



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA
CALIFORNIA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PANEL DE
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A PARTIR DE
CELDAS SOLARES UNITARIAS DE CdS y CdSe”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

MONSERRAT VARGAS MORENO

DIRECTORES DE TESIS:

DR. CARLOS VILLA ANGULO

DR. RICARDO MORALES CARBAJAL

DEDICATORIA

La presente Tesis está dedicada a mis padres, porque ellos siempre estuvieron a mi lado con su apoyo, amor y comprensión, por creer que yo podía realizar grandes cosas y alentarme a tomar las oportunidades que me presentaba la vida, gracias a ustedes estoy cumpliendo mis sueños.

A mi hermano por su apoyo y compañía durante todos estos años, por ser mi amigo cuando más lo necesitaba.

A todos mis compañeros y amigos del laboratorio de física aplicada y bioinformática, porque desde el primer día que llegue aquí me recibieron con los brazos abiertos y me hicieron sentir parte de su familia, el tiempo que pase con todos ustedes no lo podré olvidar.

A todas y cada una de las personas que he conocido y han estado conmigo a lo largo de estos dos maravillosos años.

Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Carlos Villa por creer en mí y darme la oportunidad de formar parte de su equipo de trabajo, por su apoyo y orientación durante este largo camino, así como todas las enseñanzas impartidas. Gracias por ser un ejemplo de dedicación y amor al trabajo.

Al Dr. Ricardo Morales por el apoyo brindado durante cada una de las etapas de este trabajo, por sus consejos y colaboración en la realización de las pruebas.

A los Dres. Conrado García Gonzáles, Benjamín Valdez Salas, Ma. Socorro Romero Hernández e Ing. Luz Estela Salazar Escalante por abrirme las puertas de sus laboratorios y permitirme utilizar sus equipos para la realización de las pruebas que volvieron este trabajo posible.

A la Mtra. Laura Alejandra Reyes Verdugo por su gran apoyo y amistad, por ser mi compañera de experimentos y mostrarme con mucha paciencia como se realizaban cada uno de los procedimientos.

A la Universidad Autónoma de Baja California y al Instituto de Ingeniería por darme la oportunidad de continuar mi desarrollo tanto académico como laboral.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico que me otorgó durante estos dos años y permitió que pudiera dedicar todo mi tiempo a la realización de esta Tesis.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1.	Estado del arte de los dispositivos fotovoltaicos.....	3
FIGURA 1.2.	Esquema del proceso de deposición por giro (Spin Coating)	6
FIGURA 1.3.	Modelo básico para el procedimiento de deposición por rocío pirolítico	6
FIGURA 3.1.	Estructura básica de la celda unitaria diseñada	12
FIGURA 3.2.	Carta gráfica del espectro de aplicación Fotónica.....	15
FIGURA 3.3.	Sistemas de materiales más utilizados para fabricar de fotodetectores asociados a la longitud de onda de absorción	16
FIGURA 3.4.	Energía del Gap, E_g , y parámetro de la red, a , para varias aleaciones de los grupos II-IV y III-V de la tabla periódica	16
FIGURA 3.5.	Estructura de celda solar unitaria a diseñar	17
FIGURA 3.6.	Geometría de una estructura multicapa típica.....	17
FIGURA 3.7.	Componentes del campo eléctrico que pueden existir en un medio homogéneo	18
FIGURA 3.8.	Taza de generación de excitones G_j en la capa activa (CdSe) para $\lambda = 350$ nm.	25
FIGURA 3.9.	Taza de generación de excitones G_{jT} en la capa activa (CdSe) desde 1 nm a 10000 nm de ancho para las longitudes de onda de 350 a 800 nm	26
FIGURA 3.10.	Representación gráfica de proceso iterativo	27
FIGURA 3.11.	Diagrama energético.....	28
FIGURA 3.12.	Muestra la secuencia paso implementada para encontrar V_0	30
FIGURA 3.13.	Densidad de corriente vs voltaje	33
FIGURA 3.14.	Búsqueda de J_{max}	34
FIGURA 3.15.	Estructura esperada de celda solar unitaria	37
FIGURA 3.16.	Estructura esperada del módulo.....	38
FIGURA 4.1.	Estado del arte de los dispositivos fotovoltaicos.....	41
FIGURA 4.2.	Deposición de solución CdS	42
FIGURA 4.3.	Película de CdS depositada sobre sustrato.....	42
FIGURA 4.4.	Película de CdSe depositada sobre sustrato.....	43
FIGURA 4.5.	Película de Ag depositada sobre sustrato.....	43
FIGURA 4.6.	Mufla donde se realiza el horneado	44
FIGURA 4.7.	Celda solar unitaria	44
FIGURA 4.8.	Celda solar unitaria montada en base para mediciones	45
FIGURA 4.9.	Sustratos con depósitos múltiples para construcción de paneles.....	45
FIGURA 4.10.	Paneles montados sobre bases para mediciones.....	45

FIGURA 5.1. Curva de respuesta V vs J obtenida en el diseño teórico de la celda solar unitaria	48
FIGURA 5.2. Estructura esperada para la celda solar unitaria	49
FIGURA A.1. Pantalla de resultados Matlab	60

LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1.	Ventajas y desventajas de las distintas.....	9
TABLA 3.1.	Resultados del estudio de propagación.....	25
TABLA 3.2.	Propiedades del CdS y CdSe.....	27
TABLA 3.3.	Valores de constantes.....	27
TABLA 3.4.	Resultados cálculo de concentraciones, potencial y zona de agotamiento.	31
TABLA 3.5.	Parámetros obtenidos del algoritmo de Gummel	32
TABLA 3.6.	Resumen de datos obtenidos durante el proceso.....	35
TABLA 3.7.	Resultado de la caracterización de desempeño para dispositivo unitario...	37
TABLA 4.1.	Materiales utilizados en la fabricación de las celdas solares	39
TABLA 5.1.	Resultado de la caracterización de desempeño para dispositivo unitario (teórico).....	48
TABLA 5.2.	Resultado de la caracterización de desempeño para dispositivo unitario y múltiple (práctico).....	49
TABLA 5.3.	Comparación de la caracterización de desempeño para dispositivo unitario teórico vs práctico.....	50
TABLA A.1.	Índices de reflexión y coeficientes de extinción ITO	55
TABLA A.2.	Índices de reflexión y coeficientes de extinción CdS.....	56
TABLA A.3.	Índices de reflexión y coeficientes de extinción CdSe	57
TABLA A.4.	Índices de reflexión y coeficientes de extinción Ag.....	58
TABLA A.5.	Índices de Irradiación solar	59

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

Ag	Plata
Al_2O_3	Óxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
CBD	Deposición por baño químico “Chemical bath deposition”
CdS	Sulfuro de Cadmio
CdSe	Seleniuro de Cadmio
CU	Celdas Unitarias
CuGaSe_2	Diseleniuro de galio y cobre
CuInGaSe_2	Diseleniuro de cobre, indio y galio
CuInSe_2	Diseleniuro de indio y cobre
EG	Etilenglicol
Eg	Banda prohibida “Bandgap”
FF	Factor de llenado “Fill factor”
ITO	Óxido de indio y estaño
Jsc	Densidad de corriente a corto circuito
MgO	Óxido de magnesio
MTO	Matriz de transferencia óptica
MW	Mega Watts
Na_2O	Óxido de sodio
η_{power}	Eficiencia de conversión
rpm	Revoluciones por minuto
SiO_2	Óxido de Silicio
TCO	Óxido conductor transparente
Vmax	Voltaje máximo
Voc	Voltaje a circuito abierto
ZnCdS	Sulfuro de cadmio y zinc
ZnO	Óxido de zinc

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presenta de manera detallada el diseño teórico y la implementación práctica de un panel de energía solar a partir de celdas unitarias de tipo Vidrio/ITO/CdS/CdSe/Ag. El diseño teórico está basado en los tres procesos básicos de análisis de celdas solares; el cálculo de la tasa de generación de excitones $G(x)$ utilizando la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica en un solo eje, el cálculo de las concentraciones de carga $n(x)$ y $p(x)$ en las capas activas así como el dimensionamiento de la zona de agotamiento utilizando el algoritmo iterativo de Gummel y la caracterización del desempeño de la celda unitaria mediante el cálculo de la curva de densidad de corriente-voltaje (JV), el voltaje de circuito abierto (Voc), la densidad de corriente de corto circuito (Jsc), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión (η_{power}) utilizando las ecuaciones básicas para dispositivos de unión pn.

La implementación práctica se realizó a través del depósito de múltiples capas sobre un sustrato de vidrio soda-lima con ITO utilizando deposición por rocío en frío y goteo. Otras técnicas de deposición tales como deposición por rocío pirolítico y la deposición por giro fueron probadas, pero ninguna de estas dos técnicas presentó resultados favorables. La técnica de deposición por rocío en frío y goteo que finalmente se utilizó es sencilla, rápida y económica. Esta técnica permite hasta cierta medida controlar el tamaño de las películas depositadas sobre los sustratos. Las mediciones prácticas obtenidas de la celda unitaria implementada tienen una buena correlación con los valores calculados en el diseño teórico si se realiza un ajuste adecuado de las eficiencias de captación de fotones – generación de excitones y generación de excitones – electrones que participan en la generación de corriente.

En el **capítulo uno** se encuentra una descripción general de algunas técnicas utilizadas para el depósito de películas delgadas. Las técnicas descritas son: deposición por baño químico, electrodeposición, deposición por giro y deposición por rocío pirolítico.

En el **capítulo dos** se describe la justificación para la realización de este trabajo de tesis, la descripción del objetivo general, los objetivos específicos y la hipótesis planteada.

En el **capítulo tres** se describe detalladamente el proceso que se llevó a cabo para el diseño teórico de una CU solar, desde la selección de los materiales hasta el cálculo de sus características de desempeño como Voc , Jsc , FF , η_{power} , etc. Las técnicas de diseño utilizadas son: análisis de propagación de campos electromagnético-óptico en estructuras multicapa, cálculo de concentración de cargas, potencial electrostático y dimensionamiento de la zona de agotamiento mediante la autoconsistencia en la solución de las ecuaciones de Poisson – continuidad y algoritmo iterativo de Gummel.

En el **capítulo cuatro** se puede encontrar el proceso completo de la fabricación de las CU solares y de los paneles que estas pueden formar. Se describe el proceso de

deposición de cada una de las películas así como el proceso de recocido o “*annealing*” por el que los sustratos con películas deben pasar antes de ser montados sobre las bases, para caracterizar la eficiencia del desempeño.

En el **capítulo cinco** se analizan los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo mediante una comparación entre los valores teóricos que se reportaron en el capítulo tres y los valores de las mediciones realizadas con las celdas fabricadas en el capítulo cuatro.

En el **capítulo seis** se describen las principales conclusiones obtenidas durante y después de la realización de este trabajo de tesis, así como el planteo de trabajos futuros que complementarían o mejorarían los logros obtenidos.

ABSTRACT

In this thesis, the theoretical design and practical implementation of a solar energy panel from unit cells of Glass / ITO / CdS / CdSe / Ag type is presented in detail. The theoretical design is based on the three basic processes of solar cell analysis; the calculation of the generation rate of excitons $G(x)$ using the technique of the linear matrix of optical transfer in a single axis, the calculation of the concentrations of electrons $n(x)$ and protons $p(x)$ in the active layers as well as the sizing of the depletion zone using the Gummel iterative algorithm and the characterization of the unitary solar cell performance by calculating the current-voltage density curve (JV), the open circuit voltage (Voc), the short circuit current density (Jsc), fill factor (FF) and conversion efficiency (n_{power}) using the basic equations for pn junction devices.

The practical implementation was carried out through the deposit of multiple layers on a soda-lime glass substrate with ITO using cold spray deposition and dripping. Other deposition techniques such as pyrolytic spray deposition and spin coating were tested, but neither of these techniques showed favorable results. The cold spray deposition and dripping technique that was used in the end resulted in a simple, fast and economical process. This technique allows to a certain extent the control of the size of the films deposited on the substrates. The practical measurements obtained from the unit cell implemented have a good correlation with the values calculated in the theoretical design if an adequate adjustment is made of the efficiencies of photon capture - generation of excitons and generation of excitons - electrons that participate in the generation of current.

In **chapter one** you will find a general description of some techniques used for thin films deposition. The techniques described are: chemical bath deposition, electrodeposition, spin coating and spray pyrolysis deposition.

Chapter two it's about thesis justification, description of the general objective, specific objectives and proposed hypothesis.

Chapter three describes the process carried out for the theoretical design of a unitary solar cell, from the materials selection to the calculation of its performance characteristics such as Voc, Jsc, FF, n_{power} , etc. The design techniques used in this work are: analysis of propagation of electromagnetic-optical fields in multilayer structures, calculation of the concentration of charges, electrostatic potential and dimensioning of the depletion zone through self-consistency in the solution of the Poisson equations - continuity and iterative algorithm of Gummel.

In **chapter four** you can find the manufacture process of unitary solar cells and solar panels they can form. It describes the deposition process of each of the films as well

as the annealing process by which the substrates with films must pass before they can be mounted on the bases to perform the measurements of the performance characteristics.

In **chapter five**, the results obtained during this work are analyzed by means of a comparison between the theoretical values reported in chapter three and the values of the measurements made with the cells manufactured in chapter four.

Chapter six describes the conclusions reached after the completion of this thesis work, as well as the proposition of future works that could complement or improve the achievements obtained.

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABLAS	v
ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	vi
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
Capítulo 1 MARCO TEÓRICO	1
1.2 Técnicas de deposición de películas delgadas	4
1.2.1 Deposición por baño químico.....	4
1.2.2 Electrodeposición	5
1.2.3 Deposición por giro	5
1.2.4 Deposición por rocío pirolítico	6
Capítulo 2 INTRODUCCIÓN	8
2.1 Justificación de problema	8
2.2 Objetivos del proyecto	9
2.2.1 Objetivo general	9
2.2.2 Objetivos específicos	10
2.3 Hipótesis.....	10
Capítulo 3 DISEÑO TEÓRICO	12
3.1 Diseño teórico de la celda solar unitaria.....	12
3.1.1 Estructura básica de la celda solar unitaria.....	12
3.1.2 Selección del sistema de materiales (material ventana y capa activa).....	13
3.1.3 Análisis de propagación del campo electromagnéticos óptico en la estructura multicapa	17
3.1.4 Cálculo de concentración de cargas, potencial electroestático y dimensionamiento de la zona de agotamiento.....	26
3.1.5 Cálculo de las características de desempeño.....	32
Capítulo 4 IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DE CELDA SOLAR UNITARIA	39
4.1 Materiales utilizados en la fabricación de celdas solares	39
4.2 Deposición de película de CdS	41
4.3 Deposición de película de CdSe	42
4.4 Deposición de película de Ag	43
4.5 Horneado del conjunto de películas ITO/CdS/CdSe/Ag.....	44
Capítulo 5 RESULTADOS OBTENIDOS	47
5.1 Resumen de los resultados obtenidos en el diseño teórico	47

5.2 Resumen de los resultados obtenidos en la implementación práctica	49
5.3 Correlación entre los resultados teóricos y los resultados prácticos	49
Capítulo 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	51
6.1 Conclusiones.....	51
6.2 Trabajo futuro	52
REFERENCIAS.....	53
ANEXOS	55

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

Las energías renovables han tomado un gran impulso durante los últimos años, volviéndose una herramienta indispensable en la lucha contra el cambio climático y el reemplazo para los combustibles fósiles que día a día disminuyen con alarmante velocidad. La energía limpia ha obtenido un gran respaldo internacional a través del “Acuerdo de París” que entrará en vigor a partir del 2020. En este acuerdo, casi los 200 países que lo forman se comprometen a disminuir sus emisiones de contaminantes para reducir el efecto de estos en el medio ambiente.

De entre todas las energías renovables, una de las más importantes es la energía solar, se estima que cada hora, el sol lanza a la Tierra más energía que la necesaria para satisfacer las necesidades mundiales de energía durante un año [1]. Una manera de aprovechar esta energía es mediante el uso celdas solares. Las celdas solares son dispositivos que aprovechan la energía solar convirtiéndola en energía eléctrica ya sea vía efecto fotovoltaico o mediante la conversión de la energía solar a calor. La mayor parte de las celdas solares utilizan como principio básico de operación el efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico es el encargado de transformar la luz solar en energía eléctrica. Este fue descubierto en 1839 por el científico francés Alexandre Edmond Becquerel, quien durante uno de sus experimentos notó que se producía voltaje y corriente cuando un electrodo de plata que se encontraba sumergido en una sustancia electrolítica era iluminado [2]. En 1883, el inventor estadounidense Charles Fritts construyó la primera celda solar funcional con una eficiencia del 1% al recubrir selenio con una capa muy delgada de oro, pero fue hasta 1939 que el ingeniero estadounidense Russell Ohl descubrió la unión pn que lo llevaría a la fabricación de la celda solar de silicón y por lo tanto, a patentar la primera celda solar moderna en 1946.

Los problemas actuales de las celdas solares es su dependencia de la hora del día/condiciones del clima y sus altos costos de construcción/mantenimiento. A pesar de esto, países como Estados Unidos, Japón y Alemania han decidido invertir en esta y mediante el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales, han logrado la reducción de costos y el aumento de la eficiencia de las celdas. En México, la energía solar fotovoltaica ha tenido un crecimiento más rápido en comparación a las otras energías renovables con las que cuenta. La Secretaría de Energía (SENER) publicó un reporte de avance en el cumplimiento de las metas de generación de electricidad a partir de energías limpias, donde se menciona que para junio del 2016 existía un crecimiento de 100 MW en la capacidad instalada para generación fotovoltaica y se espera que para el 2019 se puedan adicionar 5400 MW (20 veces la capacidad actual) [3].

Una celda solar se encuentra formada por dos tipos de semiconductores, un semiconductor tipo p y un semiconductor tipo n, estos forman una unión pn. La unión pn crea un campo eléctrico permanente en la unión mientras que los electrones y huecos se mueven hacia los extremos opuestos del material (electrones hacia el lado p y huecos hacia el lado n). Existen tres tipos básicos de celdas solares:

1.-La primera, denominada celdas fotovoltaicas, como fue mencionado anteriormente, estas generan energía eléctrica a partir de la luz que incide directamente sobre ellas mediante el efecto fotovoltaico.

2.-La segunda, denominada celdas fototérmicas, convierten la luz solar en calor y lo transfieren a un fluido de trabajo.

3.-La tercera, denominada celdas termodinámicas, es un sistema que aprovecha el calor, ya sea del sol, aire o de la lluvia para calentar agua.

De estos tres tipos básicos de celdas solares las celdas fotovoltaicas se clasifican en celdas orgánicas (fabricadas con material orgánico) de estructura convencional o estructura invertida, y las celdas inorgánicas (fabricadas con material inorgánico) de silicio, compuestas o heteroestructuradas (con o sin pozos cuánticos, multiunión TANDEM). La Figura 1.1 muestra, desde el año 1975 hasta predicciones echas al año 2020, la eficiencia de conversión lograda en celdas solares con diferentes materiales y tipos de estructuras. Se puede observar que las mayores eficiencias han sido logradas por celdas solares desarrolladas con materiales inorgánicos.

