de electrones, que emite un haz de electrones hacia el ánodo, un sistema de lentes electromagnéticas que se encarga de dirigir los electrones hacia la muestra, un porta muestras donde se coloca la muestra de interés, y en su modo más simple un detector de electrones retrodispersados y un detector de electrones secundarios.

Los detectores reciben información de los electrones emitidos de la muestra y los producidos por dispersiones elásticas desde el interior de la muestra, lo que ofrece capturar la topografía tridimensional de la muestra gracias a su profundidad de campo, resolución de menos de 1 nm e información espectral relacionada con los números atómicos de los átomos que contiene la muestra [48].

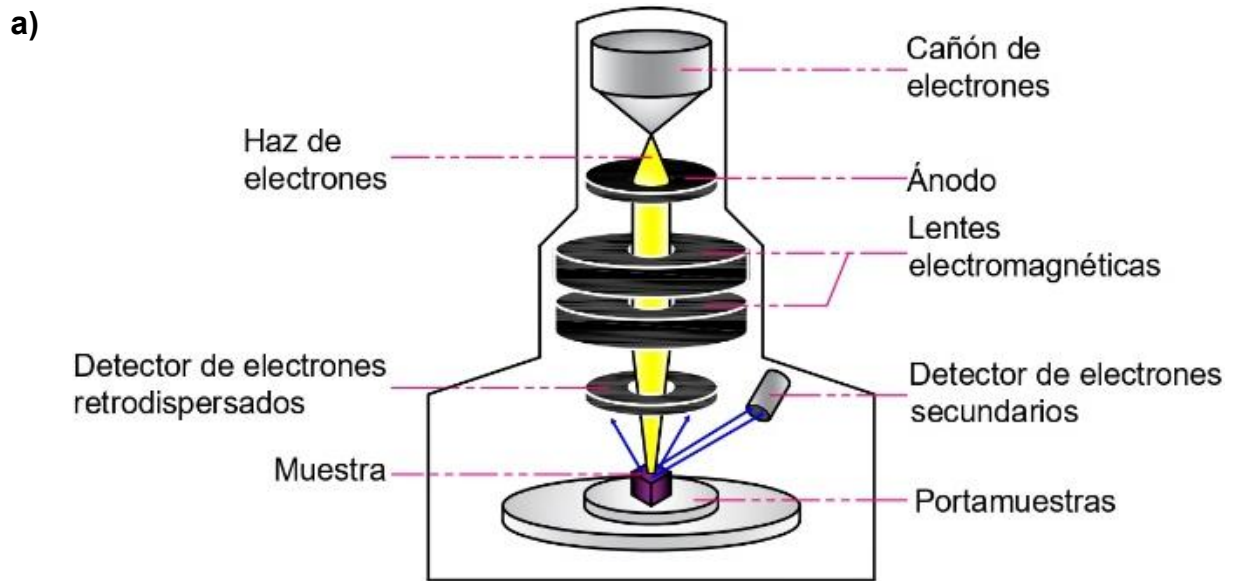


Figura 3.6. a) Esquema del microscopio electrónico de barrido (SEM) [48]. b) Microscopio Hitachi S-5500 FE-SEM.



El microscopio Hitachi S-5500 FE-SEM mostrado en la Figura 3.6b) se utilizó para realizar el análisis del perfil de sección transversal de la heterounión CdS/SnS.

#### 3.5.4.2 *Microscopía de fuerza atómica*

La AFM permite evaluar la topografía de una muestra, como se muestra en Figura 3.7a) el principio de funcionamiento se basa en la fuerza de repulsión o atracción generada entre la interacción punta-muestra, que aparece cuando los átomos que constituyen el extremo de la sonda interactúan con los átomos de la superficie de la muestra, por lo cual la diferencia de alturas entre la nanopartícula y una altura de referencia da como resultado la profundidad, y gracias a su movimiento bidimensional es posible medir la topografía de la muestra.

En la Figura 3.7b) se muestra que el AFM está equipado con una punta o sonda hecha de Si o Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, la punta está unida a un microcantilever, que se caracteriza por tener un resorte, de determinada constante ( $k$ ), que tiene la finalidad de convertir la fuerza de interacción generada por la punta y la muestra, en una deflexión dependiente del tipo de fuerza, positiva si es atractiva o negativa cuando la fuerza es repulsiva. Esta deflexión es medida por un detector (fotodiodo de cuatro cuadrantes) que tiene acoplado un haz óptico, que incide en el detector e interactúa con el cantilever. El análisis tridimensional de la topografía se puede realizar gracias a que la punta escanea la muestra con actuadores piezoeléctricos XY, mientras que un actuador Z mantiene constante la distancia punta-muestra durante el escaneo [49].

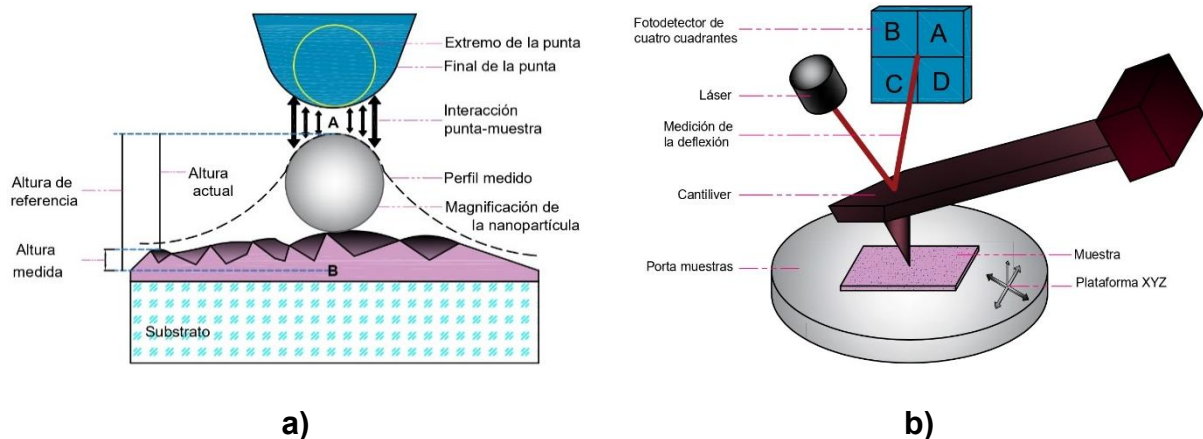


Figura 3.7. a) Esquema del funcionamiento de un AFM, b) Elementos que conforman un AFM [49].

El análisis de las películas delgadas obtenidas fue llevado a cabo con el microscopio Angstrom Advanced AA3000, presentado en la Figura 3.8.



Figura 3.8. Microscopio de Fuerza Atómica Angstrom Advanced AA3000.

### 3.5.5 Caracterización eléctrica de las películas delgadas

La conductividad eléctrica que presentan los semiconductores depende de la cantidad de electrones en la banda de conducción y la cantidad de huecos en la banda de valencia, a estos electrones y huecos que no se encuentran ligados a defectos cristalinos se les conoce como portadores libres. Cuando los portadores son expuestos a un campo eléctrico, asumiendo que el campo eléctrico por cada electrón libre es igual al campo eléctrico aplicado externamente, es decir, en presencia de un campo eléctrico débil, entonces el comportamiento puede describirse mediante una relación lineal representada por la ley de Ohm [50]:

$$V = IR \quad (3.11)$$

Uno de los parámetros que se puede encontrar mediante la Ecuación (3.11) es la resistividad, debido a que la resistencia está relacionada a la resistividad como sigue:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.12)$$

De esta manera, si se conoce la respuesta en corriente bajo un campo eléctrico aplicado, las ecuaciones (3.11) y (3.12) se pueden reescribir de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{VA}{I l} \quad (3.13)$$

Por último, se conoce que la conductividad es el inverso de la de la resistividad, por lo cual a partir de la Ecuación 8, se establece la conductividad como sigue:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{I l}{V A} \quad (3.14)$$

#### 3.5.5.1 Método de las dos puntas

El método de las dos puntas se utiliza para medir la respuesta de la corriente generada en la película delgada al aplicar un voltaje y bajo polarización de luz, a lo que se le conoce como fotocorriente o fotorrespuesta de la película delgada. En la Figura 3.9 se muestra el esquema para realizar la medición, el cual consiste en colocar sobre la película delgada semiconductora un par de electrodos, que servirán para hacer contacto con las dos puntas de una fuente de voltaje. La medición se realizará en tres intervalos de 20 s cada uno, dos en obscuridad y uno intermedio bajo iluminación. La respuesta en corriente se registra en un software [51].

Con las mediciones registradas es posible obtener la conductividad de la película delgada, al conocer el área transversal de la película, que está dada por la longitud de los contactos metálicos ( $b$ ) y el espesor de la película ( $d$ ), así como la distancia ( $l$ ) entre los dos electrodos. De tal manera que es posible reescribir la Ecuación (3.14) tomando en cuenta las consideraciones anteriores como sigue:

$$\sigma = \frac{I l}{V b d} \quad (3.15)$$

Mientras que con la respuesta en corriente que se da entre la película en oscuridad ( $I_d$ ) y con iluminación ( $I_l$ ), se puede determinar la sensibilidad de la muestra a partir de la Ecuación (3.16).

$$S = \frac{I_l - I_d}{I_d} \quad (3.16)$$

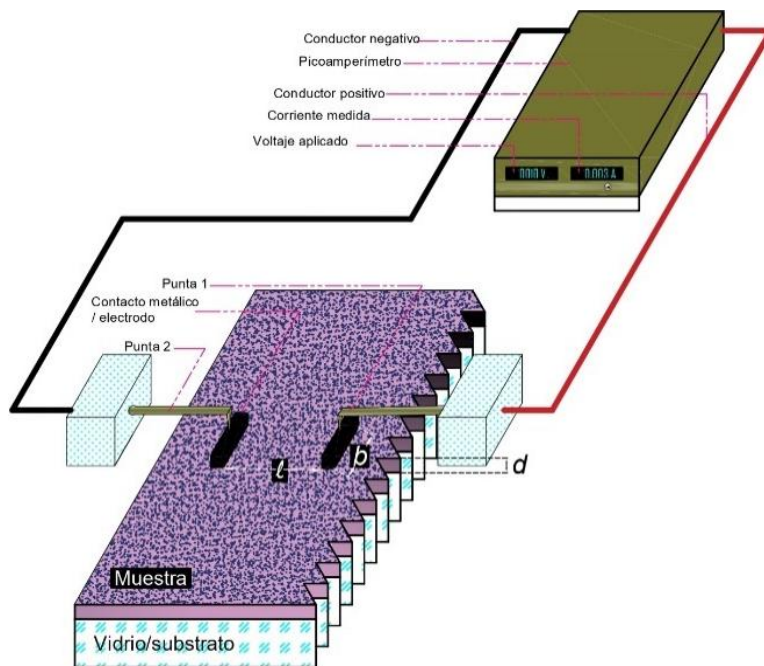


Figura 3.9. Esquema de medición de la fotorrespuesta [51].

La medición fue realizada con un picoamperímetro Keithley 6487 y una lámpara de 40 W Home Classics HCLE-P, ambos equipos son mostrados en la Figura 3.10.

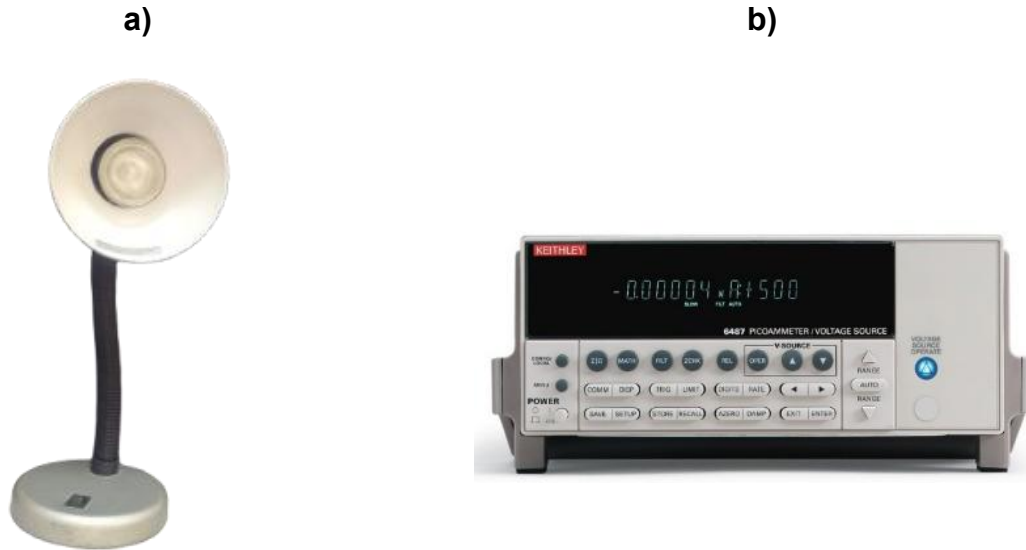


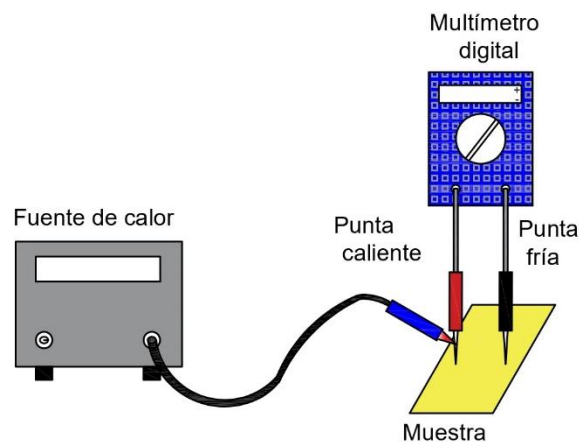
Figura 3.10. a) Pico amperímetro y b) Lámpara utilizados en las mediciones de fotorrespuesta.

### 3.5.5.2 Método de la punta caliente

De acuerdo con lo descrito en la sección 1.5 los semiconductores pueden presentar conducción  $n$  o  $p$ , el tipo de conducción toma relevancia ya que de ella dependerá la aplicación que se le pueda dar al material, por lo cual se describe el método de la punta caliente, para determinar el tipo de conductividad.

Este método se basa en el principio de que, al aplicar una fuente de calor a un semiconductor, los portadores de carga (electrones o huecos) se moverán desde la región caliente a la región fría debido a la difusión térmica. Este movimiento crea una diferencia de potencial, conocida como voltaje termoeléctrico o voltaje Seebeck, que puede medirse para determinar el tipo de conductividad del semiconductor [52].

