

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

*Estudio del semiconductor CdS en áreas de 100 cm² y su efecto en la
eficiencia fotovoltaica en módulos de película delgada de CdTe*

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

PRESENTA

ERÉNDIRA VELÁZQUEZ LÓPEZ

Director de tesis

Dr. Rogelio Mendoza Pérez

Codirector

Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera

México, D.F. junio de 2015.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

COMITÉ TUTORIAL:

Dr. Eduardo Armando Rincón Mejía, UACM.

M. en I. José Alberto Valdés Palacios, UACM.

Dr. Gerardo Silverio Contreras Puente, IPN.

Dr. Jorge Sastré Hernández, IPN.

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Plantel Del Valle, UACM.

A:

*Aquel que en los momentos adversos
me da la fortaleza para seguir adelante.*

*Mis amorosos padres:
Bertha López Garduño y Salvador Velázquez Pérez
Por ser el sol que ilumina el camino de mi vida.*

*Mi hermana Mayra
Por sus exhortos y que siempre estemos unidas.*

*Mi hermano Salvador:
Para que también acepte el reto y sigamos unidos siempre.*

Mis abuelitas Prisciliana Pérez[†] y Elena Garduño[†].

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Rogelio Mendoza Pérez por darme la oportunidad de colaborar en su proyecto y contagiarme su fascinación por las celdas fotovoltaicas de película delgada; por aceptar convertirse en mi maestro. Gracias por su confianza, paciencia y sus palabras de aliento.

Al Dr. Álvaro Eduardo Lentz Herrera por su apoyo desinteresado en mis proyectos y aspiraciones, por guiarme en ésta importante etapa de mi vida. Gracias porque sus enseñanzas han influido en mi formación personal y profesional.

Al M. en I. José Alberto Valdés Palacios por hacer posible mi participación en este excepcional proyecto de investigación que culmina con esta tesis. Gracias por darme su confianza.

Al Dr. Eduardo Armando Rincón Mejía por ser fuente de inspiración en sus clases y en sus actividades en las fuentes renovables de energía con enfoque social.

A Claudia Chávez por ofrecerme su amistad, confianza y apoyo casi sin conocerme. Su intervención fue decisiva para que esta tesis sea una realidad. Gracias por sus exhortos y gran calidad humana.

Al Dr. Jorge Sastré Hernández por haberme apoyado con mediciones de las muestras y por el tiempo que dedicó a asesorar este trabajo.

A los profesores del Programa de Energía por acompañarme en este camino compartiendo sus experiencias, conocimientos y consejos, que se han convertido en los cimientos de esta tesis. Gracias porque hicieron posible cumplir este objetivo.

Al Dr. Alfredo del Oso por su acertada contribución en el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros del laboratorio B406 del plantel San Lorenzo Tezonco quienes también participaron en este proceso: Kevin, Fabiola, Andrés, Moisés, Alejandro, Giovanni y en especial al Ing. Francisco Cortés.

A mis compañeros de la maestría por compartir su invaluable experiencia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología - Gobierno del Distrito Federal en el fondo mixto 2012-2 bajo el proyecto 189282 y al proyecto 151076 del Fondo Sectorial CONACYT-SENER Sustentabilidad Energética 2010-1, por su apoyo.

A la Universidad Autónoma de la Ciudad de México por el apoyo recibido para la impresión y empastado de la tesis.

CONTENIDO

RESUMEN	10
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS PARTICULARES	11
HIPÓTESIS	11
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Potencial de aprovechamiento solar fotovoltaico en México.....	12
1.2. Sector de Energías renovables en México.....	14
1.2.1. Participación de la energía solar fotovoltaica en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).....	15
1.2.2. Empresas de energía fotovoltaica en México.....	17
1.3. Antecedentes de las celdas solares en México.....	18
1.3.1. Investigación y desarrollo en el CINVESTAV-IPN.....	18
1.3.2. Grupo de Física del Estado Sólido del ESFM-IPN.....	20
1.3.3. Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).....	20
1.3.4. Programas y proyectos gubernamentales.....	21
1.4. Antecedentes de celdas solares de CdTe en México.....	22
CAPÍTULO 2. TEORÍA DE LAS CELDAS SOLARES	25
2.1. Materiales semiconductores.....	25
2.1.1. Semiconductores extrínsecos tipo p.....	27
2.1.2. Semiconductores extrínsecos tipo n.....	28
2.2. El efecto fotovoltaico.....	30
2.3. El modelo de diodo.....	32
2.4. La celda solar.....	35
2.4.1. Corriente en función del voltaje de una celda solar.....	37
2.4.2. Corriente de corto circuito, I_{sc}	38
2.4.3. Voltaje de circuito abierto, V_{oc}	38
2.4.4. Factor de llenado, FF.....	39
2.4.5. Eficiencia de la conversión fotovoltaica, η	40

2.5. Celdas solares basadas en CdTe.....	40
2.5.1. Construcción de la celda CdS/CdTe.....	41
2.5.2. Ventajas e inconvenientes de las celdas solares de CdTe.....	43
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SULFURO DE CADMIO Y LA TÉCNICA EXPERIMENTAL DEL DEPÓSITO.....	46
3.1. El sulfuro de cadmio (CdS).....	46
3.1.1. Propiedades del CdS.....	48
3.1.2. Sulfuro de cadmio como capa ventana.....	49
3.2. Técnicas de procesamiento de películas delgadas.....	51
3.2.1. Erosión catódica.....	51
3.2.2. Sublimación en espacio cerrado.....	57
CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	60
4.1. Depósito de sulfuro de cadmio (CdS) por erosión catódica magnetoplanar-RF.....	60
4.2. Matrices de los parámetros de depósito de CdS.....	62
4.2.1. Variación de potencia.....	63
4.2.2. Variación de temperatura del sustrato.....	63
4.2.3. Variación de presión.....	64
4.2.4. Variación de espesor del CdS.....	64
4.2.5. Variación de la velocidad de rotación del portasustrato.....	65
4.3. Procesamiento de módulos de telurio de cadmio (CdTe).....	65
4.3.1. Crecimiento de CdTe por sublimación.....	66
4.3.2. Tratamiento térmico con cloruro de cadmio (CdCl ₂).....	68
4.3.3. Depósito de contactos posteriores por Sputtering DC.....	70
CAPÍTULO 5. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	72
5.1. Técnica de perfilometría.....	72
5.1.1. Influencia de los parámetros de depósito en el espesor del CdS.....	73
5.2. Medición de transmitancia óptica.....	77
5.2.1. Influencia de los parámetros de depósito en la transmitancia del CdS.....	78
5.3. Curva de corriente eléctrica en función del voltaje (I vs. V).....	83

5.3.1. Influencia de la temperatura del sustrato en la respuesta del módulo FV.....	85
5.3.2. Influencia de las películas de CdS obtenidas a distintas potencias.....	89
5.3.3. Influencia de las películas de CdS obtenidas a distintas presiones de Ar.....	93
5.3.4. Influencia de las películas de CdS de diferentes espesores.	97
5.3.5. Influencia de las películas de CdS a diferentes velocidades de rotación del portasustrato.....	101
CONCLUSIONES.....	105
6.1. RECOMENDACIONES EN EL PROCESO DE LA MANUFACTURA	105
6.2. TRABAJOS FUTUROS.....	106
REFERENCIAS	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Irradiación solar global diaria promedio mensual en México (kWh/m^2).	13
Tabla 1.2. Capacidad instalada en operación y en construcción para la generación de energía eléctrica con fuentes renovables 2013.	14
Tabla 1.3. Capacidad instalada adicional para la generación de electricidad 2013-2027 (MW).	14
Tabla 1.4. Centrales solares fotovoltaicas para la generación de Electricidad 1013.	17
Tabla 1.5. Empresas manufactureras de módulos fotovoltaicos 2013.	17
Tabla 2.1. Brecha energética o banda prohibida de algunos semiconductores.	27
Tabla 3.1. Propiedades físicas del sulfuro de cadmio.	49
Tabla 4.1. Datos experimentales utilizados en la fase de caracterización del proceso de obtención de películas delgadas de CdS por erosión catódica RF.	62
Tabla 4.2. Potencia suministrada al magnetrón durante el depósito de CdS por la técnica de Sputtering-RF.	63
Tabla 4.3. Temperaturas del sustrato durante el depósito de Sulfuro de Cadmio por Sputtering-RF.	63
Tabla 4.4. Presión de argón en la cámara de depósito durante la deposición de la capa de CdS por Sputtering-RF.	64
Tabla 4.5. Espesores propuestos en el proceso de depósito de CdS por la técnica de erosión catódica RF.	64
Tabla 4.6. Variación de la velocidad de rotación durante el depósito del CdS por Sputtering-RF.	65
Tabla 5.1. Resultados de la medición de espesores de CdS depositadas con diferentes parámetros.	73
Tabla 5.2. Banda de energía prohibida de las muestras de CdS, en función de la longitud de onda.	80
Tabla 5.3. Banda de energía prohibida de las muestras de CdS, en función de la longitud de onda.	81
Tabla 5.4. Banda de energía prohibida de las muestras de CdS, en función de la longitud de onda.	82
Tabla 5.5. Banda de energía prohibida de las muestras de CdS, en función de la longitud de onda.	83
Tabla 5.6. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes temperaturas de sustrato.	89

Tabla 5.7. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes potencias del magnetrón.	92
Tabla 5.8. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes presiones de Argón.	96
Tabla 5.9. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes espesores de la película de CdS.....	100
Tabla 5.10. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes velocidades de rotación del portasubstrato.	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Irradiación solar global promedio anual en el territorio nacional (kWh/m ²).....	13
Figura 1.2. Generación Distribuida 2014-2028 (MW).	15
Figura 1.3. Capacidad acumulada en módulos fotovoltaicos 2013.....	16
Figura 2.1. Banda de valencia, banda de conducción y energía del gap.....	26
Figura 2.2. Tipos de materiales.....	26
Figura 2.3. Material extrínseco tipo p.....	28
Figura 2.4. Material extrínseco tipo n.....	28
Figura 2.5. Esquema electrónico de un semiconductor tipo n y tipo p.....	29
Figura 2.6. El efecto fotovoltaico.....	31
Figura 2.7. Perfil esquemático de la estructura de una celda solar a base de CdTe.....	31
Figura 2.8. Representación de semiconductores tipo p y n al ponerse en contacto.....	32
Figura 2.9. Flujo de corriente e una unión de materiales tipo n y p cuando se aplica una polarización directa.....	33
Figura 2.10. Diagrama eléctrico del circuito básico con una resistencia limitadora para medir las características de corriente en función del voltaje para un diodo o unión n-p.....	34
Figura 2.11. Curva de corriente en función del voltaje en oscuridad para un diodo ideal.....	35
Figura 2.12. Circuito equivalente de una celda solar.....	36
Figura 2.13. Circuitos y curva I vs. V de una celda solar en oscuridad e iluminación.....	37
Figura 2.14. Curva J vs. V (línea roja) y curva de P vs. V (línea azul). El área A es el producto de $J_{m\acute{a}x} * V_{m\acute{a}x}$ (área lila), en tanto el área B (área violeta) es el producto de $J_{sc} * V_{oc}$	39
Figura 2.15. Esquema de una celda solar basada en la tecnología de películas delgadas: CdS/CdTe.....	41
Figura 3.1. A) Celda unitaria de wurtzita, donde las esferas grises representan los átomos del cadmio y las amarillas representan átomos de azufre, su simetría cristalina es de forma hexagonal. B) Greenockita, mineral del que se obtiene sulfuro de cadmio.....	46
Figura 3.2. A) Celda unitaria de blenda, donde las esferas grises representan los átomos del cadmio y las amarillas representan átomos de azufre, presenta una red cristalina cúbica. B) Hawleyita, mineral del que se obtiene sulfuro de cadmio.....	47
Figura 3.3. Componentes de un equipo de pulverización catódica y el proceso de depósito. El material precursor o blanco es bombardeado por iones altamente	

energéticos procedentes de un plasma, de forma que los átomos son liberados y posteriormente depositados sobre un sustrato.	52
Figura 3.4. Principio de la técnica de erosión catódica.	52
Figura 3.5. Ejemplo de un blanco de CdS usado en el Sputtering RF erosionado en aro con perfil en V.	53
Figura 3.6. Esquema para generar el plasma mediante CD, en el cual se ilustra a) la ionización ocasionada por electrones acelerados por el campo eléctrico y b) el potencial entre el ánodo y el cátodo.	54
Figura 3.7. Esquema para generar el plasma mediante RF.	55
Figura 3.8. Sistema de erosión catódica Sputtering RF y sus componentes principales: A) Cámara de vacío, B) Sistema de vacío, C) Panel de control del proceso, D) Sistema de enfriamiento y E) Admisión y venteo de gases.	56
Figura 3.9. Sistema de crecimiento CSVT y sus componentes principales: a) Sistema de vacío, b) Control de flujo de gases, c) Cámara de crecimiento y d) Sistema de control de temperatura.	58
Figura 3.10. Cámara de crecimiento del sistema CSVT.	59
Figura 4.1. A) Depósito del material donde se observa el portasubstratos, el magnetrón y el plasma. B) Muestra con capa de CdS por Sputtering-RF.	61
Figura 4.2. Izquierda: La chalupa con el material CdTe en polvo. Derecha: corte transversal del sistema de crecimiento CSS en donde se aprecia A) fuente, B) sustrato y C) chalupa.	67
Figura 4.3. Diferencia de temperatura entre grafitos durante el depósito de CdTe por la técnica de CSVT.	67
Figura 4.4. Muestra con CdTe por CSS sobre la capa de CdS.	68
Figura 4.5. Muestra RF1 después del tratamiento con CdCl ₂ y chalupa de grafito con el sobrante de CdCl ₂	69
Figura 4.6. Sistema Sputtering DC instalado en la UACM.	70
Figura 4.7. Máscara de aluminio y muestra con los contactos posteriores.	71
Figura 5.1. Velocidad del depósito como función de la potencia de trabajo.	74
Figura 5.2. Variación de la velocidad de depósito de la película de CdS a 250°C, en función de la presión de trabajo.	75
Figura 5.3. Variación de la velocidad de depósito de la película de CdS, en función de la velocidad de rotación del portasustrato.	76
Figura 5.4. Variación de la velocidad de depósito de la película de CdS, en función de la velocidad de la temperatura del sustrato.	76
Figura 5.5. Diagrama de bloques del espectrofotómetro UV-VIS.	77
Figura 5.6. Comparación de cuatro mediciones de transmitancia realizadas en diferentes regiones de la película de CdS de la muestra RF11.	78

Figura 5.7. Transmitancia de cuatro películas de CdS por Sputtering-RF a diferentes potencias del magnetrón.....	79
Figura 5.8. Transmitancia de cinco muestras de CdS crecidas a diferentes temperaturas del sustrato.....	80
Figura 5.9. Transmitancia de tres muestras de CdS depositadas a diferentes presiones del Argón.	81
Figura 5.10. Transmitancia de las muestras RF9, RF13 y RF14 con diferentes espesores de la capa de CdS.....	82
Figura 5.11. Transmitancia de tres muestras de CdS a diferentes velocidades de rotación del portasustrato.	83
Figura 5.12. A) Potenciostato Autolab 302N y arreglo Photo kit - Led para medición de I vs. V en la UACM. B) Montaje para medición I vs. V por subcelda de un módulo fotovoltaico con el Photo kit-Led y el potenciostato Autolab 302N.	84
Figura 5.13. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la temperatura del sustrato.....	85
Figura 5.14. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la temperatura del sustrato.....	86
Figura 5.15. Voltaje de circuito abierto en función de la variación de la temperatura del portasustratos.	87
Figura 5.16. Corriente de corto circuito en función de la variación de la temperatura del sustrato.....	87
Figura 5.17. Factor de llenado FF en función de la variación de la temperatura del sustrato.....	88
Figura 5.18. Eficiencia en función de la variación de la temperatura del sustrato.....	88
Figura 5.19. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la potencia del magnetrón.	89
Figura 5.20. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la potencia del magnetrón.	90
Figura 5.21. Voltaje de circuito abierto en función de la variación de la potencia del magnetrón.	90
Figura 5.22. Corriente de corto circuito en función de la variación de la potencia del magnetrón.	91
Figura 5.23. Factor de llenado FF en función de la variación de la potencia del magnetrón.	91
Figura 5.24. La eficiencia en función de la variación de la potencia del magnetrón.	92
Figura 5.25. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la presión de Argón.	93
Figura 5.26. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la presión de Argón.	94

Figura 5.27. Voltaje de circuito abierto en función de la variación de presión de Argón.	94
Figura 5.28. Corriente de corto circuito en función de la variación de la presión de Argón.	95
Figura 5.29. Factor de llenado FF en función de la variación de la presión de Argón. ..	95
Figura 5.30. La eficiencia en función de la variación de la presión de Argón.	96
Figura 5.31. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función del espesor de la película de CdS.....	97
Figura 5.32. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función del espesor de la película de CdS.....	98
Figura 5.33. Voltaje de circuito abierto en función de la variación del espesor de la película de CdS.....	98
Figura 5.34. Corriente de corto circuito en función de la variación del espesor de la película de CdS.....	99
Figura 5.35. Factor de llenado FF en función de la variación del espesor de la película de CdS.....	99
Figura 5.36. La eficiencia en función de la variación del espesor de la película de CdS.....	100
Figura 5.37. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la velocidad de rotación del portasustrato.	101
Figura 5.38. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la velocidad de rotación del portasustrato.	102
Figura 5.39. Voltaje de circuito abierto en función de la variación de la velocidad de rotación del portasustrato.	102
Figura 5.40. Corriente de corto circuito en función de la variación de la velocidad de rotación del portasustrato.	103
Figura 5.41. Factor de llenado FF en función de la variación de la velocidad de rotación del portasustrato.	103
Figura 5.42. La eficiencia en función de la variación de la velocidad de rotación del portasustrato.....	104

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del procesamiento de películas delgadas de sulfuro de cadmio (CdS), mediante la técnica de erosión catódica (Sputtering RF). Este semiconductor "ventana" se ocupa en módulos fotovoltaicos de CdTe en áreas de 100 cm². El Teluro de Cadmio (CdTe) y el Tratamiento Térmico con Cloruro de Cadmio (TT-CdCl₂) se realizaron por la técnica CSS; mientras que los contactos metálicos de Cobre-Molibdeno (Cu-Mo) se depositaron por la técnica de erosión catódica (Sputtering DC).

El estudio comprende catorce muestras en las que se variaron los siguientes parámetros de depósito del CdS: temperatura de sustrato, presión del argón, potencia del magnetrón, velocidad de giro del portasubstratos y espesor del material.

Las técnicas de caracterización utilizadas consistieron en la medición de perfilometría y transmitancia óptica de las películas de sulfuro de cadmio. Es importante mencionar que estas mediciones se realizaron en el departamento de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional.

También se observa la influencia de los parámetros de depósito en la respuesta fotovoltaica (curvas I vs. V y P vs. V) de los dispositivos obtenidos. Por ejemplo, algunos de los resultados muestran que la variación de la potencia y la presión influyen en la velocidad del depósito, el espesor de la capa del material y por lo tanto en la transmitancia.

Con el desarrollo de este trabajo se pudieron establecer los parámetros adecuados de crecimiento de CdS por la técnica de Sputtering-RF, a partir de los dispositivos que presentaron los mejores resultados de I_{sc} , V_{oc} , $I_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{a}x}$, FF y η . En relación a la técnica de erosión catódica se concluye que los procesos de depósito son estables, controlables, de alta reproductibilidad y que permiten su escalabilidad.

OBJETIVO GENERAL

Procesar películas delgadas de CdS variando parámetros de depósito, mediante la técnica de erosión catódica magneto planar RF para determinar su influencia en la respuesta fotovoltaica de módulos de CdTe de 100 cm^2 .

OBJETIVOS PARTICULARES

- A. Obtener muestras de CdS variando los parámetros de depósito: temperatura, presión, potencia, velocidad de rotación del portasubstrato y espesor, por la técnica de erosión catódica magneto planar RF.
- B. Realizar mediciones a las muestras de Sulfuro de Cadmio de perfilometría, transmitancia y corriente - voltaje, para el módulo fotovoltaico y correlacionar los resultados obtenidos para el CdS con la respuesta fotovoltaica del dispositivo.

HIPÓTESIS

La respuesta fotovoltaica de módulos de película delgada de CdTe de 100 cm^2 depende de las propiedades ópticas y eléctricas del semiconductor "ventana" CdS en toda su superficie y de la técnica de depósito.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Potencial de aprovechamiento solar fotovoltaico en México.

El sol es una fuente de energía limpia, inagotable y gratuita. La transformación de energía solar en energía eléctrica puede realizarse en el lugar de consumo, sin necesidad de transportarse ni depender de otras infraestructuras.

La tecnología fotovoltaica genera electricidad a partir de la radiación solar. Las celdas fotovoltaicas transforman directamente la radiación solar en electricidad por medio de un fenómeno físico denominado efecto fotovoltaico. Las celdas fotovoltaicas se pueden utilizar en conexión con la red eléctrica, o bien en sitios aislados por medio de sistemas que incluyen baterías.

México se localiza geográficamente entre los 14° y 33° de latitud septentrional, forma parte del “cinturón solar” y esta característica resulta ideal para el aprovechamiento de la energía solar porque la irradiación global media diaria en el territorio nacional es de 5.5 kWh/m²/d. La irradiación promedio diaria cambia a lo largo del país y también depende del mes en cuestión, descendiendo ligeramente por debajo de 3 kWh/m² y alcanzando valores superiores a 8.5 kWh/m² (ver Figura 1.1 y Tabla 1.1), siendo uno de los países con mayor potencial en el aprovechamiento de la energía solar en el mundo (SENER, 2012).

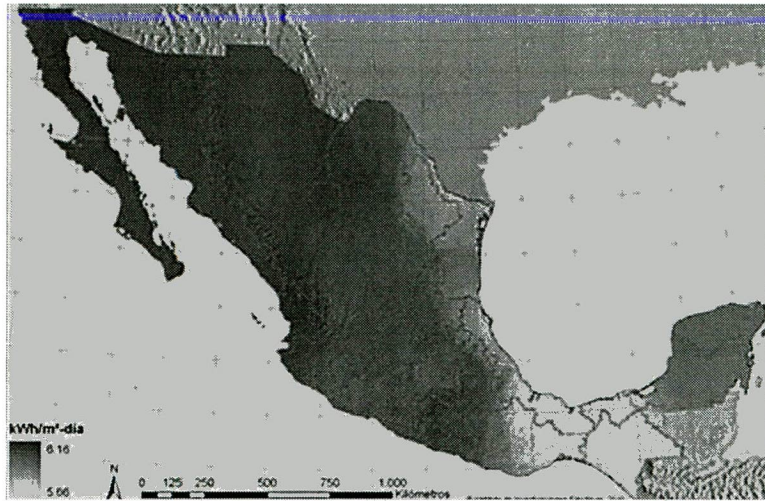


Figura 1.1. Irradiación solar global promedio anual en el territorio nacional (kWh/m^2).

La distribución de la insolación contempla la cantidad promedio de días despejados y nublados para cada región. Así se tiene que el noroeste y norte del país (Sonora, Chihuahua y Baja California) presentan la mayor insolación. Por lo contrario, las ciudades que menos radiación solar reciben son Orizaba y Jalapa (zona que rodea al pico de Orizaba), en Veracruz. En ellas siempre está nublado (Almanza Salgado & Muñoz Gutiérrez, 1994).

Tabla 1.1. Irradiación solar global diaria promedio mensual en México (kWh/m^2).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Mínimo	3.1	3.3	3.1	3.8	4.1	4.4	4.5	4.5	4.1	3.5	3.1	2.8
Máximo	5.4	6.3	6.6	7.5	8.3	8.6	7.0	6.6	6.7	6.0	5.7	5.6
Promedio	4.1	4.7	5.3	5.7	5.9	5.6	5.6	5.5	5.1	4.7	4.3	3.8

Fuente: CONUEE. Irradiación Global Media en la República Mexicana.

A partir de esta información, se concluye que el país tiene un potencial de generación de 6,500,000 GWh al año, lo que equivale aproximadamente a 27.7 veces el consumo total de electricidad de México en 2012 (ProMéxico, 2013).

1.2. Sector de Energías renovables en México.

De acuerdo con información del gobierno federal (Tabla 1.2), hasta 2013 México contaba con una capacidad instalada para la generación de energía eléctrica de 64,690 MW, de los cuáles 14,891 MW provinieron de fuentes renovables de energía (eólica, solar, hidráulica, geotérmica y de biomasa), lo que representa el 23% del total de la capacidad instalada (SENER, 2014), de acuerdo con datos de la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Tabla 1.2. Capacidad instalada en operación y en construcción para la generación de energía eléctrica con fuentes renovables 2013.

TIPO DE ENERGÍA	CAPACIDAD INSTALADA EN OPERACIÓN (MW)	CAPACIDAD AUTORIZADA EN CONSTRUCCIÓN (MW)
Hidráulica	11694	890
Eólica	1638	3332
Geotérmica	823	169
Biomasa	661	120
Solar	76	976
Total	14891	5487

Fuente: Comisión Federal de Electricidad (CFE)/Comisión Reguladora de Energía (CRE).

Mientras que para 2028 (Tabla 1.3) se estima que se alcanzará una capacidad total instalada superior a 35,000 MW para la generación de electricidad a partir de fuentes renovables de energía. Se prevé un incremento de 21,089 MW (2014-2028) en la capacidad instalada existente, liderado por las energías eólica e hidráulica con una participación de 52% y 25% respectivamente, seguida en orden de magnitud por los proyectos de solar fotovoltaica (3,508 MW).

Tabla 1.3. Capacidad instalada adicional para la generación de electricidad 2013-2027 (MW).

TIPO DE ENERGÍA	SERVICIO PÚBLICO	AUTO-ABASTECIMIENTO	GENERACIÓN DISTRIBUIDA	TOTAL	PARTICIPACIÓN %
Eólica	3519	7066	395	10980	52
Hidráulica	4713	476	150	5339	25
Solar					
- Fotovoltaica	36	2199	1273	3508	17
- Termosolar	14	29	1	44	0.002
Biomasa	0	539	402	941	0.04
Geotérmica	180	40	57	277	0.01
Total	8462	10348	2279	21089	

Fuente: Prospectiva de Energías Renovables 2013-2027, SENER (PER 2013-2027).

Cabe destacar que, considerando las adiciones acumuladas de la capacidad instalada en proyectos de generación distribuida (ver Figura 1.2) se estima un comportamiento distinto, centrándose la generación de electricidad en la tecnología solar fotovoltaica con 56% del total (1,273 MW), seguida de los proyectos para aprovechamiento de bioenergía (402 MW) hacia el año 2028.

Escenario de planeación.

Adiciones acumuladas de capacidad para Generación Distribuida (MW).

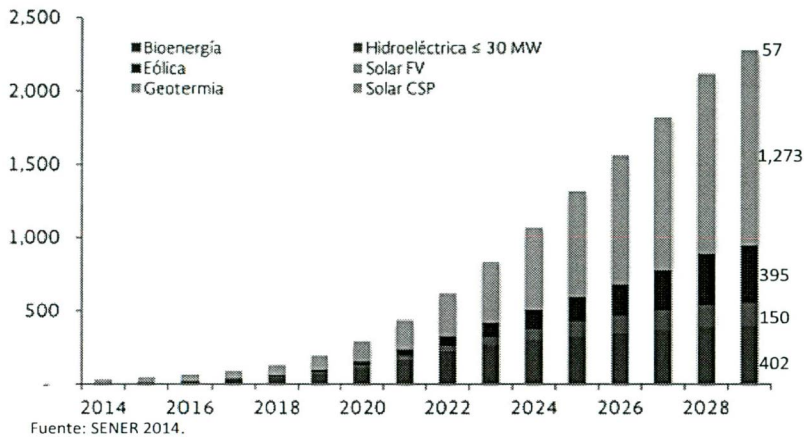


Figura 1.2. Generación Distribuida 2014-2028 (MW).