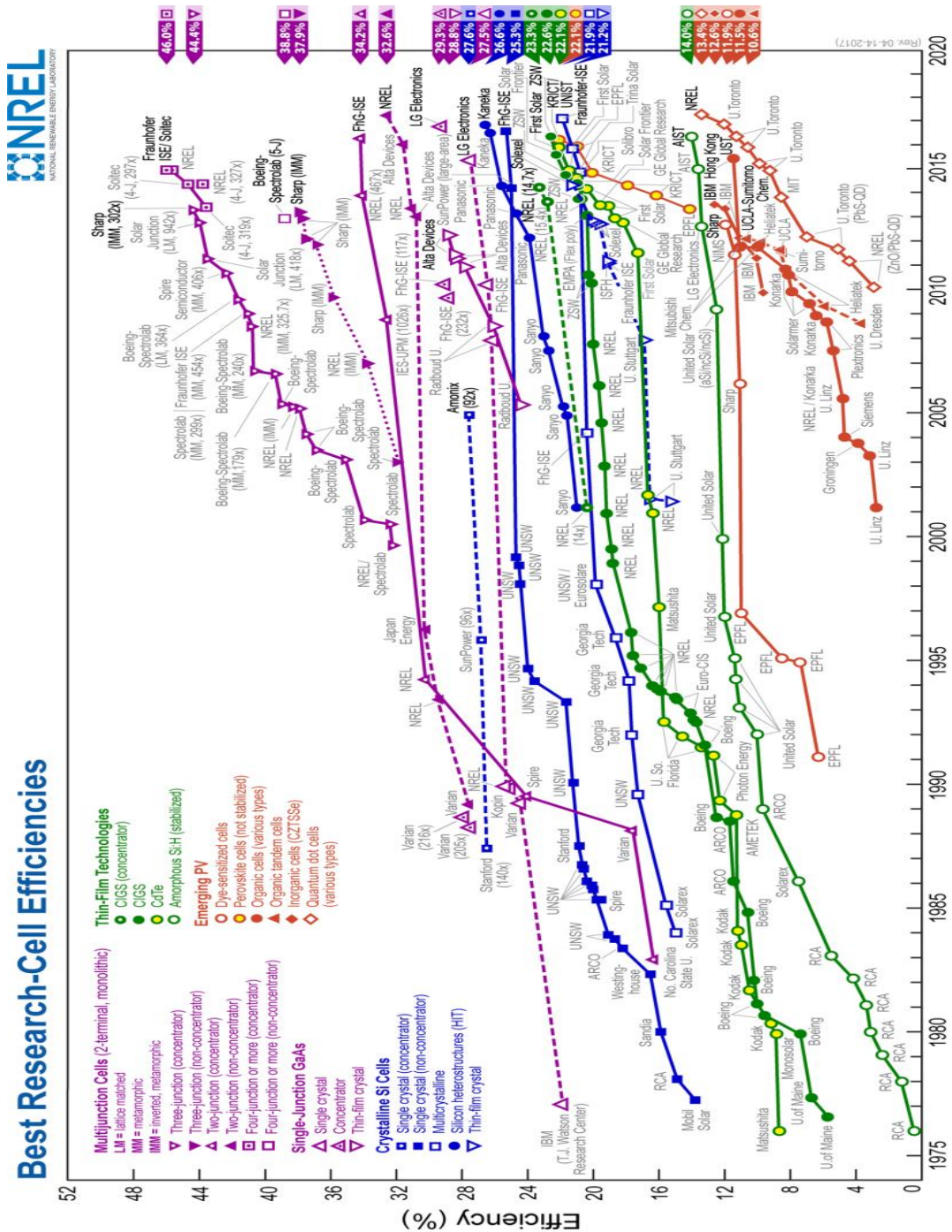


Figura 1.1. Estado del arte de los dispositivos fotovoltaicos. [11]

Este trabajo de tesis está enfocado a establecer las bases teórico – prácticas, en el laboratorio de Física Aplicada del Instituto de Ingeniería perteneciente a la Universidad Autónoma de Baja California, para el desarrollo de celdas solares inorgánicas basadas en el sistema de materiales CdS y CdSe.

1.2 Técnicas de deposición de películas delgadas

Para llevar a cabo la fabricación de una celda solar, es necesario conocer primero los materiales con los que se va a fabricar, el tipo de proceso y el tiempo de elaboración que dependerán de las características específicas de cada material. Existe un gran número de compuesto binarios de los grupos II-V, II-VI, III-VI, así como diversos ternarios que proveen numerosas alternativas de selección de materiales que satisfacen los requerimientos para la fabricación de celdas solares. Entre los materiales absorbedores poli cristalinos que más se han utilizado recientemente están los compuestos de los grupos II-VI, donde el binario CdTe aparece como uno de los más prometedores. Dentro de los compuestos de los grupos III-VI que más se utilizan destaca el CuIn_xSe_2 , el CuGaSe_2 , el $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{Se}_2$, el CuInS_2 y el $\text{CuIn}_x\text{Ga}_{(1-x)}[\text{S}_y\text{Se}_{(1-y)}]_2$. Para estos absorbedores, los compuestos más utilizados como capa ventana son el CdS, $\text{Zn}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{S}$, ZnO, ZnO/CdS, ZnO/ $\text{Zn}_x\text{Cd}_{(1-x)}\text{S}$ [4].

En este trabajo de tesis, se ha decidido utilizar los compuestos Sulfuro de Cadmio (CdS) y Seleniuro de Cadmio (CdSe) como principales materiales en la fabricación de las películas que componen la capa activa de la celda. La heterounión CdS/CdSe es considerada ideal para este propósito debido a que el semiconductor CdS tipo n contiene una banda prohibida de 2.52 eV lo que lo convierte en un excelente material ventana, ya que permite a la capa absorbidora alcanzar gran parte del espectro solar. De igual manera, los semiconductores CdSe tipo p poseen una banda prohibida directa de 1.43 eV, que lo convierte en material ideal para fabricar las capas activas de absorción en celdas solares y fotodetectores [5]. Dentro de las técnicas más comunes para deposición de películas delgadas de CdS/CdSe se encuentran: deposición por baño químico (CBD, "Chemical Bath Deposition"), electrodeposición, deposición por centrifugado o giro y la deposición por rocío pirolítico/ en frío.

1.2.1 Deposición por baño químico

La CBD consiste básicamente en una serie de reacciones químicas que se llevan a cabo sobre un sustrato sólido sumergido en la mezcla de reacción, que típicamente contiene soluciones acuosas diluidas [5, 6]. Los compuestos iónicos cuando se disuelven en agua se disocian en sus iones correspondientes, de manera que en la solución los iones metálicos se encuentran libres. Un agente acomplejante puede ser un compuesto orgánico y tiene la función de atrapar a los iones metálicos en la mezcla de reacción y liberarlos lentamente. Los agentes acomplejantes se usan para la liberación lenta de los iones metálicos en la mezcla de reacción sus compuestos depositados son altamente insolubles. Otro factor que se debe considerar en la CBD es la disponibilidad de núcleos sobre la superficie del sustrato; para que ocurra la reacción en la superficie del sólido, éste debe de contener núcleos.

Los núcleos se forman cuando especies metal-hidroxilo se absorben en la superficie y se combinan con otras especies adsorbidas formando pequeños aglomerados, proceso al cual se le llama nucleación. Los grupos hidroxilo se sustituyen por iones sulfuro o seleniuro formando una capa inicial de metal-calcógeno. La deposición de la película ocurre por la condensación de iones metálicos y calcógenos sobre esta capa inicial. La composición, estructura y morfología de las películas depositadas por baño químico son altamente sensibles a las condiciones de deposición tales como las condiciones del propio baño, temperatura y naturaleza del sustrato.

1.2.2 Electrodeposición

La electrodeposición es la aplicación de un recubrimiento de metal a una superficie metálica u otra superficie conductora mediante un proceso electroquímico. La pieza que va a ser recubierta se convierte en el cátodo (electrodo negativo) de una celda de electrólisis a través de la cual se transmite una corriente directa. La pieza se sumerge en una solución acuosa que contiene el metal con el que se quiere realizar el recubrimiento en una forma oxidada, ya sea como un catión acuoso o como un ion complejo. El ánodo generalmente es una barra del metal que se recubre. Durante la electrólisis, el metal se deposita en la pieza y el metal de la barra se disuelve. Las leyes de electrólisis de Faraday rigen la cantidad de metal depositado. Las piezas pueden ser recubiertas ya sea para alterar su apariencia, proveer una película protectora, mejorar sus características en la superficie y/o darle propiedades mecánicas [7].

1.2.3 Deposición por giro

La deposición por giro o “Spin-Coating” consiste en depositar una pequeña solución de una resina fluida en el centro de un sustrato, y posteriormente hacer girar el sustrato a gran velocidad (típicamente alrededor de 3000 rpm) tal como se muestra en la Figura 1.2. La aceleración centrípeta dará lugar a que la resina se extienda, hasta el borde del sustrato, dejando una película delgada de resina en la superficie. El espesor final de la película y otras características dependerán de la naturaleza de la resina (la viscosidad, tasa de secado, porcentaje de sólido, la tensión superficial, etc.) y los parámetros escogidos para el proceso de giro (“Spin”). Los factores como la velocidad giratoria final, aceleración y la evaporación de la solución también contribuyen a las propiedades de la película depositada. Uno de los factores más importantes de esta técnica es la habilidad de repetición.

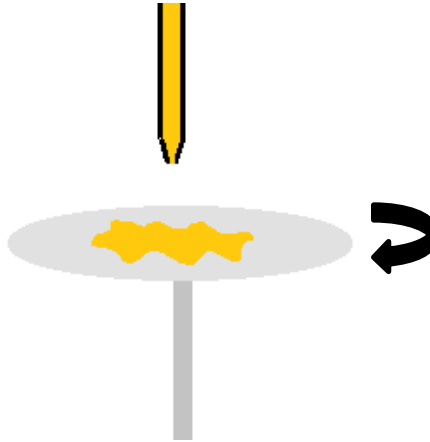


Figura 1.2. Esquema del proceso de deposición por giro (Spin Coating).

1.2.4 Deposición por rocío pirolítico

Para realizar el procedimiento de rocío pirolítico es necesario de un atomizador, la solución que se desea depositar, el sustrato en el que se va a depositar y una placa o superficie calefactora a la cual se le pueda controlar la temperatura. Tal como se muestra en la Figura 1.3, el sustrato es colocado sobre la superficie calefactora a la cual se le regula a cierta temperatura, mientras que la solución que fue vertida dentro de un depósito es rociada sobre este. Los atomizadores pueden generar variaciones en los resultados de las películas debido al tamaño de la gota de la solución, la distancia a la que se realiza el rocío y a la velocidad inicial con la que la solución sale del atomizador.

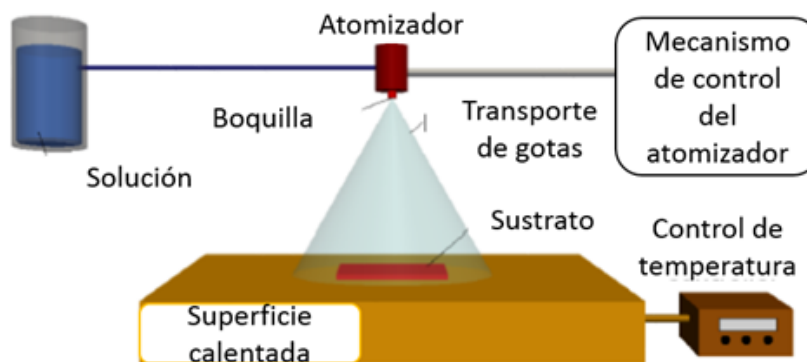


Figura 1.3. Modelo básico para el procedimiento de deposición por rocío pirolítico [8].

Las características y propiedades de las películas depositadas con esta técnica dependerán de la solución (composición) y la temperatura (tanto del sustrato al momento

de la deposición como la del medio ambiente durante esta y durante el secado). El espesor de la película en cambio depende de la distancia a la que se deposita la solución, la concentración y cantidad de solución que es depositada así como la temperatura a la que se encuentra el sustrato durante el proceso. Para la formación de la película, se toma en consideración la evaporación del solvente en el momento que se realiza el rocío de la solución sobre el sustrato. Idealmente todo el solvente es removido de la solución, ya sea por evaporación o consumo, dejando atrás solo el compuesto que forma la solución, permitiendo una buena composición [9].

El rocío pirolítico es una técnica muy versátil y ha sido utilizada para la producción de capas delgadas y gruesas, revestimientos cerámicos y polvos, incluso puede ser usada para la producción de películas multicapas. Es relativamente económica en comparación a las demás técnicas de deposición, especialmente lo referente al equipo requerido ya que no se necesitan químicos o soluciones de muy alta pureza. Existen versiones de esta técnica donde no se utiliza una placa calefactora durante la deposición de las películas, a esta versión deposición se le llama deposición por rocío en frío [10]. Algunas de las ventajas de la deposición por rocío pirolítico/en frío son los bajos costos y facilidad de ejecución, se puede trabajar con los sustratos sin importar la forma que estos puedan tener, las películas depositadas de esta forma suelen tener películas uniformes y de alta calidad y no se requieren de altas temperaturas para trabajar.

Capítulo 2

INTRODUCCIÓN

2.1 Justificación de problema

El incesante deseo de lograr un manejo conveniente y un adecuado uso de la energía proveniente del Sol que permita satisfacer los requerimientos de demanda energética, ha impulsado durante los últimos años importantes proyectos de desarrollo científico y técnico. Hasta ahora se han mantenido dos vertientes fundamentales para la utilización del recurso solar: la conversión fototérmica y la fotovoltaica. En especial la fotovoltaica es sumamente atractiva para el estado de Baja California, esto es debido a que la ciudad de Mexicali se distingue por ser una de las ciudades del país con más captación de irradiación solar, este hecho la convierte en un laboratorio natural para el estudio, prueba y desarrollo de dispositivos fotovoltaicos. Por tal motivo, el laboratorio de Física Aplicada del Instituto de Ingeniería perteneciente a la Universidad Autónoma de Baja California ubicado en la ciudad de Mexicali en los últimos años ha impulsado el desarrollo de proyectos enfocados a la elaboración de algoritmos de diseño así como implementaciones prácticas de dispositivos fotovoltaicos con material orgánico e inorgánico. Uno de los objetivos es identificar y utilizar técnicas sencillas y económicas para la fabricación de celdas solares.

En la búsqueda de la técnica de deposición más rápida y sencilla para la fabricación de una celda solar, se han analizado diferentes opciones que se encuentran a nuestra disposición en la Tabla 2.1 muestran las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Dentro de estas técnicas se encontró que la deposición por rocío es una técnica sencilla de bajos costos, de facilidad de ejecución, en la cual no importa la forma del sustrato, se pueden depositar películas uniformes de alta calidad y no requiere de altas temperaturas. Por tal motivo en este trabajo de tesis se plantea la realización del diseño teórico de celdas con estructura Vidrio/ITO/CdS/CdSe/Ag. El diseño teórico estará basado en los tres procesos básicos de análisis de celdas solares; el cálculo de la tasa de generación de excitones $G(x)$, el cálculo de las concentraciones de carga $n(x)$ y $p(x)$ en las capas activas así como el dimensionamiento de la zona de agotamiento y la caracterización del desempeño de la celda mediante el cálculo de la curva de densidad de corriente-voltaje (JV). Por otro lado, debido a que los dispositivos fotovoltaicos a fabricar estarán formados por varias capas de material semiconductor crecidas sobre un sustrato de vidrio soda-lima, se plantea utilizar para el depósito de las películas delgadas la técnica de depósito por rocío en frío y goteo.

Tabla 2.1. Ventajas y desventajas de las distintas.

Técnica	Ventajas	Desventajas
Baño Químico	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicidad • Equipo barato • Puede cubrir superficies grandes 	<ul style="list-style-type: none"> • Desperdicio de material • Selección del sustrato se encuentra restringida • No puede utilizarse para depositar películas gruesas
Electrodeposición	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidad de crecimiento • Bajo Costo • Recubre todas las partes conductores del sustrato adaptándose a su forma 	<ul style="list-style-type: none"> • Dificultad de creación de películas uniformes en superficies no lisas
Deposición por giro	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso rápido y sencillo • Muy pocos parámetros a controlar • Se adapta a otros procesos • Bajos costos 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño de sustrato deber ser proporcional al tamaño de la maquina • Uso ineficiente del material depositado
Deposición por rocío	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos costos • Facilidad de ejecución • No importa la forma del sustrato • Suelen ser películas uniformes • Alta calidad de las películas • No requiere de altas temperaturas 	<ul style="list-style-type: none"> • Desperdicio de material • Necesidad de equipo de protección de mayor nivel debido a partículas que pueden viajar en el aire

2.2 Objetivos del proyecto

2.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de tesis es diseñar e implementar un panel de generación de energía eléctrica a partir de las celdas unitarias de unión pn de CdS/CdSe, donde la deposición de las películas delgadas se realice utilizando la técnica de deposición por spray en frío y goteo.

2.2.2 Objetivos específicos

Para el logro del objetivo general de este trabajo de tesis se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Calcular de manera teórica la tasa de generación de excitones $G(x)$ en el dispositivo Vidrio/ITO/CdS/CdSe/Ag utilizando la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica en un solo eje.
2. Calcular las concentraciones de carga $n(x)$ y $p(x)$ y las dimensiones de la zona de agotamiento en las capas activas del dispositivo a través del cálculo de auto consistencia entre la ecuación de Poisson y las ecuaciones de continuidad de cargas (algoritmo iterativo de Gummel).
3. Calcular de manera teórica los parámetros que caracterizan el desempeño del dispositivo, para una irradiación solar promedio de 100 mW/cm^2 (estándar AM 1.5G), mediante el cálculo de la curva de densidad de corriente-voltaje (JV), el voltaje de circuito abierto (Voc), la densidad de corriente de corto circuito (Jsc), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión (n_{power}) utilizando las ecuaciones básicas para dispositivos de unión pn.
4. Implementar de manera práctica sobre un sustrato de vidrio soda-lima el dispositivo con estructura Vidrio/ITO/CdS/CdSe/Ag utilizando deposición por rocío en frío y goteo.
5. Medir de manera práctica los parámetros que caracterizan del desempeño del dispositivo implementado (la curva JV , el Voc , la Jsc , el FF y la n_{power}).
6. Realizar la correlación teórica-práctica de la curva JV , el Voc , la Jsc , el FF , y la n_{power} obtenidas en el diseño teórico con las obtenidas en las mediciones prácticas.
7. Calcular de manera teórica el porcentaje en la tasa de generación de excitones que ajuste la eficiencia obtenida de manera teórica con la medida de la implementación práctica.

2.3 Hipótesis

La técnica de la matriz lineal de transferencia óptica puede ser utilizada para analizar la propagación y disipación del campo eléctrico óptico en un apilado de capas de diferentes materiales, la solución de auto consistencia entre la ecuación de Poisson y las ecuaciones de continuidad de cargas puede ser utilizada para calcular las concentraciones de carga $n(x)$ y $p(x)$ en la capa activa de estructura multicapa absorbidora de fotones y las ecuaciones básicas para caracterizar el desempeño de dispositivos de unión pn pueden ser utilizadas para caracterizar los parámetros que son base para el cálculo de eficiencias de conversión en dispositivos detectores de luz. Adicionalmente, la técnica de deposición por rocío en frío y goteo son técnicas sencillas y económicas que han demostrado su gran

utilidad para el depósito de películas delgadas de material orgánico en sustrato de vidrio soda-lima.

Por tal motivo, la hipótesis de este trabajo de tesis se establece de la siguiente manera; utilizando la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica, la solución auto consistencia entre la ecuación de Poisson y las ecuaciones de continuidad de cargas, las ecuaciones básicas para caracterizar el desempeño de dispositivos de unión pn así como la técnica de deposición por rocío en frío y goteo se pueden diseñar teóricamente e implementar prácticamente dispositivos fotovoltaicos con estructura de tipo Vidrio/ITO/CdS/CdSe/Ag que den una correlación cercana entre las características de desempeño obtenidas en el diseño teórico y las medidas de la implementación prácticas.