El esquema práctico para medir el tipo de conductividad es presentado en la Figura 3.11, y consiste en un voltímetro digital al cual se le aplica calor a una de sus puntas mediante una estación de soldadura de componentes electrónicos, mientras la otra permanece a temperatura ambiente ya que actuará como la punta fría. A medida que la punta positiva se calienta, los portadores libres mayoritarios, térmicamente excitados se difunden desde una región de alta concentración a una región de baja concentración a través de la película delgada, y en todas direcciones debido al gradiente de concentración, por lo cual se genera una diferencia de potencial entre la región caliente y la región fría. Este potencial puede ser positivo si los portadores mayoritarios son electrones, o negativo si son huecos [53].



*Figura 3.11. Diagrama esquemático del método de la punta caliente [53].*

### 3.5.6 Caracterización de los parámetros eléctricos de las celdas solares

Los parámetros eléctricos de una celda solar son obtenidos mediante curvas características de corriente y voltaje (Curvas I-V). Las curvas I-V en una celda solar se obtienen midiendo la corriente que la celda produce bajo diferentes voltajes mientras está iluminada por una fuente de luz, la cual simula la radiación solar. Los parámetros que se pueden obtener se describen a continuación:

- Corriente de Cortocircuito ( $I_{sc}$ ): Es la corriente máxima que puede producir la celda solar cuando el voltaje que pasa a través de la celda es cero ( $V = 0$ ).
- Voltaje de Circuito Abierto ( $V_{oc}$ ): Es el voltaje máximo que puede producir la celda solar cuando la corriente es cero ( $I = 0$ ).

Como ejemplo se muestra la Figura 3.12, en donde se presentan los parámetros descritos con anterioridad en la curva I-V de color azul, y se puede observar una curva adicional de color rojo correspondiente a la curva  $P$  vs  $V$ , de donde se obtienen el punto de máxima potencia  $P_{mp}$  de la celda, este punto se caracteriza por un voltaje  $V_{mp}$  máximo y una corriente  $I_{mp}$  máxima [54].

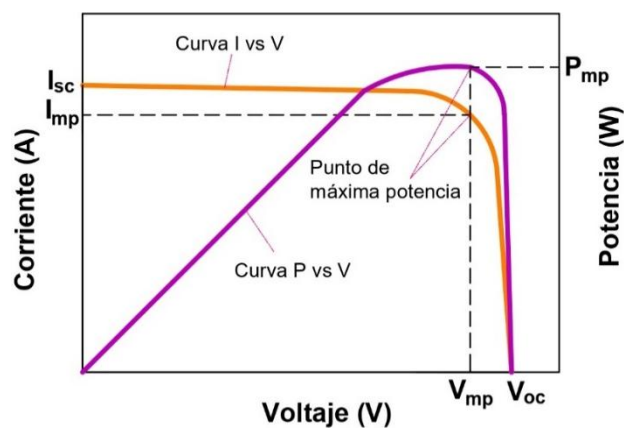


Figura 3.12. Esquema de los parámetros de las curvas I vs V y P vs V [54].



A partir de los parámetros anteriores se pueden realizar operaciones matemáticas para obtener la relación entre la corriente máxima generada y los puntos del  $V_{oc}$  e  $I_{sc}$ , conocido como factor de forma, que está dado por la siguiente ecuación:

$$FF = \frac{(V_{mp} \cdot I_{mp})}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3.17)$$

La corriente generada en cada punto de la curva es posible expresarla en términos del valor obtenido por unidad de área, a lo que se le conoce como densidad de corriente:

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.18)$$

De esta manera, y a partir de la Ecuación (3.19) es posible determinar la eficiencia de conversión de energía, en la cual se cuantifica la relación entre la potencia aprovechada por la celda (parámetros de salida: Voltaje máximo y densidad de corriente máxima), y la potencia generada por el simulador solar en AM 1.5G, equivalente a  $100 \text{ mW/m}^2$  (parámetros de entrada) [55].

$$\eta = \frac{(V_{mp} \cdot J_{mp})}{100 \text{ mW/m}^2} \quad (3.19)$$

Un análisis más profundo para entender el funcionamiento de la celda solar contempla aspectos físicos de la estructura de la celda. Con la resistencia en serie  $R_s$  calculada a partir de la Ecuación (3.20) se asocia la calidad de los electrodos y conexiones eléctricas con una región cercana al corto circuito de la curva I-V. Mientras que en una región cercana al circuito abierto es posible asociar los defectos e imperfecciones de los materiales con la resistencia en paralelo  $R_{sh}$  calculada a partir de la ecuación (3.21). Cuanto más alta sea  $R_s$  y con  $R_{sh}$  menores a 1 k $\Omega$  involucran un mal funcionamiento de electrodos y de los materiales semiconductores [56].

$$\frac{dv}{d \ln I} = IR_s + \frac{nkT}{q}; R_s \rightarrow \text{Operación óptima} \quad (3.20)$$

$$R_{sh} = \frac{d(V)}{d(I)}; R_{sh} \rightarrow \text{Corto circuito} \quad (3.21)$$

Mediante un análisis de estructuras de contacto M-S Schottky a partir de curvas I-V es posible conocer el comportamiento rectificador de la celda solar, de tal manera que la corriente inversa de saturación  $I_o$  puede ser calculada a partir de la Ecuación (3.22).

$$I = I_o \left[ \exp\left(\frac{qV}{n_i k_B T}\right) - 1 \right] \quad (3.22)$$

Siendo  $I$  la corriente medida,  $V$  el voltaje aplicado,  $T$  la temperatura en valores absolutos,  $q$  la carga del electrón,  $k_B$  la constante de Boltzmann y  $n_i$  el factor de identidad calculado a partir de la siguiente Ecuación:

$$n_i = \frac{q}{k_B T} \left( \frac{dV}{d(\ln I)} \right); V \rightarrow 0 \quad (3.23)$$

Con los valores de  $I_0$  y  $n_i$  de las dos últimas ecuaciones se puede determinar la calidad de interacción que se tiene en la interfaz en la heterounión  $p-n$  [35, 57].

Para el estudio de las curvas características que se presentan en este trabajo se utilizó el simulador solar *Oriel LCS-100* mostrado en la Figura 3.13 y el picoamperímetro previamente mencionado en 3.5.5.1.



---

*Figura 3.13. Simulador solar Oriel LCS-100.*

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados y discusiones de las caracterizaciones estructurales, ópticas y eléctricas de las películas delgadas de SnS y CdS, obtenidas mediante el método de depósito por baño químico. La morfología en la interfaz CdS/SnS, así como los parámetros eléctricos y eficiencia de la celda con estructura FTO/CdS/SnS/C/Ag.

## 4.1 Películas delgadas de SnS

Se presentan los resultados de la caracterización de las películas delgadas de SnS depositadas por CBD en vidrio Corning a 40 °C por 3, 5 y 7 h, y posterior tratamiento térmico a 400 °C con un vacío de 20 mTorr para mejorar la cristalinidad de las películas.

### 4.1.1 Espesor de las películas delgadas del SnS

Para determinar los espesores de las películas depositadas a diferentes tiempos de depósito se utilizó un perfilómetro mecánico, tal como se describe en la sección 3.5.2. Los resultados del análisis de las películas delgadas de SnS obtenidas, revelaron que los espesores alcanzados fueron de 128 nm para la película con tiempo de depósito de 3 h, 632 nm para la de 5 h, y 701 nm para la de 7 h.

En la literatura, se han reportado diversas estructuras de celdas solares de película delgada donde se varía la capa de SnS. Por ejemplo, Y. Gupta y P. Arun [58], observaron las capas de SnS tipo *p* mejoran su eficiencia con espesores mayores, debido a una mejor movilidad y características de absorción. De manera similar, F. Jiang *et al.* [59], encontraron que una capa absorbadora de SnS de aproximadamente 845 nm resultaba en la mejor eficiencia de conversión en celdas SnS/*i*- $\alpha$ Si/*n*- $\alpha$ Si. Por otro lado, S. Islam *et al.* [60], reportaron que espesores alrededor de 2000 nm en estructuras CdS/SnS maximizaban la eficiencia, alcanzando hasta un 13.2% mediante un análisis numérico realizado. Estos estudios sugieren que los espesores más altos obtenidos en esta investigación (632 y 701 nm) podrían ofrecer mejores propiedades de absorción de luz en comparación con la película de 128 nm, lo que podría tener un impacto positivo en la

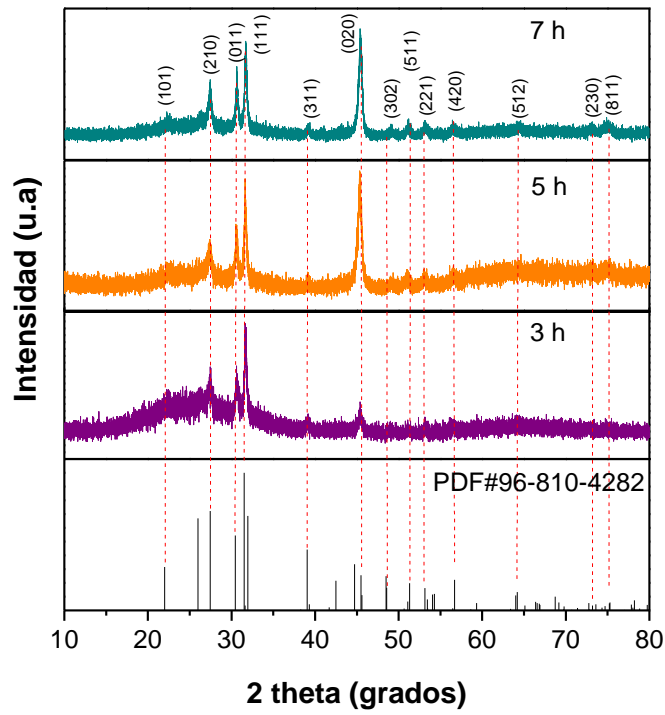
eficiencia de las celdas solares, lo cual concuerda con las eficiencias obtenidas de la sección 4.4.

#### **4.1.2 Estructura cristalina de las películas delgadas del SnS**

Las películas delgadas de SnS se caracterizaron estructuralmente mediante la técnica de XRD. En la Figura 4.1a) se muestran los difractogramas de las películas delgadas del SnS depositadas para 3, 5 y 7 h de depósito, y con tratamiento térmico a 400 °C. Los patrones de difracción indican una cristalina ortorrómbica de acuerdo con la ficha cristalográfica PDF#96-810-4282, obteniendo señales en 2 theta a 21.99, 27.46, 30.46, 31.52, 39.04, 45.50, 48.58, 51.31, 53.15, 56.68, 64.20, 73.20 y 75.20 °, correspondientes a los planos (101), (210), (011), (111), (311), (020), (302), (511), (221), (420), (512), (230) y (811), respectivamente.

En la Figura 4.1b), se presenta la tendencia a la formación de los planos cristalográficos (101), (210), (011), (111), (311), (020), (302), (511), (221), (420), debida al comportamiento del coeficiente de textura que presentan las muestras. H. S. Lee *et al.* [34] menciona que se debe de tomar en cuenta que los planos con preferencia de cristalización son aquellos que tienen un coeficiente de textura que es mayor que 1, en comparación con una muestra sin textura obtenida para este trabajo de la ficha cristalográfica PDF#96-810-4282.

a)



b)

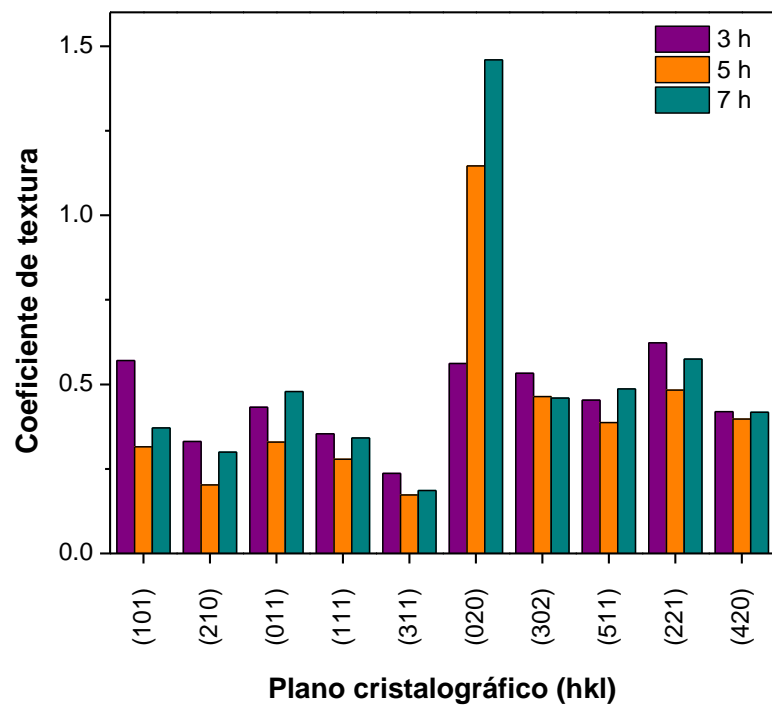


Figura 4.1. a) Difractograma de rayos X y b) Coeficiente de textura de las películas delgadas de SnS a 3, 5 y 7 h de depósito con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío.

El plano que presenta mayor ordenamiento cristalino es el (020), mostrando un incremento en la textura conforme al aumento del tiempo de depósito. El coeficiente de textura para la película de 3 h se encuentra por debajo de 1, mientras que para la de 5 h es superior a 1 y para la de 7 h alcanza un valor cercano a 1.5, lo cual concuerda con la intensidad de los patrones de difracción de la Figura 4.1a), en donde a 3 h hay una menor intensidad en el plano (020), e incrementa los tiempos de depósito de 5 y 7 h.

En la Tabla 4.1 se presentan los parámetros estructurales de las muestras, en las que se analizó el tamaño de cristal, la densidad de dislocaciones y las microdeformaciones de los tres planos más representativos. Las películas con 3 y 5 h de depósito presentan igual tamaño de cristal en el plano (210) con 23 nm, mientras que para 7 h de depósito ocurre un aumento del tamaño del cristal hasta alcanzar los 28 nm, disminuyendo de esta manera la densidad de dislocaciones y las microdeformaciones, pasando de  $1.84$  a  $1.30 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$  y de  $0.36$  a  $0.30$ , respectivamente. En el plano (011), se encontró que la película depositada durante 7 h tiene el mayor tamaño de cristal, con 29 nm, lo que repercute en una menor densidad de dislocaciones con  $1.16 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$  y su consecuente disminución de las microdeformaciones de  $0.26$ . Un comportamiento similar es observado en plano el plano (020), donde la película de 7 h presentó el mayor tamaño de cristal, menor densidad de dislocaciones y menores microdeformaciones. Mientras que en el plano (111) el mayor tamaño de cristalito lo presenta la película de 5 h de tiempo de depósito con 31 nm, y con densidad de dislocaciones y microdeformaciones de  $1.04 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$  y  $0.24$ , respectivamente.



Tabla 4.1. Parámetros estructurales de las películas delgadas de SnS.

