



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

“UTILIZACIÓN DE LA TÉCNICA DE
ELECTRODEPOSICIÓN DE
SEMICONDUCTORES PARA FABRICAR
UN DISPOSITIVO FOTOVOLTAICO DE
CdS/CdTe”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA:
STEPHANIA CAROLINA TARIN SAGASTE

DIRECTOR DE TESIS:
DR. CARLOS VILLA ANGULO

CODIRECTOR DE TESIS:
DR. RAFAEL VILLA ANGULO

MEXICALI, B.C

SEPTIEMBRE 2023

ÍNDICE

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	VII
NOMENCLATURA	VIII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO I. Técnica de electrodeposición	1
1.1. Principios generales	1
1.2. Principios de electrodeposición de aleaciones	2
1.3. Métodos	3
1.3.1. Proceso galvanostático	4
1.3.2. Proceso potencioestático	4
1.3.3. Uniformidad de espesor	5
1.3.4. Poder de lanzamiento	6
1.3.5. Microfabricación multinivel con electrodeposición	7
1.4. Propiedades de los electro depósitos	8
1.4.1. Estrés interno	8
1.4.2. Adhesión	9
1.4.3. Orientación del cristal y microestructura	10
1.4.4. Propiedades mecánicas de electrodepósitos	10
1.4.4.1. Ensayo de tracción	11
1.4.4.2. Dureza	11
1.4.4.3. Prueba de abultamiento	12
1.4.4.4. Estabilidad térmica	12
CAPÍTULO II. Introducción	14
2.1. Justificación del problema	14
2.2. Objetivos del proyecto	15
2.2.1. Objetivo general	15
2.2.2. Objetivos específicos	15
2.3. Hipótesis	16
CAPÍTULO III. Diseño teórico	17
3.1. Diseño teórico de la celda solar	17
3.1.1. Estructura y materiales de la celda solar fabricada	17
3.1.2. Análisis de la propagación del campo electromagnético óptico en la estructura multicapa	18
3.1.3. Cálculo de concentración de cargas, potencial electrostático y dimensionamiento de la zona de agotamiento	21
3.1.4. Cálculo de las características de desempeño	22
3.2. Resultados teóricos del diseño del dispositivo fotovoltaico	24

CAPÍTULO IV. Electrodeposición del dispositivo fotovoltaico con estructura Vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag	26
4.1. Materiales	26
4.2. Equipo	28
4.3. Limpieza del sustrato de vidrio soda-lima con ITO	30
4.4. Electrodeposición de la película de sulfuro de cadmio (CdS)	31
4.4.1. Preparación de la solución electrolítica	31
4.4.2. Establecimiento del sistema de electrodeposición	32
4.4.3. Realización de la electrodeposición	32
4.5. Electrodeposición de la película de telururo de cadmio (CdTe)	33
4.5.1. Preparación de la solución electrolítica	33
4.5.2. Realización de la electrodeposición	33
4.5.3. Deposición de la película de plata (Ag)	34
 CAPÍTULO V. Caracterización del dispositivo fotovoltaico Vidrio soda-lima/ITO/CdS/CdTe/Ag)	35
5.1. Realización de mediciones	35
5.2. Resultados obtenidos	36
 CAPÍTULO VI. Comparación de resultados	38
6.1 Resultados teóricos vs resultados prácticos	38
 CAPÍTULO VII. Conclusión y trabajo futuro	39
7.1. Conclusión	39
7.2. Trabajo futuro	40
 REFERENCIAS	41

Dedicatoria

La presente tesis se la dedico a mi hermano con todo mi corazón, quien a lo largo de estos años siempre estuvo conmigo, brindándome su apoyo, cariño y comprensión, por ser mi amigo y la persona que me da fuerza.

A mis padres que siempre han sido mi apoyo en los momentos difíciles, quienes me han brindado todo su amor y han sido mi gran ejemplo de fuerza y perseverancia.

Agradecimientos

Le agradezco a mí director de tesis, el Dr. Carlos Villa por su dedicación, paciencia, por todo su apoyo y orientación brindada, sin su apoyo y sus enseñanzas no habría sido posible este trabajo, así como ser un gran ejemplo de dedicación y amor por el trabajo y el conocimiento.

A mis compañeros de laboratorio, quienes se han convertido amigos, por siempre brindarme su apoyo durante estos años y por las horas de trabajo compartidas.

A todos los docentes que han sido parte de este proceso por transmitirme todos los conocimientos necesarios para realizar este trabajo.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme el apoyo económico durante este par de años, permitiéndome dedicar mi tiempo al desarrollo de este proyecto de tesis

Lista de figuras

Figura (1). Elementos esenciales del proceso de electrodeposición	2
Figura (2). Elementos esenciales del proceso de electrodeposición	4
Figura (3). Ejemplo donde la superposición aumentan el área de superficie y reducen la densidad de corriente general, lo que cambia las propiedades del depósito	6
Figura (4). Fabricación de estructuras multiniveles por electrodeposición	8
Figura (5). Celda solar de CdS/CdTe	14
Figura (6). Estructura de la celda solar fabricar y material de cada capa	18
Figura (7). Curva característica I-V obtenida teóricamente	24
Figura (8). Dimensionamiento teórico del dispositivo diseñado	25
Figura (9). Limpieza del sustrato con ITO	30
Figura (10). Medición de continuidad en un sustrato	31
Figura (11). Preparación de la solución electrolítica	31
Figura (12). Sistema de electrodeposición	32
Figura (13). Película de CdS electrodepositada	33
Figura (14). Película de CdTe electrodepositada sobre CdS	34
Figura (15). Dispositivo fotovoltaico fabricado por electrodeposición con estructura Vidrio/CdS/CdTe/Ag	34
Figura (16). Multímetros utilizados para la medición de voltaje y corriente	35
Figura (17). Circuito eléctrico armado para obtener la curva I-V	36
Figura (18). Curva I-V característica del dispositivo fotovoltaico fabricado	37

Lista de tablas

Tabla (1). Propiedades mecánicas de algunos materiales electrodepositados	11
Tabla (3.1). Resultados teóricos del desempeño del dispositivo fotovoltaico	25
Tabla (4.1). Materiales utilizados en la fabricación de las celdas solares	26
Tabla (4.2). Equipo de protección personal	28
Tabla (4.3). Equipo utilizado en el laboratorio	28
Tabla (5.1). Valores de voltaje y corriente en el dispositivo fabricado	37
Tabla (5.2). Características de desempeño en la celda solar unitaria	37
Tabla (6.1). Características de desempeño en la celda solar unitaria	38

Nomenclatura

Ag	Plata
Al	Aluminio
Al ₂ O ₃	Oxido de aluminio
Au	Oro
CdCl ₂	Cloruro de Cadmio
CdS	Sulfuro de cadmio
CdTe	Teluro de cadmio
CE	Contra electrodo
CH ₂ OHCH ₂ OH	Etilenglicol
C ₃ H ₆ O	Acetona
C ₃ H ₈ O	Alcohol isopropílico
CMP	Pulido químico mecánico
Co	Cobalto
CTE	Coficiente de dilatación térmica
Cu	Cobre
ET	Electrodo de trabajo
Fe	Hierro
ITO	Oxido de indio dopado con estaño
KI	Yoduro de potasio
MEMS	Sistemas microelectromecánicos
Mn	Manganeso
Ni	Níquel

Pb Plomo
Pt Platino
R Electrodo de referencia
S Azufre
Sn Estaño
TCO Oxido conductor transparente
TeCl₄ Tetracloruro de telurio
Ti Titanio
W Tungsteno
Zn Zinc

Resumen

En este documento de tesis de maestría se describe de manera la técnica utilizada para realizar el diseño teórico y la implementación práctica de una celda solar unitaria de tipo pn con estructura Vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag. Para el diseño teórico se usaron los siguientes tres procesos; la utilización de la técnica de la matriz lineal de transferencia óptica para el cálculo la tasa de generación de excitones $G(x)$ en la unión pn , el algoritmo iterativo de Gummel modificado para calcular el ancho de la zona de agotamiento y las concentraciones de carga $n(x)$ y $p(x)$ en cada material de la unión pn , y el cálculo de la curva de densidad de corriente-voltaje (JV), para caracterizar el desempeño de la celda unitaria mediante la obtención del voltaje de circuito abierto (Voc), la densidad de corriente de corto circuito (Jsc), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión de potencia (PCE).