Capítulo 3

DISEÑO TEÓRICO

3.1 Diseño teórico de la celda solar unitaria

Una CU solar es la unidad básica más pequeña de diseño. Es básicamente un fotodiodo formado por una unión pn entre dos contactos metálicos que sirven como electrodos de conexión a la carga. Utilizando múltiples celdas solares unitarias se establecen conexiones en serie y paralelo para satisfacer una demanda de corriente y voltaje de diseño. En este capítulo se describe el procedimiento realizado para el diseño teórico de la CU, así como el procedimiento para el diseño de un panel de 3x2 CU.

3.1.1 Estructura básica de la celda solar unitaria

La Figura 3.1 muestra la estructura básica de la CU solar diseñada.

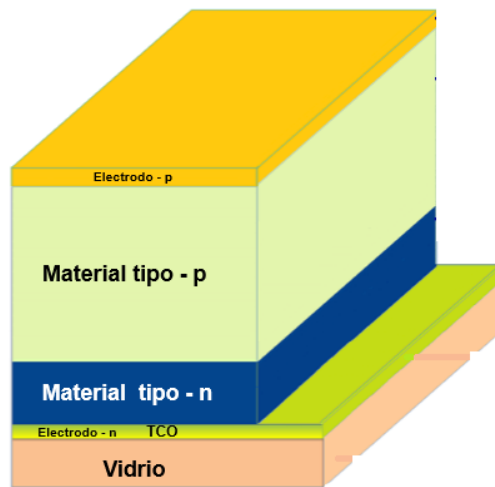


Figura 3.1 Estructura básica de la celda unitaria diseñada.

La estructura consiste (vista de abajo hacia arriba) de un sustrato de vidrio soda-lima, una capa de óxido conductor transparente (TCO) llamado electrodo tipo n, una capa de material semiconductor tipo n, una capa de material semiconductor tipo p y una capa de material metálico llamado electrodo tipo p.

El sustrato de vidrio soda-lima, también conocido como vidrio común, es muy utilizado para la fabricación de celdas solares gracias a su gran transparencia al espectro de irradiación solar y su bajo costo en producciones masivas. Este vidrio está elaborado con la mezcla de 73% de SiO₂, el 14% de NaO, el 7% de CaO, el 4% de MgO y el 2% de Al₂O₃. Su función es servir como soporte mecánico de la celda haciendo la función de sustrato de anclaje. El electrodo tipo n TCO (Óxido Conductor Transparente) tiene la

función de servir como contacto frontal de la celda sin atenuar la irradiación solar que la impacta. El material tipo n también llamado material ventana es uno de los dos materiales que forman la región activa de la unión pn de la celda. Su función principal es formar parte de la unión pn sin atenuar o absorber demasiado la irradiación solar que lo atraviesa permitiendo que esta llegue en su mayoría a la capa activa principal. Es por esto que se le llama material ventana. El material tipo p también llamado capa activa es el segundo material que forma parte de la unión pn de la celda. Este material tiene la función principal de absorber la mayoría de los fotones provenientes en la irradiación solar generando los excitones (par electrón-hueco) que participarán en la generación de la corriente. Por último, el electrodo tipo p tiene la función de servir como contacto trasero de la celda el cual se conecta directamente a la carga asignada.

3.1.2 Selección del sistema de materiales (material ventana y capa Activa)

Uno de los puntos más importantes al realizar el diseño de una CU solar es la selección de los materiales. Los materiales seleccionados deben de cumplir con los requisitos de diseño. Dentro de los requisitos de diseño más importantes para la selección de los materiales se encuentra el espectro de irradiación incidente, la potencia promedio incidente, así como la factibilidad de que los materiales seleccionados formen heterouniones de tipo pn.

En este trabajo de tesis, se establecieron como requisitos de diseño un espectro de irradiación incidente que va de 350nm a 800nm, una potencia promedio incidente de 900 W/m² (estándar AM1.5 Global), así como la formación de heterouniones de tipo pn. Para la selección del material se utilizó como referencia la carta gráfica del espectro de aplicación fotónica (Figura 3.2). En esta gráfica se muestran tres bloques principales, el bloque superior muestra los sistemas de materiales más utilizados para la fabricación de láseres asociados a la longitud de onda de emisión, el bloque del medio muestra los sistemas de materiales más utilizados para la fabricación de fotodetectores asociados a la longitud de onda de absorción, y el bloque inferior muestra los sistemas de materiales más utilizados para la fabricación de componentes ópticos (lentes, prismas etc.) asociados a la longitud de onda de manipulación. El rango de longitudes de onda asociadas para los tres bloques va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo.

Para nuestro interés, la Figura 3.3 es una expansión del bloque intermedio de la carta de aplicación fotónica incluyendo las longitudes de onda desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. En esta expansión podemos observar que varios sistemas de materiales satisfacen el requisito de absorción en el rango de 350 nm a 800 nm, pero de estos seleccionamos el material CdS (Sulfuro de Cadmio) debido a que es un material semiconductor tipo n con una banda prohibida de 2.42 eV lo que lo vuelve un excelente material “ventana” que permite gran parte del espectro solar alcanzar una siguiente capa.

Al ser un material que puede ser sintetizado a partir de una base polimérica lo convierte en un material fácil de depositar usando técnicas económicas tales como deposición por centrifugado o esprayado en frío. Para seleccionar un material adecuado para formar una heterounión de tipo pn utilizamos la gráfica de la Figura 3.4. Esta gráfica muestra para los materiales semiconductores de los grupos III-V y II-VI de la tabla periódica, la relación existente entre el ancho de zona prohibida (Energía del Gap, E_g), la constante o parámetro de red "a" y la longitud de onda de absorción o emisión. De esta gráfica se puede observar que el CdS tiene la posibilidad de formar una heterounión tanto con el CdSe (Seleniuro de Cadmio) como con el CdTe (Telurio de Cadmio). De estos dos compuestos el que tiene una constante de red más cercana al CdS es el CdSe por lo que al formar una heterounión entre estos dos compuestos, existirían uniones con menor estrés de red y por ende mejor características de transporte de cargas.

Adicionalmente, el CdSe es un compuesto semiconductor tipo p con una banda prohibida de 1.74 eV lo cual lo vuelve un buen candidato para la fabricación de la capa activa de una unión pn, tal capa activa se encargará de mayoritariamente absorber los fotones en la celda solar. Por lo tanto, el sistema seleccionado de materiales para la unión será CdS/CdSe (ventana-capa activa). Para el caso del electrodo tipo n se seleccionó óxido de Indio-Estaño comúnmente llamado ITO. Este ha sido el líder del mercado por décadas, gracias a su transparencia óptica, conductibilidad y estabilidad. Por otra parte, para este trabajo de investigación fue posible obtener el combo vidrio soda-lima recubierto con ITO, lo que facilitó la parte del proceso de fabricación. Por último, para el electrodo tipo p se seleccionó la plata (Ag) por ser un metal que se puede encontrar de forma comercial para ser depositado en frío con buena adherencia. Finalmente la estructura de la celda a diseñar es de tipo Vidrio soda-Lima/ITO/CdS/CdSe/Ag tal como se muestra en la Figura 3.5.

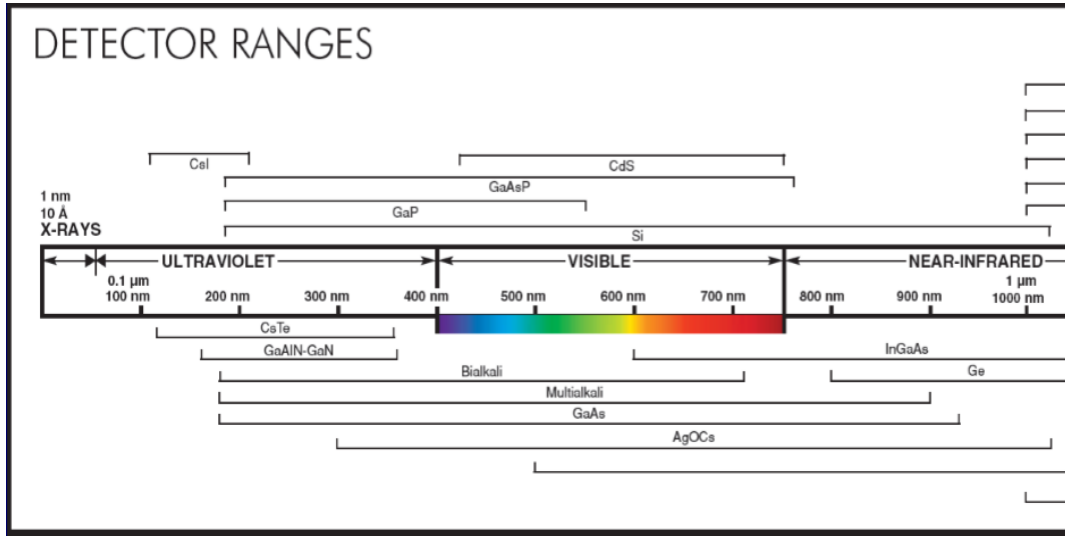


Figura 3.3. Sistemas de materiales más utilizados para fabricar de fotodetectores asociados a la longitud de onda de absorción.

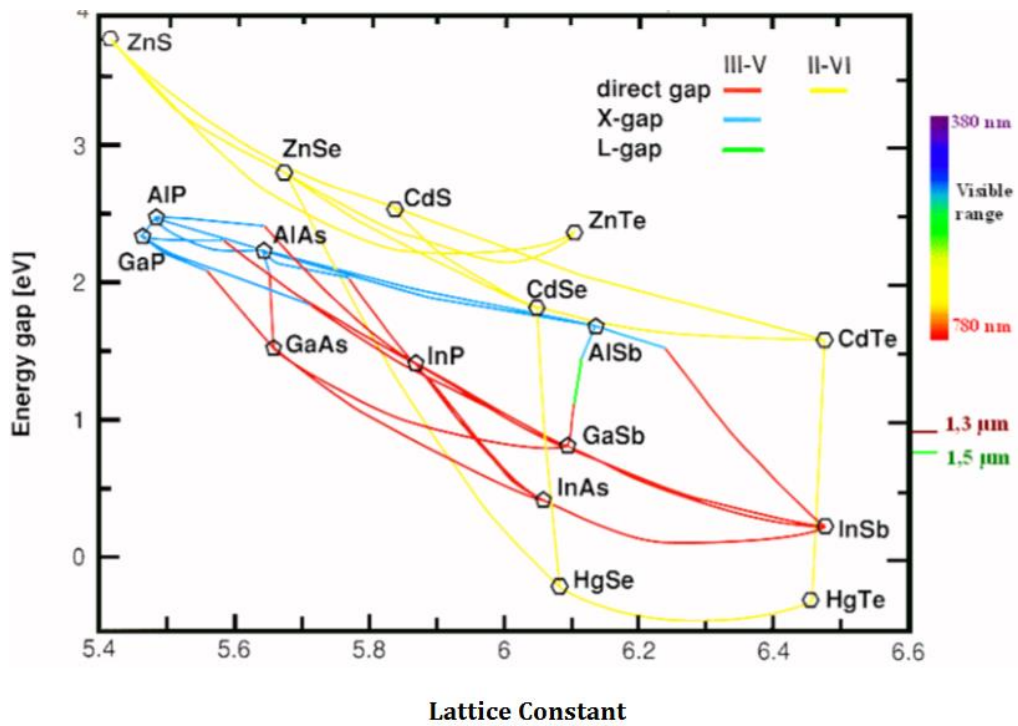


Figura 3.4. Energía del Gap, E_g , y parámetro de la red "a" para varias aleaciones de los grupos II-IV y III-V de la tabla periódica.

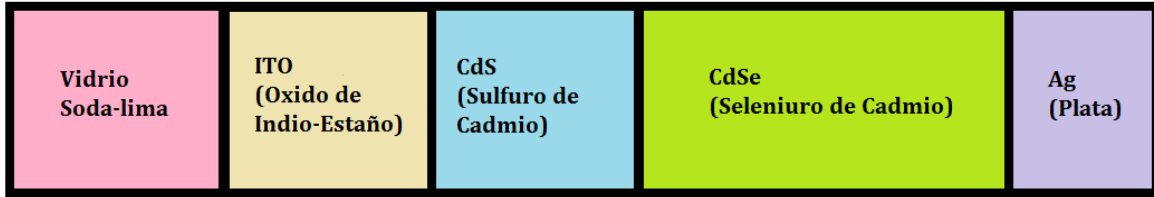


Figura 3.5. Estructura de celda solar unitaria a diseñar.

3.1.3 Análisis de propagación del campo electromagnético-óptico en la estructura multicapa.

Para analizar la propagación del campo electromagnético-óptico en la estructura multicapa propuesta para el diseño de la CU utilizamos el método de la Matriz de Transferencia Óptica (MTO). Este método suele ser utilizado en las áreas de óptica y acústica para estudiar la propagación de campos electromagnéticos y ondas acústicas respectivamente en estructuras multicapa. También está basado en los coeficientes complejos de transmisión y reflexión de Fresnel. Estos coeficientes describen los fenómenos de transmisión y reflexión de la luz en un determinado punto de la interface entre dos medios. En el método MTO se utilizan los coeficientes de Fresnel para formar matrices (asumiendo que los procesos ocurridos en la propagación son lineales) en las cuales se considera que una parte de la onda de la luz es transmitida hacia el otro medio mientras que otra parte es reflejada tal como se muestra en la Figura 3.6.

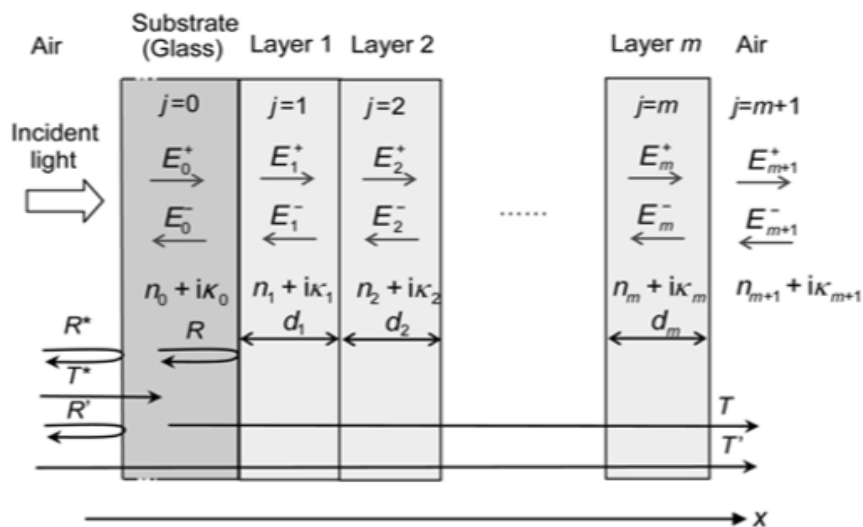


Figura 3.6. Geometría de una estructura multicapa típica.

Supongamos que tenemos una estructura multicapa como la que se muestra en la Figura 3.6, en esta se puede observar como cada una de las capas se encuentra descrita por su índice de refracción complejo, $\tilde{n} = n + ik$, donde n representa al índice de refracción y k el coeficiente de extinción. Ambos valores dependen tanto de la longitud de onda (λ)

como el grosor de la capa de CdSe. De igual manera se puede observar como la luz incidente entra por el lado izquierdo de la estructura a lo largo de la dirección del eje x y es reflejada justo en las interfaces dentro del dispositivo, formando una onda de luz en dirección opuesta a la original. Estas dos ondas de luz son descritas con un signo positivo y un signo negativo respectivamente. Por ejemplo, en determinada posición x para la capa j el campo eléctrico esta descrito por $E^+(x)$ y $E^-(x)$. La propagación de luz entre las capas j y k está dada por la matriz:

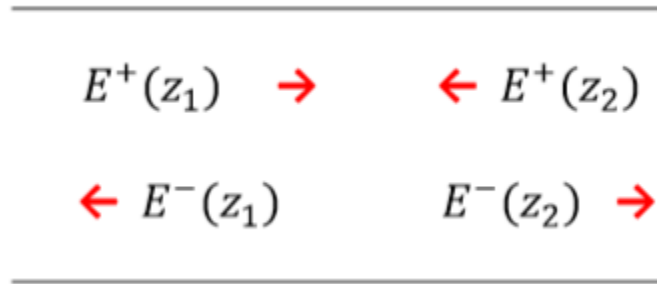
$$I = \frac{1}{t_j} * \begin{bmatrix} 1 & r_j \\ r_j & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Dónde:

$$r_{ij} = \frac{(n_2 - n_1)}{(n_2 + n_1)} \quad (2)$$

$$t_{ij} = 1 + r_j \quad (3)$$

Las ecuaciones 2 y 3 son los coeficientes de reflexión y transmisión complejos de Fresnel, respectivamente. Asumiendo que en un medio de propagación pueden existir 4 componentes de campo eléctrico como se muestra en la Figura 3.7.



$E^+(z_1)$ que viaja de izquierda a derecha y es independiente
 $E^-(z_1)$ que viaja de derecha a izquierda y es dependiente de $E^+(z_1)$
 $E^+(z_2)$ que viaja de izquierda a derecha y es independiente
 $E^-(z_2)$ que viaja de derecha a izquierda y es dependiente de $E^+(z_2)$

Figura 3.7. Componentes del campo eléctrico que pueden existir en un medio homogéneo

Lo anterior se puede expresar como:

$$\begin{aligned} E^-(z_1) &= M_{11}E^+(z_1) + M_{12}E^+(z_2) \\ E^-(z_2) &= M_{21}E^+(z_1) + M_{22}E^+(z_2) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{pmatrix} E^-(z_1) \\ E^-(z_2) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E^+(z_1) \\ E^+(z_2) \end{pmatrix} \quad (5)$$

A la matriz M (ecuación 4) se le conoce como matriz de Scattering. Si tomamos en consideración las dependencias de los campos (ecuaciones 4 y 5) obtenemos:

$$\begin{aligned} E^+(z_1) &= S_{11}E^+(z_2) + S_{12}E^-(z_2) \\ E^-(z_1) &= S_{21}E^+(z_2) + S_{22}E^-(z_2) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} E^+ \\ E^- \end{pmatrix}_{z_1} = S \begin{pmatrix} E^+ \\ E^- \end{pmatrix}_{z_2} \quad (7)$$

A la ecuación 6 se le llama matriz S se le conoce también como matriz característica. Con la información de ambas matrices podemos obtener las matrices de interface y de propagación. La matriz de interface representa el efecto que sufre el campo electromagnético al impactar en la interface, mientras que la matriz de propagación representa el efecto que sufre el campo electromagnético al propagarse en un medio. Por ejemplo considerando la estructura de la Figura 3.5 y tomando en consideración sus datos característicos para la longitud de onda (λ) de 350 nm tendremos:

ITO ---- $\tilde{n}=2.2106+j0.0585$
 CdS ---- $\tilde{n}=2.5231+j0.36695$
 CdSe --- $\tilde{n}=2.767+j0.850$
 Ag-- ---- $\tilde{n}=0.11436+j1.3196$
 $\lambda=350$ nm
 $x=1$
 $I_c=E_0=0.32913 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$

Dónde: \tilde{n} ----- Índice de refracción complejo
 I_c ----- Irradiación solar
 x ----- Ancho de capa activa

Los índices de refracción complejos para los materiales utilizados en esta tesis ITO, CdS, CdSe, y Ag dependientes de la longitud de onda se encuentran en los anexos A1, A2, A3 y A4 respectivamente. Considerando estos índices de refracción compleja se calculan los coeficientes de reflexión (r_j) y transmisión (t_j) complejos en las interfaces de las capas y se calcula la matriz de interface que describe el efecto que sufrirá el campo incidente al impactar en esta interface.