Planos (hkl)	D (nm)			$\delta$ ( $\cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$ )			$\epsilon$		
	3 h	5 h	7 h	3 h	5 h	7 h	3 h	5 h	7 h
(210)	23	23	28	1.85	1.84	1.30	0.36	0.36	0.30
(011)	23	26	29	1.82	1.46	1.16	0.32	0.29	0.26
(111)	26	31	29	1.53	1.04	1.17	0.29	0.24	0.25
(020)	17	20	22	3.43	2.47	2.15	0.30	0.26	0.24
Promedio	22	26	27	2.26	1.66	1.49	0.30	0.26	0.25

De esta manera se puede decir que la densidad de dislocaciones aumenta con un tamaño de grano pequeño, como lo observado en la película de 3 h donde el tamaño promedio de cristal es  $D = 22 \text{ nm}$  y  $\delta = 2.26 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$ , disminuyendo a  $1.49 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$  para la película de 7 h con un tamaño de cristal  $D = 28 \text{ nm}$ , lo cual concuerda con lo mencionado por M. F. Rahman et al. [61]. Mientras que las microdeformaciones se encuentran en un rango de entre 0.30-0.23, disminuyendo a medida que el tamaño de grano aumenta.

De acuerdo con las investigaciones realizadas por U. Chalapathi et al. [62], y B. A. Hasan y I. H. Shallal [63], el mayor tamaño de cristal encontrado en el plano (111) para las películas puede brindar mejores parámetros eléctricos en la celda, mientras que, con el mayor tamaño de cristal promedio, encontrado en la película de 7 h se contribuye para reducir las fronteras de grano y, por lo tanto, disminuir los sitios de recombinación no radiativa, lo que podría mejorar la eficiencia de las celdas solares, esto concuerda con los parámetros eléctricos y eficiencia obtenidos, y presentados en la sección 4.4.1.

### 4.1.3 Topografía de las películas delgadas de SnS

La Figura 4.2 muestra la topografía superficial de las películas de SnS obtenidas mediante la técnica de caracterización de AFM. Figura 4.2a), corresponde a la muestra

de SnS con 3h de depósito, se observa una superficie aglomerada en la imagen bidimensional, lo que indica una distribución no uniforme del SnS sobre el sustrato. En la imagen tridimensional, se aprecia un crecimiento transversal del SnS con una altura aproximada de 10 nm, aunque de forma cuasiuniforme.

La Figura 4.2b) muestra la topografía bidimensional de la película de SnS depositada durante 5h. Se observan granos de aproximadamente 1.2  $\mu\text{m}$  de ancho, cubriendo en su totalidad la superficie del sustrato. En la imagen tridimensional, se aprecia un crecimiento vertical de los granos con una altura aproximada de 10 nm.

Mientras que la Figura 4.2c) corresponde a la muestra de SnS depositada durante 7h, se observa un aumento en el tamaño de grano en la dirección horizontal, cubriendo de manera uniforme todo el sustrato. Este comportamiento sugiere un depósito homogéneo del SnS a medida que aumenta el tiempo de depósito. La imagen tridimensional confirma que el crecimiento del grano fue predominantemente horizontal (ancho), con una altura inferior a 10 nm.

A partir de la topografía de las tres muestras, es posible inferir que la homogeneidad de la película delgada depende del tiempo de depósito. A tiempos de depósito menores (3h), la superficie tiende a formar aglomerados, dejando expuestas zonas sin recubrir en el sustrato. A medida que el tiempo de depósito aumenta, el tamaño de grano se incrementa, asegurando un mayor recubrimiento del área del sustrato, como se observa en las muestras de SnS depositadas durante 5 y 7h.

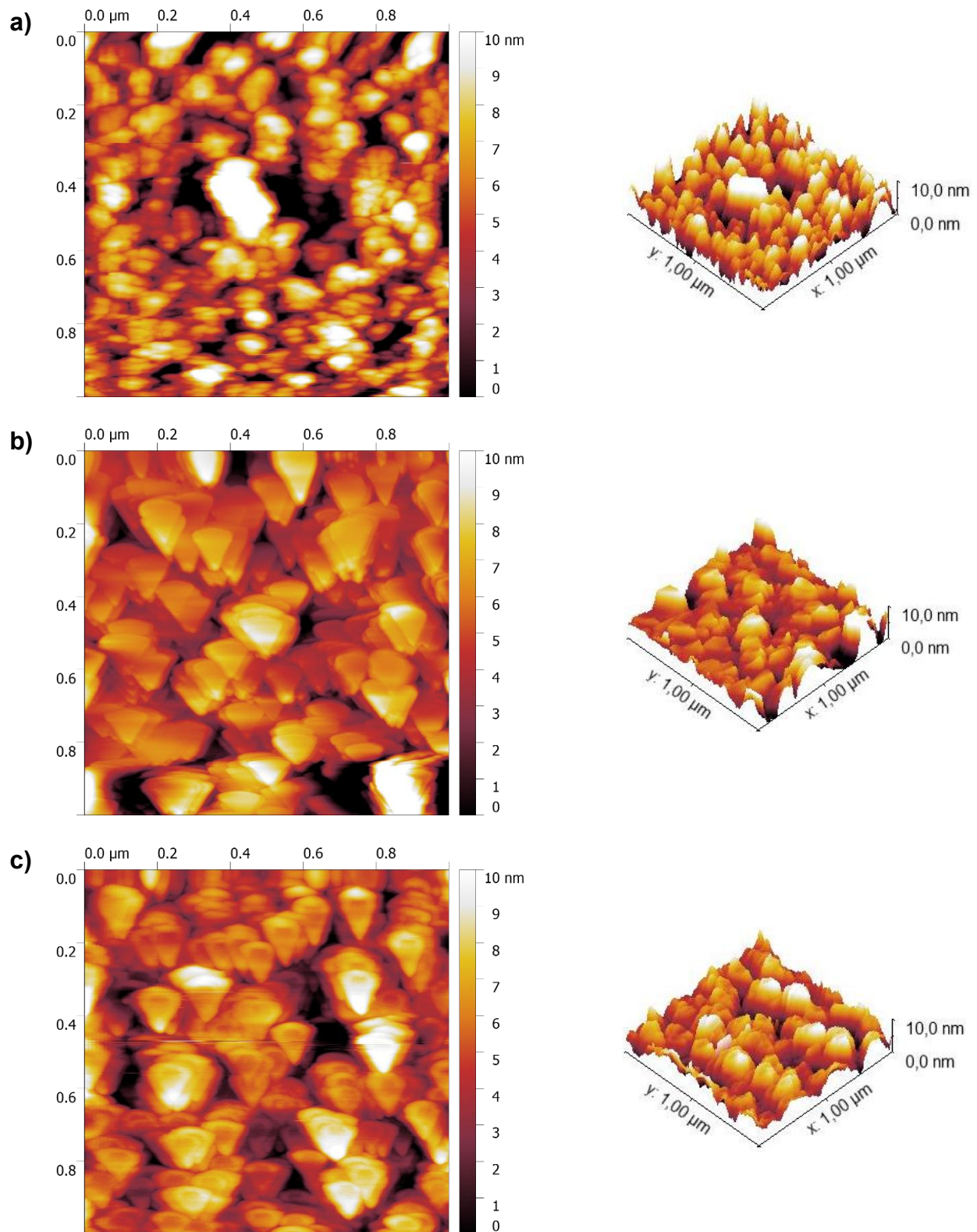


Figura 4.2. Topografía de las películas delgadas de SnS de a) 3 h, b) 5 h y c) 7 h de tiempo de depósito con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío.

Además, se obtuvieron parámetros de rugosidad ( $S_a$ ), rugosidad de superficie ( $S_q$ ), asimetría de la superficie ( $S_{ks}$ ) y coeficiente de curtosis ( $S_{ku}$ ) mediante mediciones de AFM, cuyos valores se concentran en la Tabla 4.2.

Los parámetros de la Tabla 4.2 muestran la tendencia de rugosidad que presentan las películas en función al tiempo de depósito. La película de 3 h presentó mayor rugosidad superficial  $S_a$  con 1.964 nm, seguida de la película de 7 h con 1.697 nm, y finalizando con la película de 5 h con 1.457 nm.

Mientras que la rugosidad media cuadrática  $S_q$ , sigue una tendencia similar: la muestra de 3 h tuvo el mayor valor de 2.442 nm, seguida de la de 7 h con un valor de 2.018 nm y 5 h con 1.916 nm. Esta variación en la rugosidad está relacionada con la orientación de granos: las muestras de 3 h y 7 h presentaron un crecimiento horizontal, lo que aumentó la rugosidad, mientras que la muestra de 5 h mostró un crecimiento vertical, reduciendo su rugosidad superficial. De acuerdo con lo reportado por M. Benhaliliba *et al.* [64], todas las muestras analizadas presentan valores de rugosidad bajos.

*Tabla 4.2. Parámetros de rugosidad de la superficie de las películas de 3, 5 y 7 h.*

<b>Parámetros</b>	<b>3 h</b>	<b>5 h</b>	<b>7 h</b>
$S_a$ (nm)	1.964	1.457	1.697
$S_q$ (nm)	2.442	1.916	2.018
$S_{sk}$	- 0.097	- 0.153	- 0.132
$S_{ku}$	- 0.443	0.519	- 0.142

M. Messaoudi y S. Boudour [65], mencionan que la rugosidad se incrementa con el aumento del tamaño de cristal, esta relación se cumple para las películas de 5 y 7 h, con tamaños promedio de cristal de 25 y 27 nm, respectivamente. Sin embargo, se considera

que el cambio de plano preferencial de (111) a (020) de las muestras con tiempos de depósito de 5 y 7 h, respecto a la de 3 h hace que no se cumpla la relación descrita en esta última película respecto a las que tienen mayor tiempo de depósito. De acuerdo con A. Javed *et al.* [66], en películas semiconductoras el incremento de la rugosidad en la superficie que se presenta cuando se incrementa el espesor y el tamaño de grano, podría afectar la dispersión de los portadores de carga libres en los límites de grano y causar una disminución de los parámetros eléctricos en una celda solar.

S. Zhao *et al.* [67], menciona que los valores negativos obtenidos para la asimetría de superficie  $S_{sk}$ , está relacionada con la presencia de picos. De acuerdo con la descripción bidimensional, la mayor asimetría en la superficie la presenta la muestra 5 h con -0.153, lo que coincide con el crecimiento vertical observado en la imagen bidimensional. Mientras que la asimetría en la superficie se reduce para las películas de 3 y 7 h, lo que indica una mayor presencia de valles. Finalmente se aprecia que los valores de coeficiente de curtosis ( $S_{ku}$ ), S. Zhao *et al.* [67], relaciona este parámetro con la porosidad presente en cada una de las muestras, indicando que una muestra con mayor presencia de picos en su superficie como la película de 5 h, presentará mayor porosidad lo cual es congruente en el valor de  $S_{ku} = 0.519$ . Mientras que una muestra que forme aglomerados disminuirá su porosidad como la muestra de 3 h con  $S_{ku} = -0.04430$ .

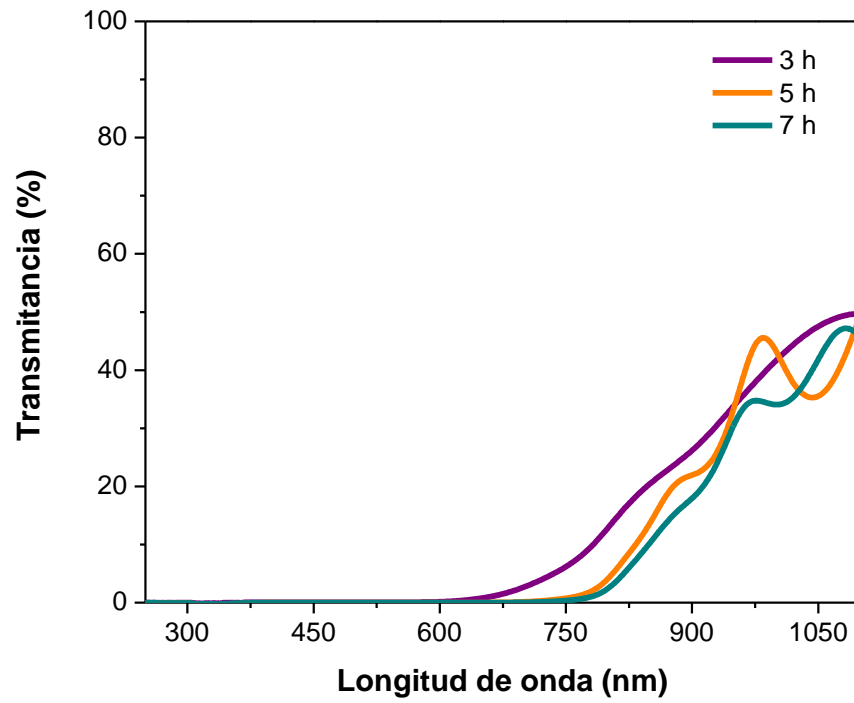
#### **4.1.4 Propiedades ópticas de las películas delgadas de SnS**

Los espectros ópticos de transmitancia de la Figura 4.3a) corresponden a las muestras de 3, 5 y 7 h de depósito, con tratamiento térmico a 400 °C, y para cada una de las películas delgadas presenta gran similitud. Obteniendo transmitancias muy bajas en la región del infrarrojo y absorbiendo en su totalidad dentro de la longitud de onda del

espectro visible (400-700 nm). Mientras que la reflectancia mostrada en la Figura 4.3b) permanece por debajo del 35% en el mismo rango de longitud de onda mencionado, mostrando interferencias ópticas por la luz reflejada sobre el sustrato Corning en 787 a 1086 nm, es decir, dentro del infrarrojo. Por lo cual para un máximo en la transmitancia se tiene un mínimo en la reflectancia, lo cual es favorable en dispositivos de celdas solares, ya que permite la absorción de los fotones, excitando los electrones y generando conductividad. V. González *et al.* [31], menciona que la baja transmisión y reflexión son características deseadas en materiales absorbentes para celdas solares, ya que esto indica una mayor absorción de luz.