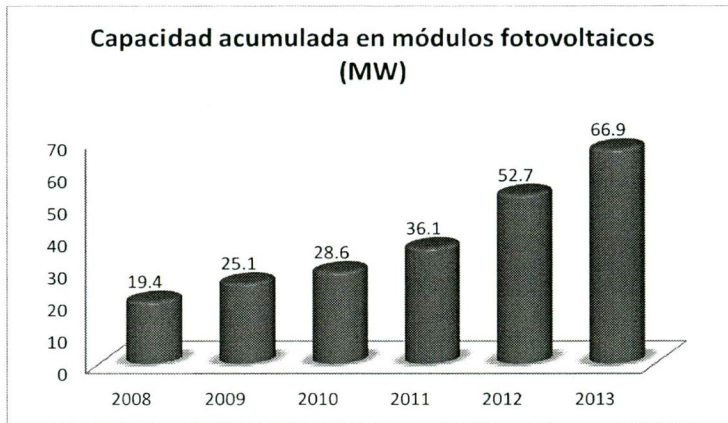
1.2.1. Participación de la energía solar fotovoltaica en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

La entrada en operación de proyectos fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica será el principal propulsor para el aprovechamiento de la energía solar en los próximos años. El desarrollo de proyectos solares fotovoltaicos para generación de electricidad en México, superiores a 500 kW, se inició en 2011 con un proyecto privado en la modalidad de autoabastecimiento en el estado de Aguascalientes de 3.8 MW y

dos proyectos piloto desarrollado por CFE en 2012 de 1 MW en Sata Rosalía, Baja California Sur y otro de 5 MW en Cerro Prieto, Baja California.

Además, el Proyecto Aura Solar de 30 MW de la empresa Eosol Energy de México, bajo la modalidad de Pequeña Producción (PP), añadirá una capacidad de 16.8 MW al SEN, cantidad que se adiciona a los proyectos de la CFE en operación por lo que se considera que la generación mediante energía solar se ha incrementado notablemente.

No obstante que solo existen algunos proyectos de generación fotovoltaica de más de 500 kW, CFE registró al 31 de diciembre de 2013 un total de 4,620 contratos de interconexión renovables (CRE, 2014). De acuerdo con el Balance Nacional de Energía, en 2013, la capacidad total instalada de sistemas fotovoltaicos registró un incremento porcentual respecto a 2012 de 27.1% con 66.94 MW (SENER, 2014) teniendo como uso final la electrificación rural, comunicaciones, bombeo de agua, refrigeración y conexión a la red (ver Figura 1.3).



Fuente: Balance Nacional de Energía 2013.

Figura 1.3. Capacidad acumulada en módulos fotovoltaicos 2013.

En 2013, la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en operación a gran escala alcanzó los 49 MW, de los cuales el 88% es operado a través de permisionarios bajo esquemas de autoabastecimiento y pequeña producción (ver Tabla 1.4).

Tabla 1.4. Centrales solares fotovoltaicas para la generación de Electricidad 1013.

CENTRAL/PERMISIONARIO	CAPACIDAD (MW)	GENERACIÓN (GWh/AÑO)	UBICACIÓN	TIPO DE SERVICIO
Santa Rosalía y Cerro Prieto.	6.0	n.d.	Baja California Sur y Baja California	Público (CFE)
Autoabastecimiento renovable	3.8	9.7	Aguascalientes	Privado (AUT)
Celulosa y papel	0.6	0.9	Guanajuato	Privado (AUT)
Servicios comerciales	38.7	86.0	Baja California Sur	Privado (PP)
Proyectos en pequeña y mediana escala.	26.6	-	n.d.	Privado (AUT)
Total en operación	75.7	-		
En construcción y por iniciar obras	961.6	1,850.0	BC, BCS, Chih, Coah, Dur, Gto, Jal, SLP, Son, Sin.	Privado (AUT, PP)
Total	1,037.3			

Fuente: CFE/CRE/SENER.

1.2.2. Empresas de energía fotovoltaica en México.

México tiene una capacidad de producción anual de módulos fotovoltaicos superior a 737 MW (por encima de Brasil, Chile y Argentina). Entre las principales empresas desarrolladoras de energía fotovoltaica se encuentran: Abengoa, Gauss Energía, Grupo Dragón, Sonora Energy Group, Enercity Alfa, Eosol Enegy, Del SolS ystems, Microm e Iberdrola. Mientras que algunas de las empresas manufactureras de módulos fotovoltaicos se enlistan en la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Empresas manufactureras de módulos fotovoltaicos 2013.

COMPAÑÍA	PAÍS DE ORIGEN	CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN ANUAL	UBICACIÓN
Jabil	EE. UU.	45.0 MW	Chihuahua, Chihuahua
Kyocera	Japón	150.0 MW	Tijuana, Baja California
Sanyo	Japón	75.0 MW	Monterrey, Nuevo León
ERDM Solar	México	30.0 MW	San Andrés Tuxtla, Veracruz
Solartec	México	12.5 MW	Irapuato, Guanajuato
Sunpower	EE. UU.	425.0 MW	Mexicali, Baja California
Total		737.5 MW	

Fuente: SENER.

1.3. Antecedentes de las celdas solares en México.

Hoy en día, México cuenta con varias instituciones académicas en donde se llevan a cabo la investigación y desarrollo de celdas solares y aplicaciones fotovoltaicas (FV) tales como el Instituto de Energías Renovables de la Universidad Nacional Autónoma de México (IER-UNAM), el Instituto de Investigación en Materiales (IIM-UNAM), el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), la Escuela Superior de Físico Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional (ESFM-IPN) y la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Además del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE), en donde realizan la instalación y evaluación de equipos FV.

Mientras que los organismos gubernamentales como la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE), Secretaría de Energía (SENER), Comisión Reguladora de Energía (CRE), determinan los planes, promociones y actividades energéticas nacionales.

Aunado a ello, están las organizaciones civiles como la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) y la Asociación Mexicana de Proveedores de Energías Renovables (AMPER). En 2008 fue aprobada la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética en el Congreso de la Unión con la finalidad de incrementar y acelerar la utilización de las diferentes fuentes renovables de energía para generar electricidad.

1.3.1. Investigación y desarrollo en el CINVESTAV-IPN.

En Latinoamérica, el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN) fue el primer espacio donde se fabricaron celdas solares y módulos fotovoltaicos para proveer de electricidad.

En cuanto a las aplicaciones fotovoltaicas, una de las primeras fue en los globos meteorológicos lanzados por la Comisión Nacional de Espacio en 1967, para el cual se fabricaron celdas solares de silicio cristalino de $2 \times 1\text{cm}^2$, contactos de oro y capas antirreflejantes de TiO_2 con eficiencia de conversión del 8%.

Posteriormente, en 1974 un grupo de profesores del CINVESTAV fabricó módulos fotovoltaicos (FV) con 36 celdas de silicio mono-cristalino de 2 pulgadas de diámetro con una potencia de 7 Watts-pico. Fue hasta 1977 cuando se desarrolló la fase preindustrial y se implementó una línea de producción y en 1980, con una capacidad de 15 kWp, se estimaron los costos de las celdas solares a nivel producción.

En 1977 en el CINVESTAV se diseñaron sistemas con 30 Wp en módulo FV para proveer de electricidad 5 horas/día a aulas del sistema nacional de tele-secundarias en comunidades de la Sierra de Puebla. El proyecto fue financiado por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura (UNESCO), la Organización de Estados Americanos (OEA) y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Para el proyecto se fabricaron celdas solares de silicio monocristalino con 11% de eficiencia de conversión, módulos fotovoltaicos a base de silicio con 9% de eficiencia. También en 1977, en la misma zona, se instalaron sistemas para la radiotelefonía rural de 60 W con uso promedio de 60 min/día. De forma paralela, se implementaron cursos de la conversión fotovoltaica en la ESIME-IPN. Asimismo, se incursionó en el bombeo de agua en pozos con profundidades simuladas de hasta 90 m con una bomba eléctrica de 7.5 HP de corriente directa, obteniendo un flujo de 3.5 l/s.

Hacia 1981, se incrementó la capacidad de producción a 20 kWp con el apoyo BID-CONACYT, lo cual también permitió equipar y automatizar los equipos de laboratorio. En 1982 la planta piloto alcanzó la capacidad de 25 kW/año de producción. Las especificaciones físicas de estos módulos modelo MS-1722 fueron: largo = 77.4 cm, ancho = 31.2 cm, espesor = 3.4 cm, peso = 4.25 kg. Los módulos desarrollaron una característica bajo la radiación equivalente de 100 mW/cm^2 a temperatura ambiente de $V_{oc} = 20.8 \text{ V}$, $I_{sc} = 1.2 \text{ A}$, $V_{m\acute{a}x} = 16.0 \text{ V}$, $I_{m\acute{a}x} = 1.08 \text{ A}$ y potencia de 17.2 W.

Los objetivos de esta planta piloto fueron demostrar la factibilidad de fabricar celdas solares en México, promover la aplicación fotovoltaica, investigar y desarrollar módulos fotovoltaicos utilizando diferentes materiales y formar recursos humanos.

En esta institución, hasta 2011, se realizaba investigación en áreas de silicio cristalino y amorfo, así como de compuestos policristalinos y orgánicos.

1.3.2. Grupo de Física del Estado Sólido del ESFM-IPN

El grupo de Física del Estado Sólido de la Escuela Superior de Física y Matemáticas (ESFM) del IPN se forma en el año de 1967. Durante la década de los 70's, varios académicos realizaron estudios de postgrado en el extranjero, lo cual resultó el desarrollo de nuevas líneas de investigación. En este período se trabaja especialmente en la dirección de propiedades ópticas en halogenuros alcalinos y en fenómenos de transferencia de carga y fotosensibilización en cristales moleculares.

Este grupo de investigación ha estado trabajando en celdas solares del tipo CdS/CdTe, registrando los siguientes resultados: CdS/CdTe por CSVT y CdS-Sputtering/CdTe-CSVT en 1998 con eficiencias promedio del 7% (Tufiño & Contreras, 1998), para el año 2003 se reportan celdas solares con CdS y CdTe por CSVT (en atmósfera de O₂) y con tratamientos térmicos de CdCl₂ y eficiencias del orden del 11% (Vigil, Santana, & Mendoza, 2004), hasta lograr una eficiencia del 12.6% con celdas solares del tipo CdS-CBD/CdTe-CSVT en el 2005, al variar la relación nominal S/Cd de 1:1 a 5:1 (Vigil, Arias, & Mendoza, 2005).

Actualmente se sigue trabajando en este tipo de celdas solares en el CINVESTAV con eficiencias del 12% al 14% en áreas de 2.54 cm², lo cual ya es competitivo a nivel industrial (Mendoza, 2007).

1.3.3. Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM).

El grupo de trabajo del IER (antes Centro de Investigación en Energía) tiene más de 28 años de experiencia en el área de materiales solares. Han realizado trabajos para la

elaboración de películas delgadas: técnicas de depósito químico, rocío pirolítico, depósito por vapor químico, sublimación en espacio cercano, sputtering, sol-gel, electro-depósito, serigrafía, entre otras.

En 2011 se instauró en el IER el Laboratorio de Innovación Fotovoltaica y Caracterización de Celdas Solares (LIFYCS), dedicado al desarrollo de materiales, celdas solares y módulos fotovoltaicos, involucrado en el análisis del desempeño eléctrico y energético de las celdas solares experimentales. Entre sus objetivos destaca la formación de recursos humanos, la consolidación de cuerpos académicos y grupos de investigación, el desarrollo de prototipos de celdas solares con posible transferencia tecnológica, módulos de difusión y promoción de tecnologías solares, promover la Red Nacional de Innovación e Investigación Fotovoltaica y establecer vínculos con el sector productivo y laboratorio de certificación de celdas solares (LIFYCS, 2013).

Las líneas de investigación del IER-UNAM, en el Departamento de Materiales Solares, abarcan el estudio de materiales fotovoltaicos para el desarrollo de celdas solares de 1ra, 2da y 3ra generación, el desarrollo de dispositivos ópticos y optoelectrónicos para aplicaciones en energía solar, la producción en planta piloto de recubrimientos semiconductores, la evaluación de sistemas fotovoltaicos y tecnologías fotovoltaicas, el desarrollo de catalizadores para aplicaciones en celdas de combustible y producción de hidrógeno, el desarrollo de materiales semiconductores por medio de las técnicas sol-gel, evaporación térmica y “sputtering” para aplicaciones en el área de celdas solares (IER-UNAM, 2013).

1.3.4. Programas y proyectos gubernamentales.

El Programa de Fomento de Sistemas Fotovoltaicos en México (ProSolar) tiene como objetivos impulsar en el corto plazo (2012 - 2013) y en el mediano (2014 - 2017) la tecnología solar fotovoltaica. Además de garantizar el crecimiento del mercado con un nivel de calidad adecuado en los productos y servicios asociados, así como desarrollar un mercado local que favorezca el desarrollo de la industria nacional (SENER/GIZ, 2012). Está enfocado a preparar las condiciones marco en las áreas de regulación, capacitación, normalización y difusión de sistemas fotovoltaicos en México.

Por otra parte, el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) con el proyecto “Estación de pruebas de sistemas fotovoltaicos” concluyó en 2009 una instalación para la prueba de sistemas fotovoltaicos, además de su caracterización para dar apoyo a los programas de electrificación rural (SENER, 2013).

En cuanto a los proyectos de las Granjas Solares Urbanas (GSU), constituyen un medio de autoabastecimiento eléctrico renovable mediante la implementación de sistemas fotovoltaicos, aplicable a conjuntos habitacionales, que pueden favorecer la economía del usuario, la sustentabilidad urbana, son impulsados por la CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). Los usuarios más beneficiados con esta tecnología son los Domésticos de Alto Consumo (DAC) y las empresas con tarifas comerciales 2 y 3.

1.4. Antecedentes de celdas solares de CdTe en México.

En este apartado se describen algunos de los proyectos más relevantes en el desarrollo de la investigación de celdas solares de CdTe en nuestro país en los años recientes.

Desde hace más de 30 años y con más de 100 publicaciones en el tema, el Grupo de Celdas Solares 2 del CINVESTAV-Mérida, trabaja en películas semiconductoras de CdS y CdTe y otros materiales. El grupo liderado por el Dr. Juan Luis Peña Chapa, a partir del año 2003 se ha dedicado a la caracterización y preparación de celdas solares de segunda generación. Este grupo, a finales del 2013, logró fabricar celdas solares de CdS/CdTe de alta eficiencia en el CINVESTAV-Mérida alcanzando 14.6%, depositadas mediante sputtering de ZnO como buffer, CdS (capa ventana) y la bicapa de Cu/ Mo como un nuevo contacto posterior. Hasta ahora es el mejor resultado a nivel de América Latina.

Para este proyecto, su equipo de trabajo reportó que, para crear cada capa semiconductor, se requieren tratamientos con sustancias contaminantes y peligrosas que logró sustituir (como el dicloruro de cadmio) por gas de freón, una sustancia que ya emplea un grupo de investigadores italianos, pero que en el CINVESTAV añadieron otros elementos para obtener mejores resultados (Cinvestav, 2014).

En el Grupo de Celdas Solares de la Escuela Superior de Física y Matemáticas del IPN se trabaja desde hace más de 17 años en la investigación básica de películas delgadas y procesamiento y caracterización de celdas solares del CdS/CdTe fabricadas en áreas de 2.54 cm^2 . Las eficiencias de estos dispositivos se ha ido incrementando en los últimos años hasta alcanzar la máxima eficiencia de 12.4%. Recientemente se ha obtenido eficiencias del 6% en áreas de 4 cm^2 . Asimismo, han realizados depósitos de los materiales involucrados en área de 450 cm^2 , lo cual representa un paso fundamental en la escalabilidad de nuestra tecnología a procesos industriales.

El Instituto de Energías Renovables (antes Centro de Investigación en Energía) de la UNAM trabajaba desde hace varios años en el depósito de películas de CdS, CdTe y aleaciones de CdTe, así como en el procesamiento de celdas solares del tipo CdS/CdTe con eficiencias del 10% y CdMgTe/CdS con eficiencia 9%. Recientemente han trabajado un mini-modulo con cuatro celdas de área 4 cm^2 por cada uno con eficiencia en el rango de 6% (CONACYT, 2013).

Por otra parte, el proyecto “Depósito de CdS sobre CdTe y formación de una celda solar sobre sustratos flexibles” es financiado con el Fondo Mixto CONACYT-Tabasco y se desarrolla tanto en instalaciones de la Universidad Politécnica del Golfo, como en la UNAM en el Distrito Federal y el CINVESTAV en la ciudad de Mérida, Yucatán.

Este proyecto consideraba que en la primera etapa se favorecerá el crecimiento de la intercapa óhmica entre el Mo y el CdTe, depósito semiconductores de CdTe y formación de la unión CdTe/CdS sobre sustratos flexibles metálicos de molibdeno así como la caracterización de física del CdTe de la heteroestructura Mo/intercapa/CdTe/CdS (UP del Golfo, 2011).

En 2013, inició el proyecto “Desarrollo de prototipos de módulos fotovoltaicos de CdTe/CdS en área de 100 cm^2 con eficiencia en el rango de 10% y de sistemas asociados para la fabricación del mismo para su futura transferencia tecnológica”, encabezado por el Dr. Xavier Mathew.

Como parte de los objetivos de este proyecto, destacan la optimización de varios procesamientos involucrados en el desarrollo de heteroestructuras fotovoltaicas de

CdTe/CdS para alcanzar uniformidad de las películas y una eficiencia arriba de 8% en área mayor que 100 cm^2 . Desarrollar procesos de tratamiento con cloro para evitar uso de sales de cadmio y nuevas tecnologías de contactos óhmicas más estables y eficientes. Así como el desarrollo de prototipo de mini-módulos de CdTe/CdS rayada por láser e interconectada para transferencia tecnología al sector industrial. Todo ello trabajando en colaboración de las instituciones: IER (institución líder) y el CINVESTAV-Mérida.

Finalmente, el presente trabajo se inscribe en el marco del proyecto para la manufactura de módulos fotovoltaicos de CdS/CdTe en áreas de 100 cm^2 y con eficiencias de 8% por la técnica de sublimación y procesos preindustriales que sean reproducibles, controlados y escalables, para la manufactura de paneles fotovoltaicos de segunda generación. Este proyecto se desarrolla al presente en la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) y termina en febrero de 2016.

CAPÍTULO 2. TEORÍA DE LAS CELDAS SOLARES

Las celdas solares son dispositivos de conversión directa que transforman (sin procesos intermedios) la potencia del sol en potencia eléctrica. Considerando que la potencia es $P = IV$, es necesario explicar cómo se genera la corriente (I) y el voltaje (V) en la celda.

La corriente es el resultado de cargas en movimiento en una dirección determinada, entonces es necesario conocer cómo se generan esas cargas y cómo son dirigidas en cierta dirección. Las cargas están ya en los semiconductores, pero en estado ligado. Bajo el efecto de la luz, las cargas se vuelven libres, capaces de formar una corriente. De esta forma, las cargas son dirigidas en una dirección determinada para formar una corriente gracias a la acción de un campo eléctrico creado en la celda.

2.1. Materiales semiconductores.

Un semiconductor es aquel material cuya resistividad varía entre un rango de 10^{-2} a $10^9 \Omega\text{cm}$, en función de la temperatura y del grado de impurificación a que se halla sometido. Precisamente, los semiconductores son materiales a los que se les puede controlar la conductividad eléctrica porque se comportan como aislantes a bajas temperaturas y a temperaturas más altas se comportan como conductores. La razón de esto es que los electrones de valencia están ligeramente ligados a sus respectivos núcleos atómicos, pero no lo suficiente pues al añadir energía elevando la temperatura, son capaces de abandonar el átomo para circular por la red atómica del material. En cuanto un electrón abandona un átomo por la acción de un fotón, en su lugar deja un hueco que puede ser ocupado por otro electrón que estaba circulando por la red (ver Figura 2.1).

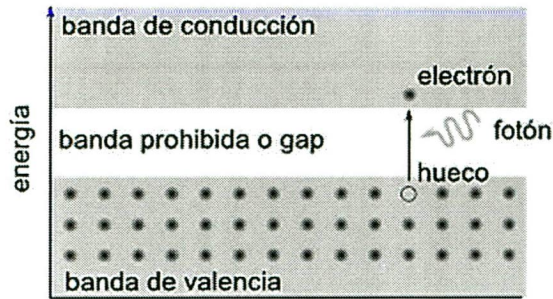


Figura 2.1. Banda de valencia, banda de conducción y energía del gap.

Una diferencia importante entre semiconductores y aislantes es el tamaño de sus brechas o bandas de energía prohibida. La teoría cuántica describe las diferencias entre conductores (metales) y semiconductores usando diagramas de bandas de energía como se muestra en la Figura 2.2.

El ancho de banda de energía prohibida para excitaciones electrónicas es mayor a 0 eV y menor a 3 eV con sus excepciones. En un semiconductor la banda prohibida de energía o gap es relativamente pequeña y un número útil de electrones puede brincarla desde la banda de valencia llena hasta la banda de conducción vacía. En este proceso, el electrón es un portador negativo en la banda de conducción y el hueco electrónico que deja en la banda de valencia se considera un portador positivo.

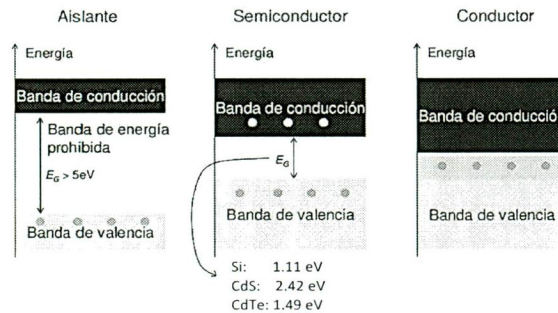


Figura 2.2. Tipos de materiales.

Los semiconductores son intrínsecos cuando están hechos con un elemento puro y son extrínsecos cuando al elemento puro se le agregan impurezas (dopado) con el objetivo de mejorar su semiconducción. A la concentración de los portadores de carga eléctrica se denomina concentración de portadores intrínseca (n_i). La concentración de portadores intrínseca es el número de electrones en la banda de conducción o el número de huecos en la banda de valencia (el número de portadores depende de la temperatura a la que se encuentra el semiconductor y de la magnitud de su banda prohibida).

La Tabla 2.1 muestra los valores de la banda energética que separa las bandas de valencia y de conducción. La energía que un electrón de un semiconductor intrínseco debe adquirir para saltar esa banda prohibida e inducir la conducción eléctrica se llama energía del gap, E_g . La unidad de energía que suele usarse es el electrón-Volt (eV), que es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 Volt. Dicho valor se obtiene experimentalmente y equivale aproximadamente a $1.602176462 \times 10^{-19}$ J.

Tabla 2.1. Brecha energética o banda prohibida de algunos semiconductores.

Material	Gap de energía (eV)
Diamante (C)	5.4
Silicio (Si)	1.11
Germanio (Ge)	0.67
Sulfuro de Cadmio (CdS)	2.42
Teluro de Cadmio (CdTe)	1.49

Las impurezas alteran las características semiconductoras de los materiales al introducir electrones extras u hoyos extras, lo que produce dos tipos de semiconductores extrínsecos: tipo p y tipo n.

2.1.1. Semiconductores extrínsecos tipo p.

Son los que se obtienen al dopar elementos semiconductores intrínsecos con elementos del grupo 13 (boro, aluminio, galio). Como estos elementos proveen sólo tres electrones de los cuatro que requiere el elemento base, se producen huecos o

zonas carentes de un electrón para completar el cuarto enlace (ver Figura 2.3). Estos agujeros funcionan como portadores de carga positiva; es decir, crean pequeñas zonas energéticas permitidas hacia donde pueden moverse los electrones, lo que reduce un poco la brecha energética y facilita la semiconducción.

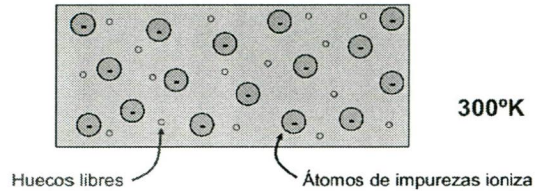


Figura 2.3. Material extrínseco tipo p.

2.1.2. Semiconductores extrínsecos tipo n.

Son los que se obtienen mediante el dopaje de semiconductores intrínsecos con elementos del grupo 15 (fosforo, antimonio). Estos elementos aportan cinco electrones de valencia, uno más de los que requieren para enlazarse con el elemento base, lo que deja un electrón “libre” que puede moverse fácilmente. Lo cual los convierte en portadores de carga negativa, útiles para la conducción eléctrica, permitiendo disminuir la carga energética de la brecha prohibida. Los átomos del grupo 15 de la tabla periódica pueden proporcionar portadores de carga negativa, o tipo-n, ya que tienen un electrón de valencia más que el promedio de cuatro en los semiconductores intrínsecos (ver Figura 2.4). Este quinto electrón puede ser desprendido de su átomo con muy poca energía adicional, y es “donado” a la banda de conducción, para convertirse en un portador de carga.

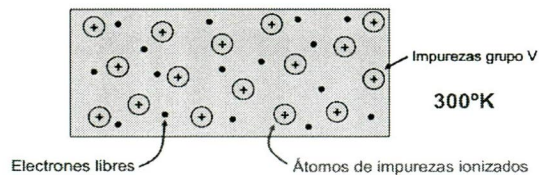


Figura 2.4. Material extrínseco tipo n.

Para una celda solar del tipo CdS/CdTe se considera un arreglo en dos dimensiones de átomos de CdS, como se muestra en la Figura 2.5, los enlaces entre los átomos más próximos de cadmio (Cd) y azufre (S) son covalentes. Cada átomo de azufre contribuye con seis electrones de valencia y recibe de un átomo vecino de cadmio dos electrones.

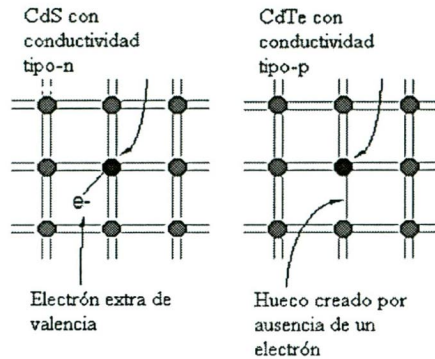


Figura 2.5. Esquema electrónico de un semiconductor tipo n y tipo p.

Suponiendo que debido a un desequilibrio estequiométrico hay un electrón extra en este arreglo atómico debido al Cd que genera vacancias de S, como no existen enlaces libres donde se pueda enlazar el electrón, este se mueve caóticamente por la red con una velocidad que depende de la temperatura. La red cristalina de CdS con un electrón más de valencia; es decir con una vacancia de S produce un semiconductor con conductividad tipo-n (portadores mayoritarios de electrones, con carga negativa), los electrones se agregan a la banda de conducción.

El par electrónico que se muestra en la Figura 2.5, forma enlaces no saturados debido a un desequilibrio estequiométrico creando vacancias de Cd con carga positiva, entonces, este enlace de valencia incompleto se denomina "hueco" que corresponde a los semiconductores con conductividad tipo p (portadores mayoritarios los "huecos" con carga positiva "p"). El enlace de valencia incompleto puede ser llenado por un electrón que pasa a éste desde el enlace saturado contiguo y por lo tanto el hueco se desplazará por el cristal a consecuencia del intercambio de electrones entre átomos (Mendoza R. , 2007).

2.2. El efecto fotovoltaico.

La conversión fotovoltaica es el proceso mediante el cual se convierte directamente la energía solar en energía eléctrica continua por medio de celdas solares. El primer dispositivo fotovoltaico fue demostrado por el físico francés Edmond Becquerel, en el año de 1839. En sus experimentos, Becquerel encontró que cuando ciertos materiales eran expuestos a la luz, producían una diferencia de potencial y al conectarlos con una carga externa se generaba una corriente eléctrica, a este fenómeno se le denominó el efecto fotovoltaico. Sin embargo, el entendimiento, dominio y uso de dicho fenómeno, no fue hasta que se desarrolló la física cuántica y los semiconductores, con el trabajo de Albert Einstein en 1904.

El efecto fotovoltaico puede aparecer en la unión entre dos materiales semiconductores, destacando algunos como el silicio cristalino, silicio amorfo, arseniuro de galio, telurio de cadmio y cobre-indio-galio-selenio. Una celda solar está formada por la unión entre dos materiales semiconductores con diferente conductividad eléctrica. Uno de ellos con exceso de electrones (cargas negativas) al que se le denomina tipo-n y el otro con deficiencias de electrones o “huecos” (cargas positivas) al que se le denomina tipo-p. La unión p-n forma dentro del material, en este caso CdTe-CdS, un campo eléctrico interno para la colección de estos portadores, sin el cual no se llevaría a cabo el efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico se produce cuando la luz (fotones) proveniente del sol incide sobre la celda solar y los fotones con energía mayor al ancho de banda prohibida de energía (gap de energía, E_g) del semiconductor “ventana” tipo-n CdS ($E_g > 2.4$ eV) son absorbidos por los electrones de valencia del semiconductor “absorbente” tipo-p CdTe ($E_g > 1.47$ eV) excitándolos a moverse a estados de conducción que les permite desplazarse al semiconductor “n” creándose una acumulación de cargas negativas en este y los estados vacíos “huecos” dejados por estos electrones, en el semiconductor “p”, se acumulan para formar una zona de carga positiva (ver Figura 2.6).