Obtención de la matriz de **interface 1** para la interface entre los materiales **ITO/CdS**

$$r_{ij} = \frac{(2.5231 + j0.36695) - (2.2106 + j0.0585)}{(2.5231 + j0.36695) + (2.2106 + j0.0585)} = 0.071297 + j0.058753$$

$$t_{ij} = 1.071297 + j0.058753$$

$$I_1 = \frac{1}{1.071297 + j0.058753} \begin{bmatrix} 1 & 0.071297 + j0.058753 \\ 0.071297 + j0.058753 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_1 = \begin{bmatrix} 0.930649 - j0.051039 & 0.069351 + j0.051039 \\ 0.069351 + j0.051039 & 0.930649 - j0.051039 \end{bmatrix}$$

Obtención de la matriz de **interface 2** para la interface entre los materiales **CdS/CdSe**

$$r_{ij} = \frac{(2.767 + j0.850) - (2.5231 + j0.36695)}{(2.767 + j0.850) + (2.5231 + j0.36695)} = 0.063738 + j0.07665$$

$$t_{ij} = 1.063738 + j0.07665$$

$$I_2 = \frac{1}{1.063738 + j0.07665} \begin{bmatrix} 1 & 0.063738 + j0.07665 \\ 0.063738 + j0.07665 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} 0.935225 - j0.067390 & 0.064775 + j0.067390 \\ 0.064775 + j0.067390 & 0.935225 - j0.067390 \end{bmatrix}$$

Obtención de la matriz de **interface 3** para la interface entre los materiales **CdSe/Ag**

$$r_{ij} = \frac{(0.11436 + j1.3196) - (2.767 + j0.850)}{(0.11436 + j1.3196) + (2.767 + j0.850)} = -0.509198 + j0.546394$$

$$t_{ij} = 0.490802 + j0.546394$$

$$I_3 = \frac{1}{0.490802 + j0.546394} \begin{bmatrix} 1 & -0.509198 + j0.546394 \\ -0.509198 + j0.546394 & 1 \end{bmatrix}$$

$$I_3 = \begin{bmatrix} 0.909848 - j1.012904 & 0.090152 + j1.012904 \\ 0.090152 + j1.012904 & 0.909848 - j1.012904 \end{bmatrix}$$

El siguiente paso es el cálculo de la matriz de propagación:

Obtención de la matriz de **propagación (ITO)**

$$\beta_j = \frac{2\pi d}{\lambda} n_j \cos\theta_i \quad (8)$$

$$e^{jx} = \cos(x) + j\text{sen}(x) \quad (9)$$

$$\beta_j = \frac{2\pi(200)}{350} (2.2106 + j0.0585) \cos(0) \left(\frac{\pi}{180}\right) = 0.138525 + j0.0036658$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} e^{j(0.138525+j0.0036658)} & 0 \\ 0 & e^{-j(0.138525+j0.0036658)} \end{bmatrix}$$

$$e^{j(0.138525+j0.0036658)} = e^{-0.0036658}(\cos 0.138525 + j\sin 0.138525)$$

$$e^{j(0.138525+j0.0036658)} = 0.986796 + j0.137577$$

$$e^{-j(0.138525+j0.0036658)} = e^{0.0036658}(\cos 0.138525 - j\sin 0.138525)$$

$$e^{-j(0.138525+j0.0036658)} = 0.994057 - j0.138589$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.986796 + j0.137577 & 0 \\ 0 & 0.994057 - j0.138589 \end{bmatrix}$$

Obtención de la matriz de **propagación (CdS)**

$$\beta_j = \frac{2\pi(300)}{350} (2.5231 + j0.36695) \cos(0) \left(\frac{\pi}{180}\right) = 0.2371619 + j0.03449$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} e^{j(0.2371619+j0.03449)} & 0 \\ 0 & e^{-j(0.2371619+j0.03449)} \end{bmatrix}$$

$$e^{j(0.2371619+j0.03449)} = e^{-0.03449}(\cos 0.2371619 + j\sin 0.2371619)$$

$$e^{j(0.2371619+j0.03449)} = 0.939056 + j0.226980$$

$$e^{-j(0.2371619+j0.03449)} = e^{0.03449}(\cos 0.2371619 - j\sin 0.2371619)$$

$$e^{-j(0.2371619+j0.03449)} = 1.0061181 - j0.2431895$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.939056 + j0.226980 & 0 \\ 0 & 1.0061181 - j0.2431895 \end{bmatrix}$$

Obtención de la matriz de **propagación (Ag)**

$$\beta_j = \frac{2\pi(5000)}{350} (0.11436 + j1.3196) \cos(0) \left(\frac{\pi}{180}\right) = 0.179157 + j2.067290$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} e^{j(0.179157+j2.067290)} & 0 \\ 0 & e^{-j(0.179157+j2.067290)} \end{bmatrix}$$

$$e^{j(0.179157+j2.067290)} = e^{-2.067290}(\cos 0.179157 + j\sin 0.179157)$$

$$e^{j(0.179157+j2.067290)} = 0.124503 + j0.022186$$

$$e^{-j(0.179157+j2.067290)} = e^{2.067290}(\cos 0.179157 - j\sin 0.179157)$$

$$e^{-j(0.179157+j2.067290)} = 7.776874 - j1.408382$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0.124503 + j0.022186 & 0 \\ 0 & 7.776874 - j1.408382 \end{bmatrix}$$

Obtención de las matrices correspondientes a cada sistema parcial S'_j y S''_j descrito por las ecuaciones:

$$S'_j = \left(\prod_{n=1}^{j-1} I_{(n-1)n} L_n \right) I_{(j-1)j}$$

$$S''_j = \left(\prod_{n=j+1}^m I_{(n-1)n} L_n \right) I_{m(m+1)}$$

Que representaremos como M'_j y M''_j respectivamente

$$M'_j = P_1 I_1 P_2 I_2 \quad (10)$$

$$M'_j = \begin{bmatrix} 0.986796 + j0.137577 & 0 \\ 0 & 0.994057 - j0.138589 \end{bmatrix}$$

$$* \begin{bmatrix} 0.930649 - j0.051039 & 0.069351 + j0.051039 \\ 0.069351 + j0.051039 & 0.930649 - j0.051039 \end{bmatrix}$$

$$* \begin{bmatrix} 0.939056 + j0.226980 & 0 \\ 0 & 1.0061181 - j0.2431895 \end{bmatrix} *$$

$$\begin{bmatrix} 0.935225 - j0.067390 & 0.064775 + j0.067390 \\ 0.064775 + j0.067390 & 0.935225 - j0.067390 \end{bmatrix}$$

$$M'_j = \begin{bmatrix} 0.817171 + j0.215360 & 0.110544 + j0.112958 \\ 0.146021 + j0.081198 & 0.795981 - j0.429398 \end{bmatrix}$$

$$M''_j = I_3 P_3 \quad (11)$$

$$M''_j = \begin{bmatrix} 0.909848 - j1.012904 & 0.090152 + j1.012904 \\ 0.090152 + j1.012904 & 0.909848 - j1.012904 \end{bmatrix}$$

$$* \begin{bmatrix} 0.124503 + j0.022186 & 0 \\ 0 & 7.776874 - j1.408382 \end{bmatrix}$$

$$M''_j = \begin{bmatrix} 0.135751 - j0.105924 & 2.127657 + j7.750258 \\ -0.011248 + j0.128110 & 5.649217 - j9.158640 \end{bmatrix}$$

Dado que la capa activa en la estructura a analizar es la capa de CdSe, se obtienen los coeficientes de reflexión y transmisión de esta capa utilizando las ecuaciones (12), (13), (14) y (15)

$$t'_j = \frac{1}{M'_{j11}} \quad (12)$$

$$r'_j = -\frac{M'_{j12}}{M'_{j11}} \quad (13)$$

$$r''_j = -\frac{M''_{j21}}{M''_{j11}} \quad (14)$$

$$t_j' = \frac{1}{(0.817171 + j0.215360)} = 1.144259 - j0.301562$$

$$r_{j-}' = -\frac{(0.110544 + j0.112958)}{(0.817171 + j0.215360)} = -0.160555 - j0.095917$$

$$r_{j-}'' = \frac{(-0.011248 + j0.128110)}{(0.135751 - j0.105924)} = -0.509199 + j0.546394$$

$$\xi = \frac{2\pi d}{\lambda} n_j \quad (15)$$

$$e^{jx} = \cos(x) + j\text{sen}(x) \quad (16)$$

$$\xi_j = \frac{2\pi(2.767 + j0.850)}{350} \left(\frac{\pi}{180} \right) = 0.000867 + j0.000266$$

Para $d = 10000 \text{ nm}$

$$e^{j2\xi_j d_j} = e^{j(2*(0.000867 + j0.000266)*10000)}$$

$$e^{j(17.34 + j5.32)} = e^{-5.32} (\cos 17.34 + \text{sen} 17.34)$$

$$e^{j(17.34 + j5.32)} = 0.00029945 - j0.00488358$$

$$t_j^+ = \frac{t_j'}{1 - r_{j-}' * r_{j-}'' * e^{j2\xi_j d_j}} \quad (17)$$

$$\frac{t_j^+}{1.144259 - j0.301562}$$

$$= \frac{1}{1 - [(-0.160555 - j0.095917)(-0.509199 + j0.546394)(0.00029945 - j0.00488358)]}$$

$$t_j^+ = 1.143886 - j0.302280$$

Una vez obtenidos los coeficientes de reflexión y transmisión de la capa activa, como paso dos se obtiene el campo eléctrico en la capa de CdSe. El cálculo en este ejemplo se realizará para la longitud de onda de 350 nm en la posición $x = 1 \text{ nm}$ del ancho de la capa activa. Recordemos que los perfiles totales del campo eléctrico en la capa activa se obtienen realizando el cálculo para todo el espectro de análisis (de 350 nm a 800 nm) y todo el ancho de la capa activa utilizando la ecuación:

$$E_j(x) = E_j^+(x) + E_j^-(x) = t_j^+ [e^{i \xi_j x} + r_{j-}'' e^{i \xi_j (2d_j - x)}] E_0^+$$

$$E_j(x) = (1.143886 - j0.302280)[(0.999733 + j0.000866) + (-0.509199 + j0.546394)(0.0002911 - j0.0048867)](0.32913)*(0.8)$$

$$E_j(x) = 0.3004433 - j0.0791738$$

$$absE_j(x) = \sqrt{0.3004433^2 + 0.0791738^2}$$

$$absE_j(x) = \sqrt{.09026618 + 0.00626849} = \sqrt{0.09653467}$$

$$absE_j(x) = 0.31070029 \text{ E(V / m}^2 \text{)}$$

Obtenido el campo eléctrico se procede a obtener la disipación de este para la longitud de onda de 350 nm en la posición $x = 1$ nm de ancho de la capa activa utilizando la ecuación:

$$Q_j(x, \lambda) = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \alpha_j \bar{n}_j |E_j(x)|^2$$

Dónde:

$$c = 3 * 10^8 \text{ m/s}$$

$$\epsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\alpha_j = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (18)$$

$$\alpha_j = \frac{4\pi(0.850)}{350} = 0.030518$$

$$Q_j(z) = \frac{1}{2} (3 * 10^8)(8.85 * 10^{-12})(0.030518)(2.767)(0.31070029)^2$$

$$Q_j(z) = 1.082 * 10^{-5} \text{ cm}^{-3} / \text{seg}$$

Para el cálculo de la tasa de generación de excitones se utiliza la ecuación (20), con Q_j dividiendo sobre la energía del fotón $1/hc$ por longitud de onda λ , e integrando sobre el espectro de Incidencia de 350 nm a 800 nm que representa los 46 espectros analizados, se asumió una eficiencia de conversión fotón-excitón igual a 1 (esto quiere decir que por cada fotón captado en la superficie del dispositivo se crea un excitón en el sustrato de la capa activa), para la longitud de onda de 350 nm resulta:

$$G(x) = \eta \int_{350}^{800} \frac{\lambda}{hc} Q(x, \lambda) d\lambda \quad (19)$$

Dónde:

$$h = 6.62606952 * 10^{-34} \text{ J/s}$$

$$n = 1$$

$$G(x) = (1) \frac{350}{(3 * 10^8)(6.62606952 * 10^{-34})} (0.00001082)$$

$$G(x) = 1.9051 * 10^{22} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$G_{jT} = 2.9406 * 10^{28} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$$

El valor de $G(x) = 1.9051 * 10^{22} m^{-3}s^{-1}$, representa la generación de excitones en la posición $x = 1$ por del campo eléctrico incidente en la longitud de onda de 350 nm. La taza tota de generación de excitones se obtiene evaluado la ecuación (20) de 350 a 800 nm que resulta en $G_{jT} = 2.9406 * 10^{28} cm^{-3}s^{-1}$. Un resumen de los valores obtenidos se encuentra en la Tabla 3.1. La Figura 3.8 muestra el perfil de $G(x)$ nanómetro por nanómetro en una capa activa de 10000 nm de ancho para la longitud de onda de 350 nm. De la misma manera la Figura 3.9 muestra el perfil de $G(x)$ para una capa activa desde 1 nm a 10000 nm de ancho para las longitudes de onda de 350 a 800 nm.

Tabla 3.1. Resultados del estudio de propagación.

Resumen de Resultados
$E_j(x) = 0.31138178 \text{ (V / m)}$
$Q_j(z) = 1.082 * 10^{-5} \text{ cm}^{-3}/\text{seg}$
$G(x) = 1.9051 * 10^{22} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$
$G_{jT} = 2.9406 * 10^{28} \text{ m}^{-3}\text{s}^{-1}$

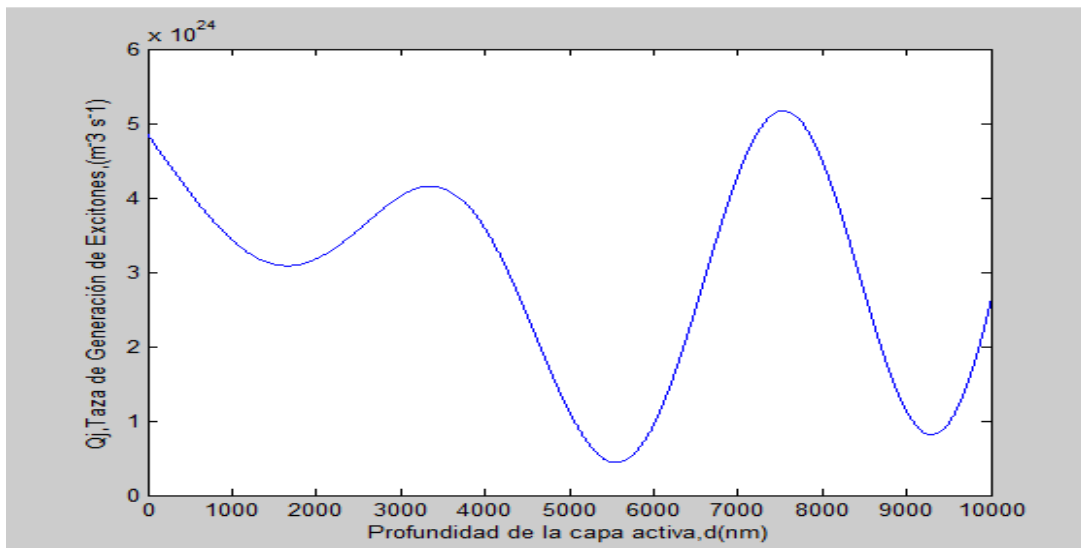


Figura 3.8. Taza de generación de excitones G_j en la capa activa (CdSe) para $\lambda = 350$ nm.

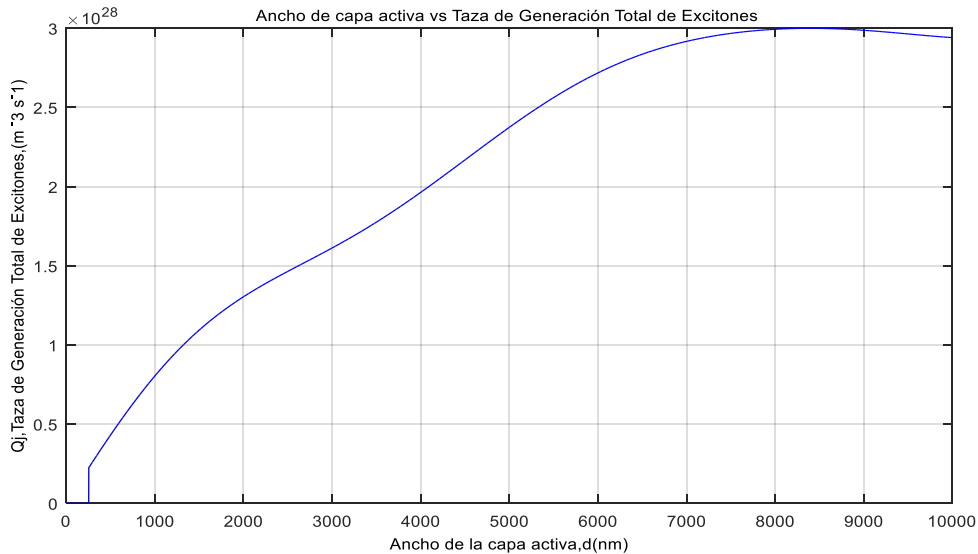


Figura 3.9. Taza de generación de excitones G_T en la capa activa (CdSe) desde 1 nm a 10000 nm de ancho para las longitudes de onda de 350 a 800 nm.

3.1.4 Cálculo de concentración de cargas, potencial electrostático y dimensionamiento de la zona de agotamiento

Una vez obtenida la tasa de generación de excitones es necesario calcular el potencial electrostático (V_{poisson}), las concentraciones de carga $n(x)$ y $p(x)$ y el dimensionamiento de la zona de agotamiento formada por la unión pn de los materiales del dispositivo fotovoltaico. La solución debe satisfacer simultáneamente las ecuaciones de continuidad de cargas y la ecuación de Poisson. Para este propósito se utiliza el algoritmo iterativo de Gummel. La Figura 3.10 muestra la secuencia iterativa implementada para satisfacer el algoritmo de Gummel. Las Tablas 3.2 y 3.3 contienen los parámetros fundamentales de los materiales que forman la unión pn (CdS/CdSe).

Para iniciar la ejecución del algoritmo de la Figura 3.10 se propone un valor inicial para el potencial de contacto de Poisson (V_{poisson}) y se procede con el cálculo de las longitudes de difusión de cargas minoritarias hasta ejecutarlo completamente. Este algoritmo se cicla iterando hasta que se satisfacen dos condiciones; la primera que la diferencia entre el V_{poisson} de la iteración actual y el V_{poisson} de una iteración anterior sea menor a un umbral previamente preestablecido, y la segunda que la suma de los valores absolutos de las diferencias de las concentraciones de cargas de la iteración actual y una anterior dividida sobre la suma de las concentraciones de cargas encontradas en la iteración actual sea menor a un umbral preestablecido.