Para la implementación práctica se utilizó el depósito de múltiples capas sobre un sustrato de vidrio soda-lima recubierto con ITO utilizando la técnica de electrodeposición. La técnica de electrodeposición utilizada es sencilla. Esta técnica permite hasta cierta medida controlar el tamaño de las películas depositadas sobre los sustratos.

En el **capítulo uno** se encuentra un resumen de los aspectos más importantes de la técnica de electrodeposición, así como del equipo necesario para implementar dicha técnica.

En el **capítulo dos** se encuentra la descripción de 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 el proceso que se llevó a cabo para realizar el diseño teórico de la celda solar unitaria desde la selección de los materiales hasta el cálculo de sus características de desempeño como los son el Voc , la Jsc , el FF y la η_{power} .

En el **capítulo cuatro** se describe el proceso de electrodeposición implementado para la fabricación de la celda solar. También, se describen los reactivos utilizados para la electrodeposición de cada una de las películas que componen la celda.

En el **capítulo cinco** se describe la caracterización obtenida del desempeño de la celda solar fabricada.

En el **capítulo seis** se describe las conclusiones y el trabajo futuro obtenidos de la realización de este trabajo de tesis.

Por último, se encunarán las referencias, así como los anexos con información utilizada durante la realización de es te trabajo de tesis.

Abstract

This master's thesis document describes the techniques used to carry out the theoretical design and practical implementation of a pn-type unitary solar cell with a Glass/ITO/CdS/CdTe/Ag structure. For the theoretical design the following three processes were used; the linear optical transfer matrix technique was used to calculate the exciton generation rate $G(x)$ at the pn junction, the modified Gummel iterative algorithm to calculate the width of the depletion zone and the charge concentrations $n(x)$ and $p(x)$ in each material of the pn junction, and the calculation of the current-voltage density (JV) curve, to characterize the performance of the solar cell and obtain the open circuit voltage (V_{oc}), the short circuit current density (J_{sc}), the fill factor (FF) and the power conversion efficiency (PCE).

For practical implementation, electrodeposition technique was used for a multilayer deposition on an ITO-coated soda-lime glass substrate. The used electrodeposition allows to control the size of the films deposited on the substrates.

In **chapter one** is described a summary of the most important aspects of the electrodeposition technique as well as the necessary equipment used for films deposition.

In **chapter two** is described the justification for carrying out this thesis work. Additionally, the general objective, the specific objectives and the proposed hypothesis are discussed.

Chapter three describes the calculation process realized to theatrically design the solar cell, from the selection of materials to the calculation of its performance characteristics such as V_{oc} , J_{sc} , FF and η_{power} .

In **chapter four** is described the electrodeposition process performed for the implementation of the solar cell. Also, the reagents used for the electrodeposition of each film that compound the solar cell are described.

Chapter five describes the characterization obtained from the performance of the implemented solar cell.

Chapter six describes the conclusions and future work obtained from the realization of this thesis work.

Finally, the references as well as the annexes with information used during the realization of this thesis work is listed.

CAPÍTULO I.

Técnica de electrodeposición

1.1 Principios Generales

Una de las grandes aplicaciones de la electrodeposición también llamada galvanoplastia de metales, aleaciones y semiconductores es en la fabricación de microsistemas y sistemas microelectromecánicos (MEMS). Si bien una gran cantidad de metales que se encuentran en los microsistemas se pueden electrodepositar a partir de electrolitos acuosos (Ni, Cu, Au, Pt, Fe, Pb, por nombrar algunos), algunos otros metales no, en particular Al, Ti y W puro. El níquel y sus aleaciones de alta resistencia constituyen algunos de los materiales más útiles para la fabricación de microsistemas por electrodeposición, debido a su uso en la formación de elementos mecánicos y magnéticos como engranajes de precisión, pestillos, motores y brazos de resorte de flexión [1]. La electrodeposición es una técnica versátil que abarca la gama de recubrimientos y películas delgadas de menos de una micra hasta espesores elementos mecánicos electroformados de milímetros de altura. Los materiales se depositan en condiciones ambientales sin necesidad de equipos caros de alto vacío. Las tasas de deposición pueden ser mucho más rápidas que los métodos de deposición de vapor y los espesores de película pueden ser tan altos como de un milímetro o dos. Tal como se muestra en la Figura (1), los elementos esenciales del proceso son el cátodo (la pieza de trabajo a recubrir), un ánodo (contraelectrodo) y un electrolito que posee el ion metálico en forma reducible. Se suministra corriente a la pieza de trabajo, que a menudo es un sustrato plano metalizado por deposición de vapor. Esta delgada capa de metal forma una capa conductora en la que se hace contacto eléctrico.

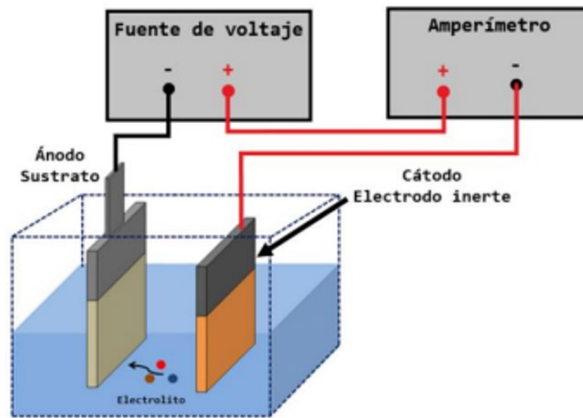


Figura (1). Elementos esenciales del proceso de electrodeposición.

1.2 Principios de la electrodeposición de aleaciones

Las propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión de muchos materiales se pueden mejorar en gran medida como resultado de la electrodeposición de diferentes aleaciones. Por ejemplo, el níquel de alta resistencia se puede hacer térmicamente estable con pequeñas cantidades de manganeso. Las aleaciones de bismuto y telurio poseen propiedades termoeléctricas superiores. Los principios de la electrodeposición de aleaciones y la amplia gama de aleaciones disponibles se han publicado en varias referencias [2, 3]. Una base de partida para comprender la relación entre la composición de electrolitos y contenido de la aleación resultante del depósito es considerar los potenciales de equilibrio y las concentraciones relativas de los iones metálicos. En primer lugar, a simple vista, los metales que tienen valores de potenciales de equilibrio muy cercanos pueden codepositarse para formar una aleación. Se dice que la electrodeposición de aleaciones es codeposición normal cuando la proporción resultante de los metales en la aleación es la esperada de acuerdo con los potenciales de equilibrio y concentraciones. Las aleaciones de estaño y plomo que se utilizan en placas de circuitos impresos para soldar los componentes entran en esta categoría [4]. Los potenciales de equilibrio son cercanos ($Pb = -0.126$ V, $Sn = -0.136$ V) y la composición de la aleación es posible a través de electrodeposición. El plomo es más noble y se depositará más rápido que el estaño, pero en su mayor parte la concentración del electrolito dicta el contenido de la aleación.

Los metales cuyos potenciales de equilibrio difieren significativamente aún se pueden codepositar reduciendo la actividad de los metales más noble. El ejemplo clásico es Cu–Zn, donde los potenciales de equilibrio son considerablemente diferentes ($Cu = +0.342$, $Zn = -0,762$). En electrolitos de sales simples, esta codeposición es imposible, ya que el cobre se depositará con

exclusión virtual de zinc. Sin embargo, las aleaciones de Cu–Zn se depositan fácilmente en electrolitos como cianuro. Desafortunadamente, una de las aleaciones más útiles para MEMS, Ni–Fe y Ni–Co, cae en la categoría de codeposición anómala. En esta categoría de electrodeposición el metal menos noble, se deposita preferentemente y el contenido de la aleación no controla las relaciones de potencial de equilibrio usuales (Ni= -0.257 , Fe= -0.447). Por esta razón, la concentración de hierro en el baño es mucho más bajo que el níquel y el proceso es muy sensible al transporte de masa ya los efectos de mezcla. Otra categoría de deposición anormal de aleaciones es la codeposición inducida, donde un elemento se codeposita como resultado de la actividad catalítica o sobrepotencial reducido de la superficie de la aleación. El tungsteno y el molibdeno son ejemplos de metales que se pueden electrodepositar como parte de una aleación, pero no como un metal puro, siendo Ni–W el ejemplo más notorio para MEMS. La aleación Ni–W tiene muchas propiedades atractivas que incluyen alta dureza, resistencia mejorada a la corrosión y al desgaste, y estabilidad térmica debido al alto punto de fusión del tungsteno. Históricamente, Ni–W ha sido difícil de procesar debido a las altas temperaturas ($80 - 90$ °C) y el alto pH ($8 - 11$) requerida en el electrolito.