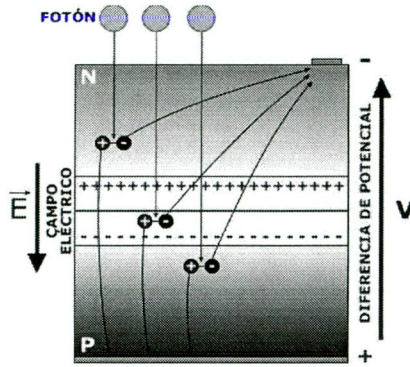


Figura 2.6. El efecto fotovoltaico.

La diferencia de potencial en estas dos zonas se ve externamente como un voltaje foto-generado. Los portadores de carga son separados por un campo eléctrico que se encuentra en la unión n-CdS/p-CdTe y producen una fotocorriente eléctrica que es colectada por el contacto "frontal" (llamado así porque es el primer material expuesto a la luz incidente en el dispositivo) de Óxido de Estaño fluorinado ($\text{SnO}_2: \text{F}$) y el contacto "posterior" de Cu-Mo. La Figura muestra esquemáticamente la estructura de una celda solar del tipo Vidrio- $\text{SnO}_2: \text{F}/\text{CdS}/\text{CdTe}/\text{Cu-Mo}$.

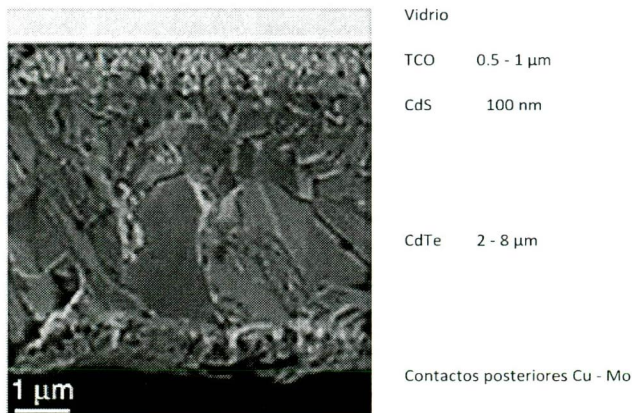


Figura 2.7. Perfil esquemático de la estructura de una celda solar a base de CdTe.

2.3. El modelo de diodo.

El funcionamiento del diodo es la base de las celdas solares que convierten a la radiación solar en energía eléctrica. El diodo es un dispositivo en el cual circula corriente cuando se polariza en forma directa, pero no lo permite cuando se invierte la polaridad. Esto es consecuencia de que al poner en contacto dos semiconductores de tipo diferente n y p, aparece un campo eléctrico en la interface. Este campo se establece de forma que se alcanza un equilibrio interno, evitando cualquier flujo neto de portadores libre en las bandas de conducción y de valencia del semiconductor, cuando no haya perturbación externa.

Cuando el diodo se polariza inversamente, el campo externo aumenta, y se opone aún más al movimiento de electrones y huecos. Pero, al polarizarlo directamente, el campo se reduce y entonces ya no puede evitar los flujos de portadores que causan una corriente eléctrica a través del dispositivo. En tal caso se observa que la corriente aumenta exponencialmente con el voltaje.

La Figura 2.8 es la representación de semiconductores tipo p y n al ponerse en contacto. Debido a la transferencia de carga entre los dos materiales aparece un campo eléctrico, hasta que se alcanza un nuevo estado de equilibrio cuando el campo es suficientemente intenso para que ya no fluyan portadores de carga en la interface.

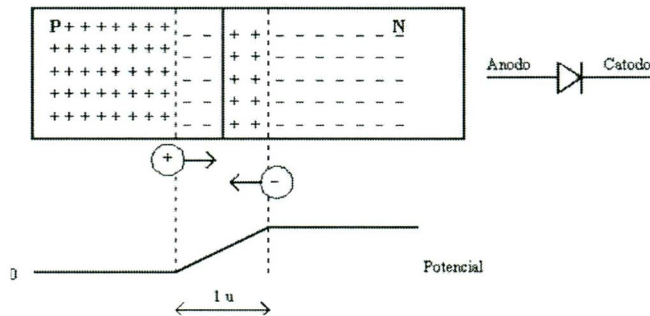


Figura 2.8. Representación de semiconductores tipo p y n al ponerse en contacto.

Para conocer qué sucede cuando se tiene un diodo de unión en oscuridad y se le aplica un voltaje externo, se considera que se pone en contacto el borne positivo de una batería con el lado n del diodo, y el borne negativo de la batería con el lado p del diodo (el diodo está polarizado inversamente). Así, el campo eléctrico interno se verá acrecentado por el voltaje externo, oponiéndose con mayor fuerza al flujo de electrones y huecos, y únicamente habrá una corriente muy pequeña llamada “corriente de saturación en oscuridad” o “corriente de fuga”.

Si se polariza positivamente al diodo (invirtiendo los bornes de la batería), el voltaje externo tenderá a reducir la barrera de potencial en la interface entre los semiconductores n y p, como se ilustra en la Figura 2.9. Entonces, la oposición al flujo de electrones desde el lado n hacia el p, o de huecos desde el lado p hacia el lado n se reducirá y se podrá medir una corriente en el dispositivo.

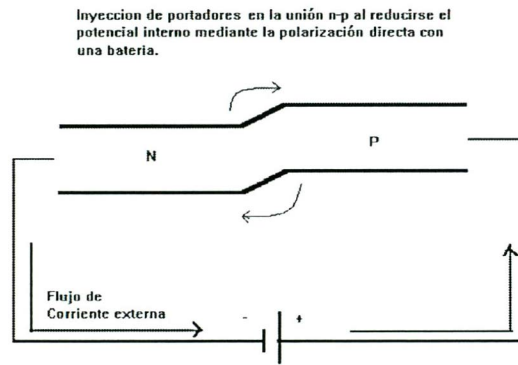


Figura 2.9. Flujo de corriente e una unión de materiales tipo n y p cuando se aplica una polarización directa.

Debido a la gran cantidad de electrones y huecos libres, en cada lado de la interface, cualquier variación en la polarización positiva ocasiona un cambio muy grande en la corriente medida. La corriente varía con el voltaje externo (V) en forma exponencial:

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1 \right]$$

I_S es el valor de la corriente oscura de saturación, la cual fluye cuando el diodo se polariza en forma inversa. La corriente de saturación es muy pequeña, por ejemplo en diodos de silicio puede ser del orden de 0.1×10^{12} Amperes en cada cm^2 . V_T es el

potencial térmico que se relaciona con la energía térmica de los electrones y los huecos dentro del material. A temperatura ambiente V_T es del orden de 0.025 V.

En la Figura 2.10, se muestra el diagrama eléctrico para limitar la corriente colocando una resistencia en serie con el diodo. Así se evita que el diodo pueda quemarse por disipación de calor al circular corrientes muy grandes.

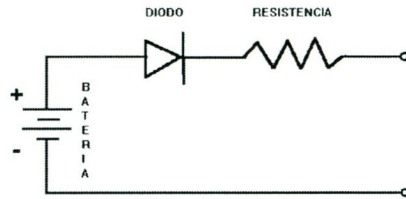


Figura 2.10. Diagrama eléctrico del circuito básico con una resistencia limitadora para medir las características de corriente en función del voltaje para un diodo o unión n-p.

La corriente a través del diodo semiconductor es una función del voltaje aplicado entre sus terminales, de la siguiente forma:

$$I = I_S \left[e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right]$$

La ecuación anterior es la ecuación de diodo, la cual representa en equilibrio (bajo condiciones de oscuridad) el flujo de corriente eléctrica en una unión p-n.

Donde:

I : es la corriente total que circula por el diodo

I_S : es el valor de la corriente oscura de saturación.

T : es la temperatura en Kelvin

K : es la constante de Boltzman

$V_T = \frac{kT}{q} = 25.9 \text{ meV}$, es el voltaje térmico a $T = 300 \text{ K}$, ($K = ^\circ\text{C} + 273$) y q la carga del electrón.

La corriente de saturación I_s es un parámetro que caracteriza a cada diodo en particular y es una medida de los mecanismos de recombinación que ocurren en la celda solar. Con la gráfica de diodo se obtiene la siguiente gráfica (Figura 2.11) que muestra la variación de la corriente en función del voltaje aplicado al diodo, indicando el comportamiento tanto en polarización directa como en inversa.

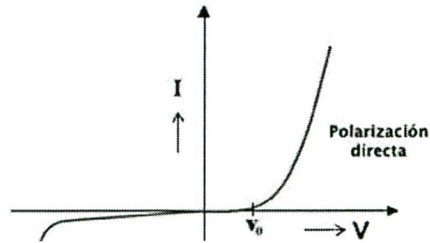


Figura 2.11. Curva de corriente en función del voltaje en oscuridad para un diodo ideal.

2.4. La celda solar.

El proceso de modelado del comportamiento de una celda solar se basa en su equivalencia hacia un circuito eléctrico y su posterior representación matemática. Para ello, es necesario recapitular que cuando se conecta una celda solar a una resistencia de carga y se ilumina, circula una corriente I generada por la radiación solar, la cual se detalla con una fuente de corriente I_L .

En este caso, se observa que en la celda la corriente circula de cátodo a ánodo, es decir, internamente circula del semiconductor tipo n al tipo p (contrario al sentido de un diodo). La celda con iluminación se comporta como un generador de corriente (corriente fotovoltaica), con un diodo en paralelo (para apartar la corriente de oscuridad) que representa la curva característica Corriente-Voltaje (I-V) y dos resistencias que representan las pérdidas intrínsecas al diseño y al comportamiento de los materiales de la celda (Ríos, 2009).

La resistencia serie (r_s) es debida a la resistencia del volumen del material, a las interconexiones y a la resistencia entre los contactos metálicos y el semiconductor. La

resistencia paralelo (r_p) es debida a la no idealidad de la unión p-n y a las impurezas cerca de la unión. Con la presencia de ambas resistencias, serie y paralelo, desde el punto de vista eléctrico una celda fotovoltaica puede representarse por un circuito equivalente como el que se muestra en la Figura 2.12.

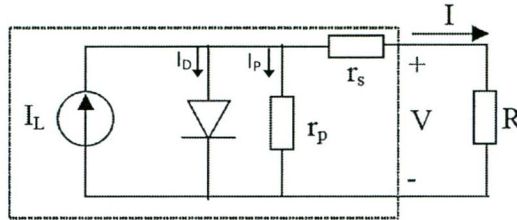


Figura 2.12. Circuito equivalente de una celda solar.

En el circuito equivalente, la corriente en la carga I es igual a la corriente I_L generada por la iluminación, menos la corriente del diodo I_D y la corriente de derivación I_p (pérdidas). La ecuación del circuito se reduce a:

$$I = I_L - I_D - \frac{V + (I \times R_s)}{R_p}$$

Donde:

R_s = Resistencia en serie y representa las pérdidas de los contactos superior e inferior, entre la celda y las terminales de corriente. En una celda ideal $R_s = 0$ (sin resistencia interna).

R_p = Resistencia en paralelo y representa los defectos estructurales al interior de la celda que producen pérdidas. En una celda ideal $R_p = \infty$ (sin pérdidas a tierra).

I_L = Corriente generada por los fotones en la celda solar (foto corriente).

I_D = Corriente del diodo que depende de las características y calidad de la celda y de la radiación solar.

V = Voltaje externo de la celda solar (V).

2.4.1. Corriente en función del voltaje de una celda solar.

La curva I-V de una celda solar se puede obtener a partir del circuito equivalente de dispositivo. Esta curva muestra la salida de un generador fotovoltaico como función de la tensión de salida, a una temperatura e irradiancia determinadas, $I = f(V)$. Entonces, como la celda solar trabaja cuando la radiación solar incide en ella, esta radiación tiene un efecto directo sobre su característica de I vs. V. La superposición de las curvas de I - V de un diodo en oscuridad y en iluminación (AM 1.5) se muestra en la Figura 2.13. El circuito equivalente de la celda solar: un diodo semiconductor que se convierte en un generador de corriente cuando incide la luz sobre él, la cual tiene el efecto de desplazar la curva I vs. V hacia abajo (Mendoza R. , 2007).

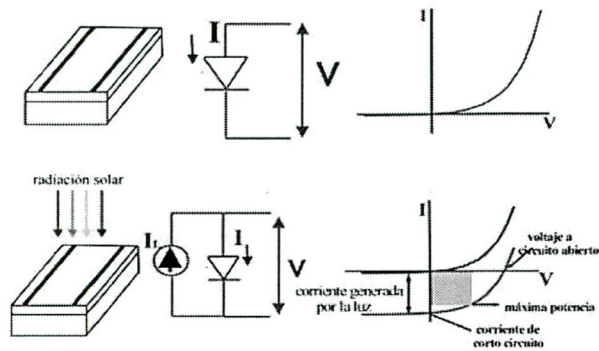


Figura 2.13. Circuitos y curva I vs. V de una celda solar en oscuridad e iluminación.

Si a la corriente en oscuro del diodo se le suma la corriente generada por la luz, obtenemos la ecuación ideal de una celda solar:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] - I_L$$

Donde: I_L : es la corriente generada por la luz (fotogenerada)

n : es el factor ideal del diodo (varía entre 1 y 3)

Valores de n mayores a uno determinan la existencia de otros mecanismos de transporte de carga para heterouniones.

Los parámetros I-V describen las características eléctricas en las terminales de una celda solar bajo la influencia de condiciones meteorológicas (nivel de irradiancia y temperatura ambiente) presentes *in situ*. Los tres puntos significativos de una celda solar se describen a continuación:

2.4.2. Corriente de corto circuito, I_{sc} .

La corriente de corto circuito I_{sc} es la corriente que atraviesa la celda solar cuando el voltaje entre sus terminales es nulo ($V = 0$), esto es, cuando la celda solar está en corto circuito. El valor de I_{sc} depende de la generación y recolección de los portadores creados por la luz. Para una celda solar donde las pérdidas resistivas no son significativas, la corriente de corto circuito es la corriente generada por la luz, esto es, $I_{sc} = I_L$ de tal forma que la I_{sc} es el máximo de corriente que puede ser extraída de la celda (Vigil, Hernández, & Santana, 2011).

Este parámetro depende de:

- El área de la celda solar. A mayor área de recolección, mayor cantidad de fotones absorbidos. Para normalizar esto, se tiene el concepto *densidad de corriente* J por unidad de área ($J=I/A$).
- El espectro de la radiación incidente y por tanto del número de fotones incidentes. La J_{sc} es directamente proporcional a la intensidad de la luz solar.
- Del número de fotones que pasan al semiconductor tipo-n, esto es de su transmitancia.
- Un semiconductor tipo-p que tenga un mayor coeficiente de absorción de fotones tendrá un mayor valor de J_{sc} .

2.4.3. Voltaje de circuito abierto, V_{oc} .

Es el punto en donde la corriente es cero ($I = 0$) presentándose el máximo voltaje que puede generar la celda solar cuando se mide sin carga conectada, es decir, en condiciones de circuito abierto (resistencia entre bornes infinita). El voltaje V_{oc} es consecuencia de la polarización en directa de la unión p-n.

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{J_L}{J_S} + 1 \right)$$

En la ecuación, V_{oc} depende de la densidad de corriente generada por la luz J_L y del inverso de la densidad de corriente de saturación J_s . Mientras que J_L varía poco, J_s lo puede hacer en varios órdenes de magnitud, por lo tanto el valor de V_{oc} está condicionado por los valores de J_s . La J_s depende de los mecanismos de recombinación de los pares electrón-hueco antes de participar en la corriente de conducción. Mientras menos portadores se recombinen, menor será J_s y mayor será V_{oc} . Como J_s depende de la temperatura, cuando ésta se incrementa el valor de J_s aumenta y V_{oc} disminuye; mientras que a mayor "gap" de energía, mayor es V_{oc} (Mendoza, 2007).

2.4.4. Factor de llenado, FF.

La densidad de corriente de corto circuito J_{sc} y el voltaje a circuito abierto V_{oc} , son los máximos valores de corriente y voltaje que se pueden obtener de una celda solar; sin embargo, en estos puntos la potencia obtenida en la celda solar $P=J*V=0$. Por ello es necesario encontrar un punto de la curva J vs. V en donde el producto $J*V$ posea un valor máximo; en la Figura 2.14, se muestra que este punto corresponde a $(J_{máx}, V_{máx})$.

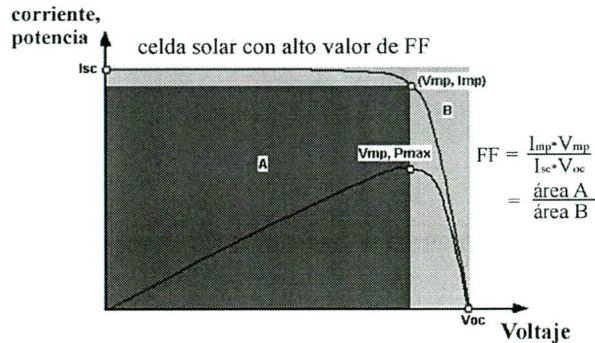


Figura 2.14. Curva J vs. V (línea roja) y curva de P vs. V (línea azul). El área A es el producto de $J_{máx} * V_{máx}$ (área lila), en tanto el área B (área violeta) es el producto de $J_{sc} * V_{oc}$.

Gráficamente el factor de llenado (FF) es una medida de la cuadratura de la curva I - V , siendo el producto $I_{mp} * V_{mp}$ la mayor área del rectángulo que se puede insertar bajo la curva. Mide cuán grande es la región coloreada de la figura anterior. Para el caso ideal $FF = 1$ ó 100%. FF con valor igual al 100% es imposible por la dependencia de la

corriente con el voltaje en una unión p-n. Entonces, una celda solar con mayor valor de FF , dará mayor potencia eléctrica por potencia luminosa incidente.

La potencia máxima ($P_{m\acute{a}x}$) que se obtiene de una celda solar para una radiación solar dada, se define como $P_{m\acute{a}x} = J_{m\acute{a}x} * V_{m\acute{a}x}$, donde $J_{m\acute{a}x}$ y $V_{m\acute{a}x}$ son la densidad de corriente y el voltaje a máxima potencia, respectivamente. Por lo que el FF es gráficamente una medida de la cuadratura de la curva J vs. V y se obtiene de la razón:

$$FF = \frac{J_{m\acute{a}x} \times V_{m\acute{a}x}}{J_{sc} \times V_{oc}}$$

2.4.5. Eficiencia de la conversión fotovoltaica, η .

Se expresa como un porcentaje, está dada por la relación entre la potencia eléctrica que puede entregar la celda y la potencia P_{in} de la radiación que incide sobre ella, lo cual indica la cantidad de energía solar que la celda es capaz de convertir en energía eléctrica.

La eficiencia (η) se define como la razón de la potencia eléctrica máxima que suministra la celda ($P_{m\acute{a}x}$) en la curva J vs. V , entre la potencia de incidencia de la radiación solar (100 mW/cm^2), esto es:

$$\eta = \frac{J_{m\acute{a}x} \times V_{m\acute{a}x}}{P_{in}} = \frac{J_{sc} \times V_{oc}}{P_{in}} FF$$

De esta ecuación puede apreciarse cómo un aumento de la corriente de cortocircuito J_{sc} y/o de la tensión de circuito abierto V_{oc} de la celda conducen a una mayor eficiencia del dispositivo.

2.5. Celdas solares basadas en CdTe.

Las celdas solares de película delgada también reciben el nombre de celdas solares de segunda generación, en contraste a las de silicio monocristalino y policristalino (denominadas de primera generación), debido a que proporcionan una eficiencia

similar a las de silicio, pero su grosor es unas 100 veces menor. La segunda generación se desarrolló por la necesidad de reducir los costos de la primera generación en los materiales usados y en las técnicas de producción (Espindola, 2011).

La celda solar de CdS/CdTe es la más apropiada para ser fabricada en la forma de películas delgadas debido a que los procesos usados para fabricar todas las películas que componen la celda son bastante simples y de bajo costo. Actualmente, ya se han obtenido eficiencias mayores al 16% a escala de laboratorio y en módulos se han logrado eficiencias del 10%, los cuales ya se comercializan.

2.5.1. Construcción de la celda CdS/CdTe.

Las celdas solares de CdS/CdTe están basadas en la heterounión formada entre el CdS tipo-n y el CdTe tipo-p. Está constituida por varias películas delgadas depositadas sobre una matriz cuya configuración típica se muestra en la Figura 2.15. Enseguida se describen cada una de las partes que constituyen la celda:

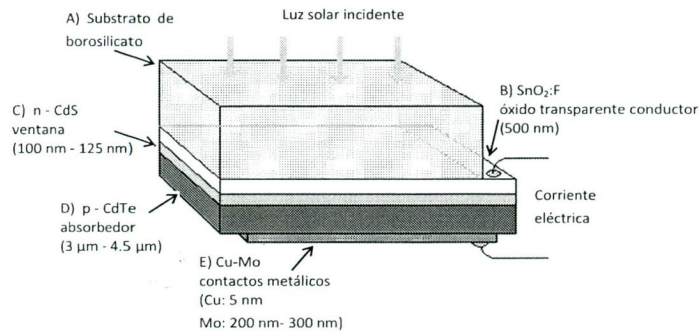


Figura 2.15. Esquema de una celda solar basada en la tecnología de películas delgadas: CdS/CdTe.

A) Vidrio soda lime como substrato, el cual está compuesto de 70% de sílice (dióxido de silicio), 15% de soda (óxido de sodio) y 9% de lime (óxido de calcio) y pequeñas cantidades de otros compuestos. El substrato sirve como soporte mecánico al dispositivo para el crecimiento de las películas delgadas que forman la celda solar, éste se utiliza debido a su transparencia, mínima absorción y bajo costo. Típicamente es de

un espesor de 2 a 4 mm y también protege a las capas activas del medio ambiente. La cara externa del vidrio frecuentemente tiene una capa antirreflejante para mejorar sus propiedades ópticas.

B) La película delgada de óxido conductor transparente (TCO: Transparent Conducting Oxide, por sus siglas en inglés) actúa como el contacto frontal para el dispositivo. En este trabajo se seleccionó la película de óxido de estaño, dopada con flúor ($\text{SnO}_2:\text{F}$) debido a que presenta la propiedad de ser muy transparente a la luz visible y altamente reflectante a las longitudes de onda pertenecientes a la zona del infrarrojo. Éste óxido, con un espesor de 0.2 a 0.5 μm , ha sido depositado industrialmente sobre el vidrio-substrato. Así, ostenta una transmitancia del orden de 80 - 90% en la región óptica de interés (300 - 1500 nm). Este óxido posee, además, una baja resistividad, del orden de 4 a $6 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$, una resistencia laminar menor de 10Ω y estabilidad química a altas temperaturas para admitir los depósitos subsecuentes, dado que tiene un punto de fusión de 1630°C (Garnica, Pérez, & Gochi-Ponce, 2013).

C) La capa de CdS policristalina tiene un dopado tipo-n debido al exceso de cadmio o a la vacancia de azufre; siendo un material con banda de gap amplia ($E_g = 2.4 \text{ eV}$ a 300 K) cuyo espesor típico oscila entre los 80 nm a 150 nm. La principal función de esta película es dejar pasar la luz a longitudes de onda mayores que 515 nm, de tal forma que la mayor cantidad de luz sea absorbida por la capa siguiente, por lo que se le conoce como "capa ventana". Debajo de estas longitudes de onda, parte de la luz seguirá pasando a través del CdTe, debido a la delgadez de la capa de CdS. En este caso, el CdS se depositó por la técnica de erosión catódica RF.

D) La película de telurio de cadmio (CdTe), obtenida en nuestro caso por la técnica de sublimación en espacio cercano, actúa como capa absorbente. Ésta es la región tipo-p de la heterojunta p-n de la celda solar, debido al exceso de telurio o a las vacancias de cadmio. Su gap de energía (1.5 eV) es idealmente adecuado para el espectro solar. Actúa como un absorbedor eficiente, por lo que esta es la región activa de la celda solar, donde ocurre la mayoría de la generación portadora y la recolección. El CdTe posee un alto coeficiente de absorción que permite que 99% de los fotones con

energías mayores que la energía del gap sean absorbidos con sólo 2 micras de material (Durham University, 2014).

E) El contacto posterior es un metal a través del cual se cierra el circuito y que provee una conexión de baja resistencia eléctrica al CdTe. El CdTe tipo-p es un material difícil para producir sobre éste un contacto óhmico. Debido a su alta conductividad, la capa de metal necesita unas pocas decenas de nanómetros de espesor. En los módulos del presente estudio, los contactos metálicos de cobre y molibdeno se depositaron por la técnica de erosión catódica CD.

Dado que las capas activas del dispositivo son aquellas en la parte superior del sustrato de vidrio, ésta construcción se conoce como una configuración de superestrato.

2.5.2. Ventajas e inconvenientes de las celdas solares de CdTe.

Las celdas solares basadas en CdTe presentan la ventaja de tener un coeficiente de absorción $>10^4 \text{ cm}^{-1}$. Esto significa que se requieren menos de 10 micras de este material para absorber más del 90% de los fotones necesarios para producir el efecto fotovoltaico, en comparación con el espesor del silicio cristalino que requiere un espesor mayor a 100 micras de material.

Lo anterior repercute en que la cantidad de material y los costos de producción en el procesamiento de módulos de CdTe sea menor que la utilizada para módulos de Si monocristalino. First Solar fue la primera empresa manufacturera de paneles de CdTe que fabricó celdas solares por menos de \$1.00 USD por watt e incluso consideran que es posible reducir este costo a la mitad.

Otras de las ventajas encontradas recientemente es que los módulos fotovoltaicos basados en CdTe en comparación con los de Si, presentan un mejor desempeño a altas temperaturas y tienen un mayor tiempo de vida útil (Kulp, 2013).

La manufactura de estas celdas solares es relativamente sencilla. El campo eléctrico necesario, que hace posible la conversión de la energía solar en electricidad, se deriva de las propiedades de dos tipos de moléculas de cadmio, el sulfuro de cadmio y el

teluro de cadmio. Esto significa una mezcla simple de moléculas que logra las propiedades requeridas, lo que simplifica su fabricación en comparación con el proceso de múltiples pasos de la unión de dos tipos diferentes de silicio dopado en un panel solar de silicio (CAT Organization, 2013).

Por otra parte, el teluro de cadmio absorbe la luz solar cerca de la longitud de onda ideales, captando energía en longitudes de onda más cortas de lo que es posible con los paneles de silicio. Asimismo, el cadmio es abundante, es producido como un subproducto de otros metales industriales importantes como el zinc; consecuentemente, no ha presentado las variaciones de precios que han ocurrido en los últimos dos años con los precios del silicio.

En cuanto a los inconvenientes de las celdas de CdTe, estos paneles actualmente han alcanzado eficiencias del orden de 16%, la cual es significativamente más baja que las eficiencias de las celdas solares de silicio. Esta característica repercute en que la superficie a ocupar por este tipo de paneles sea mayor que los de primera generación, para obtener la misma cantidad de energía.

En relación al suministro del teluro, mientras cadmio es relativamente abundante, el teluro no lo es. El teluro es un elemento muy raro, alrededor de 1.5 partes por mil millones en la corteza de la Tierra. La mayor parte proviene como un subproducto del cobre y en menor cantidad del plomo y oro. Sin embargo, los investigadores han demostrado recientemente que las cordilleras submarinas conocidas son ricas en teluro. Pero aún no se sabe si este teluro submarino es recuperable, o si hay mucho más teluro en otra parte que se puede recuperar.

Adicionalmente, la compañía estadounidense First Solar está aplicando un proceso de reciclado a escala comercial para los paneles fotovoltaicos de CdTe, que incorpora los costos de recolección y reciclado en el precio del módulo. En el proceso de reciclado, las emisiones tóxicas son mucho más bajas en el ciclo de vida del CdTe que en los ciclos de vida de los sistemas de fotovoltaicos alternativos y los sistemas de potencia

convencionales. Este enfoque puede mitigar la toxicidad, la eficiencia de los recursos y preocupaciones sobre la escasez (Dutta & Krishna, 2012).

El alto nivel de toxicidad del telurio de cadmio es otra desventaja para su aplicación en muchos propósitos. Este componente puede causar serios problemas de salud en caso de inhalación e indigestión. El contacto directo con la piel también puede ser perjudicial para los seres humanos, por lo que es necesario tomar las precauciones necesarias mientras se esté manipulando este material.