En la Figura 4.4 se ilustra en las gráficas de Tauc, precisando los valores de  $E_g$  de las películas analizadas en 1.78, 1.67 y 1.62 eV para las películas de 3, 5 y 7 h, respectivamente. Y. Gupta *et al.* [68], menciona que la disminución de la  $E_g$  está influenciada por el aumento del tamaño de cristal y del espesor de las películas, lo cual concuerda con los resultados obtenidos, ya que el incremento en el tamaño promedio del cristal de 22-27 nm, y de los espesores de 128-701 nm, con lleva a la disminución de la  $E_g$  hasta alcanzar un valor de 1.62 eV.

a)



b)

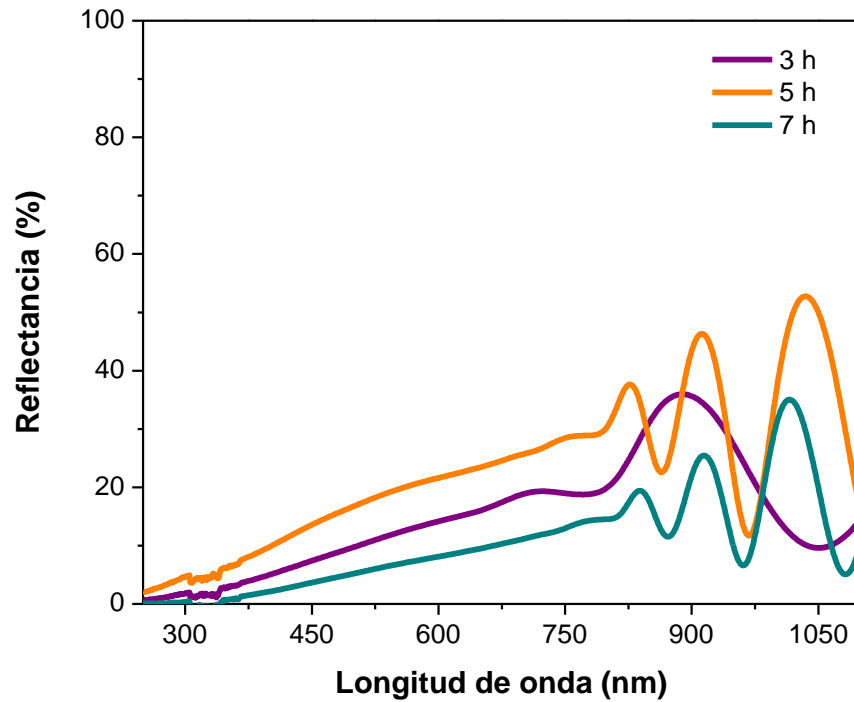


Figura 4.3. a) Transmittancia y b) Reflectancia óptica de las películas delgadas de SnS con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío.

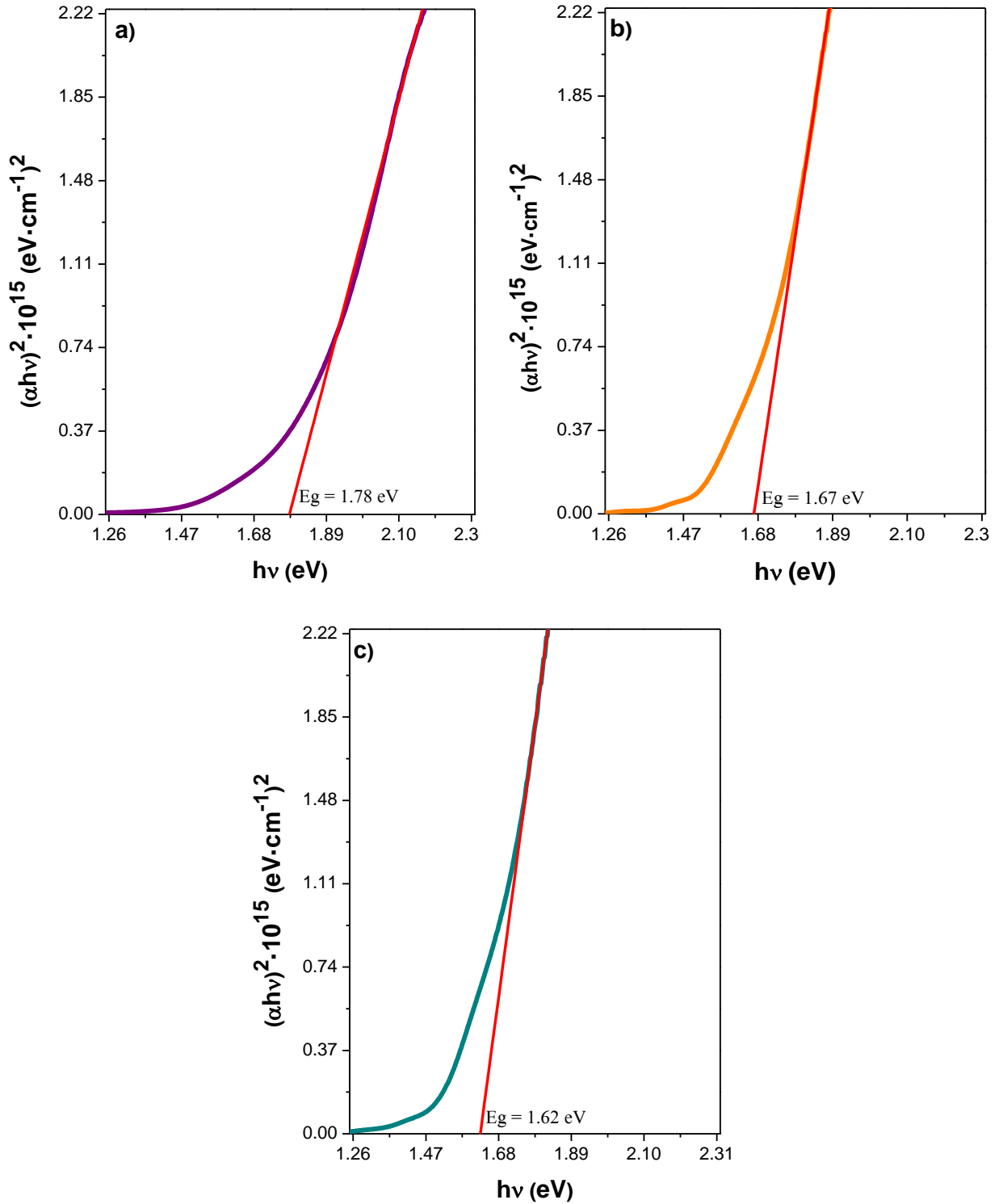


Figura 4.4. Gráfica de Tauc para: a) SnS 3 h, b) SnS 5 h, c) SnS 7 h con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío.



#### 4.1.5 Propiedades eléctricas de las películas delgadas de SnS

Para determinar las propiedades eléctricas de las películas se utilizaron los métodos de la punta caliente y de las dos puntas explicados en la sección 3.5.5. El análisis mediante el método de la punta caliente reveló que las películas delgadas de SnS presentan una conductividad tipo  $p$ , con una mayor movilidad de huecos en comparación de los electrones.

En la Figura 4.5 se muestra la fotorrespuesta de las películas delgadas de SnS obtenida por el método de las dos puntas. Esto permite evaluar la variación en la corriente de la muestra al ser expuesta a un potencial, realizando tres ciclos de mediciones con intervalos de 20 s, dos intervalos en obscuridad y uno intermedio bajo iluminación por cada ciclo. La muestra de 3 h presenta una mayor sensibilidad a la luz ya que registra un incremento en corriente del 79% al ser iluminada, lo que indica una buena respuesta. En comparación, las películas de 5 y 7 h de depósito que registran una sensibilidad del 25 y 57%, respectivamente. Este comportamiento no lineal se asocia al crecimiento vertical de los granos, discutido en la sección 4.1.3., en comparación con el crecimiento de horizontal de las películas de 3 y 7 h, así como al cambio de tendencia a cristalizar en el plano (020) mostrado en la sección 4.1.2., tal como lo relacionan U. Chalapathi *et al.* [62] V. González *et al.* [31] en sus investigaciones.

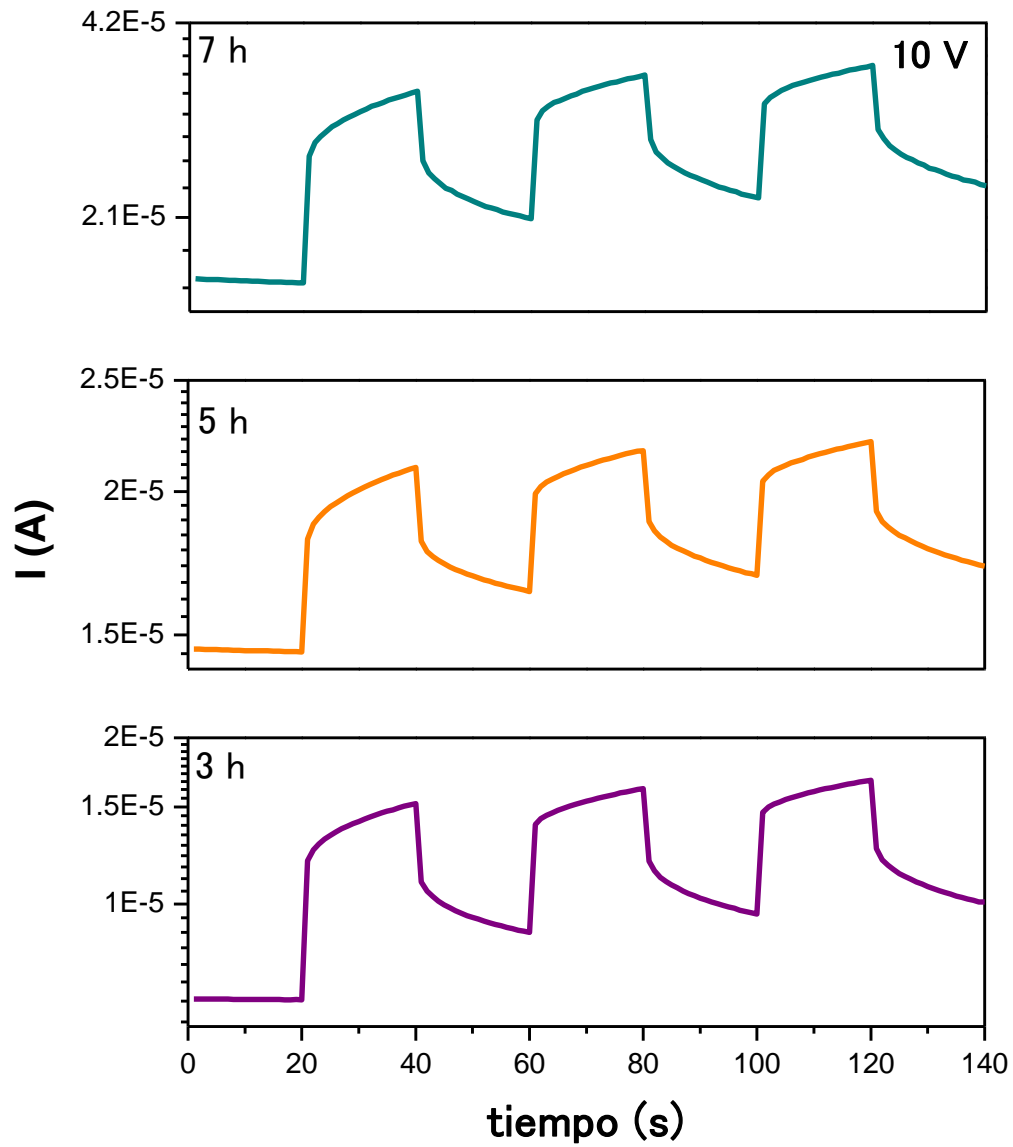


Figura 4.5. Fotorrespuesta de las películas delgadas de SnS, con tratamiento térmico a 400 °C durante 1 h y 20 mTorr de vacío.

Con los valores obtenidos de corriente, el voltaje aplicado y la resistencia calculada, se obtuvieron los resultados de conductividad eléctrica mostrada en la Tabla 4.3, la cual incrementa con el incremento del espesor, con valores entre 0.035-0.087 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )<sup>-1</sup> en obscuridad y de 0.062-0.136 ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )<sup>-1</sup> en iluminación. Manteniéndose una diferencia de menos de un orden de magnitud entre la conductividad en obscuridad y en iluminación, que de acuerdo con M. S. Mahdi *et al.* [69], esta característica no tan necesaria en aplicaciones para celdas solares, ya que al ser un material absorbedor su principal función es realizar la separación electrón-hueco.

*Tabla 4.3. Conductividad eléctrica de las películas delgadas de SnS.*

Muestra	Espesor (nm)	Conductividad ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) <sup>-1</sup>	
		Obscuridad	Luz
3 h	128	0.035	0.062
5 h	632	0.076	0.095
7 h	701	0.087	0.136

## 4.2 Películas delgadas de CdS

El CdS es un material que se ha utilizado como capa ventana típica en celdas solares, por lo cual son ampliamente conocidas sus características optoelectrónicas, de tal manera que en esta sección se discuten los resultados de las propiedades que se consiguieron experimentalmente utilizando la síntesis reportada por M. Nair *et al.*, [44] .

### 4.2.1 Espesor de las películas delgadas de CdS

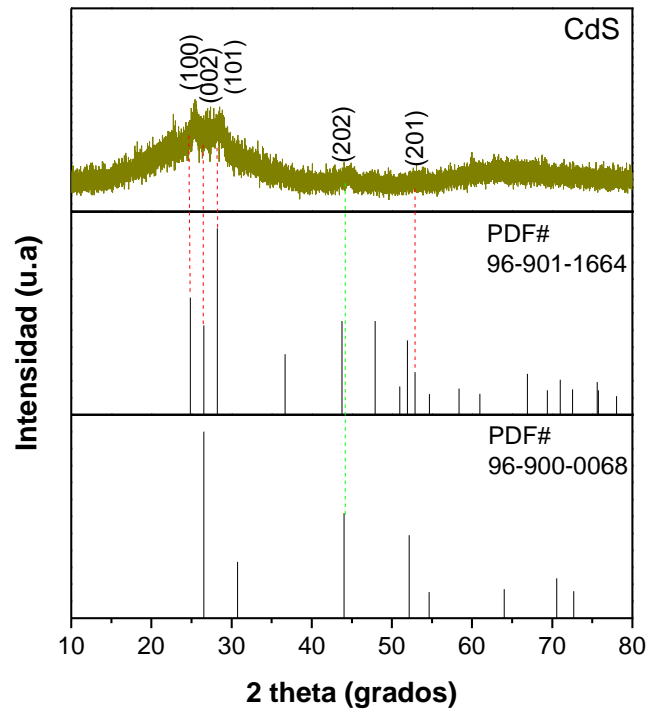
La película delgada de CdS se consiguió por CBD con un tiempo de depósito de 3 h, 75 °C y un tratamiento térmico posterior de 300 °C. Bajo las condiciones mencionadas el CdS logró un espesor de 324 nm.