El proceso general de recubrimiento se puede resumir en los siguientes puntos:

1. La fuente de alimentación bombea electrones al cátodo.
2. Los electrones del cátodo viajan a los iones cargados positivamente (cationes) de la solución electrolítica reduciendo la placa del cátodo.
3. La conducción iónica a través de la solución electrolítica completa el circuito hasta el ánodo.
4. En el ánodo tienen lugar dos procesos diferentes dependiendo de si el material del ánodo es inerte o soluble. Si el ánodo es inerte, un ion cargado negativamente de la solución electrolítica cede un electrón al ánodo. Si el material del ánodo es soluble un átomo del metal cede un electrón que va a la solución electrolítica como un ion metálico con carga positiva reponiendo el contenido del electrolito.
5. El electrón fluye desde el ánodo hasta la fuente de alimentación completando el circuito.

1.3 Métodos

La electrodeposición puede ser un simple ejercicio de laboratorio que involucre un vaso de precipitados y una fuente de alimentación o un proceso elaborado por medios para agitación, filtración, formación de campo eléctrico, control de temperatura y programas de corriente pulsada

o de varios pasos. En general estos procesos utilizan una celda electroquímica que es un sistema que está constituido por electrodos introducidos en un electrolito, en el que ocurre una reacción de oxidación-reducción capaz de absorber o generar corriente eléctrica. La celda consiste en tres electrodos: electrodo de trabajo (ET), contra electrodo (CE) y electrodo de referencia (R) [Figura (2)]. En cuestión práctica, la mayoría de los procesos de electrodeposición industrial son galvanostáticos, en lugar de potencioestáticos. Esto evita la necesidad de un electrodo de referencia y la variación en la resistencia que puede ocurrir como resultado de variaciones en la configuración del sistema de electrodeposición. La corriente puede ser directa o pulsada. Es una práctica común que los sustratos se sumerjan calientes en el electrolito, es decir, con el potencial aplicado y la corriente iniciando inmediatamente después de la entrada. Esto evita cualquier disolución u oxidación perjudicial de la semilla por el medio electrolítico.

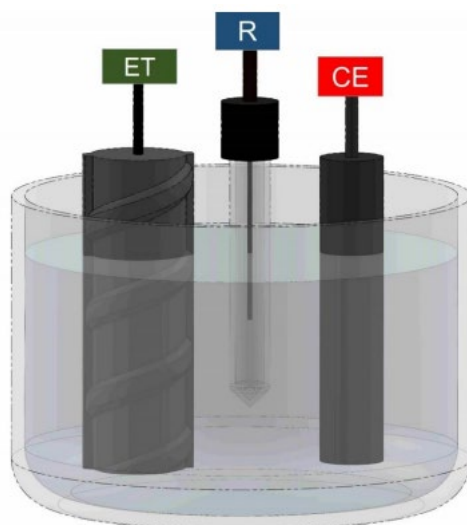


Figura (2). Elementos esenciales del proceso de electrodeposición.

1.3.1 Proceso galvanostáticos

Es un proceso donde el equipo electrónico tiene la función básica de mantener la corriente del electrodo de trabajo (ET) con respecto al electrodo de referencia (R), esto le permite mantener una corriente constante o variable en forma definida, en una celda electroquímica, sin importar la variación en el voltaje, resistencia óhmica, temperatura u otras fluctuaciones. Además, se monitorea el potencial del electrodo de trabajo con respecto al electrodo de referencia, en lugar de la corriente en la celda.

1.3.2 Proceso potenciostático

Es un proceso donde el equipo electrónico cumple con las siguientes condiciones: (1) es una fuente de potencia de corriente continua de potencial conocido, (2) suministra corrientes eléctricas que pueden variar desde nano a miliamperios, sin que el potencial altere su valor. Los potenciostatos se emplean en diferentes contextos, incluyendo técnicas electroanalíticas, tales como coulombimetría y voltamperometría, y en procesos de electrodeposición química enfocada hacia la síntesis de materiales. En el último caso, el potenciostato se emplea para controlar una celda y sus respectivos electrodos, donde se realiza la síntesis de los materiales. Existen diferentes tipos de potenciostatos–galvanostatos comerciales cada uno con características específicas y ventajas comparativas.

1.3.3 Uniformidad de espesor

El problema más común que existe una vez que se establecen las propiedades químicas y metálicas deseadas es la uniformidad del depósito en el sustrato. Aunque pasos posteriores para mejora la uniformidad, como el pulido, pueden proporcionar depósitos planos, generalmente no es deseable devastar demasiado el recubrimiento logrado. Las propiedades deseadas del depósito ya sean mecánicas, eléctricas o simplemente cosméticas, varían con la densidad de corriente y, por lo tanto, con la tasa de depósito. Un ejemplo se ilustra en la Figura (3), si la superficie de recubrimiento sobrepasa la altura del molde en cualquier punto, el área de recubrimiento comienza a aumentar y la densidad de corriente disminuye, lo que da como resultado que cambien las propiedades del depósito en aquellas áreas donde aún está depositando. Si la resistencia de polarización es baja, las áreas depositadas que sobresalen pueden atraer una cantidad desproporcionada de corriente y hacer que sea extremadamente difícil llenar las áreas en las que aún no hay depósito o hay poco depósito. Hay varios orígenes de la falta de uniformidad, por lo tanto, existen varios caminos para abordarlos. El primero, descrito como efecto terminal, se produce cuando la resistencia del metal o compuesto a depositar es significativa grande en comparación con otras resistencias, como la conducción a través del electrolito o el propio proceso de transferencia de carga. Las tasas de deposición son mayores cerca de los bordes o puntos del sustrato donde se realiza el contacto eléctrico. Esto puede convertirse en un problema para sustratos grandes y metal o compuesto a depositar delgados (como la electrodeposición de cobre

en sustratos muy grandes). Para la mayoría de las aplicaciones MEMS, una capa de metalización conductora de aproximadamente una micra es suficiente para eliminar el problema. De lo contrario, el electrolito puede hacerse más resistivo, por ejemplo, reduciendo la concentración de ácido sulfúrico en el caso del recubrimiento de cobre.

Para describir la influencia relativa de estas resistencias, a menudo se emplea el número adimensional de Wagner (Wa).

$$Wa = \frac{dn/dJ}{\rho_e L} \quad (1)$$

que en este caso describe la influencia relativa de la resistencia de polarización, o la resistencia inherente de la reacción de transferencia de carga hacia el electrolito, ρ_e es la resistividad del electrolito, y L es una longitud de conducción. Para $Wa < C1$, que indica que la resistencia de polarización es la dominante, la distribución de corriente es uniforme y la distribución de corriente secundaria es la predominante. Para $Wa > C1$, la distribución de corriente primaria predomina, es decir, la densidad de corriente es resultado de la distribución de potencial de la celda.

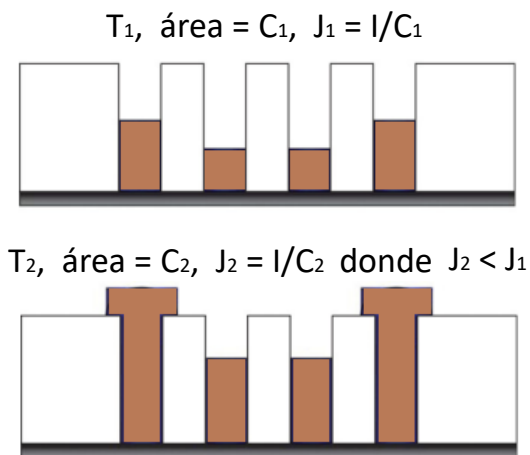


Figura (3). Ejemplo donde la superposición aumentan el área de superficie y reducen la densidad de corriente general, lo que cambia las propiedades del depósito.