Es un material que no está prohibido (por ejemplo, por regulaciones de la UE), cuando está en la forma de telurio de cadmio (CdTe) es una sustancia no metálica estable y no es soluble en agua. El punto de fusión del CdTe es de 1050 °C, entonces los incendios domésticos accidentales no representarían un riesgo. Los incendios industriales pueden alcanzar temperaturas más altas, pero las pruebas han demostrado que el CdTe fundido se mantiene contenido en el módulo FV.

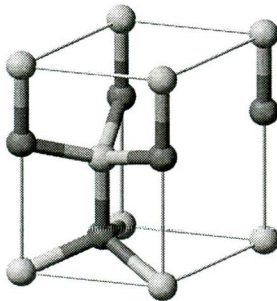
También es importante destacar que en relación a la batería NiCd, un módulo de CdTe utiliza el cadmio alrededor de 2500 veces más eficientemente en la producción de electricidad. Un sistema de 1 kW con CdTe contiene tan poco cadmio como siete pilas de tamaño C de NiCd. La producción de 1 kWh de electricidad en una central eléctrica de carbón emitirá 360 veces más cadmio (como contaminación del aire) del que se necesita en cada módulo solar CdTe por kWh producido (Fthenakis & Zweibel, 2003).

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SULFURO DE CADMIO Y LA TÉCNICA EXPERIMENTAL DEL DEPÓSITO.

3.1. El sulfuro de cadmio (CdS)

En las últimas tres décadas, ha habido un creciente interés en las películas delgadas de CdS debido a sus propiedades electro-ópticas que las hacen adecuadas para aplicaciones en el campo de dispositivos optoelectrónicos, en conversión fotovoltaica de energía solar y fotodetectores (Hur, Lee, & Kim, 2008).

A presión atmosférica, el CdS es un sólido, usualmente en forma de polvo de color amarillento que va de un amarillo brillante a un color más rojizo. Existen en forma natural y se le encuentra principalmente en menas del sulfuro de zinc, presentándose en dos formas de cristal: wurtzita y blenda. Como un compuesto que es fácil de aislar y purificar, es la principal fuente de cadmio para todas las aplicaciones comerciales (Wiberg & Holleman, 2001).



A)



B)

Figura 3.1. A) Celda unitaria de wurtzita, donde las esferas grises representan los átomos del cadmio y las amarillas representan átomos de azufre, su simetría cristalina es de forma hexagonal. B) Greenockita, mineral del que se obtiene sulfuro de cadmio.

La wurtzita presenta una simetría cristalina de forma hexagonal, mientras que la blenda es cúbica; siendo la primera la más abundante y estable. En mineralogía se le conoce como greenockita en honor a Lord Greenock, el propietario del terreno donde fue encontrada en Escocia (ver Figura 3.1). A este CdS también se le denomina w-CdS.

Su dimorfo (misma estructura cristalina y distinta composición química) es el mineral conocido como hawleyita, que presenta una red cristalina cúbica de blenda (ver Figura 3.2). A presiones muy altas pueden existir también como un tipo de estructura de sal gema. Se oxida por calentamiento en aire a 700°C, especialmente en presencia de humedad.

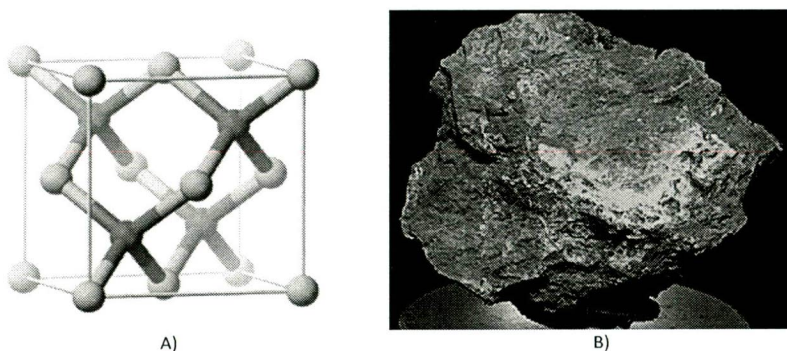


Figura 3.2. A) Celda unitaria de blenda, donde las esferas grises representan los átomos del cadmio y las amarillas representan átomos de azufre, presenta una red cristalina cúbica. B) Hawleyita, mineral del que se obtiene sulfuro de cadmio.

Este mineral se ha encontrado principalmente en Greenock (de aquí el nombre), Scotland; Llallagua, Bolivia; Paterson, New Jersey; Joplin, Missouri; Arkansas, Illinois and Kentucky, USA.

El CdS se puede preparar variando el color de blanco a naranja-rojo profundo, dependiendo del método de preparación y tamaño de partícula del mineral resultante. Cuanto menor sea el tamaño de partícula más claro es el color. La reacción directa entre el ácido sulfhídrico (H_2S) y el vapor de Cd o entre el azufre y el metal cadmio, o su óxido a alta temperatura, produce CdS (Herron, 2003).

Los pigmentos de cadmio, en general, son muy resistentes al ácido sulfhídrico, al dióxido de sulfuro (SO_2), la luz, el calor y otras condiciones atmosféricas. Son colorantes densos y pesados de tonos brillantes oscuros, adecuados para

recubrimientos. Estos colorantes encuentran aplicaciones en plásticos, pinturas, jabones, caucho, papel, vidrio, tintas de impresión, esmaltes cerámicos, textiles y fuegos artificiales. También se producen pigmentos luminiscentes basados en CdS-ZnS.

Las principales áreas de uso de cadmio en términos de consumo de los Estados Unidos en 2001 fueron las baterías, 75%; pigmentos, 12%; recubrimientos, 8%; estabilizadores de plástico, 4%; y aleaciones no ferrosas y otros usos, 1%. Asimismo, el hidróxido de cadmio es el material del ánodo de las baterías recargables de Ag-Cd y Ni-Cd. El sulfuro de cadmio, selenuro y especialmente el telurio, encuentran utilidad en las celdas solares.

3.1.1. Propiedades del CdS

El sulfuro de cadmio es un semiconductor compuesto por los elementos cadmio (Cd) y sulfuro (S) de los grupos II-VI de la tabla periódica. El cadmio es un metal de transición cuyo número atómico es 48 y su valencia es 2; mientras que el azufre tiene un número atómico de 16 y puede adoptar varias valencias para formar un compuesto, que son 2 y 4. Es precisamente con esta última valencia que el azufre se une al cadmio para formar el sulfuro de cadmio.

Usualmente es de tipo-n a causa del exceso de Cd o a las vacancias de S en la preparación del compuesto. El CdS es un material de ancho de banda prohibida a temperatura ambiente (300 K) de 2.5 eV en monocristales y de 2.45 eV para películas delgadas. Este semiconductor es utilizado como material ventana en celdas solares del tipo CdS/CdTe debido a que su ancho de banda prohibida de energía ($E_g = 2.42$ eV), cercano al máximo del espectro de radiación solar, por lo que permite el paso de la mayor parte de la radiación solar hacia la unión (interface) con el semiconductor absorbente CdTe.

Para obtener el CdS en forma de película delgada, se utilizan técnicas como sublimación en espacio cercano (Close Space Sublimation, CSS), baño químico (Chemical Bath Deposition, CBD), ablación láser y la técnica mediante la cual se procesaron los módulos fotovoltaicos de este proyecto: erosión catódica magnetoplanar por radiofrecuencia (Sputtering-RF).

En la siguiente tabla se presentan algunas propiedades del sulfuro de cadmio.

Tabla 3.1. Propiedades físicas del sulfuro de cadmio.

PROPIEDAD	VALOR
Estructura cristalina	Comúnmente hexagonal pero también cristaliza en la fase cúbica (blenda).
Punto de fusión a 100 atm	2023 K para wurtzita
Banda prohibida E_g (EV) a 300 K	Volumen 2.5, en película delgada 2.45
Densidad de blenda a 300 K	4.87 g/cm ³
Densidad de wurtzita a 300 K	4.82 g/cm ³
Índice de refracción	2.3 - 2.7
Constante dieléctrica (ϵ)	9.12
Calor de cristalización	58 kJ/mol
Capacidad calorífica, CP	0.47J/g K
Conductividad térmica	0.16 - 0.2 W cm ⁻¹ K ⁻¹
Tiempo de vida media de portadores	1 x 10 ⁻⁸ s
Coefficiente de transmisión óptica	75% – 85%
Límite de absorción del CdS	< 520 nm
Resistividad en oscuro	10 ⁵ Ω -cm
Masa efectiva de electrones en la banda de conducción	0.21 m_e
Masa efectiva de huecos en la banda de conducción	0.70 m_e

Además, su energía de enlace iónico es mayor a 5 eV, de manera que la energía de los fotones incidentes es menor que la necesaria para descomponer el compuesto, lo cual le proporciona alta estabilidad térmica y química. Sin embargo, entre el CdS y el CdTe hay un desacople reticular en la interfaz del 9.7% (Mendoza, 2007).

3.1.2. Sulfuro de cadmio como capa ventana.

El CdS es la llamada capa ventana y está depositada sobre el sustrato, que es óxido de estaño (Óxido Transparente Conductor). La función del CdS en la celda solar con la

capa absorbedora de CdTe es la de formar un diodo en el cual el CdTe absorbe los fotones de luz, los cuales provocan el movimiento de electrones en el CdTe. Estos electrones son los que al salir por el contacto óhmico constituyen la corriente eléctrica generada.

La capa ventana de CdS es requerida para proveer buena transmisión de luz a través de la capa absorbente en una estructura fotovoltaica de película delgada. El material debe cubrir uniformemente al absorbedor para evitar derivaciones entre el absorbedor y el electrodo frontal. Se requiere que la técnica de deposición permita un fino control del espesor desde películas entre 40 nm y 150 nm que son usualmente requeridas en celdas solares. La precisión del espesor de la capa de CdS determina el grado de absorción de la luz. Es necesario un equilibrio entre la uniformidad de la cobertura de los CdS, su espesor, y la transmisión de la luz en la capa absorbente (Lisco, Kaminski, & Abbas, 2015).

La celda solar con CdS como capa ventana y CdTe como absorbedor más eficiente del cual se tiene documentación, fue fabricada por Wu (2001). Consiste en una celda policristalina CTO/ZTO/CdS/CdTe con una eficiencia total confirmada por NREL del 16.5% en un área de 1.032 cm². Se obtuvo un voltaje de circuito abierto V_{oc} de 845 mV, una densidad de corriente de corto circuito J_{sc} de 25.88 mA/cm² y un factor de llenado de 75.51%.

La capa ventana o buffer que forma el CdS es en la parte n de la celda solar, mientras que el CdTe es la parte p, o positiva. El CdS tiene una fuerte tendencia a ser un semiconductor del tipo-n, por lo que no es necesario doparlo para su uso en celdas solares. La capa ventana/buffer de CdS debe cumplir con ciertos requerimientos, de acuerdo con Burgelman (2006).

El CdS cumple una función cristalográfica y morfológica debido a que sirve como base para el crecimiento del absorbedor, el CdTe. Entonces, el CdS debería ser grueso y presentar granos grandes. Además, dicha capa debería ser compacta, debido a que los huecos o el material a depositarse en el sustrato pueden causar una derivación de corriente (shunt). Para tal efecto, un mínimo de unas decenas de nm parece ser necesario.

Durante la deposición de CdTe o mediante un tratamiento térmico posterior a altas temperaturas, se presenta una interdifusión con el CdS. El CdS debe ser lo suficientemente grueso para no ser completamente consumido durante tales fenómenos. La interdifusión ocurre en el tratamiento denominado de cloración, a base de cloruro de cadmio (CdCl₂).

En cuanto a las propiedades eléctricas y cristalográficas, a pesar del desacople que existe entre el CdS y el CdTe, que es del 9.7%, la interfaz muestra un buen comportamiento sin las típicas pérdidas de recombinación.

En la interfaz o unión con el CdS y el CdTe se llegan a formar fases mezcladas de CdTe-CdS. Para el lado del CdTe absorbedor, se forma una fase de CdTe rica en sulfuro, $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$, siendo $x \ll 1$. Asimismo, se forma una fase CdS rica en telurio, $\text{CdS}_{1-y}\text{Te}_y$, siendo $y \ll 1$, en la capa ventana de CdS. La banda prohibida de las fases mezcladas depende de la composición x o y , teniendo un valor mínimo de 1.40 eV a una composición de 25% (atómica) de CdS en CdTe. Este efecto mueve la eficiencia cuántica del dispositivo a mayores longitudes de onda con valores de algunas decenas de nm. Alrededor de una longitud de onda de 520 nm, la mezcla $\text{CdS}_{1-y}\text{Te}_y$ aumenta la absorción de la capa ventana (lo que constituye una pérdida), muy cerca de la longitud de 860 nm, hay un aumento de la absorción debido a la fase $\text{CdTe}_{1-x}\text{S}_x$, lo que representa una ganancia. Normalmente, la ganancia en el infrarrojo no compensa la pérdida en la región verde en el espectro electromagnético (Burgelman, 2006).

Como se describió anteriormente, la absorción óptica por parte de la capa venta debe evitarse, por lo que debe ser lo más delgada posible o se debería elegir un material de una banda prohibida mayor. Sin embargo, la capa de CdS ha sido la mejor para combinarse con el CdTe, a pesar de los intentos de reemplazarla con semiconductores tales como CdZnS, ZnS, ZnSe, SnO_2 .

3.2. Técnicas de procesamiento de películas delgadas.

Algunos de los métodos de procesamiento principales de las películas delgadas de sulfuro de cadmio para celdas solares son erosión catódica por radio frecuencia (Sputtering RF) y sublimación en espacio cerrado (CSS). A continuación se da una breve descripción de cada uno de estos métodos.

3.2.1. Erosión catódica

La erosión catódica (en inglés "sputtering") es un proceso mediante el cual la superficie del blanco o target (material que va a ser depositado, CdS) se polariza negativamente y es desintegrado bajo la acción del bombardeo de iones positivos de un gas inerte (usualmente argón), provocando la erosión de esta superficie (ver Figura 3.3). Al condensarse el material pulverizado, puede formar películas sobre sustratos dentro de un sistema con una configuración adecuada; este proceso es uno de los más usados para el crecimiento de película delgada (Ximello, 2005).

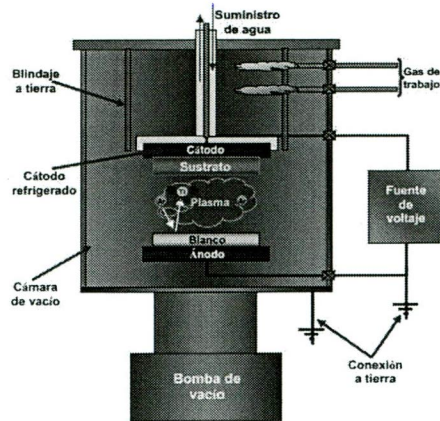


Figura 3.3. Componentes de un equipo de pulverización catódica y el proceso de depósito. El material precursor o blanco es bombardeado por iones altamente energéticos procedentes de un plasma, de forma que los átomos son liberados y posteriormente depositados sobre un sustrato.

3.2.1.1. Configuraciones del Sistema de Erosión Catódica.

El blanco se encuentra ubicado en el cátodo de un circuito eléctrico, es decir, se le ha aplicado un potencial altamente negativo DC o RF. El sustrato sobre el cual se depositarán los átomos extraídos del blanco se coloca en el ánodo del circuito (ver Figura 3.4). Estos dos electrodos se encuentran dentro de una cámara que contiene argón. La acción del campo eléctrico acelera los electrones que chocan con los átomos de argón generando el plasma de la descarga luminiscente compuestos de iones de argón y electrones libres que mantienen la descarga. Los átomos expulsados del blanco viajan en direcciones aleatorias y algunos de ellos llegan a la superficie del sustrato donde posteriormente se condensan formando una película delgada (Franco, 2012).

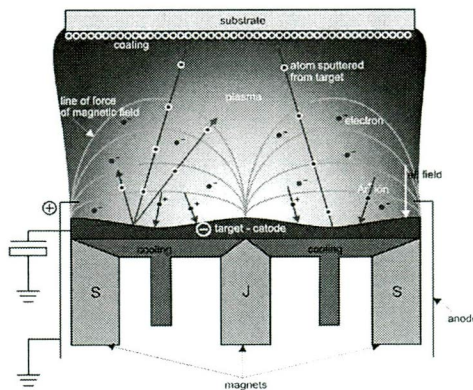


Figura 3.4. Principio de la técnica de erosión catódica.

3.2.1.2. Ventajas e inconvenientes del sistema de erosión catódica.

Algunas de las ventajas del crecimiento de películas delgadas mediante esta técnica consisten en la buena adherencia entre el sustrato y la película debido a la alta energía cinética con la que llegan los átomos o moléculas al sustrato. Permite la deposición a bajas temperaturas y provee un control de la composición química bajo las condiciones adecuadas; así como el control de la velocidad de pulverización del blanco. Generalmente las películas delgadas tienen la misma composición que el blanco con una alta reproducibilidad porque el método presenta una relativa facilidad para controlar y repetir con precisión el crecimiento.

Otra ventaja se refiere al vacío, que se realiza a presiones de 10^{-2} a 10^{-6} Torr, el cual proporciona un excelente aislamiento térmico y eléctrico. Aunado a ello, el recorrido libre medio de las partículas gaseosas puede ser tan grande que éstas prácticamente no chocan entre sí, lo que favorece que lleguen al sustrato con altas energías.

Una parte esencial del proceso de crecimiento de películas delgadas por sputtering, es el plasma de "descarga luminosa". Un plasma se define como un conjunto de iones, electrones y partículas neutras, en el cual la cantidad de iones cargados positivamente es idéntico a su contraparte negativa, por lo que la carga neta es cero, es decir, el campo eléctrico es equipotencial. El fenómeno más relevante que ocurre en un plasma es el de la colisión de los electrones con los átomos o moléculas del gas inerte usado en el proceso de crecimiento (Márquez, 2005).

Una desventaja del sistema es que el plasma formado no es uniforme sobre la superficie del blanco, por lo que se presenta erosión localizada del mismo y hace que el depósito dependa de la posición del sustrato con respecto al blanco. En el caso del magnetrón plano, el blanco es erosionado únicamente en la región frente a las líneas de campo transversales a la superficie del blanco, formándose en este un perfil de erosión en forma de V (ver Figura 3.5) que reduce su vida útil (Arias, 2009).

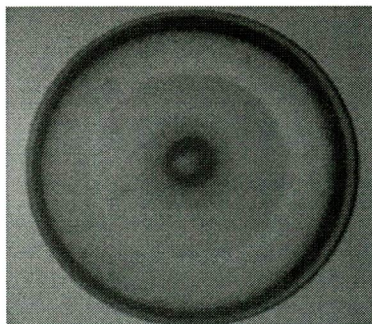


Figura 3.5. Ejemplo de un blanco de CdS usado en el Sputtering RF erosionado en aro con perfil en V.

Además, el proceso está limitado por bajas tasas de deposición, bajas eficiencias de ionización del plasma y un gran efecto de calentamiento del sustrato que hace necesaria la utilización de un sistema de enfriamiento mediante un circuito de agua durante el proceso de depósito.

Por otra parte, los métodos más comunes para encender magnetrones son radio frecuencia (RF) y corriente directa (C. D.).

3.2.1.3. Crecimiento por erosión catódica: Descargas con C.D.

La descarga de corriente directa se genera con dos electrodos, colocados dentro de una cámara de vacío y una fuente de potencia de alto voltaje externa; por lo tanto, un campo eléctrico está siempre presente en la cámara. Un esquema del sistema general del plasma se muestra en la Figura 3.6.

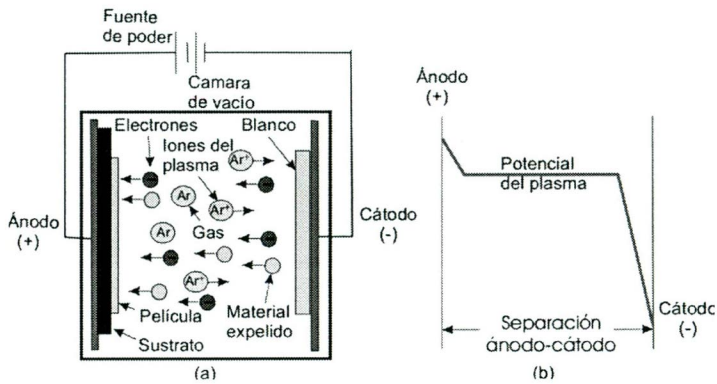


Figura 3.6. Esquema para generar el plasma mediante CD, en el cual se ilustra a) la ionización ocasionada por electrones acelerados por el campo eléctrico y b) el potencial entre el ánodo y el cátodo.

Si un electrón se encuentra cerca del cátodo, éste será acelerado rápidamente hacia el ánodo. Bajo la atmósfera del gas argón, el electrón toma la suficiente energía para ionizar a uno de los átomos del gas en la cámara, al colisionar genera un ion y un electrón secundario, los cuales son acelerados por el campo eléctrico: el ion hacia el cátodo (blanco) y el electrón hacia el ánodo. Los iones acelerados hacia el cátodo colisionan con éste con una energía cinética alta, provocando la emisión de diversas partículas. Entre las partículas emitidas se encuentran electrones secundarios que pueden ocasionar que la ionización continúe. Cuando el número de electrones creados es suficiente para producir un número de iones de igual cantidad, estos son capaces de sostener el plasma (se dice que la descarga se autosostiene), es entonces cuando el gas se ilumina (Márquez, 2005).

Los átomos desprendidos por el blanco viajan en todas direcciones, algunos alcanzan al sustrato y se depositan sobre él. Una parte de los átomos sufren colisiones con los átomos de gas y regresan al cátodo, provocando el efecto denominado redepósito.

3.2.1.4. Crecimiento por erosión catódica: Radio Frecuencia.

Sputtering RF es una técnica usada para la deposición de capas delgadas, a partir de material dieléctrico o aislante. Como el sputtering CD, el sputtering RF implica el funcionamiento de una onda energética a través de un gas inerte para crear iones positivos. El blanco, el cual finalmente será convertido en un revestimiento de película delgada, es golpeado por esos iones y fragmentado en una pulverización fina que cubre el sustrato, la base interior de la película delgada. El sputtering RF se diferencia del de CD en el voltaje, el sistema de presión, el patrón de deposición y el tipo de target. En la Figura 3.7 se presenta el esquema.

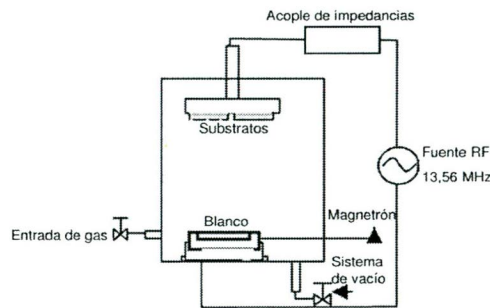


Figura 3.7. Esquema para generar el plasma mediante RF

Un proceso de sputtering RF, comienza con el target, sustrato y los electrodos RF dentro de una cámara de vacío. Subsecuentemente, un gas inerte (usualmente argón) es introducido a la cámara. Entonces se activa la fuente de potencia RF (13.56 MHz), enviando ondas de radio a través del plasma para ionizar los átomos de gas. Una vez que los iones están en contacto con el target, éste es desfragmentado en pequeñas piezas que se dirigen hacia el sustrato y comienzan a formar el revestimiento o depósito.

Desde que el sputtering RF usa ondas de radio en lugar de corriente directa, éste tiene diferentes requerimientos sobre el sistema sputtering. Por ejemplo, los sistemas CD requieren entre 2 kV y 5 kV, mientras que un sistema RF requiere más de 10 kV para alcanzar la misma velocidad de deposición por pulverización catódica. Esto es debido en gran parte porque los sistemas CD involucran el bombardeo directo de los átomos del plasma de electrones, mientras que los sistemas RF utilizan energía para remover los electrones desde las capas de electrones externas del plasma. La creación de ondas

de radio requiere más potencia de entrada para lograr el mismo efecto como una corriente de electrones. Mientras que un efecto secundario común del sputtering CD involucra la acumulación de carga sobre el material target debido al gran número de iones en la cámara, el sobrecalentamiento es el problema más común de los sistemas RF.

Como un resultado de los diferentes métodos de alimentación, el plasma de gas inerte en un sistema RF puede ser mantenido a una presión mucho más baja de menos de 15 mTorr, comparado con los 100 mTorr necesarios para optimizar el sputtering CD. Esto permite menos colisiones entre las partículas del material objetivo y los iones del gas, creando una vía más directa para las partículas que viajen hacia el material sustrato. La combinación de esta disminución de presión, junto con el método de usar ondas de radio en lugar de una corriente directa para la fuente de potencia, hace al sputtering RF ideal para materiales target que tiene cualidades aislantes (DiFeST, 2014).

En la Figura 3.8 se muestra el equipo de erosión catódica por radio frecuencia (Sputtering RF) que se encuentra en el Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES) de la UACM, el cual se depositó el sulfuro de cadmio en la parte experimental de este trabajo.

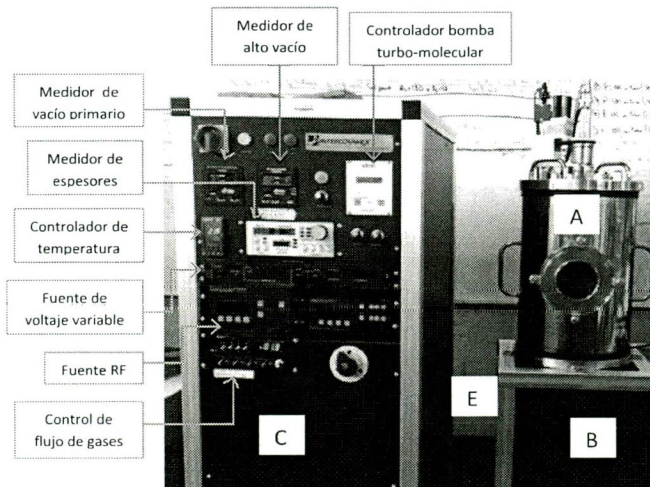


Figura 3.8. Sistema de erosión catódica Sputtering RF y sus componentes principales: A) Cámara de vacío, B) Sistema de vacío, C) Panel de control del proceso, D) Sistema de enfriamiento y E) Admisión y venteo de gases.

El sistema de erosión catódica dual cuenta con un magnetrón que permite colocar blancos de ZnO y CdS de 2 pulgadas de diámetro. El equipo está conformado por cinco bloques de elementos: A) cámara de erosión, B) sistema de vacío primario y alto vacío,

control de flujo de gases, C) fuente de corriente directa y fuente de radio frecuencia, D) sistema de enfriamiento y E) sistema de admisión y venteo de la presión de argón.

El bloque (A) se refiere a la cámara de erosión, la cual consta de una platina, un porta sustrato giratorio que permite el ajuste del vidrio soda lima de 100 cm^2 , un medidor de espesores, un calefactor de sustrato y un magnetrón para blancos de 3 pulgadas de diámetro por 0.250 pulgadas de espesor. Todo en el interior de una cámara de acero inoxidable de 32 cm de diámetro por 46 cm de alto.

Mientras que el bloque (B) corresponde al sistema de vacío primario y alto vacío, con el cual se obtiene un vacío base de alrededor de 10^{-6} Torr y presiones de trabajo del orden de 10^{-2} Torr. Consta de una bomba mecánica con la capacidad de bombeo de $5.4 \text{ m}^3/\text{h}$ y una bomba turbo-molecular con velocidades de bombeo de 80 L/s de N_2 , una válvula de aislamiento para el alto vacío, sensor pirani de rango de 10^2 a 10^{-3} Torr, sensor de cátodo frío de rango 10^{-3} a 10^{-6} Torr, válvula para admisión de gases (O_2 y Ar) y válvula de venteo.

El bloque (C) del sistema lo compone el panel de control del proceso de erosión en modalidad de radio frecuencia: interruptor de encendido general, controlador de pirani para bajo vacío, controlador de cátodo frío para alto vacío, controlador para la operación de la bomba turbo molecular del sistema, interruptor de encendido y apagado para la operación de la bomba mecánica, indicador de flujo constante de agua, indicador de presión mínima al interior de la cámara de crecimiento, un detector de espesores y una fuente de radiofrecuencia con una potencia máxima de 300 Watts y acoplador de red.