#### 4.2.2 Estructura cristalina de las películas delgadas de CdS

La película delgada de CdS presenta una estructura cristalina hexagonal de acuerdo con la ficha cristalográfica PDF#96-901-1664 y los planos difractados, lo que se muestra en la Figura 4.6a). En los planos (100), (002) y (101) se presenta la mayor preferencia de cristalización de acuerdo con el coeficiente de textura mostrado en la Figura 4.6b), siendo el plano (002) el que presenta la mayor diferencia respecto a la ficha sin textura PDF#96-910-1664. Por esta misma razón, se considera que existe la presencia de una fase secundaria correspondiente a CdS cúbico debido al mayor incremento del coeficiente de textura del plano (002) que coincide en  $2\theta$  con el plano (111) de la ficha cristalográfica PDF#96-900-0068, y la aparición del plano (202) de la fase cúbica. De igual manera, se observa el plano (201) de menor intensidad de la fase hexagonal. Önal *et al.* [70], menciona que a pesar de que la fase hexagonal es termodinámicamente más estable, pero por CBD es difícil obtener una fase pura de CdS hexagonal, lo que concuerda con la presencia de la fase secundaria cúbica obtenida.

La presencia de la fase secundaria cúbica puede impactar sobre los resultados obtenidos en la celda solar presentados en la sección 4.4. H. I Salim *et al.* [71], reportan que en diversas investigaciones es posible observar esta fase secundaria con tratamientos térmicos de alrededor de 300 °C, y que con el tratamiento térmico a 400 °C realizado en su investigación la fase metaestable cúbica desaparece.

a)



b)

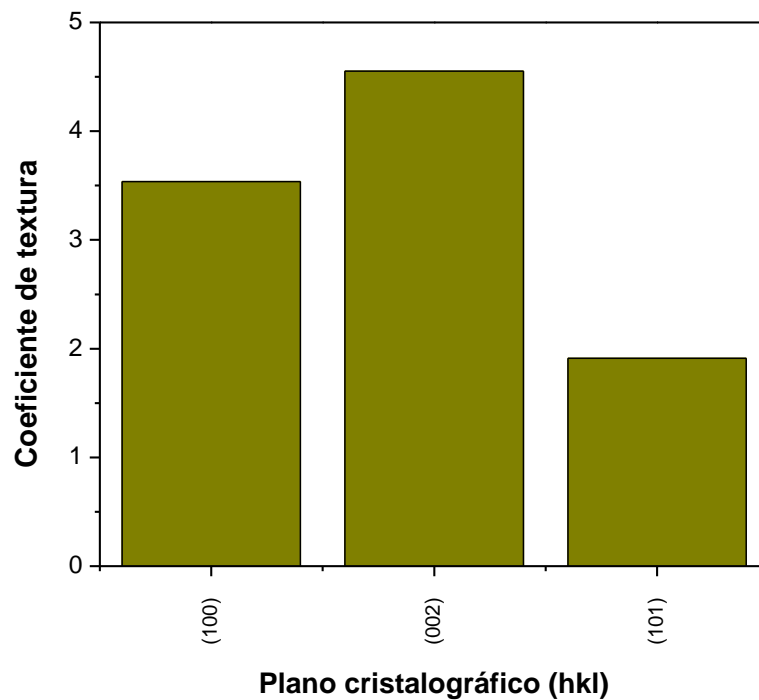


Figura 4.6. a) Difractograma de rayos X y b) Coeficiente de textura de la película delgada de CdS.

En la Tabla 4.4 se presentan los parámetros estructurales de las películas delgadas de CdS, y debido a que las señales difractadas en los planos analizados se encuentran traslapadas, estos parámetros fueron obtenidos directamente del equipo de difracción de rayos X. En el plano (100) se presenta un menor tamaño de cristal con 29 nm, con una densidad de dislocaciones de  $1.19 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$ , y con un indicador de microdeformaciones de  $2.34 \cdot 10^{-2}$ . El plano (002) cuenta con un tamaño de cristal de 37 nm, una densidad de dislocaciones de  $0.73 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$  y una disminución en las microdeformaciones de 1.73. Para el plano (101) se encuentra un tamaño de cristal de 39 nm, una densidad de dislocaciones de  $0.66 \cdot 10^{15} \text{ m}^{-2}$  y mayores microfracturas con 1.54.

*Tabla 4.4. Parámetros estructurales de las películas delgadas de CdS.*

<b>Planos (hkl)</b>	<b>D (nm)</b>	<b><math>\delta</math> (<math>\times 10^{15} \text{ m}^{-2}</math>)</b>	<b><math>\epsilon</math></b>
(100)	29	1.19	2.34
(002)	37	0.73	1.73
(101)	39	0.66	1.54
Promedio	35	1.15	1.87

### **4.2.3 Propiedades ópticas de las películas delgadas de CdS**

Los espectros de transmitancia y reflectancia óptica son mostrados en Figura 4.7, las películas delgadas de CdS presentan una máxima transmitancia de 80%, la cual se ve reducida conforme se acerca hacia una longitud de onda dentro del ultravioleta, y su reflectancia se mantiene por debajo del 20%. Debido a que la capa ventana debe permitir el paso de luz hasta la capa absorbedor esta alta transmitancia y baja reflectancia son indicadores de un buen comportamiento para la finalidad deseada.

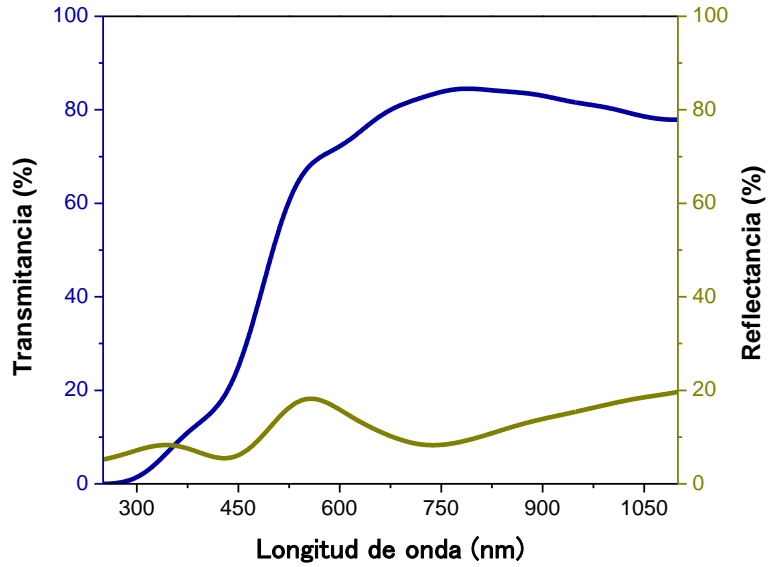


Figura 4.7. Espectros de transmitancia y reflectancia de la película delgada de CdS.

Con los espectros ópticos obtenidos fue posible determinar la energía de banda prohibida directa en 2.38 eV mediante la gráfica de Tauc de la Figura 4.8 con los valores obtenidos a partir de las ecuaciones (3.8) y (3.9), la dependencia lineal de la línea de tendencia con los datos experimentales obtenidos también confirma que el CdS es un semiconductor de banda directa, de acuerdo con E. M. Noori [72].

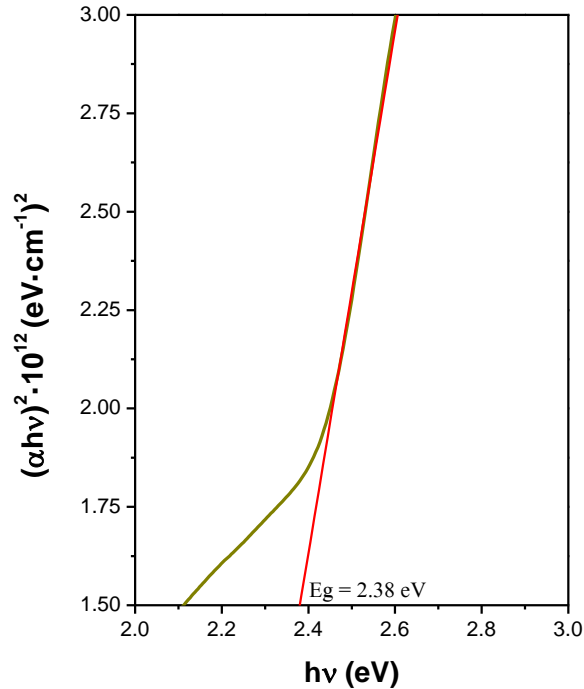


Figura 4.8. Gráfica de Tauc  $(\alpha h\nu)^2$  vs  $h\nu$  de la película delgada de CdS.

#### 4.2.4 Propiedades eléctricas de las películas delgadas de SnS

Las películas de CdS presentaron una conductividad tipo  $n$  al ser evaluadas por el método de la punta caliente. Y en la Figura 4.9 se muestra la fotorrespuesta de las películas obtenida aplicando un voltaje de 10 V. Bajo el voltaje aplicado se observa que la corriente tiene un incremento de 5 órdenes de magnitud respecto a cuando se polariza con luz, apreciable en a los 21 s, hasta alcanzar una corriente mayor  $1.00 \cdot 10^{-5}$  A. De acuerdo con A. S. Gadalla *et al.* [73], la sensibilidad tan alta que presenta el CdS se debe a que, en obscuridad, los electrones y huecos se encuentran abarrotando la banda de valencia, y presenta una resistividad alta, y cuando es iluminado la luz es absorbida permitiendo que los electrones se muevan hacia la banda de conducción, incrementando exponencialmente la conductividad. Este principio crea una alta sensibilidad, y por tal



motivo la conductividad pasa de  $1.44 \cdot 10^{-4}$  a  $2.53 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ , M. Dissanayake *et al.* [74], reportan valores similares de conductividad.

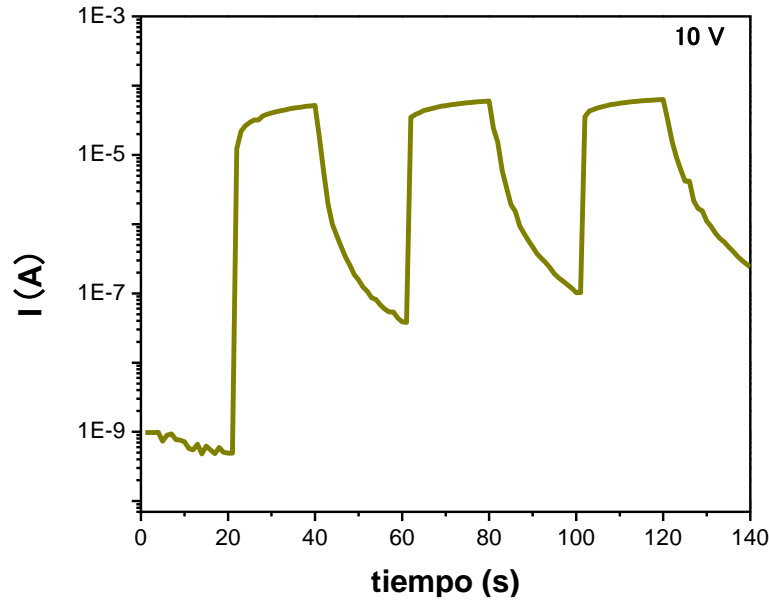


Figura 4.9. Fotorrespuesta de las películas delgadas de CdS.

### 4.3 Perfil de sección transversal de la interfaz CdS/SnS

En la micrografía de la Figura 4.10 se muestra el análisis de sección transversal de CdS/SnS de las tres muestras analizadas, se observa el espesor que alcanzaron las capas de la celda y el mecanismo de crecimiento en cada una de ellas. Debido a que el vidrio-FTO se consiguió comercialmente esta capa mantiene un rango de entre 56-60 nm de espesor con poca diferencia entre las mediciones realizadas. La capa ventana que se obtuvo bajo las mismas condiciones para las tres celdas tuvo una diferencia mayor respecto al FTO, ya que se encontró entre 399-423 nm. El espesor de la capa absorbadora en la película de 3 h de la Figura 4.10a) fue de 469 nm, y aumentando en

proporción al tiempo de depósito en la celda con 5 h de SnS de la Figura 4.10b) a 627 nm, y en la celda de 7 h de la Figura 4.10c) a 777 nm.

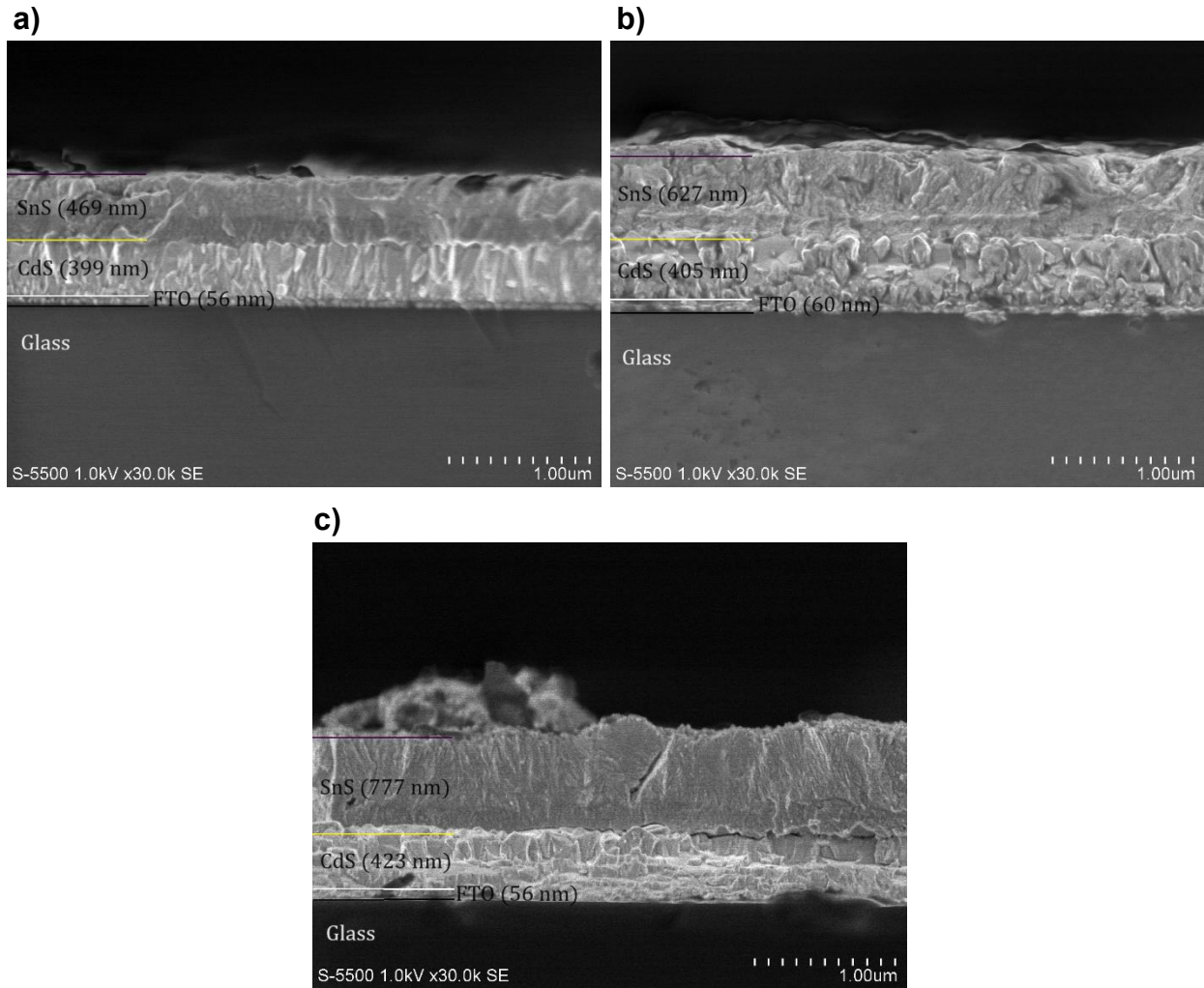


Figura 4.10. Microestructura del perfil transversal de la heterounión CdS/SnS para a) 3 h, b) 5 h y c) 7 h.