En los casos donde la resistencia a la polarización es relativamente insignificante y la geometría de la celda dicta el potencial de campo, diferentes enfoques se han utilizado para mejorar la distribución de la densidad de corriente. Una forma es insertar una barrera aislante en el cátodo, o un escudo de cátodo, para ayudar a dar forma a las líneas de campo y dirigir la corriente hacia el centro del sustrato. Otro enfoque común es agregar elementos auxiliares (conocidos como ladrón) en el borde del sustrato para absorber la falta de uniformidad en los

bordes. Otro enfoque más es proporcionar múltiples ánodos, cada uno con corriente individual para dar forma en tiempo real a la distribución de corriente. Con una complejidad aún mayor, el cátodo puede ser dividido en múltiples caminos de corriente.

1.3.4 Poder de lanzamiento

Muchas de las primeras aplicaciones de la electrodeposición en segmentos delimitados por mascarar o con patrones específicos, en particular para el revestimiento de orificios en las placas de circuitos impresos, estaban limitadas por la capacidad de depositar uniformemente dentro de huecos profundos. Los electrolitos y las condiciones que podrían lograr la uniformidad requerida se consideraron que tenía un alto poder de lanzamiento. Por lo tanto, el poder de lanzamiento puede describirse como la relación de la tasa de deposición en el punto más lejano a la superficie con respecto al punto más cercano.

1.3.5 Microfabricación multinivel con electrodeposición

La electrodeposición también se puede utilizar para fabricar estructuras de varios niveles combinando un metal de sacrificio con un patrón electrodepositado. La Figura (4) ilustra el concepto, demostrado por primera vez por Guckel y colaboradores [5, 6]. Un primer metal, normalmente níquel, se electro deposita a través de una máscara que puede ser foto resistiva (fotoresist), donde posteriormente se elimina la máscara de fotoresist. Un segundo metal llamado metal de sacrificio es usado para recubrir el depósito de la primera electrodeposición. Posteriormente, se rectifica este metal de sacrificio a través de alguna técnica de pulido. El metal de sacrificio realiza dos funciones. La primera es proporcionar un soporte rígido a las estructuras durante la rectificación y la segunda es proporcionar una base conductora para iniciar la electrodeposición del nivel subsiguiente. Esto elimina la restricción de electro depositar en la estructura exclusivamente y permite la creación de componentes más complicados casi 3D.

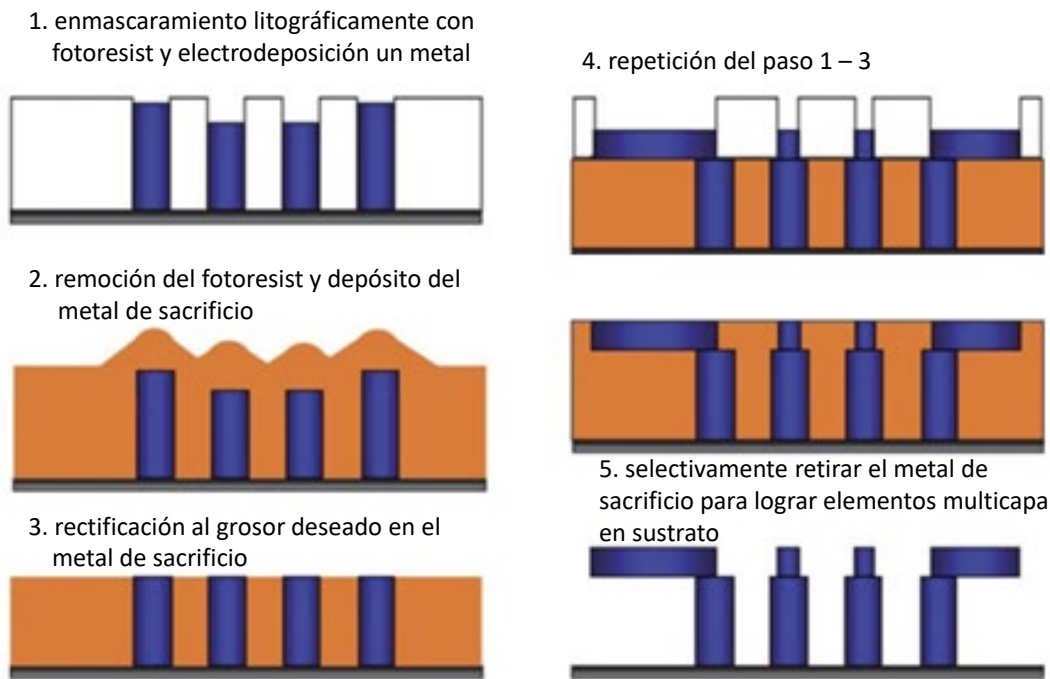


Figura (4). Fabricación de estructuras multiniveles por electrodeposición. Paso 1, enmascarar litográficamente con fotoresist el sustrato y electrodeposición un metal. Paso 2, remoción del fotoresist y depósito del metal de sacrificio. Paso 3, rectificación al grosor deseado en el metal de sacrificio. Paso 4, repetición del paso 1 – 3. Paso 5, selectivamente retirar el metal de sacrificio para lograr elementos multicapa en sustrato.

1.4 Propiedades de los electrodepósitos

1.4.1 Estrés interno

Para muchos metales electrodepositados, las tensiones internas durante el proceso de electrodeposición pueden ser lo suficientemente severas como para deformar el depósito o causar un desprendimiento catastrófico de la película electrodepositada. La severidad del efecto depende del metal, el proceso de electrodeposición, el espesor, y la geometría de la estructura depositada. Esta tensión no debe confundirse con las tensiones que se originan en el sustrato durante procesos posteriores al depósito relacionados con tratamientos térmicos a temperaturas elevadas [7]. Si el esfuerzo de tensión es de expansión, la película se despegará hacia arriba en las esquinas y los bordes donde las discontinuidades crean un aumento de fuerza localizado. Si el esfuerzo de la tensión es de compresión, la película puede pandearse o ampollarse. El grado de tensión interna limitará el espesor final de la película depositada antes de que falle, ya sea por delaminación del sustrato o grietas internas.

Hay varios métodos disponibles para medir la tensión, incluida la medición del arco del sustrato mediante interferometría o capacitancia, así como instrumentos *in situ* como el

contractómetro espiral. El método de la tira doblada es la técnica más simple para para medir la tensión, se recubren finas tiras de cobre con una película aislante, por un lado. A medida que el espesor de la película aumenta sobre la superficie, la tira de cobre se dobla según la naturaleza y magnitud de la tensión interna. El tamaño de la curvatura depende de las propiedades del depósito, el espesor y las propiedades mecánicas del sustrato. Si el espesor del sustrato, t_s , es mucho más grueso que el depósito, t_d , entonces se puede usar la ecuación de Stoney para relacionar el radio de curvatura, R , con la tensión, σ .

$$\frac{Et_s^2}{6(1-\nu)t_d R} \quad (2)$$

donde E y ν son el módulo de Young y la relación de Poisson del sustrato, respectivamente, considerando que el sustrato es inicialmente plano [8] (Stoney, 1909). El estrés es una función que depende de todos los parámetros de recubrimiento y del proceso de depósito. Por ejemplo, de alta resistencia las aleaciones de níquel con manganeso, hierro o cobalto están muy sometidas a esfuerzos de tracción. Los agentes de refinación a menudo se estresan en la compresión. Se ha utilizado la variación de la tensión intrínseca a través del espesor para expresar la curvatura en vigas galvanizadas de oro [9].

1.4.2 Adhesión

Para muchos procesos de deposición multicapa encontrados en la fabricación de MEMS, así como en el procesamiento de semiconductores, la adhesión y el patrón del depósito de metal o semiconductor al sustrato son críticos para el éxito de la fabricación. Existen diversas fuerzas en la interfaz de los metal o semiconductores que generan resultados de fabricación fallidos, incluidas las tensiones internas del propio depósito, las tensiones generadas como consecuencia del coeficiente de dilatación térmica (CTE), desajuste durante los procesos térmicos, y las tensiones aplicadas durante el pulido posterior de los depósitos como la ejercida por pulido químico-mecánico (CMP) en el proceso de damasquinado de cobre o por esmerilado del exceso de depósito en el proceso.