El bloque (D) consta del sistema de enfriamiento a base de agua cuyos componentes son un chiller (enfriador) y un sistema de mangueras para la circulación de una solución del 90% de agua destilada y 10% de alcohol etílico, a través del magnetrón de la cámara de crecimiento.

El bloque (E) consta del sistema de admisión y venteo de la presión de argón u oxígeno: tanque de argón de alta pureza, tanque de oxígeno de alta pureza, controlador de flujo para la regulación del argón y un flujómetro que indica la cantidad del gas que se está introduciendo a la cámara de crecimiento.

3.2.2. Sublimación en espacio cerrado.

También conocida por sus siglas en inglés como Close Space Vapor Transport (CSVST). Esta técnica de procesamiento de películas delgadas policristalinas se basa en la sublimación del material a depositar; es decir, el telurio de cadmio en este trabajo. Para

ello, se crea una diferencia de temperatura entre el sustrato y la fuente, separados una corta distancia (menos de 3 mm) en una atmósfera controlada de baja presión. Además, la temperatura del sustrato permite alcanzar una temperatura de activación en la que se adhiere el material y a la vez crea la diferencia de temperatura que permita el transporte de las sustancias.

Esta técnica permite la obtención de películas delgadas con gran velocidad de crecimiento (60-120 nm/min para el CdS y de 1-3 $\mu\text{m}/\text{min}$ para el CdTe) en tiempos relativamente cortos. Dependiendo de la rampa que se diseñe para la sublimación del material y manteniendo una diferencia de temperatura estable, se obtiene el control de espesores de las películas, debido a que es una técnica de alta eficiencia en el transporte del material a sublimar (Sastré, 2009).

Por otra parte, la técnica de evaporación es atractiva ya que ofrece tasas de depósito elevadas, control de la estequiometría y un tamaño de grano que puede ser controlado, además de ser reescalable para procesos de manufactura industrial y de bajo costo (Flores, Peña, & Martínez, 2011).

El sistema de crecimiento CSVT que se encuentra en el Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES) del plantel San Lorenzo de la UACM, está configurado por los siguientes componentes: a) sistema de vacío, b) control de flujo de gases, c) cámara de crecimiento y d) sistema de control y medición de la temperatura de los bloques de grafito en la cámara de crecimiento. El sistema se muestra en Figura 3.9.

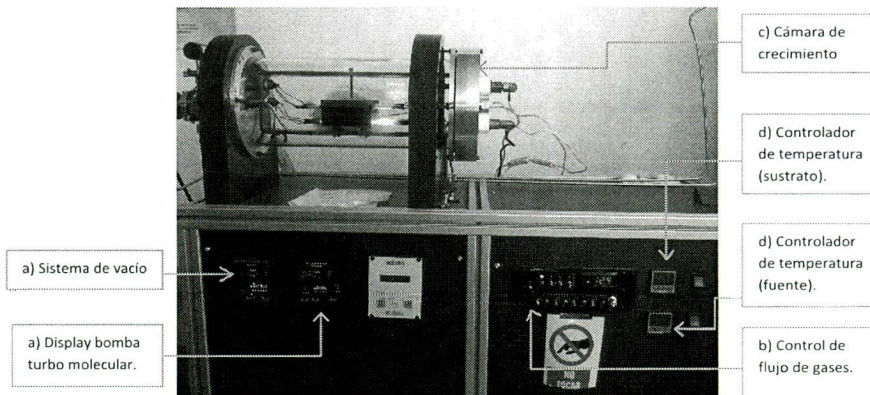


Figura 3.9. Sistema de crecimiento CSVT y sus componentes principales: a) Sistema de vacío, b) Control de flujo de gases, c) Cámara de crecimiento y d) Sistema de control de temperatura.

El sistema de vacío mide y controla tanto el vacío como la presión de la atmósfera inerte del interior de la cámara de crecimiento, bajo la cual se realiza el depósito del

CdTe. Este sistema de vacío consta de una bomba mecánica convencional para el vacío primario y una bomba turbo molecular para alcanzar un alto vacío.

El control de los gases se hace mediante dos controladores de flujo para la regulación del argón y del oxígeno, además de un flujómetro que indica la cantidad del gas que se está introduciendo a la cámara de crecimiento.

En la cámara de crecimiento c) se efectúa el depósito de las películas delgadas, la cual está constituida por un tubo de vidrio (borosilicato) de 5 mm de espesor, 15 cm de diámetro exterior y 49.5 cm de largo; el cual está sellado al vacío en ambos extremos por dos tapas de aluminio. Las dos tapas de aluminio se unen por una estructura de cobre a la cual se conectan los dos bloques de grafito, los que se calientan hasta las temperaturas deseadas y a su vez calientan al vidrio conductor y a la chalupa, en donde se encuentra el material a depositar (ver Figura 3.10).

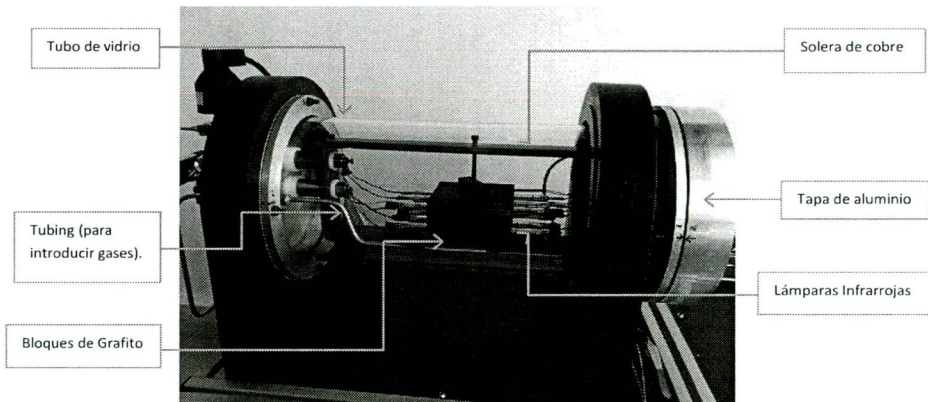


Figura 3.10. Cámara de crecimiento del sistema CSVT.

El sistema de medición y control de temperatura D) está constituido por tres lámparas infrarrojas que atraviesan cada uno de los grafitos; dos termopares conectados a dos indicadores de temperatura. De esta forma los bloques de grafito son calentados por la radiación emitida por las lámparas infrarrojas.

CAPÍTULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

En este capítulo se revisan los métodos utilizados para el desarrollo de los módulos fotovoltaicos procesados en una estructura: vidrio/SnO₂:F/CdS/CdTe; sobre sustratos vidrios conductores soda-lima con una superficie de 100 cm² y 3 mm de espesor; como contacto frontal transparente una capa de SnO₂ con espesor de 500 nm y resistencia laminar de 10 Ω/cuadro. Como ya se mencionó anteriormente, este trabajo se ha desarrollado en el Laboratorio de Ciencias y Tecnologías Sustentables (LACyTES) de la UACM.

4.1. Depósito de sulfuro de cadmio (CdS) por erosión catódica magnetoplanar-RF.

El proceso de crecimiento de películas delgadas se inicia con la limpieza de los sustratos de vidrio para eliminar la contaminación superficial. La limpieza es fundamental en la caracterización y calidad de las películas delgadas, ya que proporciona una mejor adherencia de la película con el sustrato.

Los 14 sustratos de vidrio con óxido de estaño que conforman la muestra de este trabajo, fueron sometidos a un prelavado con agua y jabón neutro; posteriormente se someten a un proceso de calentamiento y de limpieza ultrasónica alternados, con agua destilada, agua desionizada, propanol y acetona. Por último los sustratos se secan con nitrógeno y se colocan en una cámara de vacío para evitar que se contaminen.

Las películas de CdS, se depositaron sobre vidrio soda-lima con una capa de SnO₂ por medio de la técnica de Erosión Catódica Magnetoplanar a Radio Frecuencia (Sputtering-RF). Para llevar a cabo el crecimiento, primero se realiza un vacío mecánico (10⁻² Torr) para posteriormente alcanzar un alto vacío (del orden de 10⁻⁵ Torr) en la cámara con la bomba turbo-molecular. El blanco (ánodo) es una pastilla del material que va a ser depositado en este caso, el blanco utilizado es de CdS, marca Kurt J. Lesker, con una pureza de 99.99 %, puesto sobre un magnetrón conectado a una fuente de radio frecuencia (RF) que genera una señal de 13.56 MHz. La potencia de RF

está directamente ligada con la energía de los iones que bombardean el sustrato, por lo que ésta influye en la razón de crecimiento.

El porta sustrato (cátodo) se coloca frente al blanco, como se puede observar en la Figura 4.1A. La distancia típica entre el target y el sustrato es de 10 cm (Lisco, Kaminski, & Abbas, 2015). El crecimiento de CdS se realiza bajo una atmósfera controlada de un gas noble, en este caso argón, en un rango de 5 a 20 mTorr.

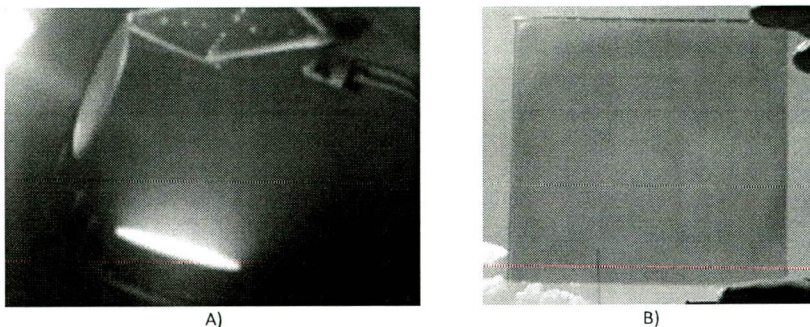


Figura 4.1. A) Depósito del material donde se observa el portasustratos, el magnetrón y el plasma. B) Muestra con capa de CdS por Sputtering-RF.

Para encender el plasma es necesario cumplir con las condiciones de vacío y que ya esté circulando agua fría (con el chiller) a través del magnetrón para evitar el sobrecalentamiento del blanco de CdS.

La fase de calentamiento del sustrato consiste en encender las lámparas infrarrojas mediante un variac y un controlador de temperatura, hasta alcanzar la temperatura de depósito (T_d). Una vez alcanzada la T_d se abre la válvula de gas argón y se regula mediante un controlador de flujo. Se controla la presión a 50 mTorr con el flujo del argón.

Después se sigue con la etapa más fina del proceso que es la generación del plasma, el cual se obtiene controlando la fuente de RF y variando la potencia del generador (20 W) hasta alcanzar la potencia de depósito y se reduce la presión a la presión de trabajo. El portasustrato deberá estar girando a 5 rpm y se retira el obturador o "shutter" para iniciar el depósito hasta obtener el espesor requerido de acuerdo con los valores del sensor. En la Figura 4.1B se presenta la muestra con el depósito de CdS.

Para apagar el plasma, se disminuyen gradualmente la temperatura y la potencia con el objetivo de que la película y los blancos se enfríen lentamente para evitar posibles

choques térmicos. Se suspende el flujo del gas, se desacelera la bomba turbomolecular y por último se rompe el vacío en la cámara de depósito.

Una vez obtenida la serie de muestras de CdS (de la 1 a la 14) crecidas sobre vidrio soda-lima mediante la técnica de Sputtering, se realiza el tratamiento térmico con CdCl₂.

4.2. Matrices de los parámetros de depósito de CdS.

En este apartado se presentan los parámetros de crecimiento de cada uno de los dispositivos construidos, así como los resultados de la caracterización. La caracterización de las muestras se realizó con distintos equipos, algunos de ellos disponibles en la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional y otros en el LACyTES de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Los parámetros de depósito involucrados en la técnica de erosión catódica son: la temperatura del sustrato durante el depósito, la potencia suministrada al magnetrón, la presión interior de argón y la variación del espesor del CdS. Estos parámetros experimentales se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Datos experimentales utilizados en la fase de caracterización del proceso de obtención de películas delgadas de CdS por erosión catódica RF.

MUESTRA	TEMPERATURA SUSTRATO (°C)	POTENCIA (W)	PRESIÓN DE DEPÓSITO (mTorr)	ESPESOR (nm)
RF1	225	100	15	125
RF2	ambiente	75	15	150
RF3	ambiente	100	15	150
RF4	ambiente	125	15	150
RF5	ambiente	150	15	150
RF6	275	100	15	125
RF7	250	100	15	125
RF8	250	100	20	125
RF9	250	100	10	125
RF10	200	100	15	125
RF11	250	100	15	125
RF12	250	100	15	125
RF13	250	100	10	100
RF14	250	100	10	150

4.2.1. Variación de potencia.

La potencia suministrada al magnetrón es un parámetro experimental que influye en la característica granular de las películas de CdS y en el valor de su resistividad. Las condiciones de crecimiento de CdS fueron: presión dentro de la cámara de crecimiento de 15 mTorr, una atmósfera de argón y el depósito se realizó a temperatura ambiente. El espesor registrado por del sensor fue de 150 nm. Las muestras de este subgrupo se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Potencia suministrada al magnetrón durante el depósito de CdS por la técnica de Sputtering-RF.

MUESTRA	TEMPERATURA SUSTRATO (°C)	POTENCIA (W)	PRESIÓN DE DEPÓSITO (mTorr)	ESPESOR SENSOR (nm)	ESPESOR MEDIDO (nm)	TIEMPO DE DEPÓSITO (min)
RF2	ambiente	75	15	150	132	66
RF3	ambiente	100	15	150	161	37
RF4	ambiente	125	15	150	178	26
RF5	ambiente	150	15	150	162	19

La potencia influye en la velocidad del depósito y por lo tanto en el tiempo de depósito; a mayor potencia menor tiempo de depósito. A su vez, este parámetro repercute en el espesor de la capa del material y en consecuencia en la transmitancia. En cuanto a la resistencia laminar, se espera que a mayor potencia se obtenga un valor mayor (Hur, Lee, & Kim, 2008).

4.2.2. Variación de temperatura del sustrato.

Las muestras de este subgrupo se presentan en la Tabla 4.3. Las condiciones de crecimiento de CdS en el Sputtering-RF fueron: presión dentro de la cámara de crecimiento de 15 mTorr, una atmósfera de argón y potencia del magnetrón de 100 W. El espesor medido por el sensor fue de 125 nm, el cual difiere del medido porque se ajustó el sensor en esa etapa del proceso.

Tabla 4.3. Temperaturas del sustrato durante el depósito de Sulfuro de Cadmio por Sputtering-RF.

MUESTRA	TEMPERATURA SUSTRATO (°C)	POTENCIA (W)	PRESIÓN DE DEPÓSITO (mTorr)	ESPESOR SENSOR (nm)	ESPESOR MEDIDO (nm)	TIEMPO DE DEPÓSITO (min)
RF10	200	100	15	125	100	28
RF1	225	100	15	125	72	27
RF7	250	100	15	125	82	27
RF6	275	100	15	125	91	26

Con la variación de la temperatura del sustrato se esperan cambios morfológicos en el CdS que afectan la resistividad laminar. Las temperaturas para el sustrato que se consideran en este trabajo, han sido reportadas en artículos como el de Lisco y colaboradores de la universidad de Loughborough (Lisco et al. 2015).

4.2.3. Variación de presión.

La presión de trajo es un parámetro importante para la estabilización del plasma en la cámara de crecimiento. Entonces, las condiciones de crecimiento de CdS fueron: temperatura del sustrato durante el depósito de 250°C, una atmósfera de argón y la potencia del magnetron de 100 W. El espesor medido por el sensor fue de 125 nm. Las muestras de este subgrupo se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Presión de argón en la cámara de depósito durante la deposición de la capa de CdS por Sputtering-RF.

MUESTRA	TEMPERATURA SUSTRATO (°C)	POTENCIA (W)	PRESIÓN DE DEPÓSITO (mTorr)	ESPESOR SENSOR (nm)	ESPESOR MEDIDO (nm)	TIEMPO DE DEPÓSITO (min)
RF9	250	100	10	125	133	19
RF7	250	100	15	125	82	27
RF8	250	100	20	125	92	37

La presión de trabajo influye en la razón de depósito y por lo tanto en la morfología. Se ha reportado que a mayor presión se obtiene menor razón de depósito del material y el tamaño de grano disminuye y por lo tanto se puede esperar menor espesor de la capa del material depositado (Hur, Lee, & Kim, 2008).

4.2.4. Variación de espesor del CdS.

Las muestras correspondientes a este subgrupo se presentan en la Tabla 4.5. Las condiciones de crecimiento de CdS en el Sputtering-RF fueron: temperatura del sustrato durante el depósito de 250°C, presión dentro de la cámara de crecimiento de 10 mTorr, una atmósfera de argón y potencia del magnetron de 100 W.

Tabla 4.5. Espesores propuestos en el proceso de depósito de CdS por la técnica de erosión catódica RF.

MUESTRA	TEMPERATURA SUSTRATO (°C)	POTENCIA (W)	PRESIÓN DE DEPÓSITO (mTorr)	ESPESOR SENSOR (nm)	ESPESOR MEDIDO (nm)	TIEMPO DE DEPÓSITO (min)
RF13	250	100	10	100	114	22
RF9	250	100	10	125	133	19
RF14	250	100	10	150	140	22

Los espesores para la capa de CdS que se considera en este proyecto han sido reportados en los artículos como el de Peña et al. (Peña, Arés, & Rejón, 2011). El espesor está en el rango de 100 a 150 nm, que corresponden a la matriz de muestras desarrollada en este trabajo. Este parámetro incide directamente en la razón de depósito.

4.2.5. Variación de la velocidad de rotación del portasubstrato.

El depósito del CdS de la mayoría de las muestras se realizó a una velocidad de giro del portasubstrato de 5 rpm, a excepción de las muestras RF11 y RF12 que fueron realizadas a 7 rpm y 3 rpm respectivamente. Esta prueba se realizó para determinar la influencia de la velocidad del giro del portasubstratos en la morfología de la capa de CdS y el espesor del material depositado. Los parámetros de depósito se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Variación de la velocidad de rotación durante el depósito del CdS por Sputtering-RF.

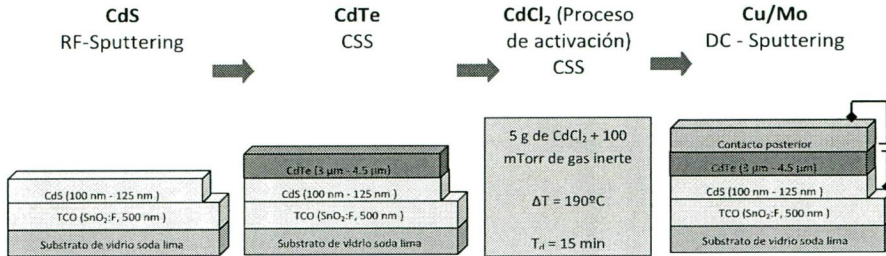
MUESTRA	TEMPERATURA SUSTRATO (°C)	POTENCIA (W)	PRESIÓN DEPÓSITO (mTorr)	ESPEJOR (nm)	ROTACIÓN (rpm)	ESPEJOR MEDIDO (nm)	TIEMPO DEPÓSITO (min)
RF7	250	100	15	125	5	82	27
RF11	250	100	15	125	7	88	31
RF12	250	100	15	125	3	103	31

Con la variación de la velocidad de giro del portasubstrato durante el depósito de CdS, se pretende que la película del material sea homogénea y por lo tanto se obtenga una mejora en la morfología.

4.3. Procesamiento de módulos de telurio de cadmio (CdTe).

Para la fabricación de las celdas solares, una vez que ha sido depositada la capa de CdS, le sigue la capa de CdTe a partir de polvo con una pureza del 99.99%, la cual es depositado por la técnica de CSS. Posteriormente se realiza un tratamiento térmico con cloruro de cadmio (CdCl₂) por la misma técnica. Por último se depositaron los contactos de cobre y molibdeno mediante la técnica de erosión catódica CD.

El procedimiento anteriormente descrito de manufactura de celdas solares de CdS/CdTe se muestra en el siguiente diagrama:



En los siguientes apartados se detalla cada uno de los procesos para efectuar el depósito de los materiales que conforman la estructura de la celda solar CdS/CdTe.

4.3.1. Crecimiento de CdTe por sublimación.

La técnica de CSS para el CdTe está basada en el principio de disociación reversible del CdTe a altas temperaturas. Los gases se difunden hacia el sustrato, el cual está en una proximidad cercana a la chalupa fuente (Rose, Hasoon, & Dhere, 1999).

Las películas de CdTe fueron depositadas sobre las capas de CdS previamente depositadas por erosión catódica RF. El material utilizado para este depósito fue polvo de CdTe de la marca Alfa Aesar de 99.999% de pureza. Las películas delgadas se depositaron con el método de sublimación en espacio cercano (CSS), utilizando lámparas infrarrojas de 1200 W para calentar los bloques de grafito.

Los dos bloques son de grafito de alta pureza y se les denomina fuente y sustrato. El término "fuente" en este sistema de procesamiento, se refiere a la chalupa de grafito con el material a sublimar cuyas medidas son 11 x 11 cm y que es calentado como resultado de la radiación emitida por las lámparas infrarrojas. La chalupa tiene una profundidad menor de 3 mm en donde se distribuye 150 mg de CdTe en polvo previamente pesado. Sobre la chalupa se coloca el sustrato ya con la capa de CdS.

La chalupa con el sustrato de vidrio es colocada entre los dos bloques de grafitos para asegurar un buen contacto entre el sustrato y su bloque correspondiente así como el de la chalupa y el bloque de la fuente. Este sistema antes descrito se introduce en la cámara de CSS a la cual previamente se le hace vacío hasta alcanzar una presión menor

de 5×10^{-5} Torr y posteriormente se introducen 50 % de O_2 y 50 % de Ar, hasta alcanzar una presión total de 0.1 Torr dentro de la cámara.

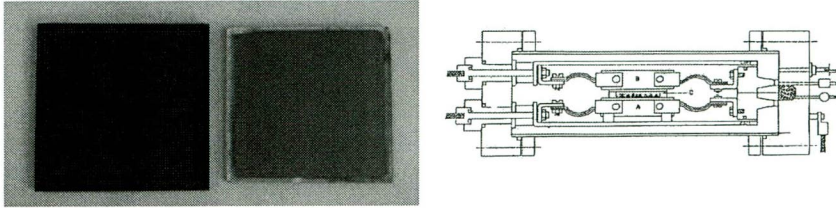


Figura 4.2. Izquierda: La chalupa con el material CdTe en polvo. Derecha: corte transversal del sistema de crecimiento CSS en donde se aprecia A) fuente, B) sustrato y C) chalupa.

Cuando se alcanza el valor de la presión en la cámara de crecimiento, se encienden las lámparas infrarrojas de 1200 W que atraviesan los bloques de grafito (fuente y sustrato), con el propósito de calentar estos bloques hasta alcanzar temperaturas aproximadas de: $T_f \approx 600^\circ\text{C}$ para la fuente y $T_s \approx 450^\circ\text{C}$ para el sustrato, obteniendo una diferencia de temperatura entre ambos bloques de 150°C (ver Figura 4.3).

Esta diferencia de temperatura permite la sublimación de forma controlada del material durante el tiempo de crecimiento (t_d). Para monitorear las temperaturas de las chalupas, se inserta un termocople en cada chalupa. Las paredes de la chalupa de grafito permiten mantener una diferencia de temperatura uniforme entre la fuente y el sustrato durante el proceso de sublimación, lo cual favorece el obtener películas con buenas características estructurales, ópticas y eléctricas (Sastré, 2009).

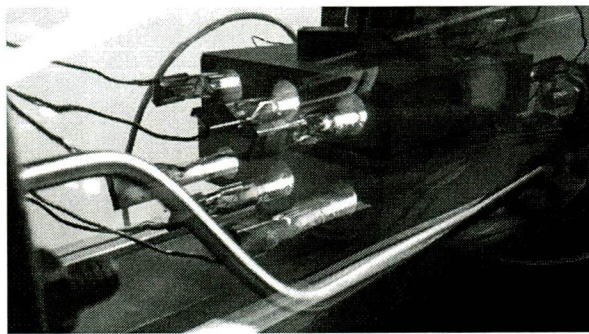


Figura 4.3. Diferencia de temperatura entre grafitos durante el depósito de CdTe por la técnica de CSVT.

Una vez que se alcanza la temperatura deseada, así como la atmósfera, se inicia el proceso de depósito durante 20 minutos aproximadamente. En la Figura 4.4 se

observa la capa de CdTe depositada sobre la capa de sulfuro de cadmio. Al final de cada crecimiento se apagan las lámparas y se continúa haciendo vacío durante 1 hora; el sistema se enfría lentamente hasta alcanzar la temperatura ambiente.

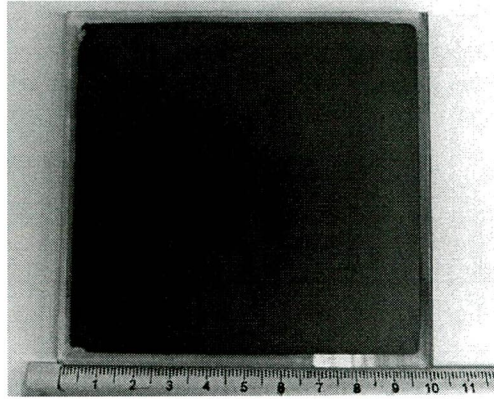


Figura 4.4. Muestra con CdTe por CSS sobre la capa de CdS.

El tamaño del grano y la densidad de las películas de CdTe también son parámetros importantes de la celda solar. Se sabe que con la técnica de CSS se obtienen películas de granos grandes en comparación a procesos como erosión catódica, electrodeposición (Ferekides, Marinskiy, Viswanathan, & Tetali, 2000).

4.3.2. Tratamiento térmico con cloruro de cadmio (CdCl_2).

Es un tratamiento térmico necesario sobre las capas ya depositadas antes de su uso en celdas solares fotovoltaicas activas. Los granos de las muestras están desconectados y tiene un alto defecto de densidad el cual limita la eficiencia de la celda solar. El tratamiento térmico remueve y elimina esos defectos y aumenta el tamaño de los granos. Las muestras son calentadas rápidamente y se enfrían lentamente permitiendo un óptimo crecimiento del grano durante la recristalización y además mejora la eficiencia total de las celdas solares. En varias investigaciones se ha reportado que este tratamiento con cloro ayuda al dopado tipo-n, reduce la resistencia serie y mejora el FF . Otro beneficio mencionado es el efecto de cementación del cloro para formar granos grandes (Diso, 2011).

Entonces, diversas investigaciones han mostrado que los tratamientos térmicos con CdCl_2 mejoran las propiedades morfológicas de los materiales ventana (CdS) y absorbente (CdTe). Este tratamiento térmico produce un recrecimiento de los cristalitas, lo cual conlleva a una redistribución del tamaño y número de los mismos,

genera mayor cohesión entre los granos disminuyendo la porosidad. Además, promueve la interdifusión entre el CdS y el CdTe. Estas mejoras se ven reflejadas en la densidad de corriente, factor de llenado, voltaje de circuito abierto y por lo tanto en la eficiencia de las celdas solares.

El tratamiento térmico utilizado sobre la estructura de CdS/CdTe, consiste en depositar una capa delgada de CdCl₂ por CSS. Para ello se pesan 5 g de CdCl₂ y se distribuye en la chalupa como se observa en la Figura 3. Sobre dicha chalupa se pone el substrato y ambos se colocan entre los dos bloques de grafito. Las condiciones para efectuar el depósito consisten en realizar un vacío previo en la cámara de crecimiento, primero con la bomba mecánica y después con la bomba turbo molecular hasta lograr una presión de 5×10^{-5} Torr.

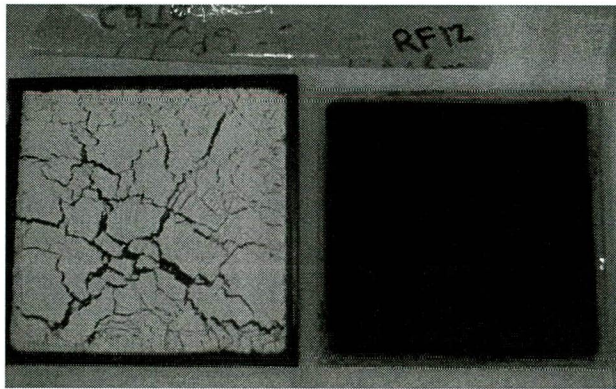


Figura 4.5. Muestra RF1 después del tratamiento con CdCl₂ y chalupa de grafito con el sobrante de CdCl₂.