Para demostrar el proceso, a continuación se muestran los cálculos y resultados de la primera iteración. En las Tablas 3.2 y 3.3 se definen las variables de los materiales con las que se trabajaron en esta ocasión:

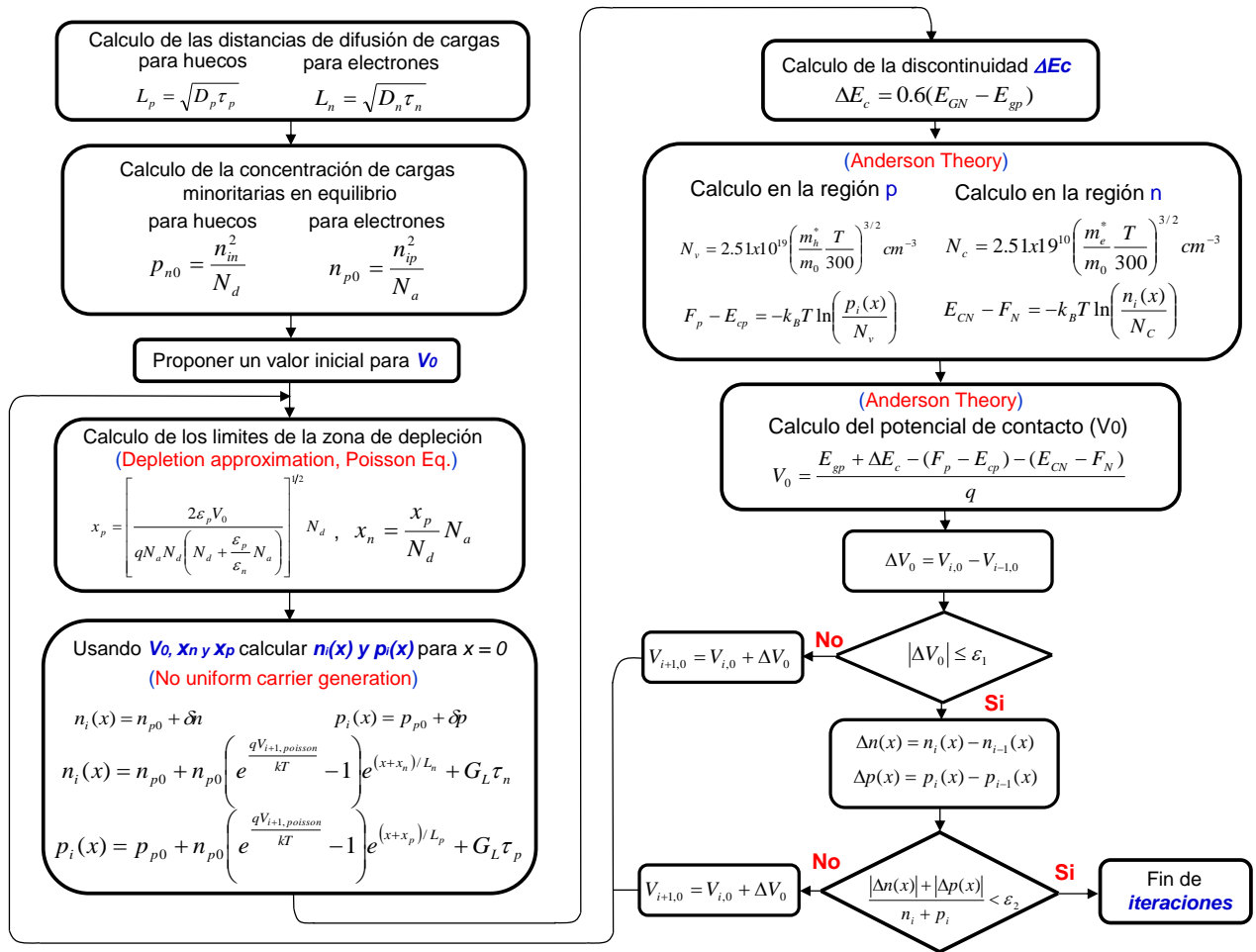


Figura 3.10. Representación gráfica de proceso iterativo.

Tabla 3.2. Propiedades del CdS y CdSe.

Datos	CdS (Material n)	CdSe (Material P)
Band gap	2.42eV	1.74eV
Masa electrón	0.17 m_0	0.13 m_0
Masa hueco	0.70 m_0	0.45 m_0
Constante dieléctrica	8.9 ϵ_0	10.2 ϵ_0
Concentración intrínseca	1.6 * 10 ¹⁰ cm ⁻³	7.07 * 10 ³ cm ⁻³
Movilidad hueco/electrón	5 * 10 ¹⁸ cm ⁻³	4.3 * 10 ¹⁸ cm ⁻³
Coefficiente difusión h/e	9 cm ² /s	0.52 cm ² /s
Tiempo de vida h/e	1 * 10 ⁻⁷ s	16 * 10 ⁻⁹ s

Tabla 3.3. Valores de constantes.

$m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$	$h = 6.58118 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}$	$eV = 1.602 \times 10^{-19}$
$k_B = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV}$	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ C}^2/\text{Ncm}^2$	$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
$G_L = 2.9406 * 10^{28} \text{ m}^{-3}/\text{s}$		

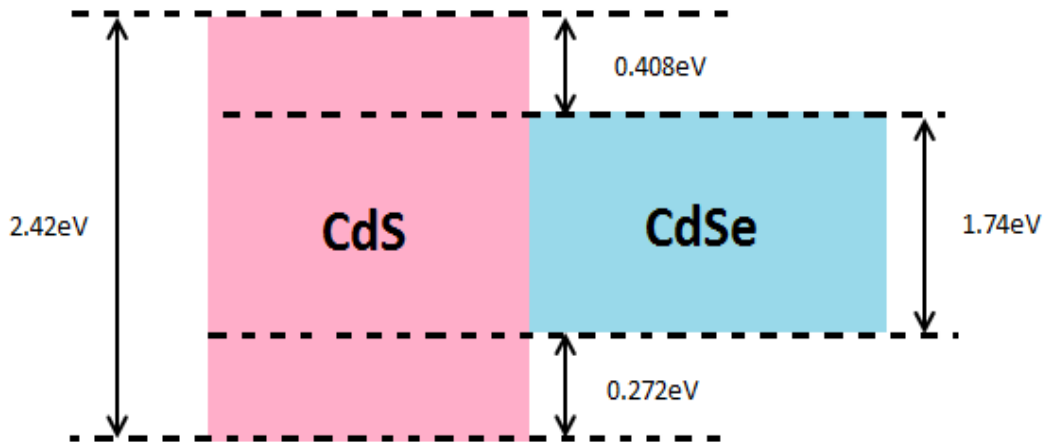


Figura 3.11. Diagrama energético.

Obtención de las distancias de difusión de cargas L_p y L_n

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad (20)$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} \quad (21)$$

$$L_p = \sqrt{(0.52)(16 * 10^{-9})}$$

$$L_p = 9.1214 * 10^{-5} \text{ cm}$$

$$L_n = \sqrt{(9)(1 * 10^{-7})}$$

$$L_n = 9.4868 * 10^{-4} \text{ cm}$$

$$\frac{kT}{q} = \frac{(8.617 * 10^{-5})(300)}{q} = 0.0258$$

Obtención de las concentraciones de cargas minoritarias en equilibrio

$$n_{po} = \frac{n_{ip}^2}{N_a} = \frac{(7.07 * 10^3)^2}{5 * 10^{15}} = \frac{49984900}{4.3 * 10^{18}} = 1.1624 * 10^{-11} \text{ cm}^{-3}$$

$$p_{no} = \frac{n_{in}^2}{N_d} = \frac{(1.6 * 10^{10})^2}{1 * 10^{15}} = \frac{2.56 * 10^{20}}{5 * 10^{18}} = 51.2 \text{ cm}^{-3}$$

Se propone un valor inicial para el voltaje de Poisson, $V_{\text{poisson}} = 0.60$

Con el Valor asignado a V_{poisson} , los valores obtenidos de distancias de difusión para electrones (L_n) y huecos (L_p), y los valores obtenidos para las concentraciones de cargas minoritarias en equilibrio n_{po} y p_{no} se procede a encontrar la primera iteración del ciclo mostrado en la Figura 3.10, que empieza por encontrar el dimensionamiento de la zona de depleción, tal como se muestra enseguida:

Inicio de la primera iteración del ciclo:

Obtención de los límites de la zona de depleción

$$x_p = \left[\frac{2\varepsilon_p V_0}{q N_a N_d \left(N_d + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_N} N_a \right)} \right]^{1/2} N_d \quad (22)$$

$$x_p = \left[\frac{(2)(10.2)(8.854 * 10^{-14})(600 * 10^{-3})}{(1.6 * 10^{-19})(4.3 * 10^{18})(5 * 10^{18}) \left((5 * 10^{18}) + \frac{10.2}{8.9} (4.3 * 10^{18}) \right)} \right]^{1/2} (5 * 10^{18})$$

$$x_p = \left[\frac{1.0837296 * 10^{-12}}{(3.44 * 10^{18})(9.9281 * 10^{18})} \right]^{1/2} (5 * 10^{18}) = \left[\frac{1.0837296 * 10^{-12}}{3.4152664 * 10^{37}} \right]^{1/2} (5 * 10^{18})$$

$$x_p = [3.173192 * 10^{-50}]^{1/2} (5 * 10^{18}) = 8.9067 * 10^{-7} \text{ cm}$$

$$x_n = \frac{x_p}{N_d} N_a \quad (23)$$

$$x_n = \frac{(8.9067 * 10^{-7})}{(5 * 10^{18})} (4.3 * 10^{18}) = 7.6598 * 10^{-7} \text{ cm}$$

$$w = x_p + x_n \quad (24)$$

$$w = 8.9067 * 10^{-7} + 7.6598 * 10^{-7} = 1.6567 * 10^{-6} \text{ cm}$$

Obtención de las concentraciones de cargas evaluadas en $x = 0$

$$P_N(x) = P_{NO} + P_{NO} \left(e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{-(x-x_n)}{L_p}} + G_L \tau_p \quad (25)$$

$$P_N(x) = (51.2) + (51.2) \left(e^{\frac{0.600}{0.0258}} - 1 \right) e^{\frac{7.6598 * 10^{-7}}{9.1214 * 10^{-5}}} + (2.9406 * 10^{28} * 10^{-6})(16 * 10^{-9})$$

$$P_N(x) = (51.2) + (649813411798) + (4.70496 * 10^{14})$$

$$P_N(x) = 4.711458 * 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_p(x) = n_{po} + n_{po} \left(e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right) e^{\frac{(x-x_p)}{L_n}} + G_L \tau_n \quad (26)$$

$$n_p(x) = (1.1624 * 10^{-11}) + (1.1624 * 10^{-11}) \left(e^{\frac{0.600}{0.0258}} - 1 \right) e^{\frac{8.9067 * 10^{-7}}{9.4868 * 10^{-4}}} + (2.9406 * 10^{28} * 10^{-6})(1 * 10^{-7})$$

$$n_p(x) = (1.1624 * 10^{-11}) + (0.1464317) + (2.4549 * 10^{15})$$

$$n_p(x) = 2.9406 * 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

Para calcular el potencial electrostático de Poisson (contacto V_0) se utilizó la teoría y modelos para análisis de heteroestructuras de Anderson. La Figura 3.12 muestra la secuencia paso implementada para encontrar V_0 .

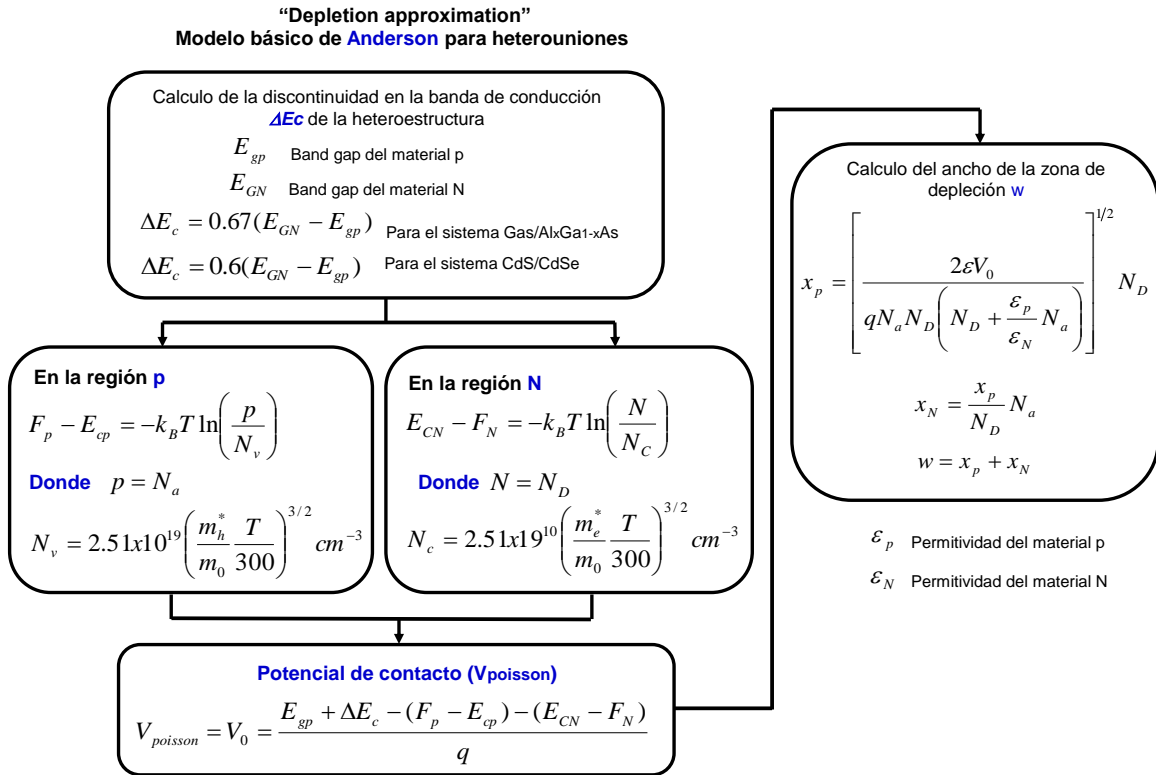


Figura 3.12 muestra la secuencia paso implementada para encontrar V_0 .

Obtención de la discontinuidad ΔE_c

$$\Delta E_c = 0.6 (E_{GN} - E_{gp}) \quad (27)$$

$$\Delta E_c = 0.6(2.42 - 1.74) = 0.408 \text{ eV}$$

$$N_v = 2.51 * 10^{19} \left(\frac{m_h^*}{m_0} * \frac{T}{300}\right)^{3/2} \quad (28)$$

$$N_v = 2.51 * 10^{19} \left(\frac{0.45 * m_0}{m_0} * \frac{300}{300}\right)^{3/2} = 2.51 * 10^{19} (0.45)^{3/2} = 7.5769 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$F_p - E_{cp} = -k_B T \ln\left(\frac{p}{N_v}\right) \quad (29)$$

$$F_p - E_{cp} = -(0.0258) \ln\left(\frac{4.711458 * 10^{14}}{7.5769 * 10^{18}}\right) = -(0.0258) \ln(0.621819 * 10^{-4})$$

$$= 0.249884 \text{ eV}$$

$$N_c = 2.51 * 10^{19} \left(\frac{m_e^*}{m_0} * \frac{T}{300}\right)^{3/2} \quad (30)$$

$$N_c = 2.51 * 10^{19} \left(\frac{0.17 * m_o}{m_o} * \frac{300}{300} \right)^{3/2} = 2.51 * 10^{19} (0.17)^{3/2}$$

$$= 1.759329 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$F_{CN} - F_N = -k_B T \text{Ln} \left(\frac{n}{N_c} \right) \quad (31)$$

$$F_{CN} - F_N = -(0.0258) \text{Ln} \left(\frac{2.9406 * 10^{15}}{1.759329 * 10^{18}} \right) = -(0.0258) \text{Ln}(0.001671)$$

$$= 0.164973 \text{ eV}$$

$$V_0 = [E_{gp} + \Delta E_c - (F_p - E_{cp}) - (F_{CN} - F_N)]/q \quad (32)$$

$$V_0 = \frac{[1.74 + 0.408 - (0.249884) - (0.164973)] \text{ eV}}{q} = 1.733143$$

El valor obtenido de V_0 se resta al valor V_{poisson} obtenido en la iteración anterior, que es este caso por ser la primera iteración será el valor propuesto al principio de la ejecución del algoritmo iterativo de Gummel. El resultado obtenido de esta diferencia se considera como un incremento en la diferencia de V_0 consecutivos, cuando este diferencial satisface la condición de ser igual o menor a un umbral fijado con anterioridad (0.55) se habrán determinado los valores para concentración de carga en las regiones n y p de la unión pn. Si la condición no se satisface se inicia nuevamente el procedimiento de solución de la ecuación para potencial de contacto.

Obtención de la diferencia $V_{i+1, \text{poisson}} - V_{i, \text{poisson}}$

$$\Delta V_{\text{poisson}} = V_{i+1, \text{poisson}} - V_{i, \text{poisson}} \quad (33)$$

$$\Delta V_{\text{poisson}} = 1.733143 - 0.600 = 1.133143 \text{ V}$$

Como se muestra en la resta anterior $|\Delta V_{\text{poisson}}| > 1$ no se cumple la condición al ser $|V_0| \leq 1$, por lo tanto se debe realizar una actualización del valor de V_0 y comenzar la siguiente iteración. Se reinician los cálculos sustituyendo ahora $V_{\text{poisson}} = V_0 = 1.133143 \text{ V}$. Hasta que se cumpla la condición $|\Delta V_{\text{poisson}}| > 1$. Este procedimiento después de un número determinado de iteración (134) cumplió con la condición requerida obteniendo los valores mostrados en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Resultados cálculo de concentraciones, potencial y zona de agotamiento.

<i>Resumen de Resultados</i>	
$L_p = 9.1214 * 10^{-5} \text{ cm}$	$L_n = 9.4868 * 10^{-4} \text{ cm}$
$n_{po} = 1.1624 * 10^{-11} \text{ cm}^{-3}$	$P_{no} = 51.2 \text{ cm}^{-3}$
$x_p = 9.893887 * 10^{-7} \text{ cm}$	$x_n = 8.508743 * 10^{-7} \text{ cm}$
$P_N(x) = 6.2048 * 10^{14} \text{ cm}^{-3}$	$n_p(x) = 2.940602 * 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
$V_{\text{poisson}} = 741.691 \text{ mV}$	$V_{\text{contacto}} = 1.740252 \text{ V}$

3.1.5 Cálculo de las Características de Desempeño

Para finalizar el diseño teórico de la estructura se debe realizar el cálculo de las características de desempeño. En la Tabla 3.5 se encuentra un resumen tanto de los parámetros obtenidos del algoritmo anterior así como algunos de los parámetros que fueron utilizados para estos cálculos.

Tabla 3.5. Parámetros obtenidos del algoritmo de Gummel.