En la heterounión CdS/SnS de las tres muestras se observa una estructura de cristales que crecieron en forma de columna, lo cual es favorable para un mejor funcionamiento de la celda de acuerdo con lo mencionado Vonzyi *et al.*, [75]. En la interfaz de 3 h y 5 h existe una transición sin grietas entre las capas lo que favorece la movilidad electrónica. En 7 h hay presencia de grietas lo que pudo causar la disminución de la eficiencia respecto a 5 h, en esta celda también se observa un corte fino en diagonal en la parte central lo cual es producto de la manipulación mecánica de la muestra al momento de la preparación para el análisis SEM.

#### **4.4 Celdas solares con estructura FTO/CdS/SnS/C/Ag**

Las películas delgadas de CdS y SnS caracterizadas de manera individual fueron incorporadas en celdas solares con estructura FTO/CdS/SnS/C/Ag. Se evaluó el rendimiento de las celdas con tiempos de depósito de SnS de 3 h, 5 h y 7 h, que para efectos prácticos se nombraron como M3, M5 y M7 respectivamente, y se analizaron los resultados de cinco sets de tres celdas, una para cada tiempo de depósito, para un total de quince dispositivos fabricados.

A partir de curvas I-V se determinó la PCE de las celdas y los resultados estadísticos son mostrados en la Figura 4.11, la celda solar M3 presentó en promedio una PCE del 0.0073%, mostrando la menor eficiencia en 0.0047% y la mejor eficiencia en 0.0084%. La celda solar M5 mostro eficiencias entre 0.021-0.030%, con un promedio del 0.021%. La mejor PCE para M7 se encontró en 0.021%, y la más baja tuvo un valor del 0.016% y en promedio 0.019%. Tomando como referencia la mejor eficiencia obtenida por M5 en 0.030%, se analizaron a profundidad los parámetros eléctricos del set de celdas donde se obtuvo esta eficiencia.

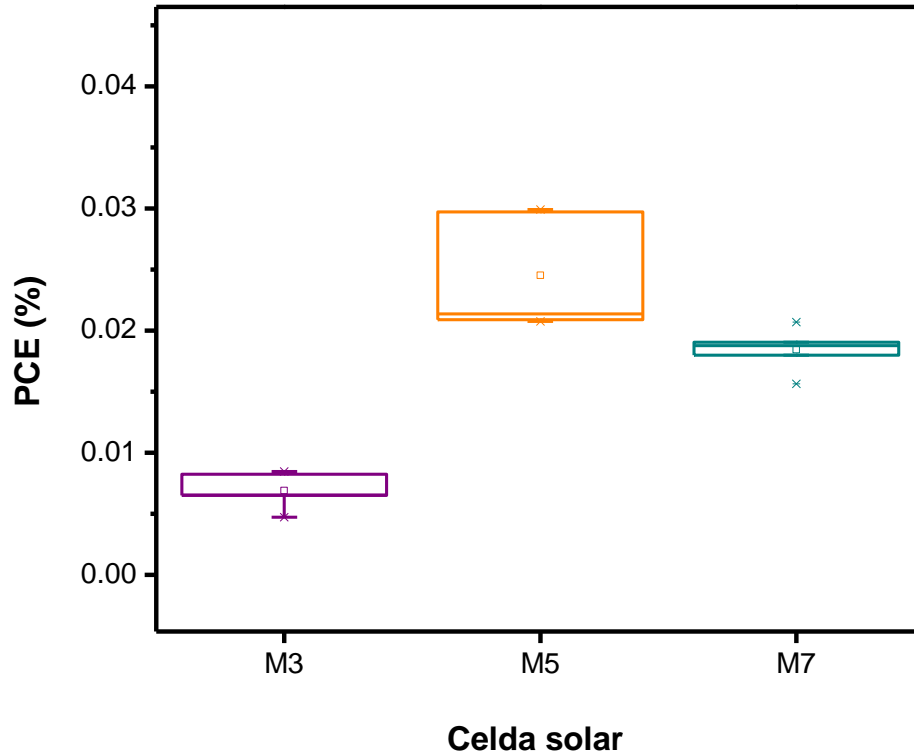


Figura 4.11. Estadísticas de la eficiencia de conversión de energía de las celdas M3, M4 y M7.

#### 4.4.1 Parámetros eléctricos de las celdas

En la Figura 4.12 se muestran los resultados de los parámetros eléctricos de las celdas analizadas. La celda M3 de la Figura 4.12a) mostró un  $P_{mp}$  equivalente a  $0.065 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ , una  $J_{sc} = 0.30 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  y un  $V_{oc} = 86 \text{ mV}$ , con el incremento del tiempo de depósito para M5 de la Figura 4.12b) los parámetros eléctricos se vieron favorecidos con una  $P_{mp} = 0.0297 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ , una  $J_{sc} = 0.54 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  y un  $V_{oc} = 190 \text{ mV}$ , mientras que para M7 de la Figura 4.12c) a pesar el aumento esperado por el aumento del espesor presentó una disminución en la  $P_{mp}$  a  $0.0207 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ , en  $V_{oc}$  a  $144 \text{ mV}$  y un aumento de  $J_{sc}$  a  $0.57 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  respecto a M5. El factor de FF que proporciona información sobre la forma de la curva tuvo valores del 25.19 al 29.90%.

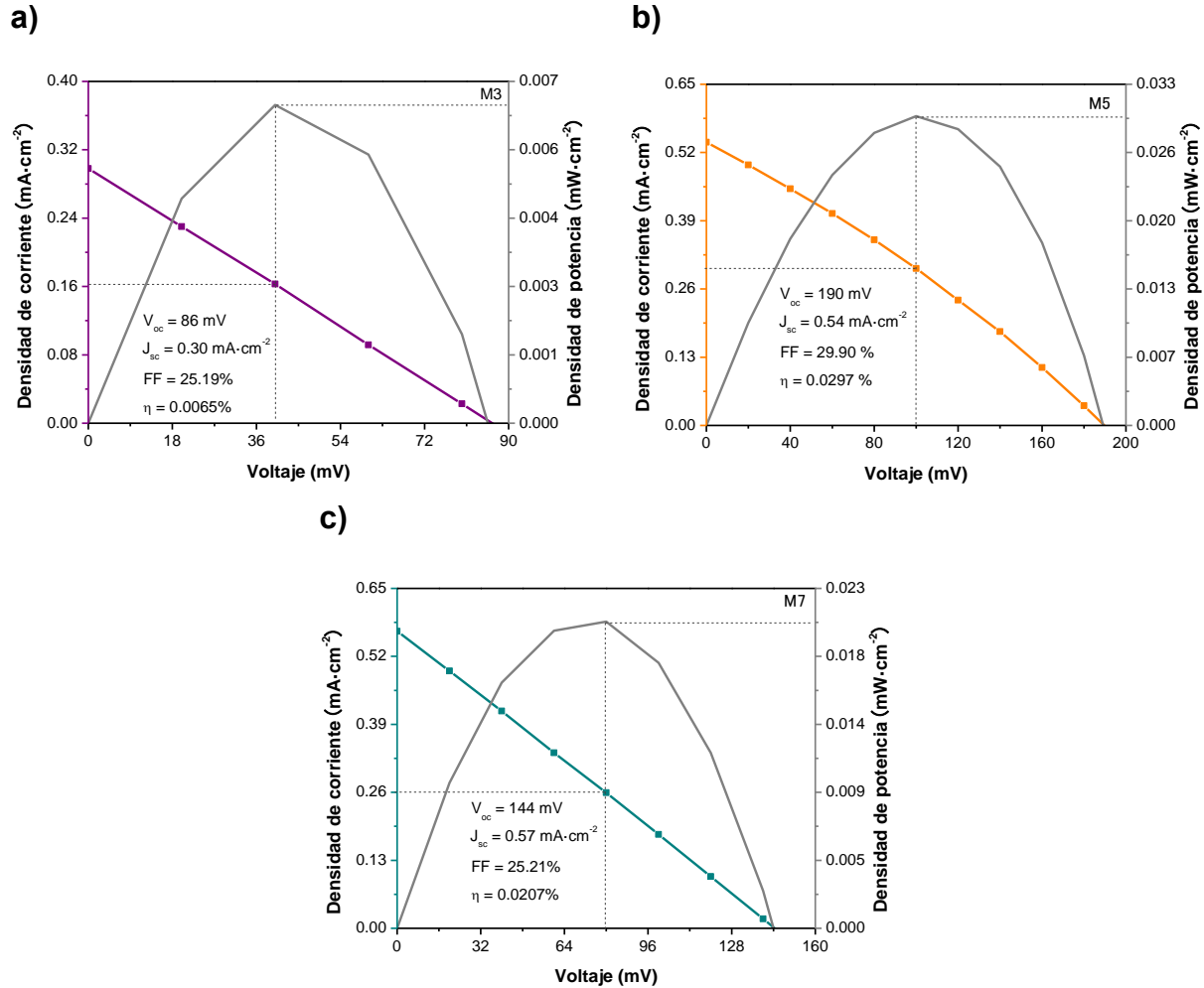


Figura 4.12. Parámetros eléctricos de las celdas solares, a) M3, b) M5 y c) M7.

Para explicar de mejor manera los FF que muestran las curvas I-V en la Tabla 4.5 se hace una recopilación de los parámetros eléctricos añadiendo la  $R_s$  y la  $R_{sh}$  de las celdas. La  $R_s$  se mantuvo en  $242 \pm 49 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ , lo que indica que el contacto metal-semiconductor es deficiente, presentado pérdidas de energía en los electrodos de C/Ag. El valor de  $R_{sh}$  se encuentra en  $339 \pm 118 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$ , lo que indica que en la interfaz heterounión CdS/SnS hay una alta densidad de defectos.

*Tabla 4.5. Parámetros eléctricos complementarios de la estructura FTO/CdS/SnS/C/Ag.*

<b>Muestra</b>	<b>V<sub>pm</sub></b> <b>(mV)</b>	<b>J<sub>pm</sub></b> <b>(mA·cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>FF</b> <b>(%)</b>	<b>η</b> <b>(%)</b>	<b>R<sub>s</sub></b> <b>(Ω·cm<sup>-2</sup>)</b>	<b>R<sub>sh</sub></b> <b>(Ω·cm<sup>-2</sup>)</b>
M3	39.76	0.16	25.19	0.007	216.57	287.47
M5	100.00	0.30	29.90	0.030	297.82	473.44
M7	80.00	0.26	25.21	0.021	211.42	255.32

En la Figura 4.13 se muestran las curvas características de las celdas solares tal como fueron obtenidas, con corrientes que van desde poco menos de 0.02 mA, hasta 1.2 mA, y voltajes desde poco más de 200 mV, hasta los 900 mV. En la Figura 4.13a) se muestran los valores en obscuridad y bajo polarización de voltaje, resultando que para valores negativos de voltaje de la región 1' la celda M3 tiene una mayor corriente, caso contrario a lo que sucede en la región 1, en donde la corriente es mayor para M5 y M7. Cuando son iluminadas bajo 100 mW·cm<sup>-2</sup> a 1.5 AM (Figura 4.13b) esta relación se conserva, sin embargo, los valores de corriente aumentan, y las curvas se ven separadas del origen, generando la región 2, en la cual se concentran los parámetros eléctricos mencionados previamente. Estas regiones son importantes ya que con ellas se puede explicar la operación de las celdas solares.

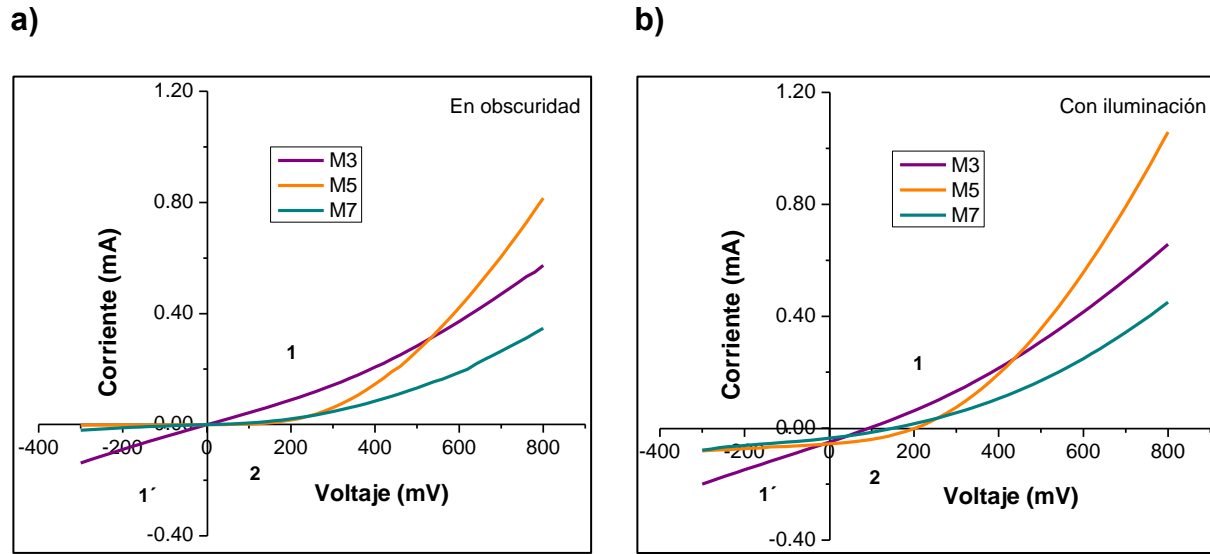
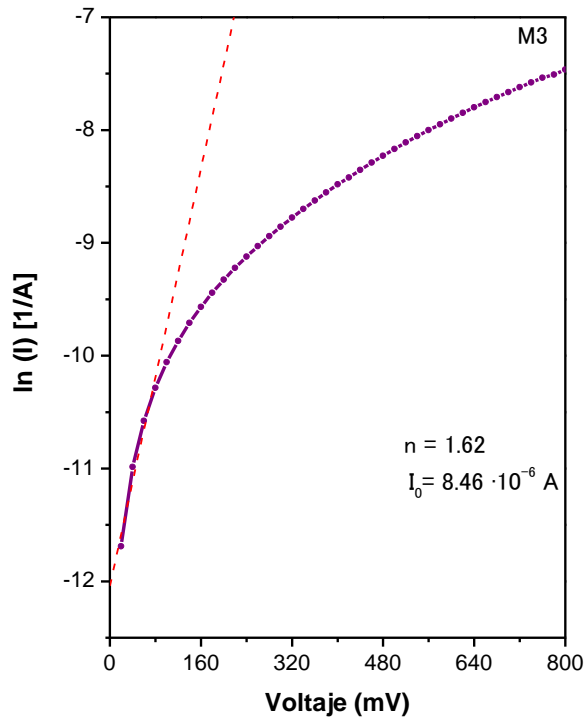