Posteriormente se introduce una atmósfera de argón hasta alcanzar la presión de 100 mTorr. Se programa una diferencia de temperatura entre el bloque de grafito fuente y el bloque de grafito substrato de 150°C. Esta diferencia permite la sublimación del material durante el tiempo del tratamiento (15 minutos aproximadamente) y se deja enfriar la muestra que se observa en la Figura 4.5. Es importante destacar que la rampa de crecimiento de CdCl₂ es la más drástica en cuanto a variaciones de temperatura en la fuente y el substrato.

Finalmente, las muestras con CdCl₂ se trataron térmicamente dentro de un horno a 400°C durante 30 minutos en aire. Una vez que se ha enfriado la muestra, se realiza

un proceso de limpieza sin gas en el sistema CSS durante 20 minutos con una temperatura en el sustrato de 410°C y se deja enfriar la muestra.

4.3.3. Depósito de contactos posteriores por Sputtering DC.

Para depositar los contactos metálicos posteriores sobre la capa de CdTe, se recurre a la técnica de crecimiento de erosión catódica por corriente directa (Sputtering DC) debido a las bajas temperaturas de sustrato utilizadas; además, se trata de una técnica ampliamente usada para la formación de contactos metálicos en celdas solares (Sarkar, 2014). La técnica de crecimiento es similar al de Sputtering-RF.

Los contactos a través de los cuales circula la corriente en una celda solar deben presentar una baja resistencia de contacto con el CdTe. Los contactos generalmente se fabrican de metales, de aleaciones metálicas o de compuestos semimetálicos. En este proyecto se utiliza una capa de cobre y otra de molibdeno (marca Kurt J. Lesker, pureza del 99.99% y 99.95%, respectivamente) como contactos posteriores de la celda solar debido a sus propiedades de metales conductores.

Para efectuar el depósito se requiere de un vacío previo de 1.5×10^{-5} Torr y posteriormente se introduce una atmósfera de argón hasta alcanzar la presión de 15 a 20 mTorr. Se calienta el sustrato a una temperatura de 200°C. El sistema Sputtering DC se muestra en la Figura 4.6.

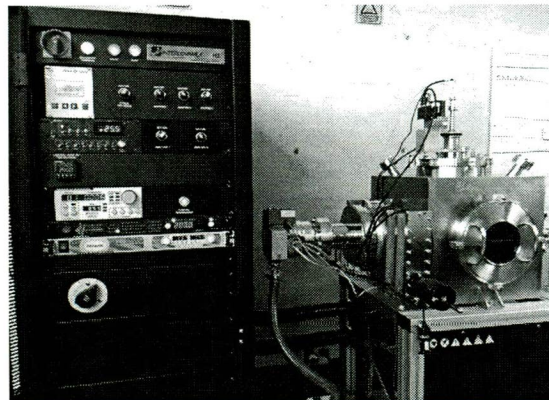


Figura 4.6. Sistema Sputtering DC instalado en la UACM.

Es importante mencionar que para este depósito se utiliza una máscara de aluminio que se coloca sobre la muestra de 100 cm² para dividir la muestra en 22 subceldas y en éstas se áreas se deposite el material (ver Figura 4.6).

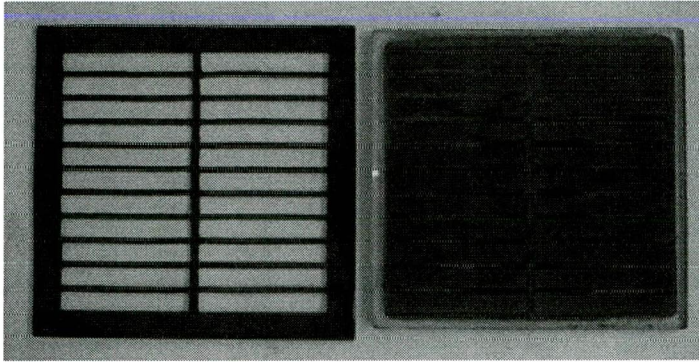


Figura 4.7. Máscara de aluminio y muestra con los contactos posteriores.

Primero se realiza el depósito de la capa de cobre, cuyo espesor puede variar de 2 a 5 nm, el tiempo de depósito es $t_d = 2$ minutos. Secuencialmente se depositan aproximadamente 300 nm de molibdeno y el tiempo de depósito es $t_d = 100$ minutos. Ambos depósitos se realizan con el portasubstrato girando a 5 rpm. Por último se deja enfriar la muestra antes de sacarla de la cámara de depósito.

CAPÍTULO 5. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En este apartado se analizan las propiedades de las películas de CdS obtenidas, ya que al ser utilizado como material ventana debe cumplir con ciertas propiedades ópticas que proporcionen altos valores de eficiencia de conversión en la celda solar.

Las películas de CdS se analizaron por la técnica de perfilometría y transmitancia óptica.

5.1. Técnica de perfilometría.

Entre las propiedades ópticas, la película de CdS debe tener una alta transmitancia y una baja reflectancia para disminuir las pérdidas por reflexión. Además, las películas deben estar libres de "pin-holes". Esto se logra disminuyendo el espesor de la película de CdS hasta valores tales que la transmitancia sea la mayor posible y libre de pin-holes, garantizando de esta manera altos valores de la corriente de corto circuito J_{sc} sin deterioro del voltaje de circuito abierto V_{oc} y el factor de llenado FF (Sastré, 2009).

La caracterización por perfilometría consiste en la medición del espesor (d) de capas delgadas o bien rugosidades de un material, mediante el movimiento electromecánico de una punta de prueba de un perfilómetro step profiler modelo Dektak-IIA (± 1 nm). La punta recorre la superficie de la muestra aplicando sobre ella una fuerza constante (la longitud de barrido y la magnitud de la fuerza pueden variarse en función de las características de la muestra). La punta está conectada a un sistema de medición que grafica los desplazamientos o variaciones verticales que sufre en su recorrido a lo largo de la superficie de la muestra.

La caracterización por perfilometría se realizó en los laboratorios de la Escuela Superior de Física y Matemáticas del Instituto Politécnico Nacional (ESFM-IPN) con un perfilómetro marca Ambios modelo XP 100 con la capacidad de barrido horizontal de hasta 30 cm, manipulación de a fuerza de punta de 0.03 a 10 mg.

El espesor medido del CdS, antes del tratamiento térmico en mufla, con el sensor del Sputtering-RF difiere del que se midió por la técnica de perfilometría. Los resultados de ambas mediciones se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Resultados de la medición de espesores de CdS depositadas con diferentes parámetros.

MUESTRA	ESPESOR SENSOR (nm)	ESPESOR MEDIDO (nm)	TIEMPO DE DEPÓSITO (min)	TIEMPO DE DEPÓSITO (s)	VELOCIDAD DE CRECIMIENTO (nm/s)
RF1	125	72	27	1620	0.04
RF2	150	132	66	3960	0.03
RF3	150	161	37	2220	0.07
RF4	150	178	26	1560	0.11
RF5	150	148	19	1140	0.13
RF6	125	91	26	1560	0.06
RF7	125	82	27	1620	0.05
RF8	125	92	37	2220	0.04
RF9	125	133	19	1140	0.12
RF10	125	100	28	1680	0.06
RF11	125	88	31	1860	0.05
RF12	125	103	31	1860	0.06
RF13	100	114	22	1320	0.09
RF14	150	140	22	1320	0.11

Comparando el espesor de la capa de CdS medido con el sensor, con el valor que se obtuvo con el perfilómetro, se calculó que el error experimental relativo en la medición es del 12.23%.

Una explicación de esta variación en la medición del espesor, es que se ajustó la distancia entre el sensor y el portasubstratos en algún momento de la fabricación de las muestras. Además, cuando se limpiaba el magnetrón con aire comprimido, también se movía el sensor.

5.1.1. Influencia de los parámetros de depósito en el espesor del CdS.

Se estudió la influencia de la potencia en la velocidad del depósito en las muestras RF2, RF3, RF4 y RF5. En la Figura 5.1, se observa que conforme aumenta la potencia, aumenta la razón de depósito del CdS, manteniendo constantes los demás parámetros. Por lo que el tiempo de depósito del CdS disminuye a casi una tercera parte, al aumentar al doble la potencia.

Este resultado es congruente con lo que reporta F. Lisco en el artículo "High rate deposition of thin film cadmium sulphide by pulsed direct current magnetron sputtering" (Lisco, et. al., 2015).

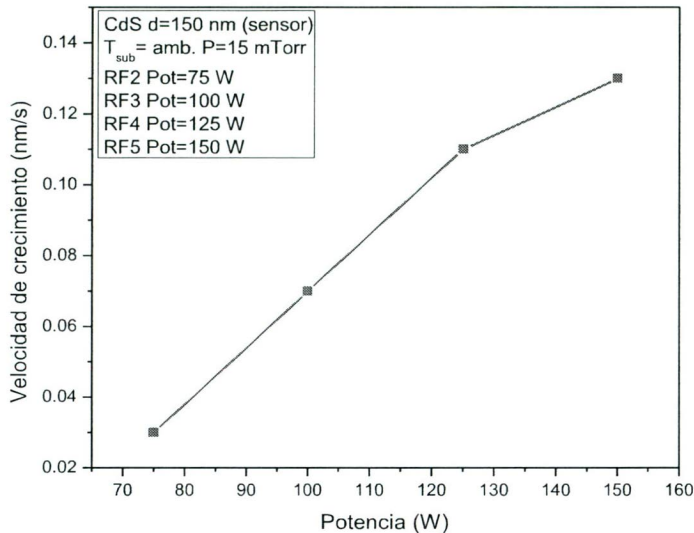


Figura 5.1. Velocidad del depósito como función de la potencia de trabajo.

El mismo efecto ocurre con la presión de trabajo observado en las muestras RF7, RF8 y RF9. La Figura 5.2 muestra la variación de la velocidad de depósito de la película de CdS en función de la presión de trabajo. Las condiciones de depósito del CdS para obtener una película con un espesor de 125 nm fueron: temperatura de sustrato de 250°C, potencia de 100 W.

Como se muestra en la gráfica, al aumentar la presión en la cámara al doble, disminuye la velocidad del depósito de la película de CdS y aumenta el tiempo de depósito en la misma proporción. Es decir, el crecimiento de la película de CdS disminuye con el incremento de la presión de trabajo.

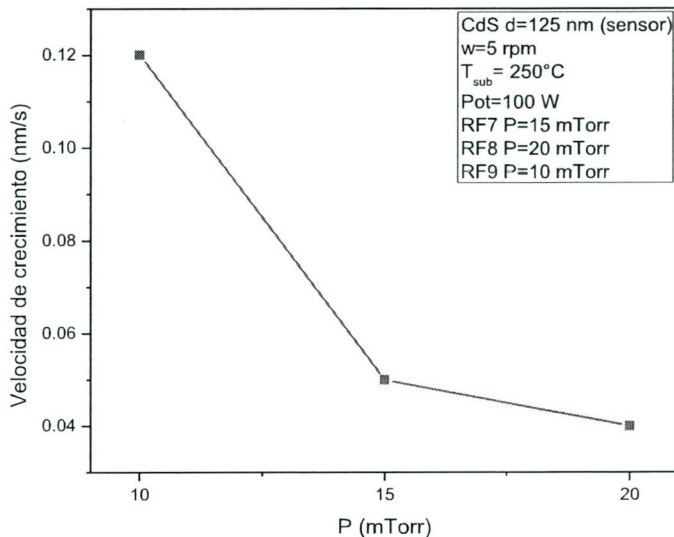


Figura 5.2. Variación de la velocidad de depósito de la película de CdS a 250°C, en función de la presión de trabajo.

Este resultado coincide con lo que reportan Sung-Gi Hur y Eui-Tae Kim en el artículo "Characterization of photoconductive CdS thin films prepared on glass substrates for photoconductive-sensor applications" (Hur & Kim, 2008).

En relación a la velocidad de rotación del portasubstrato (en revoluciones por minuto) durante el depósito de la capa de CdS, en la Figura 5.3 se observa que existe una correlación entre la velocidad de rotación del portasubstrato y el espesor medido en cada muestra; es decir, a mayor rotación menor espesor del CdS sobre el vidrio conductor.

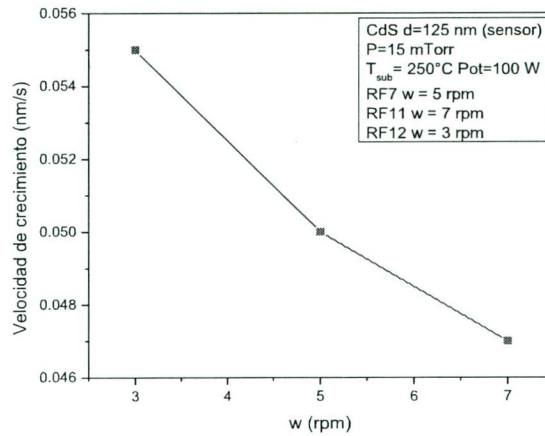


Figura 5.3. Variación de la velocidad de depósito de la película de CdS, en función de la velocidad de rotación del portasubstrato.

Respecto a la variación de la temperatura del sustrato con la variación de la velocidad de depósito de la capa de CdS, no se observa un comportamiento proporcional a la temperatura del sustrato, como se muestra en la Figura 5.4.

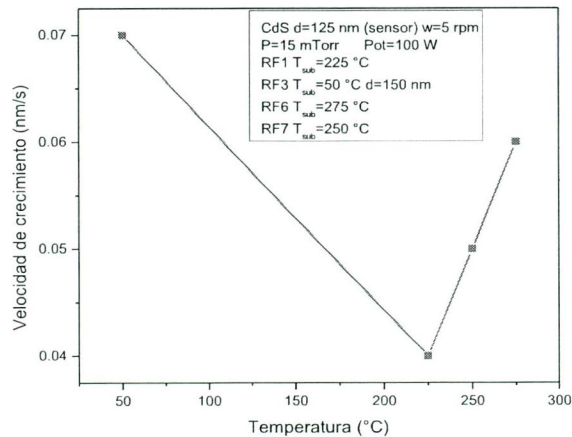


Figura 5.4. Variación de la velocidad de depósito de la película de CdS, en función de la velocidad de la temperatura del sustrato.

5.2. Medición de transmitancia óptica.

El material ventana CdS debe ser transparente en la zona de absorción del material absorbente y a la vez presentar una alta calidad en la zona cercana a su energía de la banda prohibida, para aumentar la región espectral de trabajo de la celda.

Para realizar las medidas de absorción óptica o transmitancia, se utiliza un espectrofotómetro de doble haz UV-VIS Shimadzu 3101-PC. Este espectrofotómetro mide simultáneamente la muestra de CdS y una muestra de referencia y calcula directamente la absorción en función de la longitud de onda en la lámina de interés.

Una forma de estudiar el comportamiento de un semiconductor consiste en hacerle incidir fotones de energía conocida que exciten electrones desde estados de menor energía hasta estados de mayor energía superando la banda de energía prohibida E_g .

El arreglo consiste esencialmente de una fuente luminosa (1) que emite radiación en el rango visible y el haz que se enfoca a través de una lente (2) hasta incidir en una red de difracción (3), la cual divide la luz de la lámpara en sus diferentes componentes (longitudes de onda λ), un emisor de haz para enviar el haz en dos trayectorias distintas (referencia y muestra).

El haz monocromático pasa por un espejo semi-transparente (4) el cual hace que la mitad del haz llegue a un foto-detector (5). La otra mitad del haz incide sobre la muestra (M) y llega a otro foto-detector (6). Después las intensidades registrada por los foto-detectores se comparan con un divisor de voltaje (7). La señal resultante se lleva a una computadora (8) que calcula la transmisión en función de la longitud de onda del haz luminoso incidente. El diagrama a bloques del espectrofotómetro se muestra en la Figura 5.5.

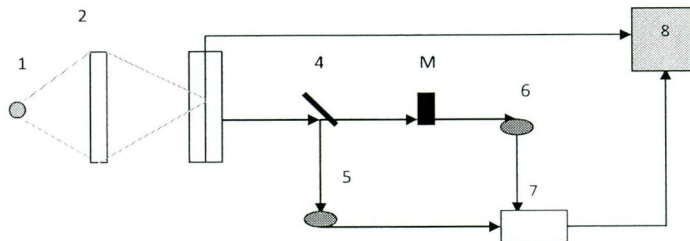


Figura 5.5. Diagrama de bloques del espectrofotómetro UV-VIS.

En relación a los resultados de las mediciones de transmitancia óptica mediante el espectrofotómetro UV-VIS, los resultados de la Figura 5.6 corresponden a un ejemplo de las mediciones que se realizaron a cada una de las catorce muestras. En las gráficas A, B, C y D se aprecia la repetitividad de los resultados de las mediciones de transmitancia realizadas en diferentes regiones de la muestra RF11, para este caso. Es importante mencionar que se observó el mismo resultado para las otras muestras.

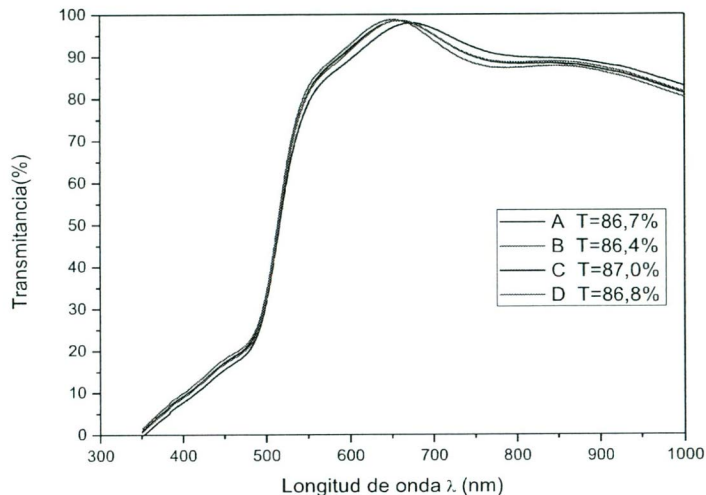


Figura 5.6. Comparación de cuatro mediciones de transmitancia realizadas en diferentes regiones de la película de CdS de la muestra RF11.

5.2.1. Influencia de los parámetros de depósito en la transmitancia del CdS.

En esta sección se presentan las gráficas de transmitancia óptica obtenidas por medio del espectrofotómetro de las películas de CdS.

Las muestras de CdS RF2, RF3, RF4 y RF5, se depositaron en un ambiente de argón a una presión de 15 mTorr, se fijó la temperatura del sustrato a temperatura ambiente (50°C) con un espesor de aproximadamente 150 nm, se varió la potencia del magnetron en cuatro valores: 75 W, 100 W, 125 W y 150 W.

En la Figura 5.7 se observa la comparación de los valores de transmitancia obtenidos a esas potencias bajo las condiciones ya descritas. Como la potencia influye en la velocidad del depósito; es decir, a mayor potencia menor tiempo de depósito, entonces se obtiene un menor espesor de la capa de CdS. En consecuencia, las muestras con los mejores valores de transmitancia, que son la RF4 y RF5 con el 80.2% y 79.7% respectivamente, son las que se crecieron a mayor potencia.

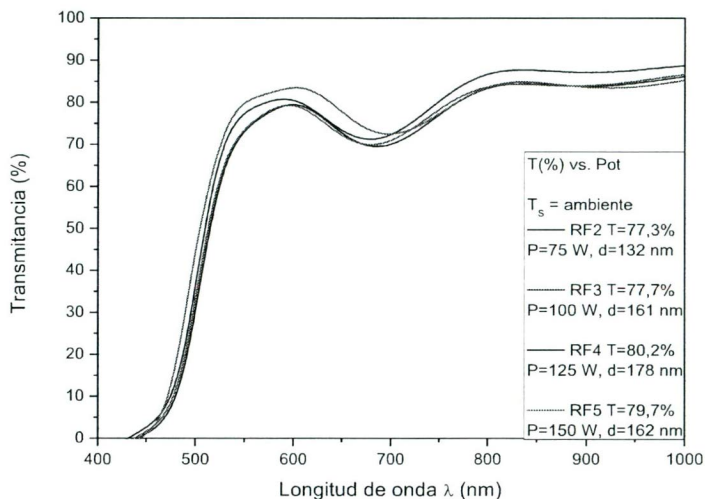


Figura 5.7. Transmitancia de cuatro películas de CdS por Sputtering-RF a diferentes potencias del magnetrón.

Todas las muestras empezaron con una fuerte absorción alrededor de los 500 nm. Se calcularon sus bandas prohibidas usando el método de punto de inflexión con ayuda del software OriginPro 8 (Morales & Janampa, 2012). Los valores encontrados fueron 2.46 eV para la muestra RF2 y de 2.48 eV para las demás películas. El valor obtenido concuerda con los valores estándares que se encuentran en la literatura de semiconductores.

En el siguiente grupo de muestras (ver Figura 5.8) se varió la temperatura del sustrato: 45°C, 200°C, 225°C, 250°C y 275°C. Mientras que se fijaron los parámetros de potencia a 100 W, con una presión de argón de 15 mTorr para obtener un espesor de CdS de 125 nm aproximadamente.

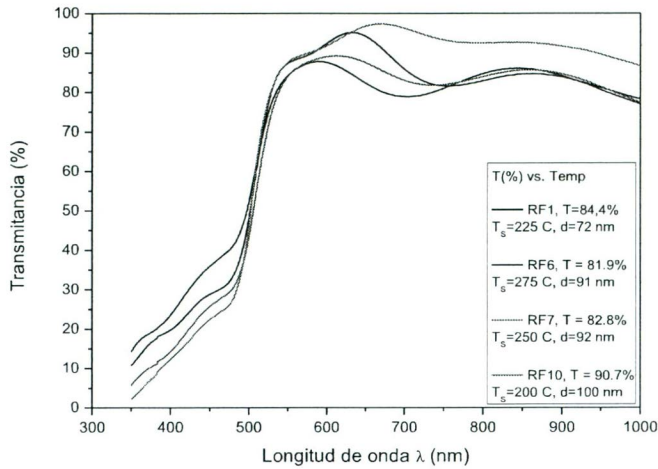


Figura 5.8. Transmiancia de cinco muestras de CdS crecidas a diferentes temperaturas del sustrato.

De la gráfica se concluye que la mayor transmiancia se obtuvo en la muestra RF10, la cual se depositó a una temperatura de sustrato $T_s = 200^\circ\text{C}$. La transmiancia más baja corresponde a la muestra RF3 que se depositó a temperatura ambiente ($T_s = 50^\circ\text{C}$).

El valor calculado de las bandas prohibidas de este grupo, usando el mismo método aplicado en el grupo de variación de potencia, se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Banda de energía prohibida de las muestras de CdS, en función de la longitud de onda.

Muestra CdS	λ (nm)	E_g (eV)
RF1	507	2.44
RF3	501	2.48
RF6	505	2.45
RF7	506	2.45
RF10	504	2.46

En las muestras RF9, RF7 y RF8 se varió la presión del argón en 10 mTorr, 15 mTorr y 20 mTorr respectivamente (ver Figura 5.9). Por otra parte, los siguientes parámetros se mantuvieron: la potencia a 100 W y la temperatura del sustrato a 250°C para obtener un espesor de CdS de 125 nm aproximadamente.

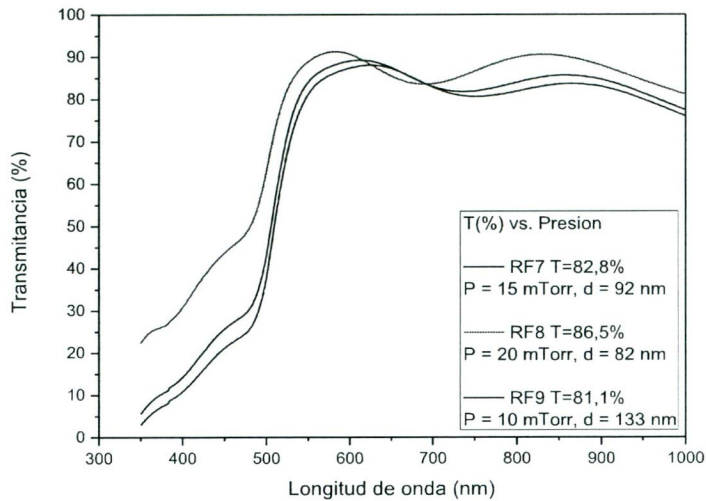


Figura 5.9. Transmitancia de tres muestras de CdS depositadas a diferentes presiones del Argón.

De acuerdo con la gráfica, se concluye que la mayor transmitancia se obtiene con la mayor presión de argón en la muestra RF8 y la más baja con la menor presión de depósito. Por lo que se verifica que a mayor presión resulta una capa de CdS de menor espesor de material.

El valor calculado de las bandas prohibidas de este grupo se muestra en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Banda de energía prohibida de las muestras de CdS, en función de la longitud de onda.

Muestra CdS	λ (nm)	E_g (eV)
RF9	508	2.44
RF7	506	2.45
RF8	505	2.45

En las muestras RF13, RF9 y RF14 se variaron los espesores de la película de CdS para obtener 100, 125 y 150 nm respectivamente; manteniendo fijos los parámetros de depósito del material a una potencia de 100 W en un ambiente de argón a una presión de 10 mTorr y una temperatura del sustrato de $T_s = 250^\circ\text{C}$.

En la Figura 5.10 se comparan los valores de transmitancia bajo esas condiciones de depósito. Como se esperaba, el resultado de la mayor transmitancia corresponde a la película de CdS con el menor espesor.

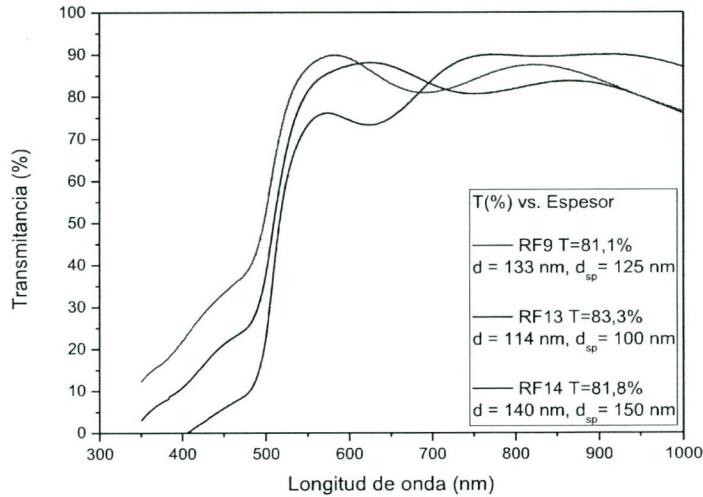


Figura 5.10. Transmitancia de las muestras RF9, RF13 y RF14 con diferentes espesores de la capa de CdS.

Mientras que el valor de las bandas prohibidas correspondientes a este grupo se calcularon con el apoyo del programa OriginPro 8 y se muestran en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Banda de energía prohibida de las muestras de CdS, en función de la longitud de onda.

Muestra CdS	λ (nm)	E_g (eV)
RF9	508	2.44
RF13	504	2.46
RF14	509	2.44

Los resultados de transmitancia del grupo de muestras donde se varió la velocidad de rotación del portasubstrato se observan en la Figura 5.11. Las condiciones de depósito del CdS fueron las siguientes: temperatura de sustrato $T_s = 250^\circ\text{C}$, potencia de 100 W en un ambiente de argón de 15 mTorr para obtener un espesor de 125 nm según sensor del Sputtering-RF.

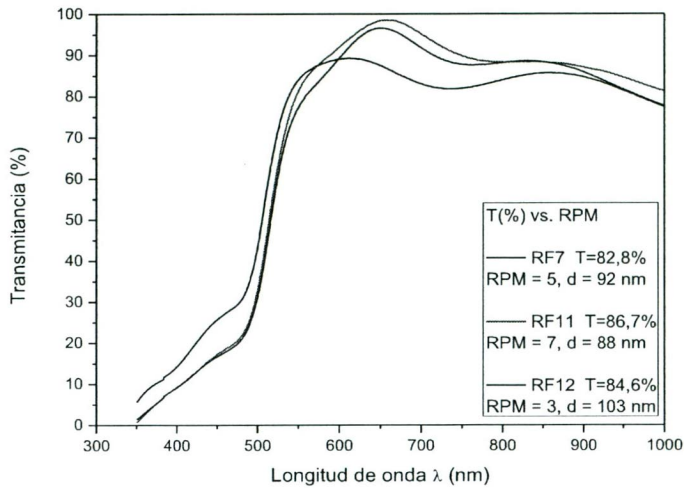


Figura 5.11. Transmancia de tres muestras de CdS a diferentes velocidades de rotación del portasustrato.