Parámetros obtenidos hasta este momento	
$N_a = 4.3 * 10^{18}$	$N_d = 5 * 10^{18}$
Voltaje de Contacto	$V_0 = 1.740252$ V
Concentración de Electrones	$n_i = 2.940602 * 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Concentración de Huecos	$p_i = 6.2048 * 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
Ancho de la Depleción en n	$x_n = 8.508743 * 10^{-7} \text{ cm}$
Ancho de la Depleción en p	$x_p = 9.893887 * 10^{-7} \text{ cm}$
Ancho de la Zona de Depleción	$w_{np} = 1.840263 * 10^{-6} \text{ cm}$
Distancia de Difusión de Electrones	$L_n = 9.4868 * 10^{-4} \text{ cm}$
Distancia de Difusión de Huecos	$L_p = 9.1214 * 10^{-5} \text{ cm}$
Coeficiente de Difusión de Electrones	$D_n = 9 \text{ cm}^2/\text{s}$
Coeficiente de Difusión de Huecos	$D_p = 0.52 \text{ cm}^2/\text{s}$
Concentración Int. Material N	$n_{iN} = 1.6 * 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
Concentración Int. Material P	$n_{iP} = 7.07 * 10^3 \text{ cm}^{-3}$
Taza de Generación de Excitones	$G_L = 2.9406 * 10^{28} \text{ m}^{-3}$
$n_{po} = 8.6026 * 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	$p_{no} = 0.0195 \text{ cm}^{-3}$

El cálculo de las características de desempeño se realiza con los cálculos mostrados enseguida y empezando por la de la obtención del voltaje de circuito abierto V_{oc} .

$$n_{po} = \frac{N_a}{n_{iP}^2} \quad (34)$$

$$p_{no} = \frac{N_d}{n_{iN}^2} \quad (35)$$

$$n_{po} = \frac{4.3 * 10^{18}}{(7.07 * 10^3)^2} \quad p_{no} = \frac{5 * 10^{18}}{(1.6 * 10^{10})^2}$$

$$n_{po} = 8.6026 * 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad p_{no} = 0.0195 \text{ cm}^{-3}$$

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left\{ \frac{q G_L (L_p + L_n)}{q \left[\frac{D_p}{L_p} (p_{no}) + \frac{D_n}{L_n} (n_{po}) \right]} + 1 \right\} \quad (36)$$

$$V_{oc} = 0.0258 \ln \left\{ \frac{(2.9406 * 10^{28} * 10^{-6})(9.1214 * 10^{-5} + 9.4868 * 10^{-4})}{\left[\frac{0.52}{9.1214 * 10^{-5}} (0.0195) + \frac{9}{9.4868 * 10^{-4}} (8.6026 * 10^{10}) \right]} + 1 \right\}$$

$$V_{oc} = 0.0258 \ln \left\{ \frac{(3.0579 * 10^{19})}{(8.1612 * 10^{14})} + 1 \right\} = 0.0258 \ln(37469.7546)$$

$$V_{oc} = 0.2717 \text{ V}$$

Obtención del voltaje de la densidad de corriente de corta circuito J_{sc}

$$J_{sc} = -qG_L(L_p + L_n) \quad (37)$$

$$J_{sc} = -(1.6 * 10^{-19})(2.9406 * 10^{28} * 10^{-6})(9.1214 * 10^{-5} + 9.4868 * 10^{-4})$$

$$J_{sc} = -4.8926 \text{ A/cm}^2 \rightarrow 4.8926 \text{ A/cm}^2$$

Obtención del voltaje de la densidad de corriente a máxima potencia J_{max}

$$J = \left[q \frac{D_p}{L_p} (p_{no}) + q \frac{D_n}{L_n} (n_{po}) \right] (e^{qV/kT} - 1) - qG_L(L_p + L_n) \quad (38)$$

Evalutando en $V=0$

$$J = \left[(1.6 * 10^{-19}) \frac{0.52}{9.1214 * 10^{-5}} (0.0195) + (1.6 * 10^{-19}) \frac{9}{9.4868 * 10^{-4}} (8.6026 * 10^{10}) \right] * (e^{q0/0.0258} - 1) - (1.6 * 10^{-19})(2.9406 * 10^{28} * 10^{-6})(9.1214 * 10^{-5} + 9.4868 * 10^{-4})$$

$$J = (1.3057 * 10^{-4})(0) - (4.8926) = -4.0845 \text{ A/cm}^2$$

Graficando J vs V

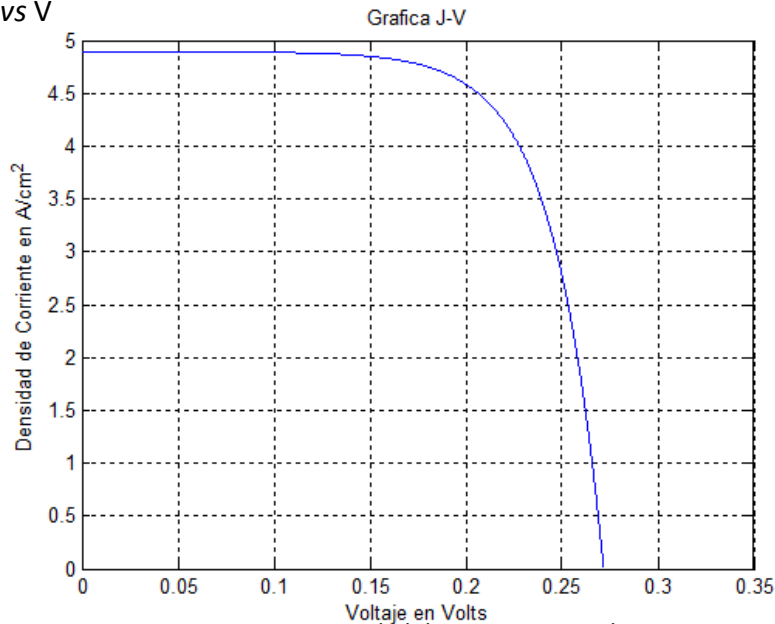


Figura 3.13. Densidad de corriente vs voltaje.

Obtención del voltaje y densidad de corriente a máxima potencia J_{max} de la gráfica característica J vs V.

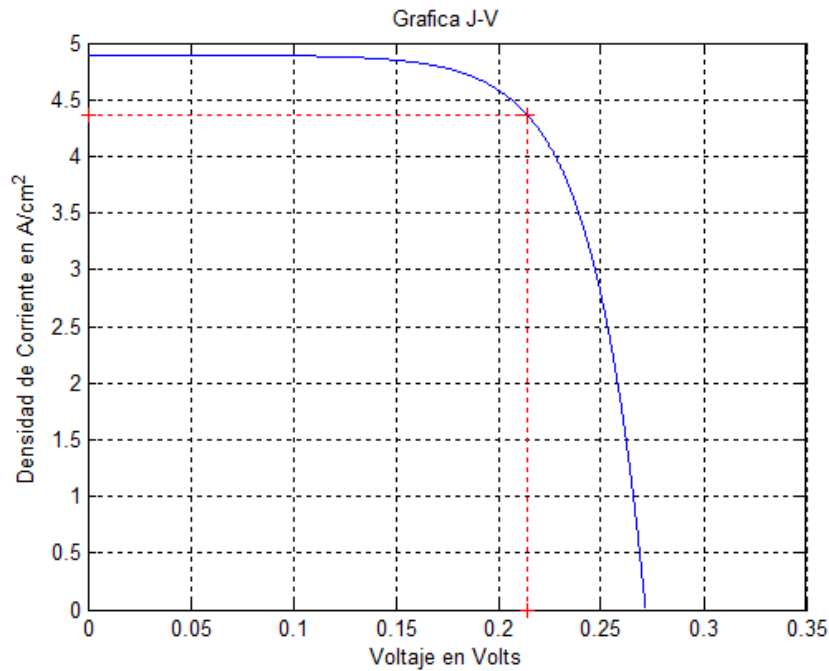


Figura 3.14. Búsqueda de J_{max} .

De la Figura 3.13 se obtiene los parámetros siguientes:

$$V_{max} = 0.2142 \text{ V}$$

$$J_{max} = 4.3662 \text{ A/cm}^2$$

Por lo tanto:

$$P_{max} = J_{max} V_{max} \quad (39)$$

$$P_{max} = (4.3662) * (0.2142) = 0.9352 \text{ W/cm}^2$$

$$FF = \frac{V_{max} J_{max}}{V_{oc} J_{sc}} \quad (40)$$

$$FF = \frac{(4.3662) * (0.2142)}{(0.2717) * (4.8926)} = \frac{0.9352}{1.3293} = 0.7035$$

Obtención de la eficiencia de conversión de potencia de la celda unitaria considerando una irradiación incidente solar de:

$$P_{incidente} = 900 \text{ W/m}^2 = 0.09 \text{ W/cm}^2$$

$$n_{power} = \frac{V_{mp}J_{mp}}{P_{incidente}} = FF \frac{V_{oc}J_{sc}}{P_{incidente}} \quad (41)$$

$$n_{power} = \frac{(4.3662) * (0.2142)}{0.09} = \frac{0.9352}{0.09} = 10.3911$$

En la Tabla 3.6 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización teórica de la celda solar unitaria:

Tabla 3.6. Resumen de datos obtenidos durante el proceso.

$V_{oc} = 0.2717 V$	$J(V = 0)$ $= -4.8926 A/cm^2$	$J_{max} = 4.3662 A/cm^2$
$J_{sc} = -4.8926 A/cm^2$	$V_{max} = 0.2142V$	$P_{max} = 0.9352 W/cm^2$
$FF = 0.7035$	$n_{power} = 10.3911$	

Una vez que las características de desempeño son calculadas, se procede a calcular las dimensiones (ancho (W) y largo (L)) del dispositivo diseñado con el cual se puedan realizar conexiones serie y paralelo para satisfacer la demanda requerida de suministrado de corriente. Se desea que el dispositivo sea capaz de suministrar 300 mA y se dispone de una área de fabricación para cada dispositivo individual de 100 μm x 100 μm. Para dimensionar se propone un valor para el largo del dispositivo y se encuentra el ancho utilizando la ecuación (1.32), proponiendo valores para x y cuidado que W no exceda del área disponible. Donde x representa el porcentaje de corriente que un solo dispositivo (fotodiodo) proporcionara del total requerido. Para el cálculo de dimensionamiento se consideraran una densidad de corriente deseada $J_{maxdeseada}$ y una densidad de corriente entregada por la celda unitaria J_{max} iguales a:

$$I_{maxdeseada} = 300mA = 0.3A$$

$$J_{max} = 4.3662 A/cm^2$$

Si el sustrato disponible mide 100 μm x 100 μm, la L propuesta será de 100 μm y se calcula una combinación de porcentaje de W que satisfaga las condiciones anteriores:

$$W = \frac{x\%(I_{max})}{L*J_{max}} \quad (42)$$

Primer valor propuesto: 50%

$$W = \frac{0.5(0.3)}{(0.01) * 4.3662} = \frac{0.15}{0.043662} = 3.4355cm = 34355 \mu m \text{ --- Valor muy alto}$$

Segundo valor propuesto: 10%

$$W = \frac{0.1(0.3)}{(0.01) * 4.3662} = \frac{0.03}{0.043662} = 0.6871 \text{ cm} = 6871 \mu\text{m} \text{ --- Valor muy alto}$$

Tercer valor propuesto: 0.14%

$$W = \frac{0.0014(0.3)}{(0.01) * 4.3662} = \frac{0.00042}{0.043662} = 9.6193 * 10^{-3} \text{ cm} = 96.193 \mu\text{m} \text{ --- Valor final}$$

Obtención del área transversal del dispositivo

$$A_{trans} = W * L \quad (43)$$

$$A_{trans} = 96.193 * 100 = 9619.3 \mu\text{m}^2$$

$$I_{max} = J_{max} * A_{trans} \quad (44)$$

$$I_{max} = 4.3662 * 9.6193 * 10^{-5} = 4.1999 * 10^{-4} \text{ A}$$

$$R_{max} = \frac{V_{max}}{I_{max}} \quad (45)$$

$$R_{max} = \frac{0.2142}{4.1999 * 10^{-4}} = 510.0121 \Omega$$

$$P_{max} = J P_{max} * A_{trans} \quad (46)$$

$$P_{max} = 0.9352 * 9.6193 * 10^{-5} = 8.9959 * 10^{-5} \text{ W}$$

En la Tabla 3.7 se resumen los resultados de la caracterización de la celda solar unitaria con voltaje a circuito abierto (V_{oc}), densidad de corriente en corto circuito (J_{sc}), voltaje máximo (V_{max}), densidad de corriente máxima (J_{max}), potencia máxima (P_{max}), eficiencia de conversión (η_{power}), fill factor, la resistencia y corriente con la que trabajará así como su área transversal, mientras que en las imágenes 3.14 y 3.15 se puede observar el diseño tanto de la unidad como de la matriz de celdas que se necesitaría fabricar para cubrir ciertas necesidades:

Tabla 3.7. Resultado de la caracterización de desempeño para dispositivo unitario.

$V_{oc} = 0.2717 V$
$J_{sc} = 4.8926 A/cm^2$
$V_{max} = 0.2142V$
$J_{max} = 4.3662 A/cm^2$
$P_{max} = 8.9959 * 10^{-5} W$
$n_{power} = 10.3911$
$FF = 0.7035$
$R_{max} = 510.0121\Omega$
$I_{max} = 4.1999 * 10^{-4} A$
$A_{trans} = 9619.3\mu m^2$

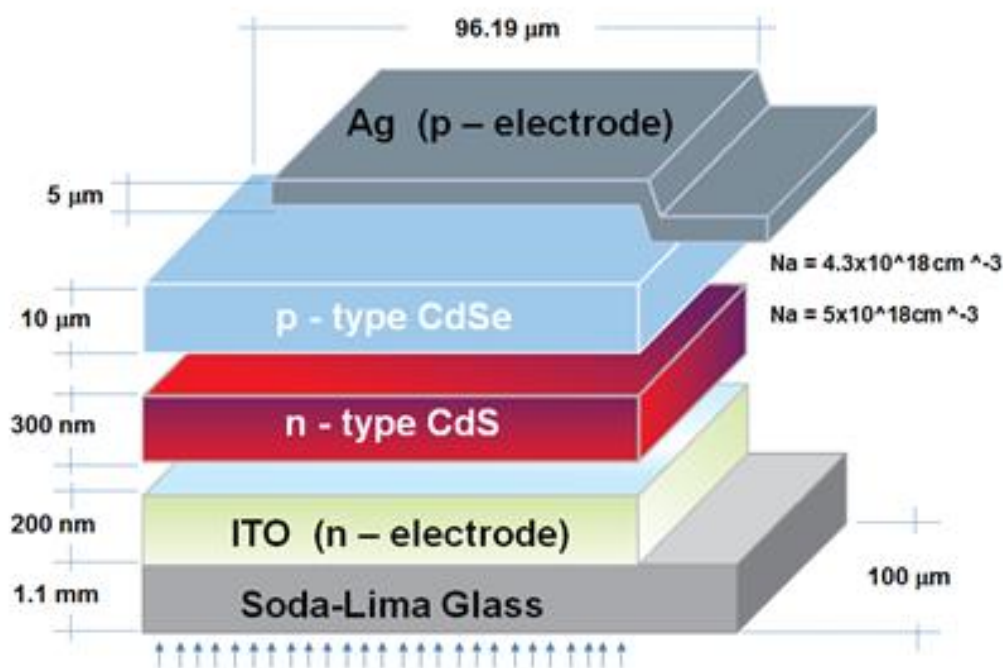


Figura 3.15. Estructura esperada de celda solar unitaria.

Una vez diseñado el dispositivo unitarios y encontradas sus características de desempeño, se requiere realizar calcular cuántos de estos son necesarios conectar en paralelo para lograr un voltaje deseado. Ya encontrada esta maya de cuántos son necesario en paralelo se requiere calcular cuántas de estas mayas se requiere conectar en serie para logara una corriente deseada final. En este trabajo de tesis se planteó lograr una corriente a máxima potencia $I_{MaxPot} = 5 mA$ y un voltaje a máxima potencia $V_{MaxPot} = 3 V$. La Figura 3.15 muestra un ejemplo de la conexión serie y paralelo de los dispositivos unitarios.

$$I_{MaxPot} = 5 \text{ mA}$$

$$V_{MaxPot} = 3 \text{ V}$$

$$\#CU = \frac{V_{MaxPot}(requerido)}{V_{MaxPot}(generado)}$$

$$\#Mayas = \frac{I_{MaxPot}(requerido)}{I_{MaxPot}(generado)}$$

$$\#CU = \frac{3 \text{ V}}{0.2142 \text{ V}} = 14 \text{ fotodiodos}$$

$$\#Mayas = \frac{5 \text{ mA}}{0.4199 \text{ mA}} = 11.9075 \sim 12 \text{ mayas}$$

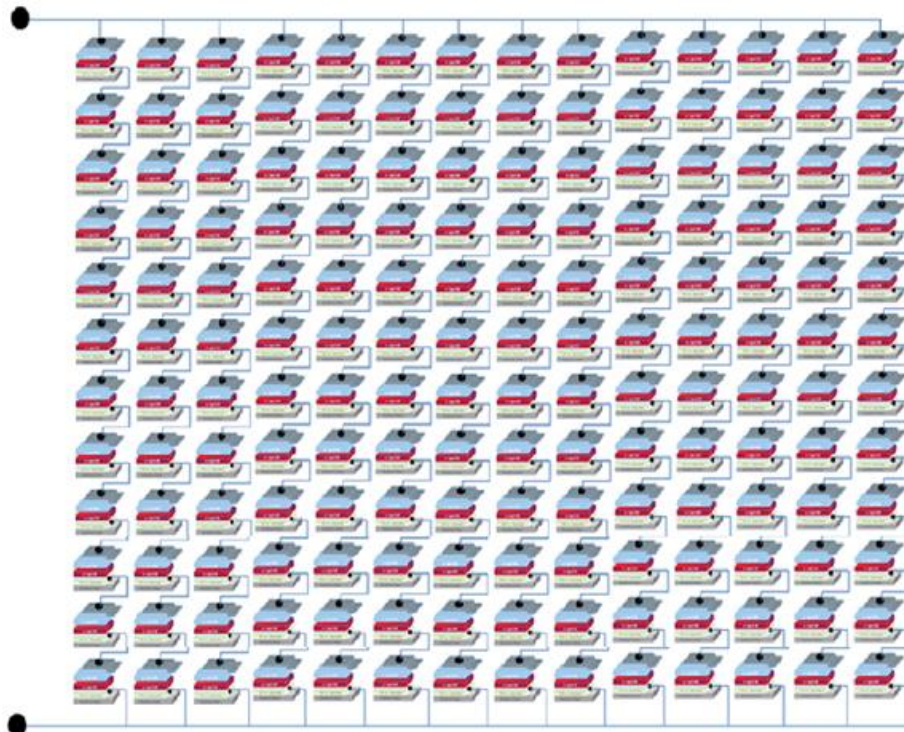


Figura 3.16. Estructura esperada del módulo.

Capítulo 4

IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DE LA CELDA UNITARIA


En este capítulo se describen los materiales y procedimientos desarrollados para la construcción física de una celda solar unitaria en un sustrato de 50 x 25 mm, y el procedimiento desarrollado para la construcción física de un arreglo de múltiples celdas unitarias en sustratos de 50 x 25 mm. Los procedimientos desarrollados para la construcción física de las celdas solares unitarias son el resultado de un largo periodo de experimentación en el cual se buscó establecer la secuencia de depósito de materiales y horneado (tratamiento de “annealing”) de películas que optimizara recursos con los mejores resultados de caracterización. El tiempo requerido para la fabricación de una celda solar unitaria o un arreglo de múltiples celdas en un el mismo sustrato es de 5 días, comenzando con la deposición de la película de CdS y terminando con el horneado del conjunto completo.

4.1 Materiales utilizados en la fabricación de las celdas solares

La Tabla 4.1 muestra imágenes y características de los materiales utilizados para la fabricación de las celdas solares. En orden descendente en la Tabla 4.1 se muestra el sustrato de vidrio soda-lima con recubrimiento de ITO, este sustrato posee una resistividad de 10 Ω/cuadro con dimensiones de 50 mm de largo, 25 cm de ancho y 1.1 mm de espesor, adicionalmente el recubrimiento de ITO es de 200nm. Posteriormente, se muestra el depósito de CdS de 98% de pureza, el depósito de CdSe de 99% de pureza, el depósito de plata líquida, el depósito con Etilenglicol y el depósito con Etanol con sus principales características respectivamente.