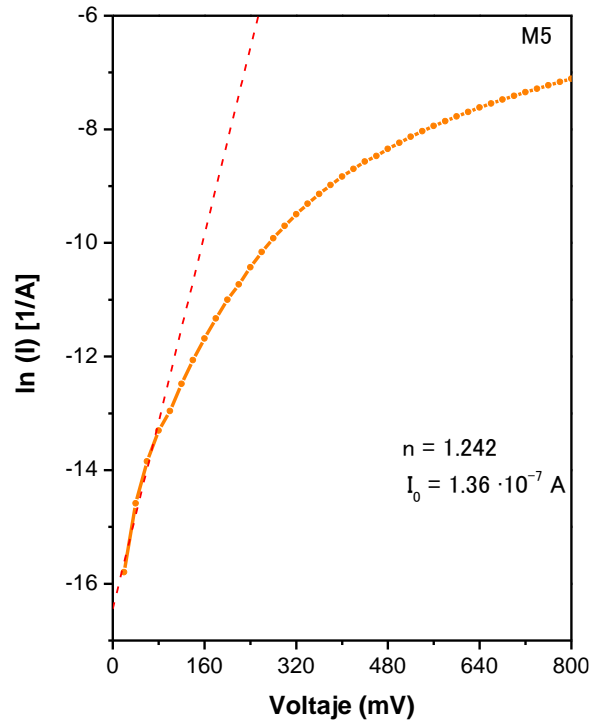
Figura 4.13. Curvas características I–V (como fueron proporcionadas por el equipo), de las celdas solares en a) oscuridad y b) bajo iluminación equivalente a  $100 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ , que demuestran un comportamiento rectificador de celdas solares de heterounión n-CdS/p-SnS.

A partir de las curvas I-V se obtuvo el factor de identidad como diodo de las celdas y la corriente inversa de saturación mostrado en la Figura 4.14. El factor de identidad de las celdas se encuentra entre 1 y 2, lo que indica que existe un mecanismo de recombinación predominante en la interfaz CdS/SnS, lo que optimiza el funcionamiento como diodo. Mientras que la corriente inversa de saturación se encuentra en el orden de  $1 \cdot 10^{-6}$  para M3 y  $1 \cdot 10^{-7}$  para M5 y M7, indicando que en la región 1' de las curvas I-V la corriente de saturación se encuentra más cercana a cero para estas dos últimas celdas, lo que se traduce en mejores parámetros eléctricos.

a)



b)



c)

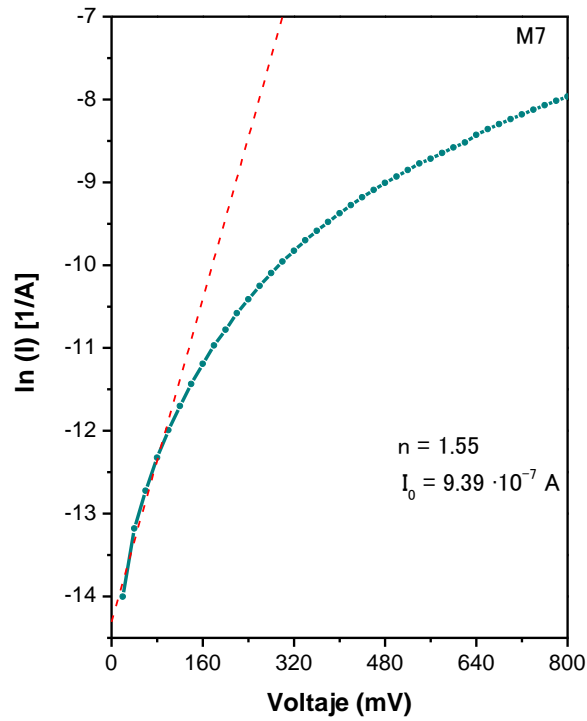


Figura 4.14. Corriente de saturación contra voltaje directo de polarización con la temperatura en condiciones de laboratorio.



La baja eficiencia presentada por las celdas solares se puede explicar desde el punto de vista de corriente inversa, ya que presentan un mecanismo de tunelización banda a banda. Partiendo de que los materiales que forman la heterounión presentan valores funcionales como capa ventana para el CdS y capa absorbidora del SnS, el hecho de que se tiene un comportamiento rectificador mostrado en la Figura 4.13, y una interacción adecuada en la interfaz de acuerdo con lo presentado en la Figura 4.10. Se puede decir que la baja eficiencia proviene de una alineación desfavorable entre la banda de conducción y la banda de valencia explicado en la sección 1.8.5 .

En el caso de las celdas estudiadas no se lleva a cabo una transferencia electrónica que conserve momento, debido a que los valles de las bandas no tienen el mismo momento cristalino y se requiere que se genere momento adicional mediante un fonón proveniente de la vibración de la red cristalina.

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

El material semiconductor  $p$ -SnS fue obtenido por la síntesis de depósito por baño químico mediante la metodología descrita y desarrollada en el grupo de investigación. Analizando un total de tres películas delgadas en las que se varió el tiempo de depósito, para 3, 5 y 7 h. Obteniendo un aumento del espesor con el incremento del tiempo de depósito que va desde 128-701 nm.

Corroborando la obtención de la fase ortorrómbica por XRD de acuerdo con la ficha cristalográfica PDF#96-810-4282. Los planos principales difractados fueron el (011), (111) y el (020), encontrando una preferencia de cristalización en este último plano para las tres muestras. Los tamaños promedio de cristal van de 22-28 nm, con una menor densidad de dislocaciones con el aumento del tamaño de cristal. Y una mayor tendencia a las microdeformaciones con un menor espesor de las películas delgadas.

Por AFM se comprobó la topografía de las películas delgadas, encontrando que con menor tiempo de depósito el crecimiento del material no es uniforme en toda la superficie, con crecimiento transversal cuasiuniforme de altura de 10 nm. Con el incremento del tiempo de depósito se observó una formación de granos que cubría la totalidad de la superficie del sustrato, manteniendo el crecimiento con orientación vertical. Para la película de 7 h se observó un crecimiento homogéneo, cambiando a una orientación horizontal.

A partir de los resultados obtenidos de transmitancia y reflectancia fue posible determinar la energía de banda prohibida para las películas delgadas, la cual se encontró en 1.78, 1.67 y 1.62 eV, para las muestras de 3, 5 y 7 h de depósito. Manteniendo una transmitancia cercana a 0% y una reflectancia menor del 30% dentro del rango de luz visible, rango que es de interés para la aplicación en celdas solares.

La sensibilidad de las películas de SnS observada en la fotorrespuesta no presenta una relación lineal, ya que pasa de un 79% para 3 h, a 25% para 5 h, y alcanzando un 57% de sensibilidad para 7 h de depósito. Sin embargo, al calcular la conductividad con los resultados de la fotorrespuesta si es posible encontrar una relación lineal, ya que se cuenta con una gran dependencia del espesor, encontrando conductividades que van de  $0.035\text{-}0.087 (\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$  en oscuridad, a conductividades entre  $0.062\text{-}0.136 (\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$ .

Se caracterizó una capa de transporte de electrones o capa ventana, como lo es el CdS de acuerdo con la síntesis reportada por [44], para formar la interfaz CdS/SnS. El espesor obtenido fue de 324 nm. Con una fase cristalina hexagonal de acuerdo con la ficha PDF#96-901-1664, difractando principalmente los planos (100), (002) y (101); con la presencia de la fase cúbica comprobado por la ficha PDF#96-900-0068. Con tamaños de cristal de 101 nm para el plano (100), de 36 y 27 nm para los planos (002) y (101); con una mayor densidad de dislocaciones y tendencia a microfracturas con la disminución del tamaño de cristal. Se encontró una brecha de banda directa con un valor de 2.38 eV. Un incremento en la fotorrespuesta de 5 órdenes de magnitud de la muestra en oscuridad respecto a la película iluminada.

Al conformar la celda solar FTO/CdS/SnS/C/Ag, incorporando las películas delgadas de *p*-SnS de 3, 5 y 7 h se evaluó la eficiencia de un total de 5 sets de 3 celdas, una para cada tiempo de depósito, por cada set. Las celdas solares que incorporaron las películas de 3 h tuvieron eficiencias que se encuentran en  $0.0068 \pm 0.0015\%$ , las de 5 h una eficiencia de  $0.0245 \pm 0.0048\%$  y las de 7 h de  $0.0184 \pm 0.00185\%$ . La eficiencia más alta se encontró con una película de 5 h incorporada, cercana al 0.03%, para esta celda sus parámetros eléctricos fueron un  $V_{oc} = 190$  mV, una  $J_{sc} = 0.54$  mA·cm<sup>-2</sup> y un FF = 29.90%. La morfología en la interfaz comprobó un mayor incremento del espesor con el aumento del tiempo de depósito para la capa de SnS de 469-777 nm, con una interacción entre las capas CdS/SnS sin presencia de agrietamiento y con un crecimiento vertical en forma de columnas.

Los parámetros eléctricos de las celdas solares FTO/CdS/SnS/C/Ag no fueron favorables para conseguir una eficiencia del 5%, se considera que la presencia de la fase secundaria cúbica del, una preferencia a cristalizar del SnS en el plano (020) y no en el (111) como se ha concretado en distintos estudios, una energía de banda prohibida superior al 1.5 eV, no poder conseguir mayores espesores por el crecimiento del SnS sobre una superficie de CdS, así como una la probabilidad de que el mecanismo de recombinación no sea radiativo mermaron las excelentes propiedades optoelectrónicas con las que cuenta el SnS.

## 5.1 Trabajos futuros

Estudiar la función de trabajo del SnS respecto al CdS con el fin de encontrar la relación que existe entre esta y el crecimiento de la película delgada de SnS sobre la película de CdS.

Estudiar mayores espesores del SnS que permitan encontrar un ancho de banda prohibida adecuado.

Estudiar la longitud de difusión abrupta y lineal a partir del aumento del tamaño de cristal.

Por último, se sugiere estudiar el mecanismo de recombinación que se genera en la interfaz con el fin de garantizar que sea una recombinación radiativa.

## REFERENCIAS

- [1] E. Cervantes Rendón, «Energía y sociedad,» de *Perspectivas de la sustentabilidad en México*, Madrid, CIEMAT, 2019, pp. 1-28.
- [2] International Energy Agency, «Overview and key findings,» de *World Energy Outlook 2023*, IEA, 2024, pp. 23-77.
- [3] International Energy Agency, «Electricity,» de *Renewables 2023: Analysis and forecasts to 2028*, IEA, 2024, pp. 14-48.
- [4] E. Ojeda Durán, «Historía, desarrollo y actualidad de las celdas solares,» *Conciencia*, vol. II, nº 01, pp. 17-21, 2018.
- [5] T. Markvart y L. Castañer, «Chapter I-1-A - Principles of Solar Cell Operation,» de *McEvoy's Handbook of Photovoltaics*, Academic Press, 2018, pp. 3-28.
- [6] K. W. Böer y U. W. Pohl, «Chapter 6: The Origin of Band Structure,» de *Semiconductor Physics*, Springer Nature, 2018, pp. 192-365.
- [7] J. P. McKelvey, «Capítulo 9: Semiconductores electronicos uniformes en equilibrio,» de *Física del estado sólido y de SEMICONDUCTORES*, Limusa Noriega, 1989, pp. 281-345.
- [8] K. W. Böer y U. W. Pohl, «Chapter 21: Equilibrium Statistics of Carriers,» de *Semiconductor Physics*, Springer Nature, 2018, pp. 900-929.

- [9] S. J. Fonash, «Chapter Five-Semiconductor– Semiconductor Heterojunction Cells,» de *Solar Cell Device Physics*, Boston, Academic Press, 2010, pp. 183-261.
- [10] K. Rodríguez Rosales, F. J. de Moure Flores y J. G. Quiñones Galván, «Energía solar fotovoltaica,» *Ciencia*, vol. LXXI, nº 3, pp. i1-i6, 2020.
- [11] S. J. Irvine y V. Barrioz, «CHAPTER 2: Fundamentals of Thin Film,» de *Materials Challenges: Inorganic Photovoltaic Solar Energy*, The Royal Society of Chemistry, 2014, pp. 27-51.
- [12] S. Chetan Singh , «Solar cell fundamentals,» de *Solar photovoltaics, fundamentals, Technologies, and application* , Delhi, Asoke K. Ghosh, 2015, pp. 3-129.
- [13] N. Shah, A. A. Shah, P. K. Leung, S. Khan, K. Sun, X. Zhu y Q. Liao, «A Review of Third Generation Solar Cells,» *Processes*, vol. 11, nº 6, pp. 1-58, 2023.
- [14] G. Oreski, J. Stein, G. Eder, K. Berger, L. S. Bruckman, J. Vedde, K.-A. Weiss, T. Tanahashi, R. H. French y S. Ranta, «Designing New Materials for Photovoltaics: Opportunities for Lowering Cost and Increasing Performance through Advanced Material Innovations,» IEA, Amsterdam, 2021.
- [15] F. Mesa, A. Dussan y B. A. Paez Sierra, «Estudio estructural de semiconductores usados en aplicaciones fotovoltaicas,» *Revista de física E-DocUR*, vol. VII, nº 48-E, p. 24.37, 2014.

- [16] V. Robles Valero , Preparación y estudio de los sulfuros del sistema Cu-Sn-Zn en lámina delgada para su aplicación fotovoltaica. PhD, Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, 2016.
- [17] S. J. Fonash, «Chapter Four - Homojunction Solar Cells,» de *Solar Cell Device Physics (Second Edition)*, Academic Press, 2010, pp. 121-182.
- [18] J. I. Pankove, «Processes in p-n Junctions,» de *Optical processes in semiconductors*, Dover Books on Physics, 2022, pp. 170-212.
- [19] M. Akhtaruzzaman y V. Selvanathan, «Chapter 3 - Introduction of inorganic solar cells,» de *In Solar Cell Engineering, Comprehensive Guide on Organic and Inorganic Solar Cells*, Academic Press, 2022, pp. 57-63.
- [20] H. S. Reehal y J. Ball, «CHAPTER 3: Crystalline Silicon Thin Film and Nanowire Solar Cells,» de *Materials Challenges: Inorganic Photovoltaic Solar Energy*, The Royal Society of Chemistry, 2014, pp. 53-88.
- [21] J. Ramanujam, D. M. Bishop, T. K. Todorov, O. Gunawan, J. Rath, R. Nekovei, E. Artegiani y A. Romeo, «Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells: A review,» *Progress in Materials Science*, vol. 110, p. 100619, 2020.
- [22] K. L. Chopra, *Thin film solar cells*, New York: Springer, 1983.
- [23] B. A. Ezekoye, P. O. Offor, V. A. Ezekoye y F. I. Ezema , «Chemical Bath Deposition Technique of Thin Films: A Review,» *Journal of Scientific Research*, vol. 2, nº 8, pp. 452-456, 2013.