Los metales que se oxidan fácilmente como el aluminio, o que forman un óxido químicamente resistente, como el níquel, han demostrado tener una mal adhesión como sustratos en procesos de electrodeposición [10]. Existen otros métodos cualitativos para evaluar la adherencia en el proceso de electrodeposición. Por ejemplo, cuando el recubrimiento está sujeto

a temperaturas elevadas, aparecen una especie de ampollas lo cual indica una mala adherencia. También, existen instrumentos que miden la fuerza máxima en la falla y proporciona una medida más cuantitativa de la adhesión. En las electrodeposiciones generadas con alta resistencia generalmente la falla ocurre en la interfaz, por lo que esto se puede describir en la adhesión. El inconveniente de este enfoque es que la resistencia aparente del sustrato puede ser más débil que la resistencia interfacial, en cuyo caso solo se puede asignar una fuerza mínima. Existen otros métodos disponibles que generalmente emplean una serie de tratamientos con ácidos seguidos de una capa de choque o una capa delgada de metal generada con un electrolito preparado especialmente para cada superficie.

Si bien no existe un método universal para determinar un valor absoluto de adhesión, varios métodos dan una buena estimación de esta. Existen métodos que incluyen la prueba de pelado, prueba de cizallamiento y la prueba de cizallamiento anular [11, 12].

1.4.3 Orientación del Cristal y Microestructura

La naturaleza policristalina de la mayoría de los electrodepositos hace que sus propiedades sean muy sensibles a la forma de la microestructura, que es la distribución de tamaño de los cristales individuales, o granos, sus límites y su orientación reticular. Muchas propiedades, incluyendo la fuerza, la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión, las tasas de grabado, las propiedades magnéticas, dependen en gran medida de la textura u orientación del cristal del electrodeposito, que a su vez depende de todas las variables de procesamiento. Por ejemplo, la orientación del crecimiento en $\langle 110 \rangle$ está asociado con depósitos de alta resistencia, y es dependiente del pH y la densidad de corriente [13]. La influencia del sustrato es generalmente insignificante una vez que el depósito supera un espesor de unas pocas micras.

1.4.4 Propiedades mecánicas de electrodepositos

Las propiedades mecánicas de los electrodepositos, en particular la resistencia y la dureza, se han mejorado tanto que hoy en día se pueden lograr depósitos de alta resistencia al desgaste. En la actualidad se conocen una gran cantidad de propiedades mecánicas y diferentes procesos de electrodeposición para manipularlas [14]. Como los materiales estructurados en elementos micromecánicos, tal como si fueran brazos de flexión de resorte, el electrodeposito provoca deformaciones permanentes, y por lo tanto requiere alta resistencia. Además, las propiedades

mecánicas pertinentes al comportamiento del resorte, como la rigidez o el módulo, deben caracterizarse con precisión. La Tabla (1) muestra una gama de resistencias y módulos para varios metales electrodepositados.

Tabla (1). Propiedades mecánicas de algunos materiales electrodepositados.

	Modulo (GPa)	Límite elástico (MPa)	Dureza de Vickers
Nickel, grano grueso	160	300 – 500	200 – 300
Nickel, aditivo orgánico	180	800 – 1200	400 – 600
Ni – 1% Mn	190	600 – 1200	400 – 600
Ni – 56% Co	200	600 – 1100	400 – 600
Gold	70	100	50 – 100
Gold duro	70	200	150 – 200
Cobre	11	300 – 400	50 – 200

1.4.4.1 Ensayo de tracción

El método tradicional para determinar la resistencia y el módulo de elasticidad de un metal es a través de una prueba de tracción, en la que de una forma precisa la muestra se estira hasta que se rompa o falle. Esto produce la curva de tensión–deformación de la cual puede determinarse el módulo, el límite elástico, la resistencia a la tracción y la deformación hasta que se fracture. Este enfoque se puede aplicar a los electrodepositos de dos maneras. El primero es depositar una película por electrodeposición con un espesor suficiente, y luego forzar o moldear a la forma requerida a través de estampado o maquinado. El segundo enfoque es definir litográficamente el molde de tracción, siempre que la resistencia sea lo suficientemente gruesa (se necesitan unos pocos cientos de micrómetros para un probador convencional). Con este último enfoque se capturan detalles asociados a las características del material, pero sufre de largos tiempos de procesamiento y métodos de litografía especializados. Se han desarrollado algunos instrumentos especializados específicamente para pruebas de tracción de película delgada, pero los enfoques no son estándar.

1.4.4.2 Dureza

Otro indicador de la resistencia de un metal electrodepositado es su dureza, determinada al indentar una superficie con un cilindro piramidal con punta de diamante. Para una carga conocida, la superficie se deforma plásticamente y el tamaño de la muesca restante se utiliza para

caracterizar la resistencia del material. El número resultante de dureza se ha correlacionado con el flujo de esfuerzo, o límite elástico, para numerosos metales, aunque el valor exacto en relación es único para cada material. Existen varias escalas para la dureza, incluidas Vickers, Knoop, Rockwell y Brinell. La dureza Vickers se define como

$$H = 1854 \frac{P}{a^2} \quad (3)$$

donde a es la longitud de la diagonal de la muesca en micras y P es la carga en gramos-fuerza. Para películas delgadas y recubrimientos, una prueba de microdureza se usa comúnmente, donde la carga aplicada es lo suficientemente pequeña como para reducir el tamaño de la muesca muy por debajo del espesor del depósito. Un requisito para la prueba de microdureza es que la profundidad de penetración sea inferior a un tercio de la profundidad total del material; de lo contrario, el sustrato influirá en la medición. Además, la superficie dentada debe ser ópticamente plana para proporcionar una medición precisa. La rugosidad de las películas tal como se deposita hace difícil la toma de mediciones. Por lo tanto, las muestras deben prepararse cuidadosamente para mostrar una superficie lisa. Sin embargo, la técnica es sencilla y comúnmente es utilizada para caracterizar metales electrodepositados.

1.4.4.3 Prueba de abultamiento

Otra técnica para medir las propiedades mecánicas de películas delgadas es la prueba de abultamiento, en la que la desviación de una membrana bajo presión arroja la medida de la tensión y la deformación, de acuerdo con la ecuación

$$\sigma = \frac{2P\omega^2}{ht} \quad (4)$$

donde el esfuerzo está relacionado con la presión P , el ancho de la membrana w , la deflexión central h y el espesor de la película t [15].

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \frac{h^2}{6\omega^2} \quad (5)$$

aquí ε es la deformación y ε_0 la deformación residual.

1.4.4.4 Estabilidad térmica

En muchas aplicaciones de microsistemas, los componentes fabricados tendrán una temperatura de operación elevada o deben conservar su rendimiento después de ser sometido a temperaturas elevadas. Desafortunadamente, para muchos metales, la naturaleza del proceso de electrodeposición que lo hace útil también produce microestructuras poco estables. En algunos

casos, los cambios en la microestructura como la recrystalización y el crecimiento de granos pueden hacer que el electrodepósito pierda sus propiedades.

Sin embargo, para muchos metales como el cobre se requiere una recrystalización para reducir la resistividad eléctrica y hacerlo estable a procesamientos en alta temperatura [16]. La recrystalización disminuye aproximadamente un 20% la resistividad eléctrica lograda en el electro depósito. Por ejemplo, se sabe que las películas de cobre electrodepositadas se recrystalizan fácilmente a temperaturas tan bajas como la temperatura ambiente. Este proceso de auto-recocido depende en gran medida de las condiciones de depósito [17].

Sin embargo, para electrodepósitos de níquel, se requiere conservar la microestructura de grano fino para que el material tenga de alta resistencia. Los electrodepósitos de níquel puro son térmicamente inestables, manifestando crecimiento de grano y evolución de textura comenzando cerca de 300 °C [18, 19] encontraron que el inicio del crecimiento del grano para el Ni electrodepositado nanocrystalino puede ser tan bajo como 220 °C. Para electrodepósitos de Ni-Fe (20%) [20] se encontró que el crecimiento rápido del grano comenzaba cerca de 300 °C, y la dureza caía en un 50% con una temperatura de recocido de 400 °C. Se ha demostrado que las aleaciones Ni-W poseen una mejor estabilidad térmica [21] demostró que los electrodepósitos de Ni-W nanocrystalino (20%) se conservó microestructuralmente hasta 400 °C, con buena estabilidad incluso a 700 °C. Las aleaciones de Ni-Mn (1%) también han demostrado una notable estabilidad térmica, con altas resistencias y una microestructura de grano fino preservada con tratamientos térmicos de hasta 600 °C [22].

CAPÍTULO II.

Introducción.