Para el manejo del material durante el proceso de fabricación se utilizó una bata de laboratorio, guantes y mascara para gases peligrosos. El equipo utilizado fue una campana de extracción, un aerógrafo, una placa calefactora y una mufla.

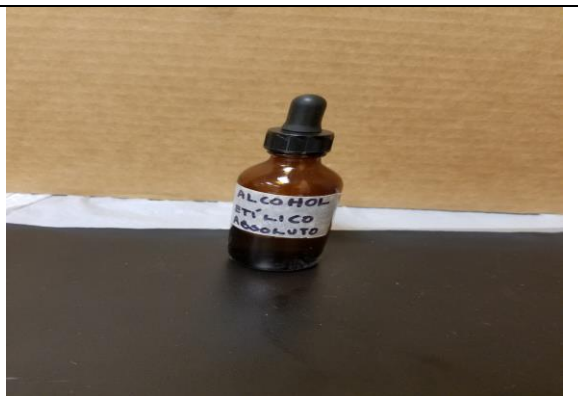
Tabla 4.1. Materiales utilizados en la fabricación de las celdas solares.

Nombre/Características	Imagen
<p>Vidrio soda lima con recubrimiento de ITO</p> <ul style="list-style-type: none">-L 50mm x W 25mm x T 1.1 mm-Resistividad < 10 Ohms/cuadro	

<p>Sulfuro de Cadmio en polvo (CdS)</p> <ul style="list-style-type: none"> -Sulfuro de Cadmio 98% -Peso molecular 144.46 g/mol -Densidad 4.82 g/mL -Insoluble en agua 	
<p>Seleniuro de Cadmio en polvo (CdSe)</p> <ul style="list-style-type: none"> -Seleniuro de Cadmio 99% -Peso molecular 191.37 g/mol -Densidad 5.81 g/mL -Tamaño de partícula <50µm 	
<p>Plata líquida</p> <ul style="list-style-type: none"> -Sólidos de plata 43% +/- 3% -Resistividad <60mOhms/sq/mil -Coeficiente de expansión 3×10^{-5} m/m/°C -Conductividad térmica 0.04J/cm-s°C (0.01 cal/cm-s°C) 	
<p>Etilenglicol</p> <ul style="list-style-type: none"> -Acidez (como CH₃COOH) 0.005% -Agua (H₂O) 0.10% -Cloruros (Cl) 0.5% -Color (Pt-Co) 10 -Hierro (Fe) 0.1ppm -Residuos después de ignición 0.005% 	

Etanol

- Metanol (como CH_3OH) 0.0%
- Agua (H_2O) 0.2%
- Color (APHA) 10
- Residuos después de evaporación 0.001%



4.2 Deposición de película de CdS

La preparación de la solución de CdS a depositar sobre los sustratos de vidrio soda-lima se realizó de la siguiente forma: dentro de un recipiente se vierten 1 gramo de Sulfuro de Cadmio, 0.8 gramos de Etilenglicol y 0.2 gramos de Etanol (CdS 50%, EG 40%, Etanol 10%). Posteriormente se baten hasta dejar la solución totalmente homogénea sin rastro de grumos, tal como se muestra en la Figura 4.1.

Una vez que la solución se encuentra lista, es vertida dentro de la cámara de atomización de la pistola del aerógrafo a presión de aire (airbrush WD-130). Previo a la deposición del CdS se calienta el sustrato de vidrio soda-lima durante 30 segundos a 160°C en la placa calefactora, inmediatamente después de 30 segundos de calentamiento se retira el sustrato de la placa calefactora y se realiza la deposición atomizando el CdS sobre el sustrato dentro de la campana de extracción para evitar daños a la salud que pudieran ser provocados por los gases despedidos por el material, tal como se muestra en la Figura 4.2.

Terminado este proceso, el sustrato es colocado en un recipiente con cubierta y se pone a reposar durante veinticuatro horas. Este proceso se repite una segunda vez, solo eliminando el paso de calentamiento, para asegurar que la película depositada cubra totalmente el área requerida, tal como se muestra en Figura 4.3.



Figura 4.1. Estado del arte de los dispositivos fotovoltaicos.



Figura 4.2. Deposición de solución CdS.



Figura 4.3. Película de CdS depositada sobre sustrato.

4.3 Deposición de película de CdSe

Una vez transcurridas las veinticuatro horas de haber realizado el segundo depósito de CdS en el sustrato de vidrio, se continúa con el depósito de la película de CdSe. La solución se prepara de la siguiente forma: dentro de un recipiente se vierte 0.5 gramos de Seleniuro de Cadmio y 0.33 gramos de Etilenglicol (CdSe 60%, EG 40%) y se baten hasta dejar la solución totalmente homogénea sin rastro de grumos.

Cuando la solución se encuentra lista se realiza el depósito del CdSe encima de la película de CdS mediante la sencilla técnica de goteo. Esta técnica solo requiere de una pequeña pipeta de plástico para gotear el CdSe. Una vez depositada una gota de CdSe sobre el CdS se dispersa con la misma pipeta para obtener el largo y ancho deseado, tal como se muestra en la Figura 4.4.

Una vez terminado este proceso, el sustrato es colocado en un recipiente con cubierta y se deja reposar durante veinticuatro horas. Todo el proceso de deposición se repite las veces necesarias para asegurar que la película depositada cubra totalmente el área requerida, tal como se muestra en Figura 4.5.



Figura 4.4. Película de CdSe depositada sobre sustrato.

4.4 Deposición de película de Ag

Veinticuatro horas después de haber realizado el depósito de CdSe sobre la película de CdS, se continúa con la deposición de la película de Ag. El depósito de plata se bate vigorosamente para homogeneizar la mezcla y se deja reposar por un minuto. Una vez que la solución de Ag se encuentra lista se deposita sobre la película de CdSe a través del goteo aplicado con una pipeta de plástico. Una vez depositada una gota de Ag sobre el CdSe, esta se dispersa con la misma pipeta para obtener el largo y ancho deseado, tal como se muestra en la Figura 4.6. Tras terminar este proceso, el sustrato se coloca en un recipiente con cubierta y se deja reposar durante veinticuatro horas.

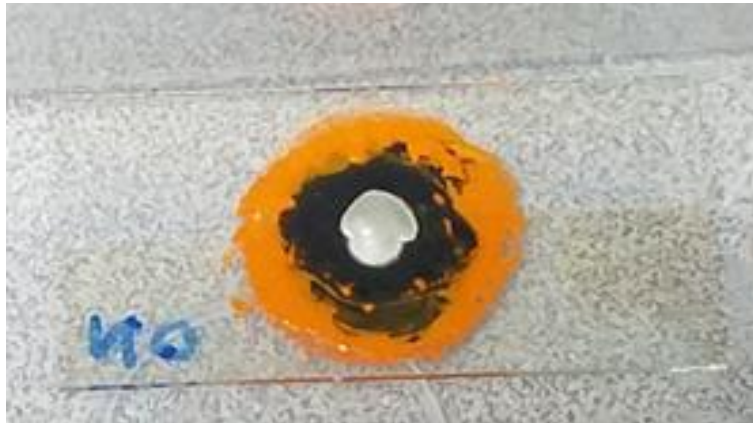


Figura 4.5. Película de Ag depositada sobre sustrato.

4.5 Horneado del conjunto de películas ITO/CdS/CdSe/Ag

Una vez que se finaliza la deposición de los materiales (CdS/CdSe/Ag) se prosigue con el horneado del conjunto de películas. En este caso se utilizó una mufla, tal como se muestra en la Figura 4.7 precalentada a 100 °C antes de ingresar el sustrato con las películas dentro de ella, los cuales se hornean a una temperatura de 100 °C durante 15 minutos. Después de los 15 minutos de horneado los sustratos se retiran de la mufla y se guardan en un depósito pequeño y con cubierta para controlar la humedad del ambiente, además de protegerlas contra polvo y otros residuos en el aire (Figura 4.8).



Figura 4.6. Mufla donde se realiza el horneado.



Figura 4.7. Celda solar unitaria.

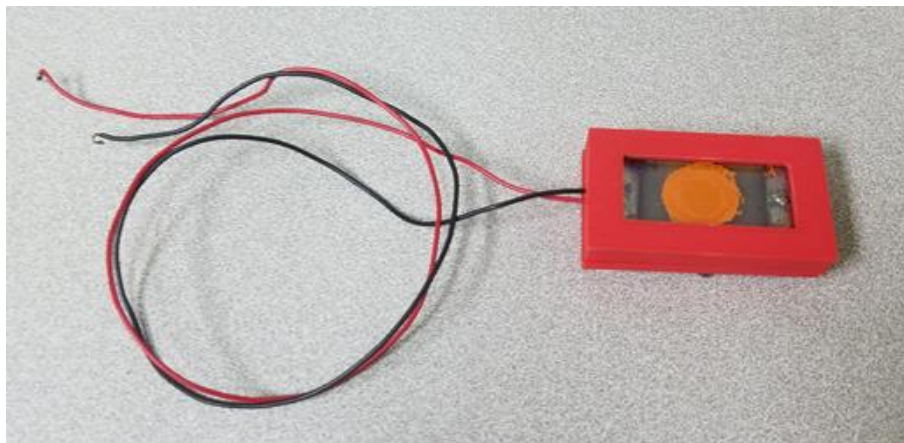


Figura 4.8. Celda solar unitaria montada en base para mediciones.

Basados en el procedimiento para la fabricación de la celda solar unitaria de la imagen 4.8, se fabricaron celdas de manera simultánea sobre el mismo sustrato como se observa en la Figura 4.9 para la fabricación de los paneles que se muestran en la Figura 4.10;

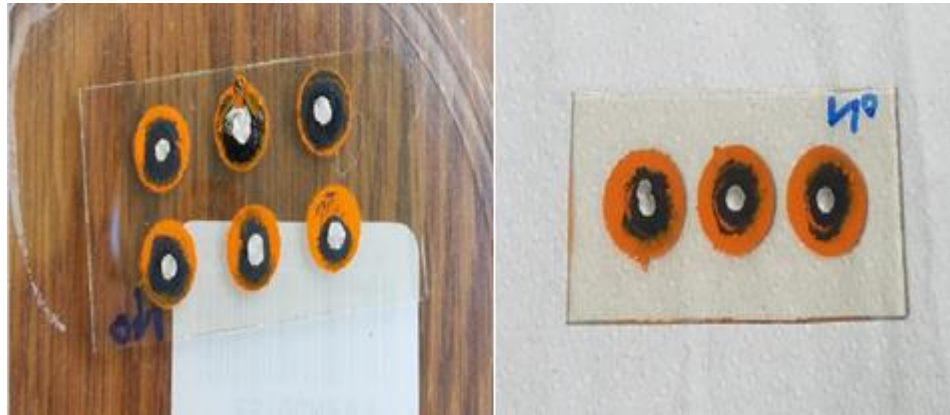


Figura 4.9. Sustratos con depósitos múltiples para construcción de paneles.

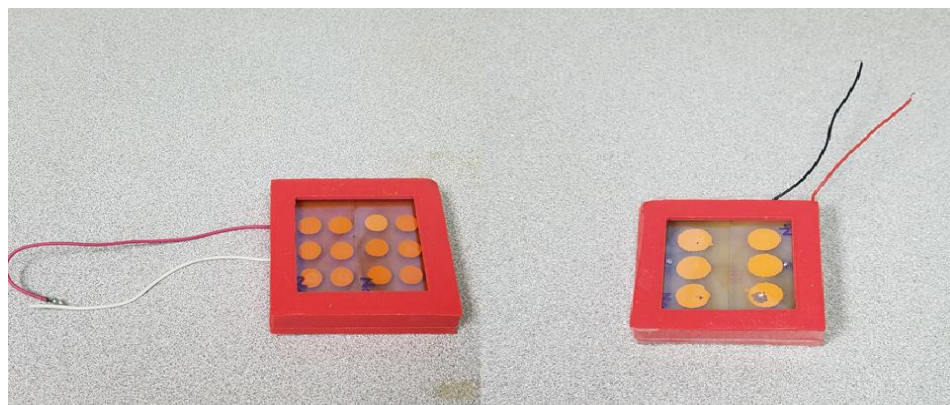


Figura 4.10. Paneles montados sobre bases para mediciones.

A lo largo del proceso de fabricación se pudieron observar algunos problemas de adherencia debido a la temperatura y etapas de horneado. Basados en el artículo de Ching-Fa Chi, et al. [13] probamos con el horneado a 300°C durante 30 minutos después de la deposición de la película de CdS y pudimos notar que la película quedaba totalmente pulverizada tras ser retirada del horno. Lo mismo ocurrió al disminuir el tiempo a 15 minutos a la misma temperatura por lo que se optó por disminuir la temperatura a 100°C , continuar con un tiempo de 15 minutos y solo realizar el horneado hasta terminar el depósito de todas las películas juntas.

Otro problema que necesita ser solucionado es la adherencia entre la película de CdSe y Ag, ya que el manejo constante de las celdas ocasiona que se desprendan una de la otra provocando que la celda deje de funcionar. Para esto se planea utilizar otro reactivo en lugar del EG durante la preparación de la película de CdSe, para más detalles consultar capítulo 6.

Capítulo 5

RESULTADOS OBTENIDOS

En este capítulo se resumen los principales resultados obtenidos en el diseño teórico e implementación práctica de la celda solar unitaria y las celdas solares en arreglo serie paralelo. De igual forma se muestra una correlación de las características de desempeño calculadas con las medidas.

5.1 Resumen de los resultados obtenidos en el diseño teórico.

La Figura 5.1 muestra la curva de respuesta V vs J obtenida en el diseño teórico de la De la misma manera, la Tabla 4.1 muestra un resumen de los parámetros de desempeño calculados y obtenidos a partir de la Figura 5.1. En esta Tabla 5.1 se puede observar un voltaje de circuito abierto V_{oc} de 0.2717 V y una densidad de corriente corto circuito J_{sc} de que son valores típicos para celdas unitarias fabricadas con los materiales utilizados. Es importante notar que estas características de desempeño, al ser demasiado pequeñas, no podrían alimentar una carga práctica por lo que es necesaria la conexión en paralelo y en serie de estas CU para incrementar el voltaje y la densidad de corriente hasta suministrar suficiente potencia para alimentar una carga real. De igual manera se puede observar un factor de llenado FF de 0.7035 y una eficiencia de conversión de potencia de 10.3911 que también son valores típicos para un CU de capa activa de CdSe.

La Figura 5.2 muestra la estructura final obtenida en el diseño teórico de la celda solar unitaria. En este dibujo se puede observar un ancho de la capa ventana (CdS) de 300 nm mientras que el de la capa activa (CdSe) es de 10 μm , esta diferencia se debe principalmente a que el CdS al ser material ventana su función principal es el ser uno de los materiales que forman la unión pn pero sin atenuar o disipar (lo menos posible) la radiación solar que pasa a través de él. También se puede observar en esta figura un largo L de dispositivo de 100 μm así como un ancho calculado de 96.19 μm .

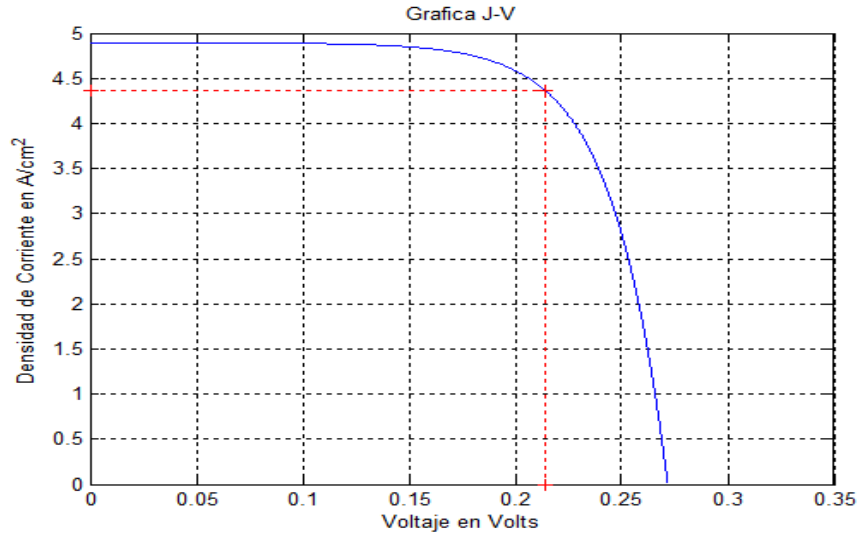


Figura 5.1. Curva de respuesta V vs J obtenida en el diseño teórico de la celda unitaria.

Los valores obtenidos a lo largo del capítulo 3 y el resumen de datos que se muestran a continuación en la Tabla 5.1, fueron corroborados con el uso de un programa de Matlab y cuya pantalla de resultados puede ser consultada en el capítulo de anexos, Figura A.1.

Tabla 5.1. Resultado de la caracterización de desempeño para dispositivo unitario (teórico).

$V_{oc} = 0.2717 V$
$J_{sc} = 4.8926 A/cm^2$
$V_{max} = 0.2142V$
$J_{max} = 4.3662 A/cm^2$
$P_{max} = 8.9959 * 10^{-5} W$
$n_{power} = 10.3911$
$FF = 0.7035$
$R_{max} = 510.0121\Omega$
$I_{max} = 4.1999 * 10^{-4} A$
$A_{trans} = 9619.3\mu m^2$

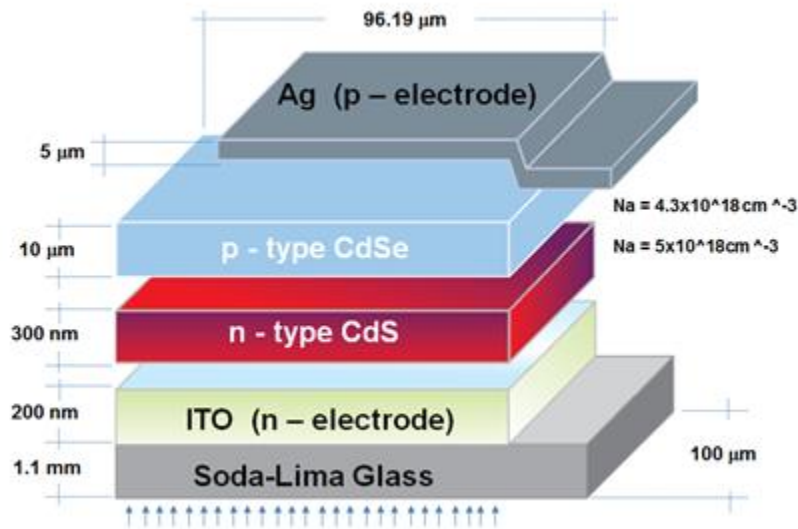


Figura 5.2. Estructura esperada de celda solar unitaria.

5.2 Resumen de los resultados obtenidos en la implementación práctica.

En la Tabla 5.2 se muestran los valores obtenidos a partir de las pruebas de circuito abierto y corto circuito que se le realizaron a las CU y a los paneles de seis y doce fotodiodos. Para la realización de estas pruebas se utilizó el equipo multímetro digital HP 3458A, con él se pudo obtener el V_{oc} , I_{sc} , J_{sc} y con un vernier marca Pittsburgh de 6" digital el área transversal promedio de capa activa (0.6903 cm^2). El resto de los valores de comparación como FF, n_{power} , R_{max} etc. no pudieron ser medidos debido a falta de equipo especializado y de tiempo para buscar alternativas dado a que tomó mucho más tiempo del esperado encontrar un procedimiento viable de preparación de celdas que produjeran resultados aceptables (no desprender material con manejo inmediato y poder obtener mediciones de ella).

Tabla 5.2. Resultado de la caracterización de desempeño para dispositivo unitario y múltiple (práctico).