- [24] M. Ichimura, K. Takeuchi, Y. Ono y E. Arai, «Electrochemical deposition of SnS thin films,» *Thin Solid Films*, vol. CCCLXI, nº 40, pp. 98-101, 2000.
- [25] S. Rahaman, J. KB, Pradeep, A. Sriram, Anirudha y Nitin, «Synthesis and Characterization of SnS Quantum Dots materialfor Solar Cell,» *Materials Today: Proceedings*, vol. V, nº 2214, pp. 3117-3120, 2018.
- [26] A. Voznyi, V. Kosyak, L. Grase, J. Vecstaudža, P. Onufrijevs, Y. Yeromenko, A. Medvid y A. Opanasyuk, «Formation of SnS phase obtained by thermal vacuum annealing of SnS<sub>2</sub> thin films and its application in solar cells,» *Materials Science in Semiconductor Processing*, vol. LXXIX, nº 1369, pp. 32-29, 2018.
- [27] J. Yu Cho, S. Sinha, M. Gil Gang y J. Heo, «Controlled thickness of a chemical-bath-deposited CdS buffer layer for a SnS thin film solar cell with more than 3% efficiency,» *Alloys and Compounds*, vol. DCCXCVI, nº 925, pp. 160-166, 2019.
- [28] M. Minbashi, A. Ghobadi, M. H. Ehsani, H. Rezagholipour Dizaji y N. Memarian, «Simulation of high efficiency SnS-based solar cells with SCAPS,» *Solar Energy*, vol. CLXXVI, nº 38, pp. 520-525, 2018.
- [29] P. Sinsersuksakul, L. Sun, S. Woon Lee, H. Hejin Park, S. Bok Kim, C. Yang y R. G. Gordon, «Overcoming Efficiency Limitations of SnS-Based Solar Cells,» *Advanced Energy Materials*, vol. IV, nº 15, p. 1400496, 2014.

- [30] K. J. Norton, F. Alam y D. J. Lewis, «A Review of the Synthesis, Properties, and Applications of Bulk and Two-Dimensional Tin (II) Sulfide (SnS),» *Applied Science*, vol. 11, n° 05, p. 2062, 2021.
- [31] V. E. González Flores, R. N. Mohan, R. Ballinas Morales, M. Nair y P. Nair, «Thin film solar cells of chemically deposited SnS of cubic and orthorhombic structures,» *Thin Solid Films*, vol. 72, n° 40, pp. 62-65, 2019.
- [32] S. Gedi, V. Reddy, S. Alhammedi, P. R. Guddeti, T. R. Kotte, C. Park y W. K. Kim, «Influence of deposition temperature on the efficiency of SnS solar cells,» *Solar Energy*, vol. 184, pp. 305-314, 2019.
- [33] V. Reddy, H. Cho, S. Gedi, K. T. Reddy, W. K. Kim y C. Park, «Effect of sulfurization temperature on the efficiency of SnS solar cells fabricated by sulfurization of sputtered tin precursor layers using effusion cell evaporation,» *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 806, pp. 410-417, 2019.
- [34] H. S. Lee, J. Y. Cho, R. Nandi, P. S. Pawar, K. E. Neerugatti, C. T. Mai, D. K. Lee y J. Heo, «Influence of the Temperature Ramping Rate on the Performance of Vapor Transport Deposited SnS Thin-Film Solar Cells,» *Applied Energy Materials*, vol. 3, pp. 10393-10401, 2020.
- [35] R. Shashidha y N. Choudhary, «Cost-effective SnS heterojunction solar cells synthesized by spray pyrolysis,» *Sol-Gel Science and Technology*, vol. 96, pp. 188-196, 2020.

- [36] D. Jeong, V. R. Reddy, M. R. Pallavolu, H. Cho y C. Park, «Investigation on the performance of SnS solar cells grown by sputtering and effusion cell evaporation,» *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 37, pp. 1066-1070, 2020.
- [37] R. K. Yadav, P. S. Pawar, K. E. Neerugatti, R. Nandi, J. I. Cho y J. Heo, «Effect of Intrinsic ZnO Thickness on the Performance of SnS/CdS-Based Thin-Film Solar Cells,» *Current Applied Physics*, vol. XXXI, n° 1567, pp. 232-238, 2021.
- [38] T. T. Ho, E. Jokar, S. Quadir, R. S. Chen, F. C. Liu, C. Y. Chen, K. H. Chen y L. C. Chen, «Enhancing the photovoltaic properties of SnS-Based solar cells by crystallographic orientation engineering,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 236, p. 111499, 2022.
- [39] R. K. Yadav, P. S. Pawar, Y. T. Kim, I. Sharma, P. R. Patil, N. Bisht y J. Heo, «Investigation of hybrid SnSe/SnS bilayer absorber for application in solar cells,» *Solar Energy*, vol. 266, p. 112174, 2023.
- [40] S. John, M. Francis, A. P. Reena Mary y V. Geetha, «Influence of annealing on the properties of chemically prepared SnS thin films,» *Chalcogenide Letters*, vol. 20, n° 5, pp. 315-323, 2023.
- [41] R. K. Yadav, P. S. Pawar, Y. T. Kim, I. Sharma y J. Heo, «Prebaking of an SnS source with sulfur for achieving higher photovoltaic performance in VTD-SnS thin films for solar cells,» *Materials Chemistry*, vol. 12, pp. 3265-3275, 2024.

- [42] M. I. Khan, S. Bano, S. Hussain, N. Alwadai, M. Fatima , U. Shahzad, E. S. Yousef y M. Iqbal, «Heterostructure of TiO<sub>2</sub> and SnS for enhancing the structural, optical and photovoltaic properties of solar cells,» *Optik* , vol. 300, p. 171625, 2024.
- [43] A. B. Hijal, L. Pezzato, E. Colusso, G. Bragaglia, N. Tormena, N. Trivellin, K. Alouani, M. Dabala y K. Brunelli, «Influence of deposition potential and substrate characteristics on the photovoltaic conversion efficiency of p-SnS absorbing layers,» *Alloys and Compounds*, vol. 987, p. 174150, 2024.
- [44] M. T. S. Nair, P. K. Nair, R. A. Zingaro y E. A. Meyers, «Conversion of chemically deposited photosensitive CdS thin films to n-type by air annealing and ion exchange reaction,» *Applied Physics*, vol. MDLVII, nº 75, 1994.
- [45] A. A. Bunaciu, E. G. Udriștioiu y H. Y. Aboul-Ene, «X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications,» *Analytical Chemistry*, vol. 45, nº 4, pp. 289-299, 2015.
- [46] KLA Instruments, «KLA,» 27 04 2021. [En línea]. Available: [www.kla-instruments.cn/wp-content/uploads/2022/06/KLA\\_AppNote\\_Stylus\\_Profiler\\_Styli.pdf](http://www.kla-instruments.cn/wp-content/uploads/2022/06/KLA_AppNote_Stylus_Profiler_Styli.pdf). [Último acceso: 04 09 2024].
- [47] B. P. Kafle, «Chapter 6 - Introduction to nanomaterials and application of UV–Visible spectroscopy for their characterization,» de *Chemical Analysis and Material Characterization by Spectrophotometry*, Elsevier, 2020, pp. 147-198.

- [48] J. Campbell, S. Burkitt, N. Dong y C. Zavaleta, «Chapter 9 - Nanoparticle characterization techniques,» de *Nanoparticles for Biomedical Applications*, Elsevier, 2020, pp. 129-144.
- [49] N. Feltin, S. Ducourtieux, L. Crouzier, A. Delvallée, K. Dirscherl y G. Zeng, «Chapter 2.1.3: Scanning probe microscopy (SPM),» de *Characterization of Nanoparticles: Measurement Processes for Nanoparticles*, Elsevier, 2020, pp. 49-63.
- [50] P. Y. Yu y M. Cardona, «5. Electrical Transport,» de *Fundamentals of semiconductors*, Springer, pp. 203-241.
- [51] Y. Wang, Z. Tang, P. Podsiadlo, Y. Elkasabi, J. Lahann y N. A. Kotov, «Mirror-Like Photoconductive Layer-by-Layer Thin Films of Te Nanowires: The Fusion of Semiconductor, Metal, and Insulator Properties,» *Advanced Materials*, vol. 18, nº 4, pp. 518-522, 2006.
- [52] A. A. Wilson, Analysis of non-contact and contact probe-to-sample thermal exchange for quantitative measurements of thin film and nanostructure thermal conductivity by the scanning hot probe method, Rensselaer Polytechnic Institute, 2017.
- [53] K.-Y. Chan, Y.-K. Sin y Z.-N. Ng, «Hot-point probe measurements of N-type and P-type ZnO films,» *Microelectronics International*, vol. 34, nº 1, pp. 30-34, 2017.

- [54] T. Vargas y A. Abrahamse, «An open-source hardware I-V curve tracer for monitoring PV output in Bolivia.,» *Investigacion y desarrollo*, vol. 14, nº 1, pp. 100-116, 2014.
- [55] Z. Zhu, D. Mühlbacher, M. Morana, M. Koppe, M. C. Scharber, D. Waller, G. Dennler y C. J. Brabec, «Design Rules for Efficient Organic Solar Cells,» de *High-Efficient Low-Cost Photovoltaics*, Springer, 2009, pp. 195-220.
- [56] D. Glowienka y Y. Galagan, «Light Intensity Analysis of Photovoltaic Parameters for Perovskite Solar Cells,» *Advanced Materials*, vol. 34, p. 2105920, 2022.
- [57] F. Jiang, H. Shen, W. Wang y L. Zhang, «Preparation of SnS Film by Sulfurization and SnS/a-Si Heterojunction Solar Cells,» *The Electrochemical Society*, vol. 159, nº 3, pp. 235-238, 2012.
- [58] Y. Gupta y P. Arun, «Optimization of SnS active layer thickness for solar cell application,» *Semiconductors*, vol. 38, p. 113001, 2017.
- [59] F. Jiang, H. Shen y J. Jiao, «Effect of the thickness on the optoelectronic properties of SnS films and photovoltaic performance of SnS/i-a-Si/n-a-Si solar cells,» *Materials Science & Processing*, vol. 117, pp. 2167-2173, 2014.
- [60] M. S. Islam, N. Islam, N. Anis-Uz-Zaman, M. Baul, A. Mostafa y M. Sreelekha, «Investigation for optimal structure of CdS/SnS solar cell from numerical analysis,» *International Conference on Intelligent Sustainable Systems*, pp. 447-450, 2019.

- [61] M. F. Rahman, J. Hossain y A. M. Ismail, «Structural, surface morphological and optical properties and their correlation with the thickness of spin coated superior quality CdS thin film synthesized using a novel chemical route,» *SN Applied Sciences*, vol. 2, nº 12, p. 1956, 2020.
- [62] U. Chalapathi, B. Poornaprakash y S. Park, «Chemically deposited cubic SnS thin films for solar cell applications,» *Solar Energy*, vol. 139, pp. 238-248, 2016.
- [63] B. A. Hasan y I. H. Shallal, «Structural and Optical Properties of SnS Thin Films,» *Nanotechnology & Advanced Materials*, vol. 2, nº 2, pp. 43-49, 2014.
- [64] M. Benhaliliba, A. Ayeshamariam y Y. S. Ocak, «The Nanostructure Based SnS Chalcogenide Semiconductor: A Detailed Investigation of Physical and Electrical Properties,» *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, vol. 3, p. 68, 2024.
- [65] M. Messaoudi y S. Boudour, «Extent of dependence of crystalline, morphological, optical and electrical properties on deposition time of sprayed SnS thin films,» *Microscopy Research and Technique*, vol. 86, pp. 342-350, 2022.
- [66] A. Javed, N. Khan, S. Bashir, M. Ahmad y M. Bashir, «Thickness dependent structural, electrical and optical properties of cubic SnS thin films,» *Materials Chemistry and Physics*, vol. 246, p. 122831, 2020.
- [67] S. Zhao, Y. Li, Y. Wang, Z. Ma y X. Huang, «Quantitative study on coal and shale pore structure and surface roughness based on atomic force microscopy and image processing,» *Fuel*, vol. 244, pp. 78-90, 2019.

- [68] Y. Gupta, P. Arun, A. A. Naudi, M. V. Walz y E. A. Albanesi, «Grain size and lattice parameter's influence on band gap of SnS thin nano-crystalline films,» *Thin Solid Films*, vol. 612, pp. 310-316, 2016.
- [69] M. S. Mahdi, A. Hmood, K. Ibrahim, N. M. Ahmed y M. Bououdina, «Dependence of pH on phase stability, optical and photoelectrical properties of SnS thin films,» *Superlattices and Microstructures*, vol. 128, pp. 170-176, 2019.
- [70] M. Önal y B. Altıokka, «Chemical deposition of CdS thin films in the hexagonal phase without annealing,» *Emerging Materials Research*, vol. 9, n° 3, pp. 738-742, 2020.
- [71] H. I. Salim, «The effect of growth technique on the characteristic properties of CdS layers for solar cell applications,» *Materials Science*, vol. 31, p. 4193–4207 , 2020.
- [72] E. M. Noori, «Properties of CdS Thin Films Prepared by Thermal Evaporation,» *Nanostructures*, vol. 14, n° 1, pp. 12-19, 2024.
- [73] A. S. Gadalla, H. Al-shamiri, S. Alshahrani, H. Khalil, M. Nahas y M. Khedr, «Epitaxial Growth and Optical Properties of Laser Deposited CdS Thin Films,» *Coatings*, vol. 12, n° 87, pp. 1-16, 2022.
- [74] M. Dissanayake, K. Paramanathan , G. Senadeera y C. A. Thotawattage, «Optical transmission and photoconductivity of chemical bath-deposited CdS thin films for optoelectronic applications,» *Thin Solid Films* , vol. 791, p. 140225, 2024.



[75] A. Voznyi, Y. Yeromenko, V. Kosyak, I. Shpetnyi, M. Kolesnyk y A. Opanasyuk, «Photovoltaic Effect of SnS/CdS Heterostructure,» *IEEE International Conference on Nanomaterials: Applications and Properties (NAP)*, vol. 7, pp. 03NE18: 1-5, 2017.