2.1. Justificación del problema.

La Figura (5) muestra la estructura de una celda de Vidrio/TCO/CdS/CdTe/metal. El dimensionamiento de la capa de sulfuro de cadmio (CdS) es en el orden de 200 nanómetros mientras que el dimensionamiento del telururo de cadmio (CdTe) es en el orden de algunos micrómetros. Por lo tanto, para poder depositar películas ultra-delgadas de CdS y CdTe a bajos costos y de una forma sencilla, se requiere de una técnica que permita lograr dichos dimensionamientos.

Tras estudiarse las diferentes técnicas para depositar películas delgadas a bajos costos y de una forma sencilla se identificó que la técnica de electrodeposición es adecuada, por lo que en este trabajo se pretende utilizar dicha técnica para lograr la deposición de la heteroestructura CdS/CdTe en Vidrio/TCO. Como se mencionó previamente el sustrato a utilizar será Vidrio/TCO. El sustrato sirve como un soporte mecánico para la película y en aplicaciones electrónicas puede servir como aislante o contacto óhmico (caso del TCO). Para que un material se utilice como sustrato debe tener estabilidad térmica, alta resistencia mecánica y adecuada adhesión de la película en intervalos amplios de temperatura. La superficie del sustrato deber ser lisa y suave para obtener buena reproducibilidad de las películas depositadas. Además, debe considerarse la disponibilidad y precio del material. Los sustratos más ampliamente usados para películas policristalinas son vidrio, sílice fundida y cerámicos (la mayoría basados en Al_2O_3) [23].

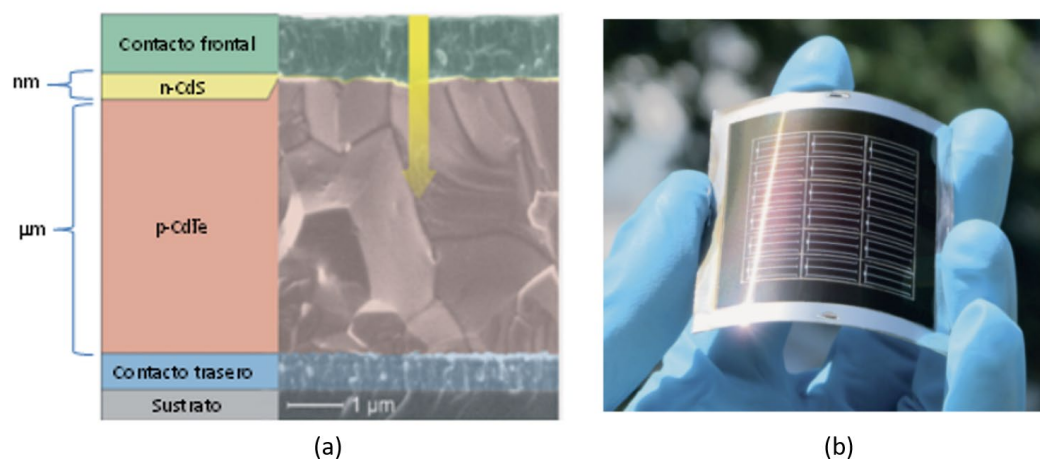


Figura (5). Celda solar de CdS/CdTe; a) fotografía de la heteroestructura y su dimensionamiento, b) fotografía de la celda final.

2.2. Objetivos del proyecto.

2.2.1 Objetivo general.

El objetivo general de este trabajo de tesis tiene dos vertientes; la primera es diseñar teóricamente una celda solar unitaria de CdS/CdTe, calculando la tasa de generación de exítonos (G_L) utilizando la técnica de la matriz de transferencia óptica, el ancho de la zona de depleción y concentración de cargas en las uniones pn se calcula utilizando el algoritmo de Gummel modificado y para la obtención de las características de desempeño la gráfica $J-V$ obtenida a partir de la ecuación de corriente de la unión pn . La segunda vertiente es utilizar la técnica de electrodeposición para la fabricación de una celda solar unitaria de CdS/CdTe diseñada teóricamente.

2.2.2 Objetivos específicos.

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

1. Realizar el estudio del arte de la utilización de la técnica de electrodeposición para la fabricación de celdas solares.
2. Utilizar la técnica de la matriz de transferencia óptica para el cálculo de la tasa de generación de exítonos (G_L) en una celda solar unitaria de unión pn basada en el sistema de materiales CdS/CdTe.
3. Utilizar el algoritmo de Gummel modificado para el cálculo del ancho de la zona de depleción fuera de equilibrio y concentración de cargas en las uniones pn basadas en el sistema de materiales CdS/CdTe.
4. Utilizar la gráfica $J-V$ obtenida a partir de la ecuación corriente de la unión pn para la obtención de las características de desempeño de las celdas solares unitarias diseñadas basadas en el sistema de materiales CdS/CdTe.
5. Utilizar técnicas de electrodeposición para depositar las películas delgadas en un arreglo de celda solar tipo Vidrio/TCO/Cds/CdTe/metal.
6. Caracterizar el desempeño de la celda solar obtenida, mediante la medición de las curvas de densidad de corriente-voltaje (JV), el voltaje de circuito-abierto (V_{oc}), la densidad de corriente de corto - circuito (J_{sc}), y la eficiencia de conversión (PCE).

2.3. Hipótesis.

La hipótesis de este trabajo se establece de la siguiente manera; utilizando la técnica de electrodeposición es posible depositar películas delgadas de CdS y CdTe con características estructurales y ópticas que satisfacen los requerimientos de aplicación de absorbentes fotónicos con aplicación en dispositivos fotovoltaicos.

CAPÍTULO III.

Diseño teórico.

3.1 Diseño teórico de la celda solar

El objetivo del diseño teórico de una celda solar unitaria es estructurar y dimensionar el dispositivo a partir de un conjunto de requerimientos de entrada. Los requerimientos de entrada normalmente incluyen el espectro de radiación incidente, el voltaje, la corriente y la potencia máximos que deberá entregar el dispositivo. El proceso de estructuración del dispositivo consiste en determinar el material que tendrá cada capa, así como el orden o posición de estas en el dispositivo. El proceso de dimensionamiento consiste en determinar las dimensiones físicas incluyendo grueso, ancho y largo de cada capa que formara al dispositivo.

El procedimiento de diseño teórico de una celda solar inorgánica está constituido de tres procesos. El primero es un análisis óptico que consiste en determinar la propagación del campo electromagnético óptico en la estructura multicapa que forma el dispositivo, para obtener la tasa de generación de excitones (G_t) en la capa activa. El segundo es un análisis eléctrico que consiste en determinar las concentraciones de cargas, el potencial electrostático y el dimensionamiento de la zona de agotamiento de la unión pn (fuera de equilibrio térmico) que forma el dispositivo. Y el tercero consiste en realizar el cálculo de las características de desempeño del dispositivo incluyendo el V_{oc} , J_{sc} , y PCE. En los siguientes apartados se describirán los detalles de cada uno de estos procesos.

3.1.1 Estructura y materiales en la celda solar fabricada

La celda solar orgánica fabricada en este trabajo de tesis tiene la estructura Vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag, tal como se muestra en la Figura (6). Es un dispositivo heteroestructurado, donde el sustrato es un vidrio soda–lima obtenido de la compañía Techinstro, con un espesor 1.1 mm con dimensiones de 25 x 25 mm de ancho y largo respectivamente, con 10Ω de resistividad y una transmitancia >90%. El sustrato tiene un recubierto de ITO de 200 nm de espesor. Posteriormente, tiene una capa de CdS como semiconductor de tipo p , el cual favorecer la extracción de huecos e iguala la superficie rugosa del ITO. Sobre el semiconductor de tipo p hay una capa de semiconductor CdTe tipo n obtenido de la compañía Sigma-Aldrich. Finalmente, como electrodo posterior tiene una capa Ag.

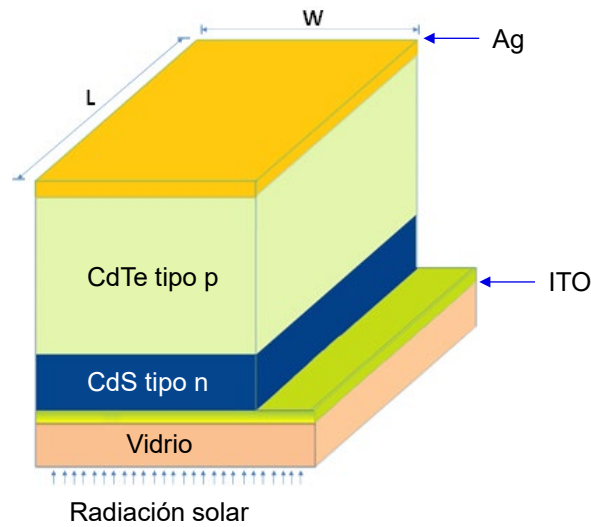


Figura (6). Estructura de la celda solar fabricar y material de cada capa.