De la gráfica anterior se puede concluir que el menor espesor de la capa de CdS se obtiene con la mayor velocidad de giro, el cual corresponde al mayor valor de transmancia $T = 86.7\%$ para la muestra RF11.

El valor calculado de las bandas prohibidas de este grupo se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Banda de energía prohibida de las muestras de CdS, en función de la longitud de onda.

Muestra CdS	λ (nm)	E_g (eV)
RF7	506	2.45
RF11	514	2.41
RF12	515	2.41

5.3. Curva de corriente eléctrica en función del voltaje (I vs. V)

La caracterización fundamental del comportamiento eléctrico de los módulos fotovoltaicos está dado por las curvas de corriente contra voltaje (curva I vs. V) o potencia contra voltaje (curva P vs. V). Es decir, a partir de estas curvas se obtienen los

parámetros para caracterizar una celda fotovoltaica que se explicaron previamente en el capítulo 2.

La curva I-V de una celda fotovoltaica representa pares de valores de tensión e intensidad de corriente en los que puede encontrarse funcionando la celda. Mientras que la curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva I vs. V. En este apartado se reportan los resultados de las mediciones de corriente en función del voltaje bajo iluminación.

Para obtener la curva I-V de cada una de las celdas, se utilizó un equipo optoelectrónico llamado foto kit complementado con un potencióstato/galvanostato Autolab 302N, el cual está constituido por un led y una celda de referencia. El led da una longitud de onda particular cuya potencia de radiación es de 100 mW/cm^2 , en el espectro de radiación AM1.5 (radiación solar normal directa a nivel del mar). El led que se utilizó fue en la longitud de onda de 627 nm que es el espectro rojo. El sistema fue calibrado de tal manera que otorgara la irradiancia de un SUN (100 mW/cm^2). De esta medición se obtienen automáticamente los valores de cómo depende la corriente respecto al voltaje aplicado, obteniendo parámetros importantes como V_{oc} , I_{sc} y FF , entre otros.

Los electrodos que cierran el circuito de la celda son sus contactos de $\text{SnO}_2:\text{F}$ y Cu-Mo . Además, los valores se procesan mediante el programa Nova 1.10.

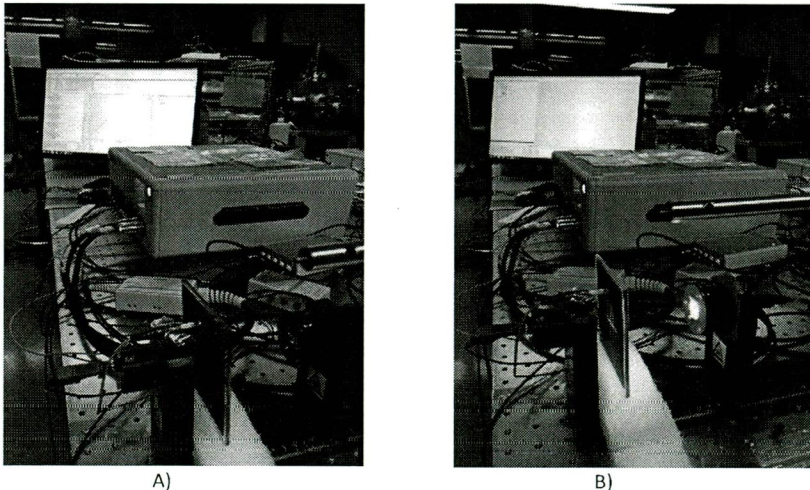


Figura 5.12. A) Potenciostato Autolab 302N y arreglo Photo kit - Led para medición de I vs. V en la UACM. B) Montaje para medición I vs. V por subcelda de un módulo fotovoltaico con el Photo kit-Led y el potencióstato Autolab 302N.

En estas condiciones medimos la relación corriente voltaje para las catorce muestras de CdS sobre los contactos de Cobre-Molibdeno. En las gráficas que se muestran a continuación se encuentran las curvas corriente-voltaje para las mejores celdas de cada uno de los catorce módulos estudiados.

5.3.1. Influencia de la temperatura del sustrato en la respuesta del módulo FV.

En la Figura 5.13 se comparan las curvas I vs. V de las muestras que corresponden al grupo en donde se varió la temperatura del sustrato. La muestra RF3 que de depositó a temperatura ambiente (50°C) es la que arroja los mayores valores de $I_{sc} = 5.03 \text{ mA}$ y $V_{oc} = 451 \text{ mV}$ con un factor de llenado $FF = 0.45\%$. Este valor nos da una idea de lo cuadrada que es la curva $I - V$ de la celda, y es mayor en cuanto mayor sea la calidad de la celda solar.

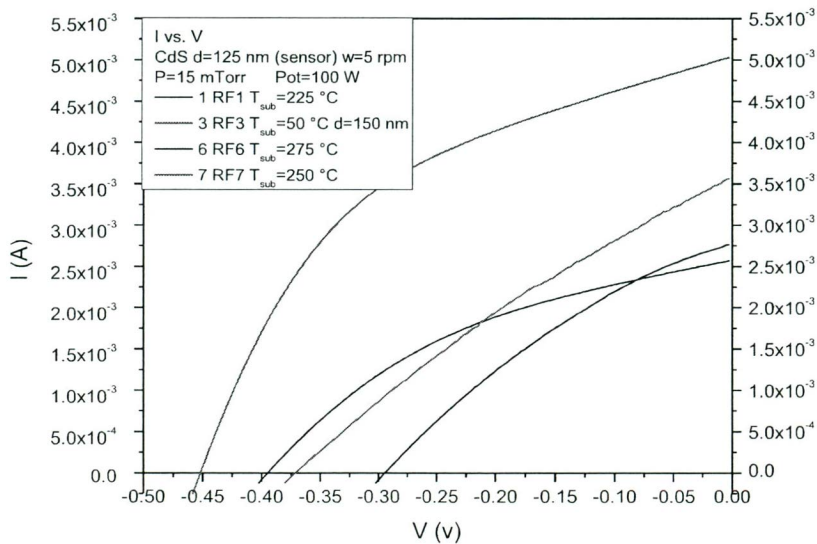


Figura 5.13. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la temperatura del sustrato.

En la curva P vs. V, la potencia máxima es la capacidad nominal o tamaño del módulo. La corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia corresponden a la corriente nominal y voltaje nominal del módulo, respectivamente.

En la Figura 5.14 se representa la potencia generada I - V frente al voltaje V. La mejor muestra de CdS, la RF3, reporta un voltaje de máxima potencia $V_{m\acute{a}x} = 313$ mV y una corriente de máxima potencia $I_{m\acute{a}x} = 3.30$ mA, con una eficiencia $\eta = 1.04\%$.

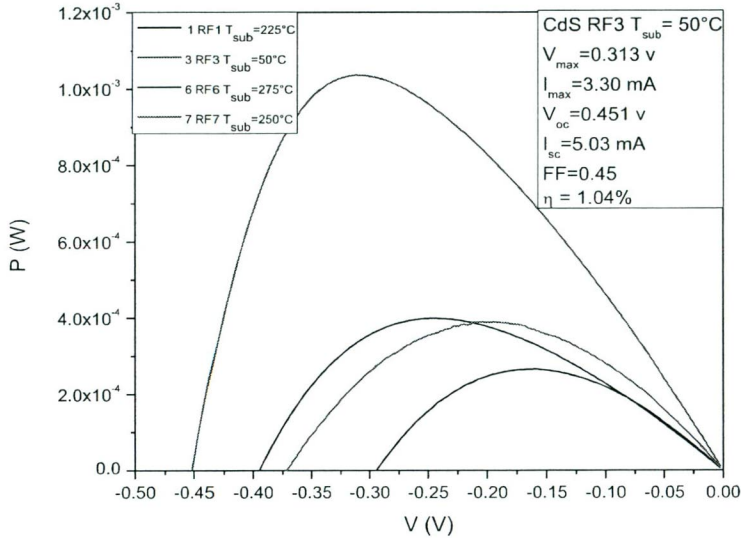


Figura 5.14. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la temperatura del sustrato.

De las mediciones I - V se obtienen las corrientes de corto circuito I_{sc} y los voltajes de circuito abierto V_{oc} , los cuales se grafican en función de la temperatura del sustrato, el factor de llenado (FF) y la eficiencia (η).

Entonces, respecto al análisis del voltaje de circuito abierto V_{oc} en función de la variación de la temperatura del portasustrato, se presenta esta relación en la Figura 5.15. Sin embargo, en la curva no se observa una correlación clara. Como parte de los trabajos posteriores, se propone depositar películas de CdS a temperaturas del sustrato de 100°C, 150°C y 200°C para revisar nuevamente si se presenta correlación alguna.

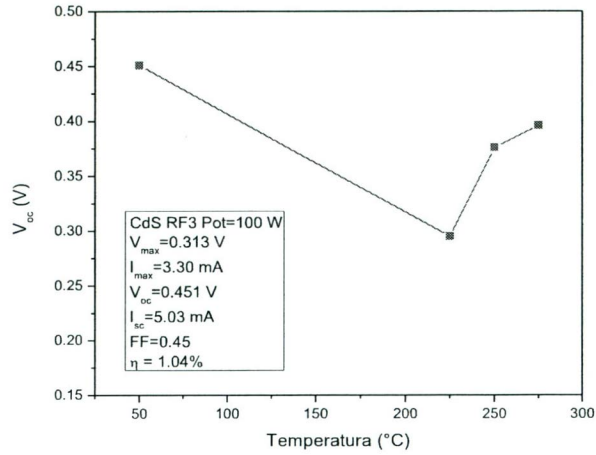


Figura 5.15. Voltaje de circuito abierto en función de la variación de la temperatura del portasubstratos.

En la siguiente gráfica se muestra la corriente de corto circuito I_{sc} en función de la variación de la temperatura del portasubstrato. Nuevamente, igual que en el caso anterior, en la curva no se observa una correlación clara.

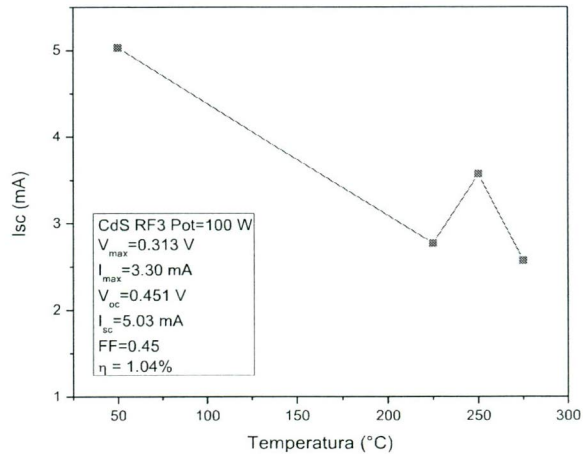


Figura 5.16. Corriente de corto circuito en función de la variación de la temperatura del substrato.

A continuación se muestra el factor de llenado FF en función de la variación de la temperatura del sustrato. Se repite el mismo resultado que en las dos gráficas anteriores porque no se observa una correlación clara.

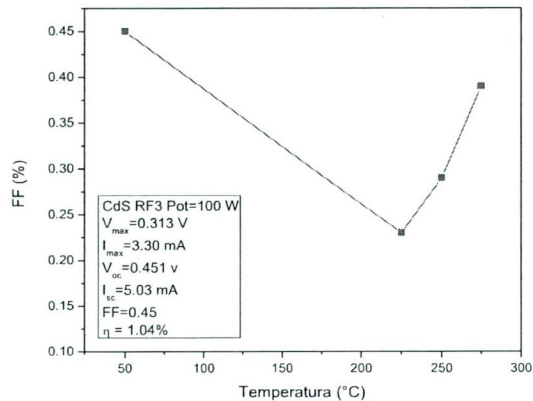


Figura 5.17. Factor de llenado FF en función de la variación de la temperatura del sustrato.

Por último, en la Figura 5.18 se grafica la eficiencia η en función de la variación de la temperatura del sustrato. De la misma forma, en la curva no existe una correlación.

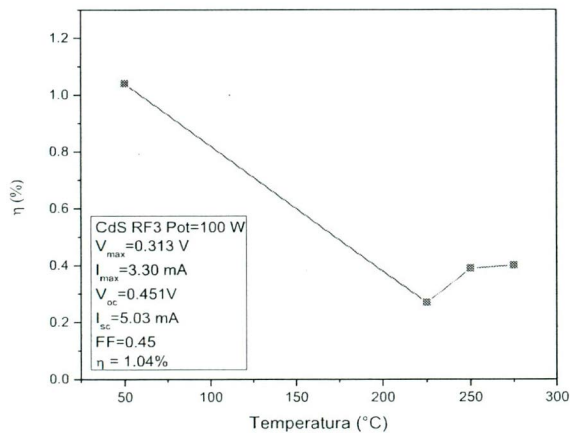


Figura 5.18. Eficiencia en función de la variación de la temperatura del sustrato.

En la Tabla 5.6 se presenta un resumen de los valores obtenidos de las gráficas anteriores para las diferentes temperaturas de sustrato seleccionadas. Se resaltan los mejores resultados que se obtuvieron.

Tabla 5.6. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes temperaturas de sustrato.

MUESTRA	TEMPERATURA (°C)	$V_{m\acute{a}x}$ (mV)	$I_{m\acute{a}x}$ (mA)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
RF1	225	159	1.168	295	2.77	0.23	0.27
RF3	50	313	3.30	451	5.03	0.45	1.04
RF6	275	242	1.65	396	2.57	0.39	0.40
RF7	250	203	1.92	376	3.57	0.29	0.39

5.3.2. Influencia de las películas de CdS obtenidas a distintas potencias.

Las curvas (I vs. V) de las muestras que corresponden al grupo en donde se experimentó con la potencia del magnetrón, se comparan en la Figura 5.19. De acuerdo con las curvas, la muestra que se depositó a una potencia de 100 W, que es la RF3, nuevamente es la que arroja los mayores valores de $I_{sc} = 5.03$ mA y $V_{oc} = 451$ mV con un factor de llenado $FF = 0.45\%$.

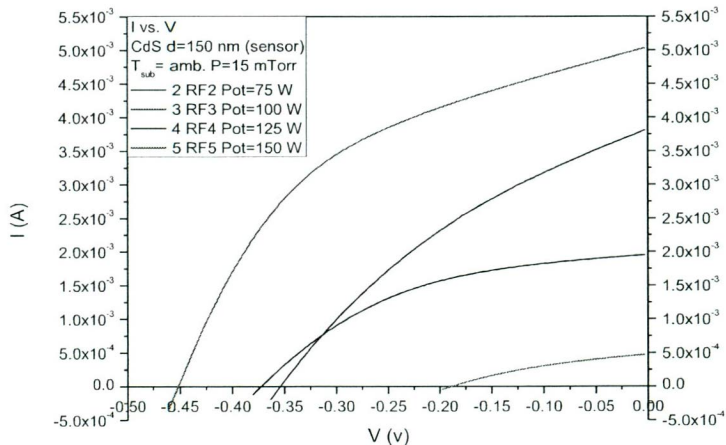


Figura 5.19. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la potencia del magnetrón.

La curva (P vs. V) se presenta en la Figura 5.20, en donde se observa que los valores más altos del voltaje de máxima potencia, corriente de máxima potencia y eficiencia se obtuvieron con la muestra RF3 de CdS, que se depositó a 100 W. Después de este análisis, se concluye que la potencia de depósito más apropiada es la de 100 W.

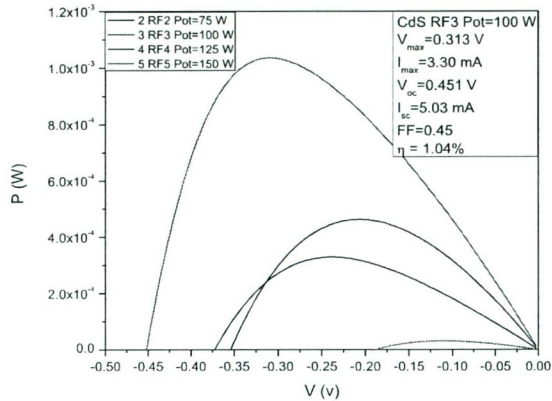


Figura 5.20. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la potencia del magnetrón.

En relación al análisis del voltaje de circuito abierto V_{oc} en función de la variación de la potencia del magnetrón, se presenta la Figura 5.21. De la curva se puede concluir que el mayor $V_{oc} = 451$ mV se obtiene a 100 W y el más bajo corresponde a 150 W.

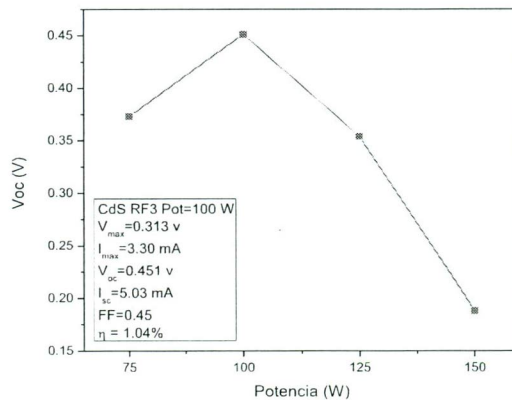


Figura 5.21. Voltaje de circuito abierto en función de la variación de la potencia del magnetrón.

En la Figura 5.22 se grafica la corriente de corto circuito I_{sc} en función de la variación de la potencia del magnetrón, que también concluye que el valor más alto se obtiene con la potencia de 100 W.

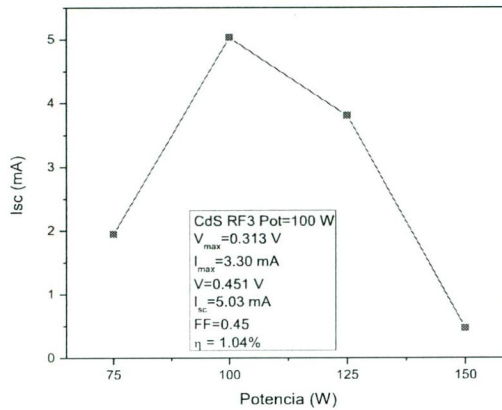


Figura 5.22. Corriente de corto circuito en función de la variación de la potencia del magnetrón.

En la Figura 5.23 se muestra el factor de llenado FF en función de la variación de la potencia del magnetrón. En la curva se observa cierta tendencia, pues con las menores potencias se obtiene el FF más alto, decreciendo conforme ésta aumenta.

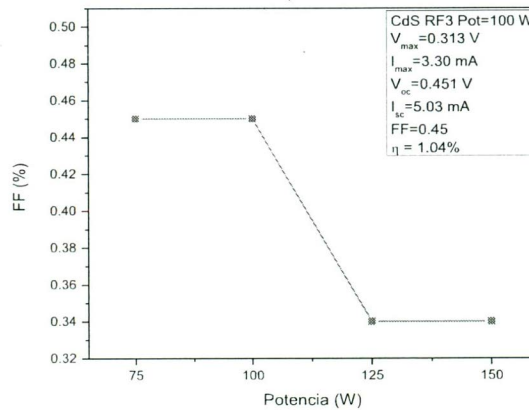


Figura 5.23. Factor de llenado FF en función de la variación de la potencia del magnetrón.

Para la eficiencia, ésta se graficó en función de la variación de potencia del magnetrón. El resultado muestra claramente que la eficiencia más alta se midió en la película de CdS que creció a 100 W y decrece para valores más altos o más bajos.

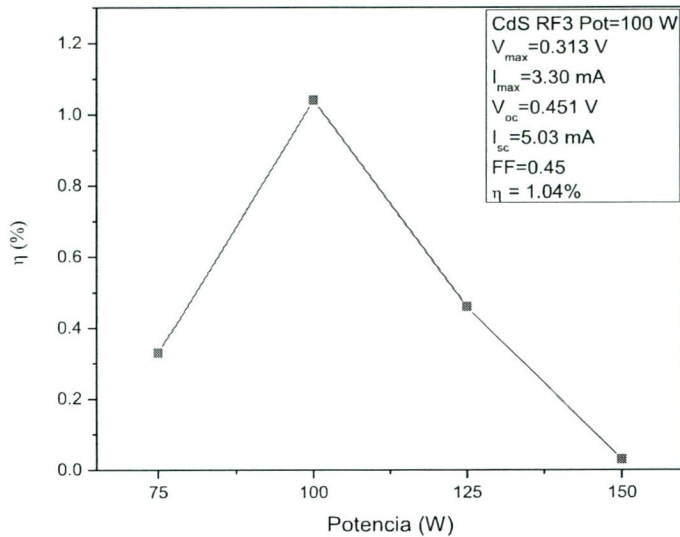


Figura 5.24. La eficiencia en función de la variación de la potencia del magnetrón.

Los resultados obtenidos de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) para la variación de la potencia del magnetrón, se presentan en forma de resumen en la Tabla 5.7. En la tabla se resaltan los valores más altos.

Tabla 5.7. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes potencias del magnetrón.

MUESTRA	POTENCIA W)	$V_{\text{máx}}$ (mV)	$I_{\text{máx}}$ (mA)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
RF2	75	237	1.39	373	1.95	0.45	0.33
RF3	100	313	3.30	451	5.03	0.45	1.04
RF4	125	210	2.21	354	3.81	0.34	0.46
RF5	150	110	0.28	188	0.47	0.34	0.03

5.3.3. Influencia de las películas de CdS obtenidas a distintas presiones de Ar.

Para el presente trabajo, también se experimentó con la presión del Argón confinado en la cámara de crecimiento. Las curvas (I vs. V) de las muestras que corresponden a este grupo se comparan en la en la Figura 5.25. La muestra con el mejor resultado es la RF7 que se depositó a una presión de 15 mTorr de argón. Los valores para esta muestra son $I_{sc} = 3.57$ mA y $V_{oc} = 376$ mV con un factor de llenado $FF = 0.29\%$.

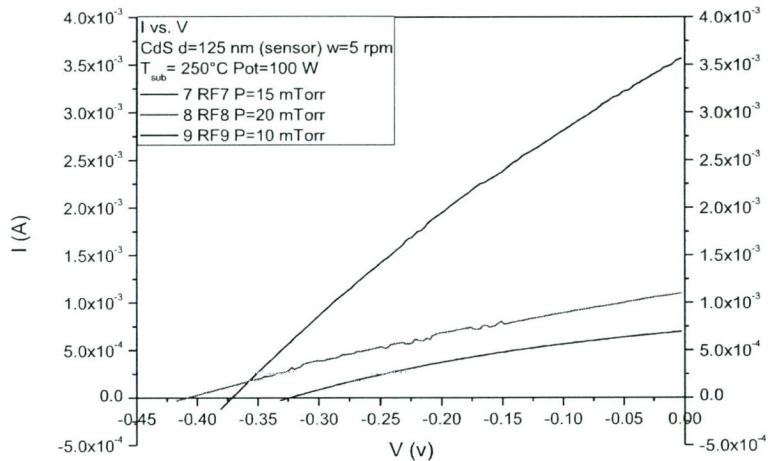


Figura 5.25. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la presión de Argón.

En la Figura 5.26 se presentan las curvas de la potencia generada $I \cdot V$ contra el voltaje V . El mejor resultado corresponde a la muestra RF7, la cual reporta un voltaje de máxima potencia $V_{m\acute{a}x} = 203$ mV y una corriente de máxima potencia $I_{m\acute{a}x} = 1.92$ mA, con una eficiencia $\eta = 0.39\%$.

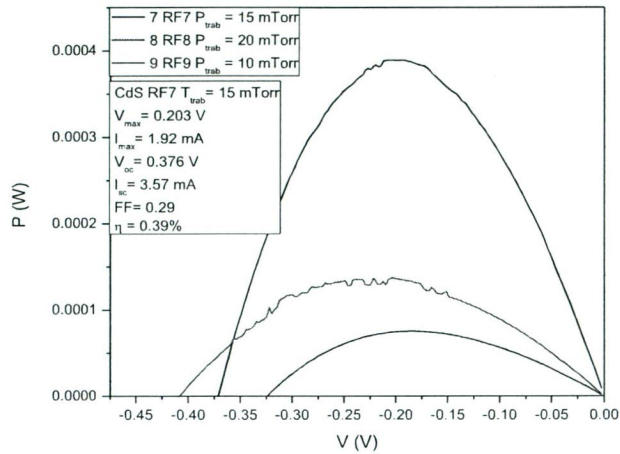


Figura 5.26. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la presión de Argón.

Para el análisis del voltaje de circuito abierto V_{oc} en función de la variación de la presión del argón, se muestra la Figura 5.27. De la curva se puede concluir que conforme aumenta la presión de depósito, también se incrementa el V_{oc} . Entonces, el mejor $V_{oc} = 376$ mV se obtuvo a una presión de 20 mTorr, mientras que el más bajo pertenece a la presión de 10 mTorr.

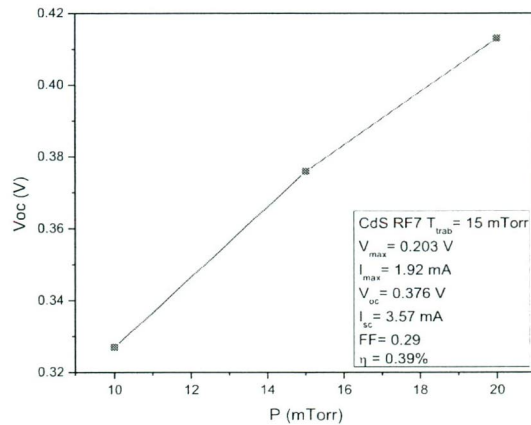


Figura 5.27. Voltaje de circuito abierto en función de la variación de presión de Argón.

La corriente de corto circuito I_{sc} en función de la variación de la presión de Argón, se aprecia en la Figura 5.28. De la gráfica se concluye que el valor de I_{sc} más alto se obtuvo con la presión de Argón de 15 mTorr.

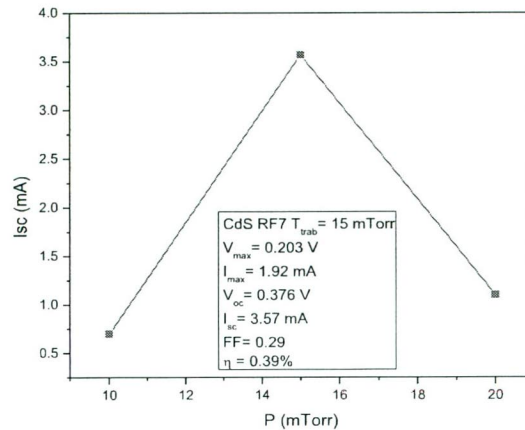


Figura 5.28. Corriente de corto circuito en función de la variación de la presión de Argón.

En la Figura 5.29 se calcula el factor de llenado FF en función de la variación de la presión de Argón. De la curva se infiere que el FF más alto se logra con la presión de 10 mTorr de argón.

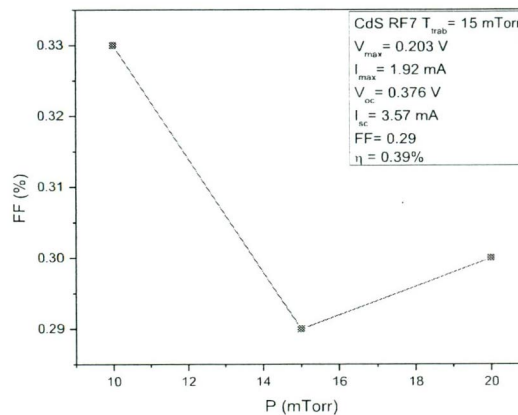


Figura 5.29. Factor de llenado FF en función de la variación de la presión de Argón.

Respecto a la eficiencia η en función de la variación de la presión de Argón, en la Figura 5.30 se grafica la curva. El resultado que se aprecia es que la eficiencia más alta se midió en la muestra que se depositó a una presión de 15 mTorr.

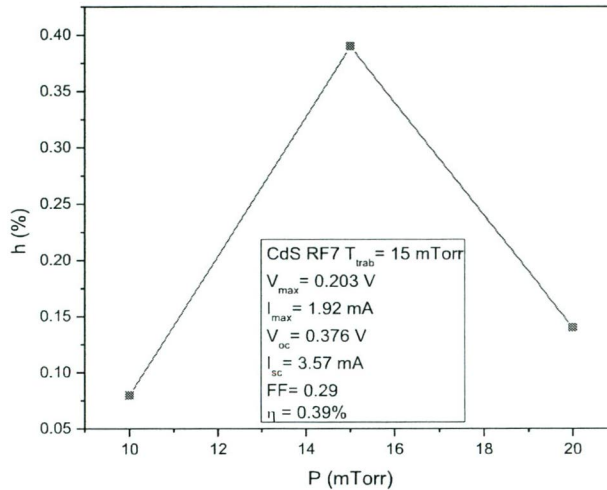


Figura 5.30. La eficiencia en función de la variación de la presión de Argón.