# fotodiodos	V_{oc}	I_{sc}	J_{sc}
1	168 mV	142 nA	$2.0571 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$
6	200 mV	268 nA	$3.8824 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$
12	276 mV	450 nA	$6.5189 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$

5.3 Correlación entre los resultados teóricos y los resultados prácticos.

Realizando una comparación entre los resultados de las características de desempeño mostradas en la Tabla 5.1 y 5.2 se puede notar una notable diferencia entre los valores calculados y los valores medidos en la práctica como se muestra en la Tabla 5.3.

Parte de esta diferencia se le atribuye a que durante el diseño teórico de la celda solar unitaria se consideraron varios valores ideales, entre ellos que cada fotón que era absorbido por la capa activa generaba un excitón (par electrón-hueco) que contribuiría al proceso de generación de energía. Otros factores a considerar se encuentran en el desarrollo práctico de las celdas, como el tamaño de las partículas de CdS y CdSe, los reactivos utilizados para la preparación de las soluciones que fueron depositadas sobre los sustratos y el control sobre el tamaño deseado del área transversal.

Tabla 5.3. Comparación de la caracterización de desempeño para dispositivo unitario teórico vs práctico.

	Voc	Jsc
Teórico	0.2717 V	4.8926 A/cm ²
Práctico	0.168 V	2.0571x10 ⁻⁷ A/cm ²

Capítulo 6

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo se describen las conclusiones principales en la realización de este trabajo de tesis y se plantean trabajos futuros que complementaria de manera positiva los logros obtenidos.

6.1 Conclusiones

En el capítulo anterior se muestra que existe una diferencia notable entre los valores medidos con los valores calculados, pero se logró encontrar un método de deposición casero que diera como resultado una celda solar funcional.

Por lo tanto, la aportación principal de este trabajo de tesis consiste en la presentación detallada del diseño teórico y la implementación práctica de un panel de energía solar a partir de celdas unitarias de tipo Vidrio/ITO/CdS/CdSe/Ag. La parte del diseño teórico está basado en los tres procesos básicos de análisis de celdas solares; el cálculo de la tasa de generación de excitones $G(x)$ utilizando la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica en un solo eje, el cálculo de las concentraciones de carga $n(x)$ y $p(x)$ en las capas activas así como el dimensionamiento de la zona de agotamiento utilizando el algoritmo iterativo de Gummel y la caracterización del desempeño de la celda unitaria mediante el cálculo de la curva de densidad de corriente-voltaje (JV), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la densidad de corriente de corto circuito (J_{sc}), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión (η_{power}) utilizando las ecuaciones básicas para dispositivos de unión pn.

La parte de la implementación práctica está basada en el depósito de múltiples capas sobre un sustrato de vidrio soda-lima con ITO utilizando deposición por rocío en frío y goteo. Estas técnicas de deposición fueron seleccionadas por ser sencillas, rápidas y económicas. Se realizó la fabricación práctica de tres módulos de prueba; un primer módulo que incluye una sola CU en un sustrato de 50 mm por 25mm, un segundo módulo que incluye dos sustratos de 50 mm x 25 mm conectados en serie, en cada sustrato se fabricaron tres CU conectadas en paralelo logrando un arreglo final de seis celdas unitarias, y un tercer módulo que incluye dos sustratos de 50 mm x 25 mm conectados en serie, en cada sustrato se fabricaron seis celdas unitarias conectadas en paralelo logrando un arreglo final de doce celdas unitarias.

Los resultados teóricos obtenidos fueron comparados con mediciones prácticas realizadas a cada módulo fabricado. Para el módulo de una sola celda unitaria los parámetros más importantes el V_{oc} y la I_{max} obtenidos teóricamente son 271.7 mV y 0.4199 mA que comparados con los valores obtenidos de las mediciones prácticas, que son 168

mV y 142nA, se puede observar que el V_{oc} tiene una buena correlación debido a que ambos son de orden de los mV, pero para el caso de la corriente se puede observar que el valor calculado es del orden de los mA mientras que el medido es del orden de los nA. Esta correlación baja se puede atribuir a las eficiencias que fueron consideradas unitarias en el diseño teórico, que en la práctica no lo son, por ejemplo la eficiencia de generación de excitones y la eficiencia de colección de cargas por los electrodos de la celda fueron consideradas unitarias, pero en la práctica no ocurre que todo fotón absorbido genere un excitón ni tampoco cada excitón genere un electrón libre que será colectado por electrodos.

Las mediciones prácticas obtenidas de la CU implementada tienen una buena correlación con los valores calculados en el diseño teórico si se realiza un ajuste adecuado de las eficiencias de captación de fotones – generación de excitones y generación de excitones – electrones que participan en la generación de corriente.

6.2 Trabajo futuro

Como se ha mencionado en los capítulos anteriores, se encontraron varias mejoras que se pueden aplicar en el proceso de fabricación de las celdas, entre ellas el cambio del EG durante la preparación de la película de CdSe por Piridina, reactivo que ha mostrado mejores resultados en otras deposiciones con el mismo compuesto [14]. También se buscará una forma de controlar mejor el área transversal de la capa activa, cosa que no se pudo lograr muy bien en esta ocasión por restricciones de tiempo.

Para realizar las mediciones, las celdas eran ingresadas en pequeñas cajas que facilitaban su manejo para las pruebas, desgraciadamente, estas ejercían demasiada presión sobre el sustrato y las películas provocando que con el uso durante las pruebas, ajuntando el problema con el EG, se desprenda la película de Ag volviendo inservible la celda. Por lo tanto, se buscarán mejores formas de encapsular las celdas que nos permitan un manejo de ellas sin ejercer más presión de la necesaria sobre las películas aparte de eliminar la necesidad de equipo de protección.

Referencias

- [1] Redacción National Geographic. *Energía Solar*, nationalgeographic.es, 5 de Septiembre (2010).
<http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/energia-solar>
- [2] Beequerel E., et al., "An Overview of the Progress in Photoelectrochemical Energy Conversion",
Journal of Chemical Education, 9, pp. 561 (1983).
- [3] Secretaría de Energía (SENER), Boletín de Prensa 147, 26 de Diciembre (2016).
<https://www.gob.mx/sener/prensa/solido-crecimiento-de-la-capacidad-instalada-de-energiaslimpias>
- [4] Francisco J., et al., "Películas semiconductoras policristalinas para aplicaciones fotovoltaicas: Técnicas sencillas de fabricación", *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, Vol. 12(1), 1993.
- [5] Xiangdong ZHOU, et al., "Preparation and formation mechanism of CdS nano-films via chemical bath deposition", *Front. Chem. China.*, 3(1), 18–22 (2008)
- [6] Abdullah M.A., et al., "Synthesis, structure, and optical properties of CdS thin films nanoparticles prepared by chemical bath technique", *Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences*, 11, 27-31 (2012).
- [7] Ken Osborne, "Electroplating", Metal Protection Ltd, Auckland, with editing by John Packe
<https://nzic.org.nz/ChemProcesses/metals/8G.pdf>
- [8] Reynoso Soto, Edgar. et al., "Automatización en la deposición de películas delgadas de nanomateriales para la posible utilización en celdas solares", *Revista de Tecnología e Innovación*, vol.3 No.7, Junio (2016)
- [9] Kaneko S. et al., "Spray Pyrolysis Deposition for Thin-Film Formation and Its Application to SCD Study", 24th EU PVSEC, Hamburg. 21-25, September (2009).
- [10] Filipovic L. et al., "Modeling Spray Pyrolysis Deposition", *Proceeding of the World Congress on Engineering*, 2, 1-6 (2013).
- [11] National Renewable Energy Laboratory (NREL).
<https://energy.gov/eere/solar/downloads/research-cell-efficiency-records>
- [12] "Photonics Spectrum Reference Chart" by Scientech Technologies Pvt.Ltd
http://link.scientechworld.com/slc/wallchart/The_Photonic_Spectrum_Reference_chart.jpg
- [13] Ching-Fa Chi, et al. (2009), "The heat annealing effect on the performance of CdS/CdSe-sensitized TiO₂ photoelectrodes in photochemical hydrogen generation",

Department of Chemical Engineering, National ChengKung University, Tainan 70101,
Taiwan

[14] Artjay Javier and Edward E. Foos (2009), "Nanocrystal Photovoltaic Paint Sprayed With a Handheld Airbrush", IEEE Transaction on nanotechnology, Vol.8, No.5, September 2009.

ANEXOS

A.1 Tablas con índices de reflexión y coeficientes de extinción

Tabla A.1. Índices de reflexión y coeficientes de extinción ITO.

	$\lambda(\text{nm})$	R. Index $n(-)$	Ex. Coeff. K
ITO	350	2.2106	0.05851254
	360	2.1904	0.05400554
	370	2.1708	0.05037373
	380	2.1516	0.04748415
	390	2.1331	0.04522533
	400	2.1152	0.04350352
	410	2.098	0.04223955
	420	2.0815	0.04136638
	430	2.0657	0.04082706
	440	2.0505	0.04057307
	450	2.036	0.4056298
	460	2.0221	0.0407613
	470	2.0088	0.04113761
	480	1.9961	0.04166571
	490	1.9839	0.04232306
	500	1.9723	0.04309022
	510	1.9613	0.04395034
	520	1.9507	0.04488888
	530	1.9405	0.04589323
	540	1.9308	0.04695242
	550	1.9216	0.04805696
	560	1.9127	0.04919859
	570	1.9042	0.05037013
	580	1.8961	0.05156533
	590	1.8883	0.05277875
	600	1.8808	0.05400567
	610	1.8737	0.05524196
	620	1.8668	0.05648406
	630	1.8602	0.05772886
	640	1.8539	0.05897364
	650	1.8478	0.06021609
	660	1.842	0.06145417
670	1.8364	0.06268614	
680	1.831	0.06391049	
690	1.8259	0.06512594	
700	1.8209	0.06633137	
710	1.8161	0.06752584	
720	1.8115	0.06870857	
730	1.807	0.06987888	
740	1.8028	0.07103622	
750	1.7986	0.07218014	
760	1.7946	0.07331026	
770	1.7908	0.07442628	
780	1.7871	0.07552799	
790	1.7835	0.07661521	
800	1.7801	0.07768784	

Tabla A.2. Índices de reflexión y coeficientes de extinción CdS.

	$\lambda(nm)$	<i>R. Index n(-)</i>	<i>Ex. Coeff. K</i>
	350	2.5231	0.36695
	360	2.5159	0.36173
	370	2.5111	0.35637
	380	2.5084	0.35091
	390	2.5076	0.34538
	400	2.5086	0.33981
	410	2.5113	0.3342
	420	2.5158	0.32855
	430	2.5223	0.32283
	440	2.5312	0.317
	450	2.5432	0.311
	460	2.5598	0.30452
	470	2.5844	0.29578
	480	2.621	0.27651
	490	2.6618	0.23085
	500	2.68	0.15633
	510	2.6578	0.079838
	520	2.6092	0.029488
	530	2.5598	0.007797
	540	2.5216	0.0015002
	550	2.4935	0.00021337
	560	2.4718	0.000022916
<i>CdS</i>	570	2.4541	1.9497E-06
	580	2.439	1.3464E-07
	590	2.426	7.516E-09
	600	2.4144	3.516E-10
	610	2.4041	1.4625E-11
	620	2.3948	5.281E-13
	630	2.3863	0
	640	2.3786	0
	650	2.3715	0
	660	2.365	0
	670	2.3589	0
	680	2.3533	0
	690	2.348	0
	700	2.3431	0
	710	2.3386	0
	720	2.3343	0
	730	2.3302	0
	740	2.3264	0
	750	2.3229	0
	760	2.3195	0
	770	2.3163	0
	780	2.3133	0
	790	2.3104	0
	800	2.3077	0

Tabla A.3. Índices de reflexión y coeficientes de extinción CdSe.

	$\lambda(\text{nm})$	<i>R. Index n(-)</i>	<i>Ex. Coeff. K</i>
	350	2.767	0.85
	360	2.765	0.817
	370	2.763	0.781
	380	2.724	0.682
	390	2.762	0.731
	400	2.762	0.709
	410	2.764	0.688
	420	2.698	0.602
	430	2.764	0.649
	440	2.696	0.566
	450	2.773	0.619
	460	2.694	0.546
	470	2.785	0.583
	480	2.703	0.523
	490	2.796	0.551
	500	2.708	0.496
	510	2.708	0.496
	520	2.802	0.524
	530	2.812	0.506
	540	2.728	0.478
	550	2.829	0.482
	560	2.829	0.482
<i>CdSe</i>	570	2.76	0.481
	580	2.853	0.44
	590	2.866	0.402
	600	2.758	0.427
	610	2.853	0.344
	620	2.837	0.311
	630	2.74	0.275
	640	2.733	0.257
	650	2.834	0.268
	660	2.733	0.242
	670	2.739	0.247
	680	2.862	0.27
	690	2.755	0.231
	700	2.797	0.23
	710	2.812	0.23
	720	2.856	0.162
	730	2.856	-0.0001
	740	2.821	-0.0001
	750	2.761	-0.0001
	760	2.66	-0.0001
	770	2.721	-0.0001
	780	2.691	-0.0001
	790	2.673	-0.0001
	800	2.635	-0.0001

Tabla A.4. Índices de reflexión y coeficientes de extinción Ag.

	$\lambda(\text{nm})$	<i>R. Index n(-)</i>	<i>Ex. Coeff. K</i>
Ag	350	0.11436	1.3196
	360	0.0870299	1.5198
	370	0.066912	1.689
	380	0.052206	1.8412
	390	0.05	1.9741
	400	0.05	2.1035
	410	0.05	2.2325
	420	0.046105	2.3478
	430	0.040291	2.4566
	440	0.04	2.5528
	450	0.04	2.6484
	460	0.044439	2.7511
	470	0.049317	2.8545
	480	0.05	2.9476
	490	0.05	3.0391
	500	0.05	3.1309
	510	0.05	3.2233
	520	0.05	3.3157
	530	0.053285	3.4101
	540	0.056895	3.5074
	550	0.059582	3.5974
	560	0.056597	3.6786
	570	0.053612	3.7598
	580	0.050627	3.8409
	590	0.052277	3.9249
	600	0.055159	4.0097
	610	0.05804	4.0944
	620	0.059251	4.1768
	630	0.056909	4.2543
	640	0.054567	4.3318
	650	0.052225	4.4094
	660	0.049889	4.4869
	670	0.047667	4.5658
	680	0.045444	4.6447
690	0.043222	4.7236	
700	0.041	4.8025	
710	0.038932	4.8811	
720	0.03699	4.9596	
730	0.035049	5.038	
740	0.033107	5.1165	
750	0.031165	5.1949	
760	0.030614	5.2718	
770	0.032151	5.3463	
780	0.033687	5.4208	
790	0.035223	5.4953	
800	0.036759	5.5698	

Tabla A.5. Índices de Irradiación solar.

I_c/E_o	λ (nm)	R. Index n(-)
		350
	360	0.3924
	370	0.51666
	380	0.49751
	390	0.58457
	400	0.83989
	410	0.8091
	420	0.88467
	430	0.70134
	440	1.0993
	450	1.2881
	460	1.2791
	470	1.2749
	480	1.3825
	490	1.3968
	500	1.3391
	510	1.3497
	520	1.3349
	530	1.3598
	540	1.3096
	550	1.3648
	560	1.3885
	570	1.324
	580	1.3455
	590	1.2316
	600	1.3278
	610	1.3237
	620	1.3299
	630	1.2589
	640	1.2962
	650	1.2299
	660	1.2668
	670	1.2853
	680	1.265
	690	1.0746
	700	1.1636
	710	1.1954
	720	0.8994
	730	1.0294
	740	1.1119
	750	1.1273
	760	0.24716
	770	1.0646
	780	1.0687
	790	1.0045
	800	0.98859

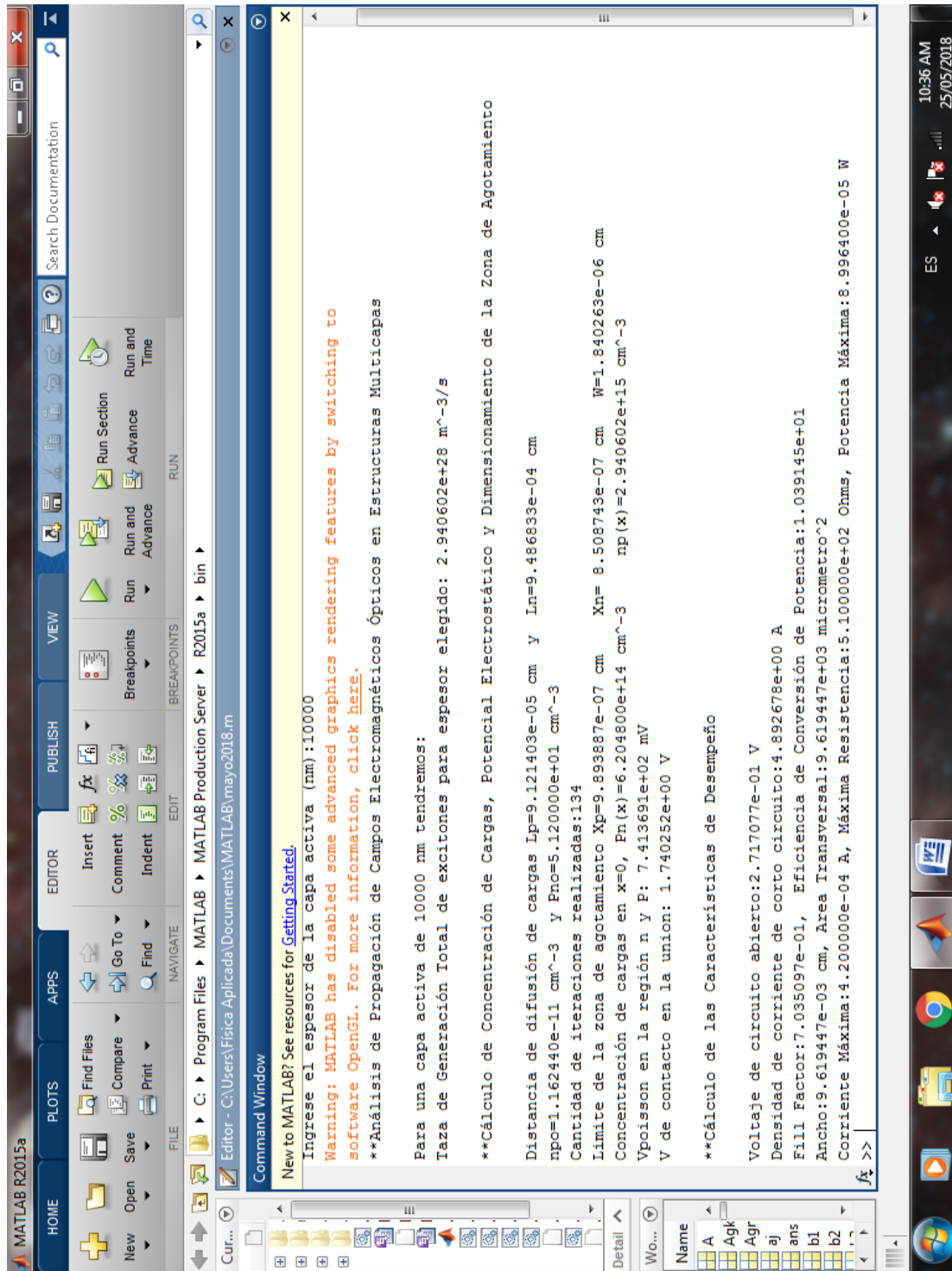


Figura A.1. Pantalla de resultados Matlab.