3.1.2 Análisis de la propagación del *campo electromagnético óptico* en la estructura multicapa

Para realizar el análisis óptico se utilizó la teoría de la matriz de transferencia óptica, con la cual se modeló la variación en la intensidad del campo eléctrico óptico (luz) en todo el dispositivo fotovoltaico. Se consideró que el dispositivo consta de un apilado de m capas, y que cada capa esta descrita por su índice de refracción complejo, $\tilde{n}(\lambda) = \bar{n}(\lambda) + i\bar{k}(\lambda)$ y espesor d . Las m capas están intercaladas entre el sustrato de vidrio y el aire. Considerando la luz como ondas planas con incidencia normal sobre el sustrato, el campo eléctrico de la luz en cualquier punto del dispositivo es una cantidad compleja con índice positivo $E^+(x)$ para las ondas que viajan de izquierda a derecha e índice negativo $E^-(x)$ para las ondas que viajan de derecha a izquierda. El comportamiento de la luz en la interfaz entre dos capas, j y k , se describe mediante la matriz de interfaz de 2×2 dada por la ecuación (6), que contiene los coeficientes complejos de reflexión (r_{jk}) y transmisión (t_{jk}) de Fresnel.

$$I_{jk} = \frac{1}{t_{jk}} \begin{bmatrix} 1 & r_{jk} \\ r_{jk} & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde los coeficientes $r_{jk} = (\tilde{n}_j - \tilde{n}_k)/(\tilde{n}_j + \tilde{n}_k)$ y $t_{ij} = 1 + r_{jk}$. De manera similar, el efecto en el campo eléctrico óptico por propagarse en cada capa se describe a través de la matriz de propagación de 2×2 dada por la ecuación (7).

$$P_j = \begin{bmatrix} e^{-i\xi_j d_j} & 0 \\ 0 & e^{i\xi_j d_j} \end{bmatrix} \quad (7)$$

donde $\xi_j = 2\pi\tilde{n}_j/\lambda$ y λ es la longitud de onda de la luz. Los componentes de campo eléctrico óptico en el sustrato (subíndice o) están relacionados con los del aire (subíndice $m+1$) por la matriz de transferencia total S dada por la ecuación (8).

$$\begin{bmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} E_{m+1}^+ \\ E_{m+1}^- \end{bmatrix} \quad (8)$$

donde M es el producto de todas las matrices de interfaz y propagación expresado en la ecuación (9).

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \left(\prod_{n=1}^m I_{(n-1)n} L_n \right) I_{m(m+1)} \quad (9)$$

Los campos eléctricos en la ecuación (8) son los existentes en las fronteras derecha e izquierda del conjunto de m capa que constituyen la parte activa del dispositivo. Por lo tanto, los coeficientes de reflexión y transmisión son $r = E_0^-/E_0^+ = M_{21}/M_{11}$ y $t = E_{m+1}^+/E_0^+ = 1/M_{11}$ respectivamente. Para calcular el campo eléctrico interno en una capa j , el sistema multicapa se dividió en dos subconjuntos separados por la capa j : un conjunto formado por las capas previas a la capa j indicado con $'$, y un conjunto formado por las capas posteriores a la capa j indicado con $''$. Donde la matriz de transferencia total esta dad por la ecuación (10).

$$M = M_j' L_j M_j'' \quad (10)$$

donde

$$M_j' = \left(\prod_{n=1}^{j-1} I_{(n-1)n} L_n \right) I_{(j-1)j} \quad (11)$$

y

$$M_j'' = \left(\prod_{n=j+1}^m I_{(n-1)n} L_n \right) I_{m(m+1)} \quad (12)$$

Los sistemas parciales M_j' y M_j'' , tiene sus propios coeficientes de reflexión y transmisión dados por $t_j'' = 1/M_{j11}''$ $t_j' = 1/M_{j11}'$ $r_j'' = M_{j21}''/M_{j11}''$, and $r_j' = 1/M_{j11}'$, respectivamente. Combinando las ecuaciones (10), (11) y (12) con sus correspondientes coeficientes, se puede encontrar un par de coeficientes internos de transferencia que relacionan la onda plana incidente con el campo eléctrico óptico interno que se propaga en sentido positivo y negativo del eje x en la capa j . Estos coeficientes son para la interfaz izquierda e interfaz derecha de la capa j y están dados por las ecuaciones (13) y (14), respectivamente.

$$t_j^+ = \frac{E_j^+}{E_0^+} = \frac{t_j}{1 - r'_{j-} r''_j e^{i2\xi_j d_j}} \quad (13)$$

$$t_j^- = \frac{E_j^-}{E_0^+} = \frac{t_j - r''_j e^{i2\xi_j d_j}}{1 - r'_{j-} r''_j e^{i2\xi_j d_j}} = t_j^+ r''_j \cdot e^{i2\xi_j d_j} \quad (14)$$

donde $r'_{j-} = -M'_{j12}/M'_{j11}$. Usando las ecuaciones (13) y (14), se obtiene el campo eléctrico total en un punto de la capa j a una distancia x del lado derecho de la interfaz ($j-1$) que en términos del campo incidente E_0^+ esta dado por la ecuación (15).

$$\begin{aligned} E_j(x) &= E_j^+(x) + E_j^-(x) \\ &= t_j^+ \left[e^{i\xi_j x} + r''_j e^{i\xi_j(2d_j - x)} \right] E_0^+ \end{aligned} \quad (15)$$

La ecuación (15) también puede ser expresada en términos de los elementos de la matriz de transferencia del sistema parcial para $0 \leq x \leq d_j$, y está dada por la ecuación (16)

$$E_j(x) = \frac{S''_{j11} e^{-i\xi_j(d_j - x)} + S''_{j21} e^{i\xi_j(d_j - x)}}{S'_{j11} S''_{j11} e^{-i\xi_j d_j} + S'_{j12} S''_{j21} e^{i\xi_j d_j}} E_0^+ \quad (16)$$

Dado que el número de estados excitados en una posición dada en la estructura es directamente dependiente de la energía absorbida por el material, la energía disipada por campo electromagnético en el material es la que interesa para el caso de dispositivos fotovoltaicos. La energía disipada en la capa j en posición x debido a la incidencia normal de campo incidente esta dad por la ecuación (17).

$$Q_j(x, \lambda) = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \alpha_j \bar{n}_j |E_j(x)|^2 \quad (17)$$

donde c es la velocidad de la luz, ϵ_0 es la permitividad en espacio libre, \bar{n}_j el índice de refracción complejo y α_j el coeficiente de absorción dado por $\alpha_j = 4\pi k_j / \lambda$, donde \bar{k}_j es el coeficiente de extinción de la capa j . Entonces, el número de estados excitados en una capa es proporcional al número de fotones absorbidos, por lo que $|E|^2$ versus la posición x en una capa representa la producción de estados excitados en cada punto. Expandiendo la ecuación (17) con el uso de la ecuación (10), la energía disipada por segundo en la capa j en posición x resulta la ecuación (18).

$$Q_j = \alpha_j T_j I_0 \left[e^{-\alpha_j x} + \rho_j''^2 \cdot e^{-\alpha_j(2d_j - x)} + 2\rho_j'' \cdot e^{-\alpha_j d_j} \cdot \cos\left(\frac{4\pi\bar{n}_j}{\lambda}(d_j - x) + \delta_j''\right) \right] \quad (18)$$

donde I_0 es la intensidad de la luz incidente, $T_j = (\bar{n}_j/\bar{n}_0)|t_j^+|^2$ es la transmitancia interna, y ρ_j' y δ_j' son los valores absolutos y el argumento del coeficiente de reflexión complejo del segundo subsistema dado por r_j'' . Como se observa en la ecuación (18), la disipación de energía en cada punto x de la capa j esta descrito por tres términos. El primer término del lado derecho es derivado de la propagación del campo en la dirección del eje de propagación (la misma dirección que la del campo incidente), el segundo término se deriva de la propagación del campo en dirección opuesta a la dirección de propagación del campo incidente, y el tercer término se debe a la interferencia de las ondas de los dos campos anteriores. Una vez que Q_j es calculado, y asumiendo una eficiencia de conversión de fotón – excitón de η , la tasa de generación de excitones $G(x)$ puede ser expresada dividiendo Q_j sobre la energía de un fotón de longitud de onda λ . Integrando sobre todas las longitudes de onda del espectro incidente resulta en la ecuación (19).