Los resultados de las mediciones obtenidos mediante el análisis de las gráficas (I vs. V) y (P vs. V) anteriores, referidas a la variación de las presiones del argón en la cámara de crecimiento, se concentran en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes presiones de Argón.

MUESTRA	PRESIÓN (mTorr)	$V_{m\acute{a}x}$ (mV)	$I_{m\acute{a}x}$ (mA)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
RF7	15	203	1.92	376	3.57	0.29	0.39
RF8	20	203	0.68	413	1.10	0.30	0.14
RF9	10	183	0.41	327	0.70	0.33	0.08

5.3.4. Influencia de las películas de CdS de diferentes espesores.

Los resultados de la curva (I vs. V) de las muestras de CdS con diferentes espesores, según la medición del sensor del Sputtering-RF, se contrastan en la Figura 5.31. Analizando la gráfica, la muestra de la cual se esperaba el mayor espesor, la RF14, fue la que presentó los mejores valores de $I_{sc} = 3.13$ mA y $V_{oc} = 359$ mV con un factor de llenado $FF = 0.53\%$.

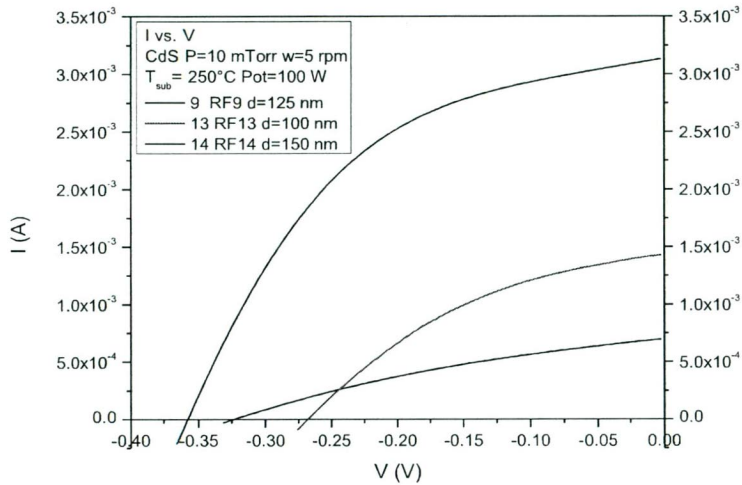


Figura 5.31. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función del espesor de la película de CdS.

Las curvas de la potencia generada $I - V$ contra el voltaje V , se contrastan en la Figura 5.32. Los mejores valores medidos de corriente y voltaje corresponde a la muestra RF14, cuyo espesor medido con el perfilometro fue de 140 nm, la cual reporta un voltaje de máxima potencia $V_{m\acute{a}x} = 232$ mV y una corriente de máxima potencia $I_{m\acute{a}x} = 2.27$ mA, con una eficiencia $\eta = 0.53\%$.

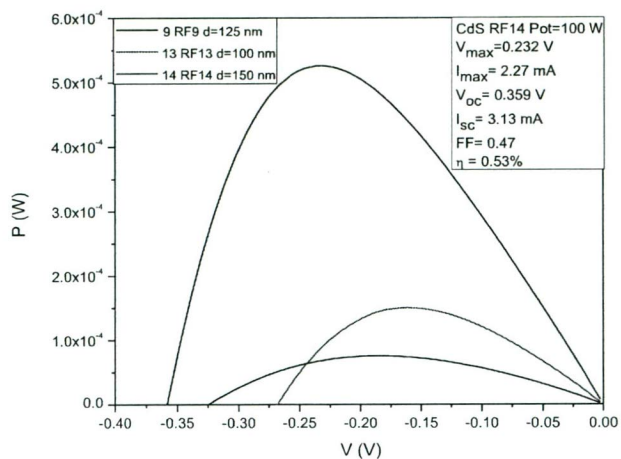


Figura 5.32. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función del espesor de la película de CdS.

En relación al estudio del V_{oc} como función de la variación del espesor de la película de CdS, se muestra la Figura 5.33. De la gráfica se puede concluir que conforme aumenta el espesor de la capa de CdS, también se incrementa el V_{oc} . El voltaje de circuito abierto que se obtuvo para la muestra RF14, que es el segundo más alto del total de las muestra, es de $V_{oc} = 359$ mV para un espesor $d = 140$ nm.

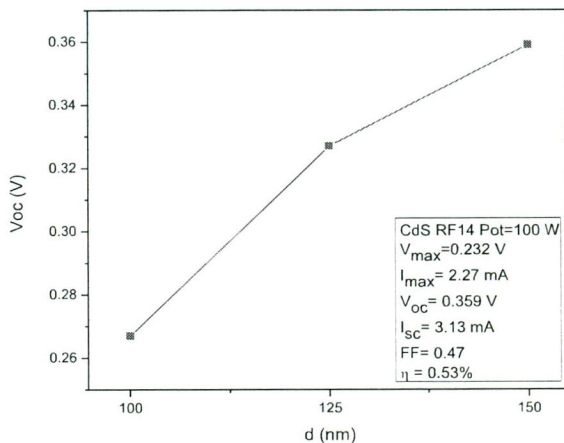


Figura 5.33. Voltaje de circuito abierto en función de la variación del espesor de la película de CdS.

En la Figura 5.34 se tiene la gráfica de I_{sc} en función de la variación del espesor de la capa de CdS. De la cual se concluye que el valor más alto de $I_{sc} = 3.13$ mA, se obtiene para la muestra RF14 con el espesor de 150 nm medido con el sensor del Sputtering-RF.

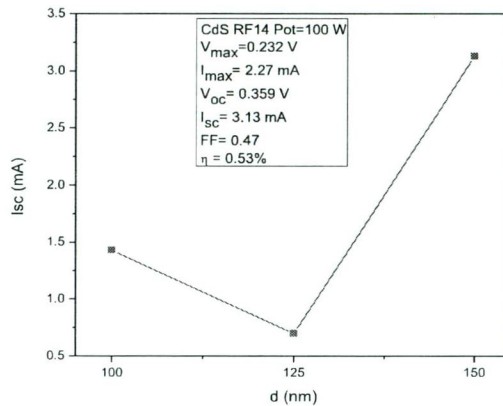


Figura 5.34. Corriente de corto circuito en función de la variación del espesor de la película de CdS.

La curva obtenida con los resultados del cálculo del factor de llenado FF en función de la variación del espesor de la película de CdS se presenta en la Figura 5.35. Para este caso, el mejor valor de FF también corresponde a la muestra RF 14.

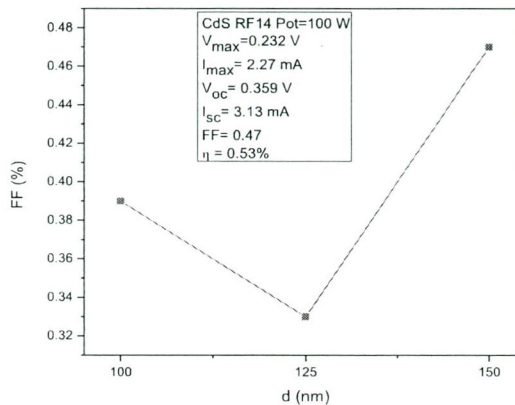


Figura 5.35. Factor de llenado FF en función de la variación del espesor de la película de CdS.

Para los valores calculados de la eficiencia de las muestras RF9, RF13 y RF14, éstos se graficaron en función de la variación del espesor de la película de CdS. La gráfica resultante se observa en la Figura 5.36, donde la eficiencia más alta corresponde también a la muestra RF14 con $\eta = 0.53\%$.

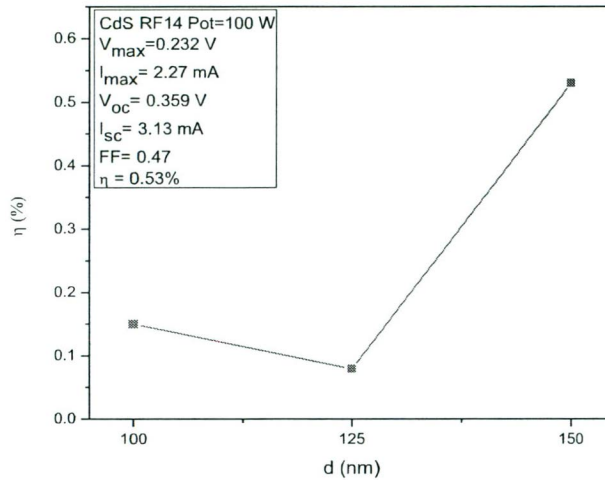


Figura 5.36. La eficiencia en función de la variación del espesor de la película de CdS.

Todos los resultados anteriores obtenidos a partir de las curvas (I vs. V) y (P vs. V), de acuerdo con la variación del espesor de la capa de CdS, se presentan a manera de resumen en la Tabla 5.9. En la tabla se resaltan los valores más altos correspondientes a la muestra RF14.

Tabla 5.9. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes espesores de la película de CdS.

MUESTRA	ESPESOR (nm)	$V_{m\acute{a}x}$ (mV)	$I_{m\acute{a}x}$ (mA)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
RF9	125	183	0.41	327	0.70	0.33	0.08
RF13	100	161	0.93	267	1.43	0.39	0.15
RF14	150	232	2.27	359	3.13	0.47	0.53

5.3.5. Influencia de las películas de CdS a diferentes velocidades de rotación del portasubstrato.

En las muestras RF7, RF11 y RF12 se analizaron los efectos de variar la velocidad de rotación del portasubstrato durante el depósito de la capa de CdS. Las curvas (I vs. V) de las muestras que corresponden a este grupo se comparan en la Figura 5.37. La muestra con el mejor resultado es la RF7 que se depositó a una velocidad de 5 rpm. Los valores para esta muestra son $I_{sc} = 3.57$ mA y $V_{oc} = 376$ mV con un factor de llenado $FF = 0.29\%$.

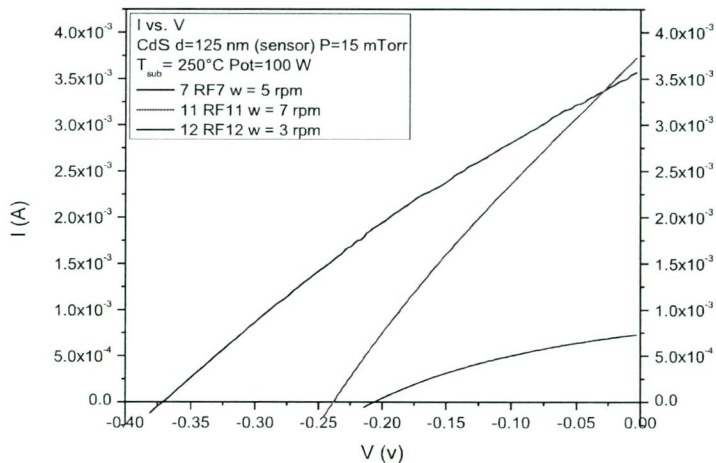


Figura 5.37. Curva (I vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la velocidad de rotación del portasubstrato.

La curva (P vs. V) de este grupo de muestras se representa en la Figura 5.38, en donde se manifiesta que los mejores valores medidos de corriente y voltaje corresponden a la muestra RF7 que se depositó a una velocidad de portasubstratos $w = 5$ rpm. Los resultados obtenidos son: voltaje de máxima potencia $V_{m\acute{a}x} = 203$ mV y corriente de máxima potencia $I_{m\acute{a}x} = 1.92$ mA, con una eficiencia $\eta = 0.39\%$. Con éste análisis se concluye que la velocidad más apropiada para el giro el portasubstratos durante el depósito de CdS es $w = 5$ rpm.

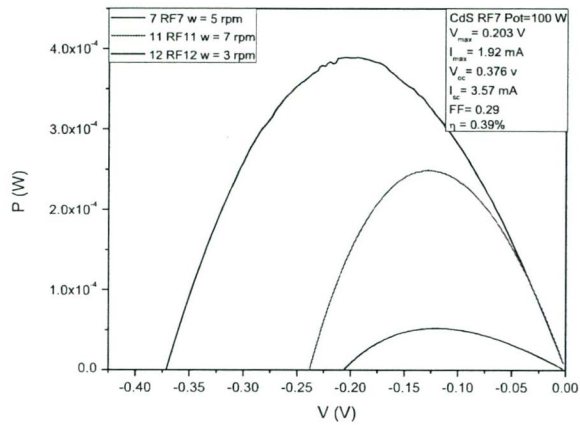


Figura 5.38. Curva (P vs. V) para celdas solares CdS/CdTe en función de la velocidad de rotación del portasustrato.

En la Figura 5.39 se muestra la relación del voltaje de circuito abierto V_{oc} en función de la variación de la velocidad de rotación del portasustrato durante el crecimiento del CdS. De la gráfica se deduce que el mayor valor de V_{oc} corresponde a $w = 5$ rpm, con la muestra RF7.

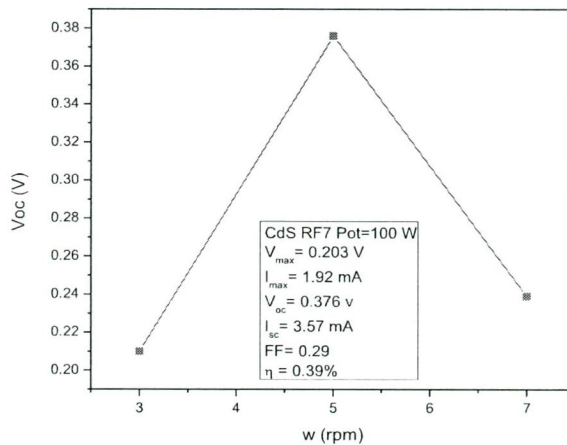


Figura 5.39. Voltaje de circuito abierto en función de la variación de la velocidad de rotación del portasustrato.

En la siguiente gráfica se explica la relación de la I_{sc} en función de la velocidad de rotación del portasubstrato durante el crecimiento de la capa de CdS. En la gráfica se observa que el valor más alto de $I_{sc} = 3.57$ mA corresponde de nuevo a la muestra RF7.

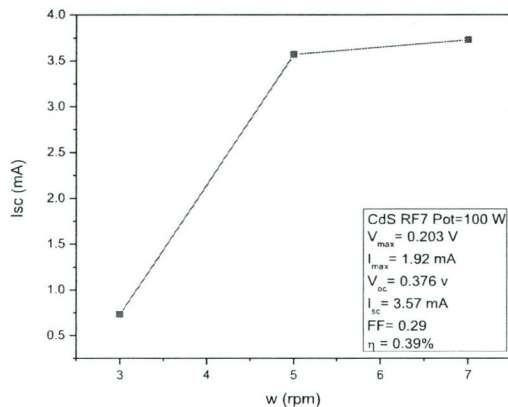


Figura 5.40. Corriente de corto circuito en función de la variación de la velocidad de rotación del portasubstrato.

La curva de los resultados del cálculo del FF en función de la variación de la velocidad de rotación del portasubstrato cuando se deposita la película de CdS, se presenta en la Figura 5.41. Entonces, el mejor valor $FF = 0.29$ pertenece a la muestra RF12 que se depositó con $w = 3$ rpm.

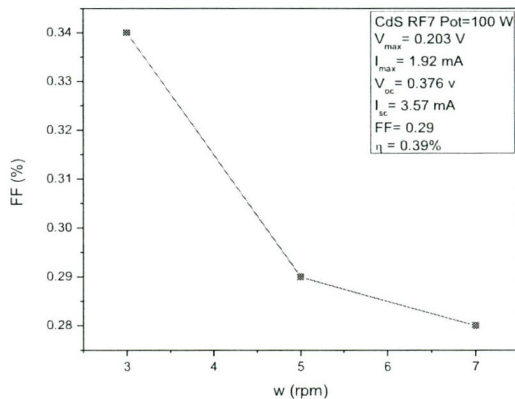


Figura 5.41. Factor de llenado FF en función de la variación de la velocidad de rotación del portasubstrato.

Finalmente, los valores calculados de la eficiencia de las muestras de éste grupo se graficaron en función de la velocidad de rotación del portasubstrato durante el depósito de la capa de CdS. La gráfica correspondiente se observa en la Figura 5.42, donde la eficiencia más alta corresponde también a la muestra RF7 con $\eta = 0.39\%$.

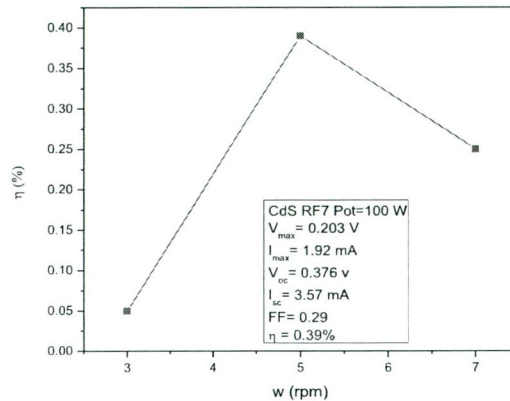


Figura 5.42. La eficiencia en función de la variación de la velocidad de rotación del portasubstrato.

Todos los resultados de este grupo fueron determinados a partir de las curvas (I vs. V) y (P vs. V), de acuerdo con la variación de la velocidad de rotación del portasubstrato, y se presentan en la Tabla 5.10. En la tabla se resaltan los valores más altos correspondientes a la muestra RF7.

Tabla 5.10. Resultados de las curvas (I vs. V) y (P vs. V) con diferentes velocidades de rotación del portasubstrato.

MUESTRA	VELOCIDAD ROTACIÓN (rpm)	$V_{m\acute{a}x}$ (mV)	$I_{m\acute{a}x}$ (mA)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	FF	η (%)
RF7	5	203	1.92	376	3.57	0.29	0.39
RF11	7	129	1.93	239	3.73	0.28	0.25
RF12	3	122	0.43	210	0.73	0.34	0.05

De esta forma se determinó que la velocidad de rotación de portasubstrato adecuada para el depósito de la capa de CdS por la técnica de Sputtering-RF es $w = 5$ rpm. Es importante mencionar que las otras 12 muestras se depositaron a esta velocidad.

CONCLUSIONES

A partir de los datos presentados en este apartado, es posible determinar los parámetros de crecimiento de CdS por la técnica de Sputtering-RF en la matriz de CdS, que presentaron los mejores resultados de I_{sc} , V_{oc} , $I_{máx}$, $V_{máx}$, FF y η en este trabajo. Entonces, los parámetros de depósito de CdS que dieron la mejor eficiencia fotovoltaica por la técnica de erosión catódica magnetoplanar RF son: potencia del magnetrón 100 W, presión del argón en la cámara de crecimiento de 15 mTorr, espesor de la capa de CdS de 150 nm según sensor del Sputtering-RF y con el perfilómetro se tiene 140 nm, con una velocidad de rotación del portasubstratos de 5 rpm.

Realizar depósitos de CdS con temperaturas de sustrato de 100°C, 150°C y 200°C debido a que no se observó un comportamiento de los parámetros eléctricos del dispositivo respecto a la temperatura.

Respecto a la técnica de depósito de películas delgadas de sulfuro de cadmio por Sputtering-RF, se concluye que éste proceso es estable, además de que permite controlar los parámetros de crecimiento. Por esta razón se considera que es una técnica apropiada para repetir con precisión el crecimiento de materiales semiconductores; es decir, tiene una alta reproductibilidad de los procesos de depósito. También facilita la escalabilidad hacia superficies mayores que la del presente estudio.

Otras ventajas del crecimiento de películas de CdS mediante esta técnica consisten en que permite el depósito a bajas temperaturas y provee un control de la composición química bajo las condiciones establecidas. Una ventaja adicional se refiere al vacío, el cual se realiza a presiones de 10^{-6} Torr, ya que proporciona un excelente aislamiento térmico y eléctrico en la cámara de depósito.

6.1. RECOMENDACIONES EN EL PROCESO DE LA MANUFACTURA

- Durante la manufactura de las catorce muestras que comprenden el análisis de la influencia del CdS en la respuesta fotovoltaica de los módulos de CdTe, se detectaron algunos cambios a implementar en este proceso.

- En relación a los substratos, es conveniente que antes del lavado del vidrio, éste sea rebajado para ajustar sus dimensiones a las chalupas de grafito y la platina para el rayado laser para evitar daños en las capas de materiales que ya hayan sido depositados.
- También es importante no cambiar de proveedor de materiales como el CdS, CdTe y el CdCl₂ sin que se haya utilizado previamente y por lo tanto no se haya caracterizado aún.
- Mantener las muestras y los dispositivos en vacío para evitar su degradación.
- Para obtener una película homogénea del CdTe que se deposita por la técnica de sublimación en espacio cercano, dado que es difícil distribuir de manera uniforme el polvo del material en la superficie de la chalupa, es conveniente realizar pruebas con blancos compactos de este material.
- En las mediciones del espesor del CdTe se observó que el espesor promedio de esta capa es de 14 µm, entonces, una forma para mejorar el desempeño de las celdas solares consiste en disminuir el espesor de esta película a valores por debajo de los 10 µm de acuerdo a la literatura.

6.2. TRABAJOS FUTUROS.

- Efectuar mediciones de morfología (Microscopía de Fuerza Atómica-AFM) para conocer la topografía de la superficie de las películas de CdS.
- Realizar mediciones de respuesta espectral a los dispositivos que presentaron los mejores resultados.
- Caracterizar el depósito de CdS sobre substratos TEC 10 Y TEC 15. Además, realizar pruebas con vidrios templados para evitar deformaciones, dado que son más resistentes a las altas temperaturas y permitirían un enfriamiento rápido.
- Realizar depósitos de CdS en una atmósfera de oxígeno fluorinado.
- Hacer estudios de fatiga y envejecimiento en las películas de CdS.

REFERENCIAS

Almanza Salgado, R., & Muñoz Gutiérrez, F. (1994). *Ingeniería de la Energía Solar*. México: El colegio Nacional.

Burgelman, M. (2006). *Thin film solar cells: Fabrication, characterization and applications*. (J. Poortmans, & V. Arkhipov, Edits.) Chinchester, UK: John Wiley & Sons.

CAT Organization. (Octubre de 2013). *Centre for Alternative Technology Canolfan y Dechnoleg Amgen*. Recuperado el 27 de Febrero de 2015, de Centre for Alternative Technology Canolfan y Dechnoleg Amgen: info.cat.org.uk

Cinvestav. (13 de Enero de 2014). *Portal de comunicación Cinvestav*. (Cinvestav, Editor) Recuperado el 02 de Enero de 2015, de comunicacion.cinvestav.mx

CONACYT. (2013). *Procesamiento de módulos fotovoltaicos de CdTe/CdS en baja potencia para su transferencia tecnológica al sector industrial*. Sistema de fondos, México.

CRE. (29 de Octubre de 2014). *Comisión Reguladora de Energía*. Recuperado el 25 de Enero de 2015, de www.cre.gob.mx/articulo.aspx?id=171

Diso, D. (2011). *Research and development of CdTe based thin film PV solar cells*. U. K.: Sheffield Hallam University.

Durham University. (1 de Mayo de 2014). *Polycrystalline solar cells: The CdS/CdTe solar cell*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de Research Themes: www.dur.ac.uk

Dutta, V., & Krishna, K. (2012). *Study of the environmental, health and safety of CdTe photovoltaic technology*. Delhi, India: Indian Institute of Techonology Delhi.

Espindola, M. (2011). *Obtención de contactos tipo CuxTe en celdas solares de CdTe mediante depósitos de Te por la técnica de CSVT y evaporación de Cu*. D. F.: I.P.N.

Ferekides, C., Marinskiy, D., Viswanathan, V., & Tetali, B. (2000). High efficiency CSS CdTe solar cells. *Thin Solid Films*, 520-526.

Fthenakis, V., & Zweibel, K. (2003). *CdTe PV: Real and Perceived EHS Risk*. U.S. Department of Energy. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.

Garnica, I., Pérez, A. D., & Gochi-Ponce, Y. (2013). Caracterización de películas delgadas de SnO₂ obtenidas sobre vidrio por aspersión pirolítica intermitente para celdas solares tipo Grätzel. *Superficies y Vacío*, 2 (26), 36-41.

Herron, N. (2003). *Cadmium Compounds*. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (Vol. 4). John Wiley & Sons.

Hur, S. G., Lee, J. H., & Kim, G. H. (Jul-Aug de 2008). Characterization of fotoconductive CdS thin films prepared on glass substrates for photoconductive-sensor applications. *American Vacuum Society*, 1334-1337.

IER-UNAM. (2013). *Plan de Negocios e Internacionalización*. Secretaría de Gestión Tecnológica y Vinculación., Temixco.

Kulp, B. A. (2013). First Solar Sets CdTe module efficiency world record launches serie 3 black module. *Phys Rev* (125), 1856.

LAERFTE. (28 de Noviembre de 2008). LAERFTE. *Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética*, México.

LIFYCS. (2013). *Informe del Proyecto 123122-LIFYCS*. Instituto de Energías Renovables, Laboratorio de Innovación Fotovoltaica y Caracterización de Celdas Solares. Temixco: IER-UNAM.

Lisco, F., Kaminski, P., & Abbas, A. (2015). High rate deposition of thin film cadmium sulphide by pulsed direct current magnetron sputtering. *Thin Solid Film*, 574, 43-51.

Mendoza, R. (2007). *Desarrollo de celdas solares prototipo de CdTe con CdS procesado por baño químico*. Tesis de Doctorado. D.F., México: Instituto Politécnico Nacional.

Metropoli San Luis. (22 de Febrero de 2014). CIACYT impartirá un curso básico y una conferencia sobre celdas solares. San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. Recuperado el 2 de Febrero de 2015, de <https://metropolisanluis.com>

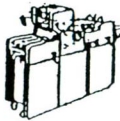
- Morales, O., & Janampa, K. (2012). Cálculo de banda de energía prohibida de CdTe por el método de punto de inflexión. *XIX Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XIX SPES)*. Puno.
- Peña, J., Arés, O., & Rejón, V. (2011). A detailed study of the series resistance effect on CdS/CdTe solar cells with Cu/Mo back contact. *Thin Solid Films* (520), 680-683.
- ProMéxico. (2013). *Energías Renovables 2013*. México.
- Ríos, S. (2009). *Generación solar fotovoltaica: integración en los sistemas eléctricos*. España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Rose, D., Hasoon, F., & Dhere, R. (1999). Fabrication procedures and process sensitivities for CdS/CdTe solar cells. *Progress in Photovoltaics: Researchs and applications* (7), 331-340.
- Sarkar, J. (2014). *Sputtering Materials for VLSI and Thin Film Devices*. Waltham, USA: Elsevier.
- Sastré, J. (2009). *Influencia de los parámetros de crecimiento por sublimación en las propiedades ópticas y morfológicas de película delgada de CdS y su uso como material ventana en Celdas Solares*. D. F., México: I.P.N.
- SENER. (2013). *Fondo de Sustentabilidad Energética*. Informe Cero, Secretaría de Energía, Subsecretaría de Planeación y Transición Energética., México.
- SENER. (2014). *Prospectiva de las Energías Renovables 2014-2028*. México: Secretaría de Energía.
- SENER. (2012). *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*. México, México.
- SENER/GIZ. (2012). *Programa de Fomento de Sistemas Fotovoltaicos en México (ProSolar)*. Secretaría de Energía, México.
- Tufiño, M., & Contreras, G. (1998). *Revista Mexicana de Física* (44), 589-595.
- UP del Golfo. (2011). *Investigación para el desarrollo de la ciencia y la tecnología 2011*. Tabasco: UP del Golfo.

Vigil, O., Arias, A., & Mendoza, R. (2005). *Semiconductor Science and Technology* (20), 819-822.

Vigil, O., Hernández, L., & Santana, G. (2011). *Fotovoltaicos: Fundamentos y aplicaciones*. D. F.: Thomson.

Vigil, O., Santana, g., & Mendoza, R. (2004). *Revista Mexicana de Física* (50), 353-357.

Wiberg, E., & Holleman, A. F. (2001). *Inorganic Chemistry*.



Tesis
IMPRESA
TERE

PONE A SUS ORDENES SU SERVICIO
DE ELABORACIÓN DE TESIS Y EMPASTADOS
EN 24 HORAS
PALMA NORTE No. 518 DESP. 210 COL. CENTRO
ENTRE BELISARIO DOMINGUEZ Y REP. DE CUBA
TEL. 55-18-07-19
www.imprentatere.com.mx