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

donde h es la constante de Planck. La integración generalmente es realizada de 350 a 800 nm, que es un rango de absorbancia típico de materiales utilizados como capa activa en dispositivos fotovoltaicos.

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

Para determinar la corriente de corto circuito en estado estacionario de un dispositivo fotovoltaico, se tienen que resolver simultáneamente las ecuaciones de Poisson y continuidad de cargas (ecuaciones (20), (21) y (22)) hasta obtener una solución auto consistente [24, 25]. Para obtener una solución auto consistente, se requiere valores iniciales del potencial electrostático y las densidades de carga. Con estos valores iniciales se calcula un valor de corrección de del potencial electrostático $\delta\psi$ con la ecuación de Poisson. Este nuevo potencial es usado para actualizar las densidades de carga resolviendo las ecuaciones de continuidad de cargas. Este proceso se repite hasta que exista convergencia.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi(x) = \frac{q}{\epsilon_r \epsilon_0} [n(x) - p(x)], \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} J_n(x) = qU(x), \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} J_p(x) = qU(x), \quad (22)$$

En las ecuaciones anteriores $\psi(x)$ es el potencial electrostático, q es la carga del electrón, $n(x)$ y $p(x)$ representan la concentración de electrones y huecos respectivamente, $J_n(x)$ y $J_p(x)$ representan la densidad de corriente de electrones y huecos respectivamente, ϵ_r es la constante dieléctrica del material, y $U(x)$ es la tasa de generación de cargas libres. Para resolver las ecuaciones anteriores, se deben relacionar las densidades de corrientes, las concentraciones de cargas y el potencial eléctrico. Esto está incorporado en las ecuaciones (23) y (24) que son las ecuaciones de difusión y deriva de corriente de cagas.

$$J_n = qn\mu_n \frac{\partial}{\partial x} \psi + qD_n \frac{\partial}{\partial x} n, \quad (23)$$

$$J_p = qp\mu_p \frac{\partial}{\partial x} \psi + qD_p \frac{\partial}{\partial x} p, \quad (24)$$

donde $D_{n,p}$ son los coeficientes de difusión de cargas, que obedecen la relación Einstein [17]. En estas $D_{n,p} = \mu_{n,p}V_t$, y $V_t = k_B T/q$ es el voltaje térmico, donde k_B es la constante de Boltzmann, T es la temperatura absoluta. De cualquier manera, se observa que para altas concentraciones de carga los coeficientes de difusión incrementan.

3.1.4 Cálculo de las características de desempeño.

Una vez realizado los cálculos previamente descritos se realiza el cálculo de las características de desempeño. En las características de desempeño a calcular son el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), la densidad de corto circuito (J_{sc}), el factor de llenado (FF) y la eficiencia de conversión (PCE). Para el cálculo del V_{oc} se utilizó la ecuación (25), con los valores fijos del ruido térmico $kT = 0.025$ eV, la carga del electrón $q = 1.602 * 10^{-19}$ C y la difusión de electrones $D_n = 6.475$ cm²/s. Así como los valores de las variables: distancia de difusión de huecos L_p , distancia de difusión de electrones L_n , tasa de generación de excitones G_L , concentraciones de cargas minoritarias en equilibrio n_{p0} y P_{n0} , obtenidos en los procesos de cálculo anteriormente explicados.

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left\{ \frac{qG_L(L_p+L_n)}{q \left[\frac{D_p}{L_p} P_{n0} + \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right]} + 1 \right\} \quad (25)$$

Para el cálculo de la J_{sc} se utilizó la ecuación (26), con los valores de las distancias de difusión de cargas L_n , y L_p , y la tasa de generación de excitones G_L obtenidas en los cálculos anteriores.

$$J_{sc} = -qG_L(L_p + L_n) \quad (26)$$

Para el cálculo del FF y la PCE se grafica la curva JV de la celda unitaria diseñada. La grafica JV se obtiene utilizando la ecuación (27).

$$J = \left[q \frac{D_p}{L_p} P_{n0} + q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \right] e^{(qV/kT-1)} - qG_L(L_p + L_n) \quad (27)$$

Para obtener la curva JV del dispositivo se sustituyen los valores de los parámetros en la ecuación (27) dejándola en función de V , después se dan valores a V desde 0 hasta el V_{oc} y se obtienen los valores de J , posteriormente se grafica J versus V . El punto de la curva JV que cruza con el eje V es el V_{oc} y el punto de la curva que cruza con el eje J es el J_{sc} . En la curva JV existe un punto (multiplicación de V por J) en el cual se da la máxima densidad de potencia. Una vez localizado este punto, si se traza una línea de este hacia el eje V , al punto en que cruza el eje se le denomina voltaje de máxima potencia V_{MaxPot} . De la misma manera si se traza una línea de este hacia el eje J , al punto en que cruza el eje se le denomina densidad de corriente de máxima potencia J_{MaxPot} .

Para encontrar el ancho de la celda solar unitaria diseñada se utilizó la ecuación (28) con los parámetros J_{MaxPot} , I_{MaxPot} y lo largo de la celda solar unitaria (L) obtenido en el cálculo de la tasa de generación de excitones.

$$W = \frac{x\% * I_{MaxPot}}{L * J_{MaxPot}} \quad (28)$$

Sabiendo el área disponible en el sustrato para la fabricación de la celda unitaria, por ejemplo, si se tiene un área de $100 \mu m \times 100 \mu m$, en la ecuación (28) se sustituyen los parámetros y se le van dando valores de porcentaje a la variable $x\%$ hasta encontrar un ancho cercano pero menor a $100 \mu m$. El porcentaje que satisfaga el criterio anterior representa el porcentaje de corriente que la celda unitaria suministrara con respecto al valor deseado y establecido en los parámetros de entrada al algoritmo de diseño.

Una vez encontrado el ancho del dispositivo se tienen las dimensiones finales de largo y ancho L y W respectivamente. Con este valor de área transversal se calcula la corriente a máxima potencia deseada utilizando la ecuación (29).

$$I_{MaxPot} = J_{MaxPot} * A \quad (29)$$

Para el cálculo de la FF se utiliza la ecuación (30) sustituyendo los parámetros previamente obtenidos de V_{MaxPot} , I_{MaxPot} , V_{OC} y I_{SC}

$$FF = \frac{V_{MaxPot} * I_{MaxPot}}{V_{OC} * I_{SC}} \quad (30)$$

Para el cálculo de la PCE se utiliza la ecuación (31) sustituyendo los parámetros requeridos previamente calculados

$$PCE = \frac{V_{MaxPot} * J_{MaxPot}}{P_{incidente}} \quad (31)$$

Para el cálculo de la resistencia a máxima potencia (R_{MaxPot}) se utiliza la ecuación (32) sustituyendo los parámetros V_{MaxPot} y I_{MaxPot} previamente calculados

$$R_{MaxPot} = \frac{V_{MaxPot}}{I_{MaxPot}} \quad (32)$$

Finalmente, para el cálculo de la potencia máxima (P_{MaxPot}) se utiliza la ecuación (33) sustituyendo los parámetros requeridos A y J_{MaxPot} previamente calculados.

$$P_{MaxPot} = J_{MaxPot} * A \quad (33)$$

3.2 Resultados teóricos del diseño del dispositivo fotovoltaico

La Figura (7) muestra la curva característica I-V obtenida en el diseño teórico utilizando la ecuación (27). De esta curva se obtuvieron el V_{OC} , la J_{SC} , la P_{maxpot} , el V_{maxpot} y la J_{maxpot} y con estos se calcularon la FF y η utilizando las ecuaciones (30) y (31), respectivamente. La Tabla (3.1) muestra los valores de las características de desempeño obtenidos. De esta tabla se puede observar que el diseño teórico sugiere un FF de 84.52% y una η de 9.31%.

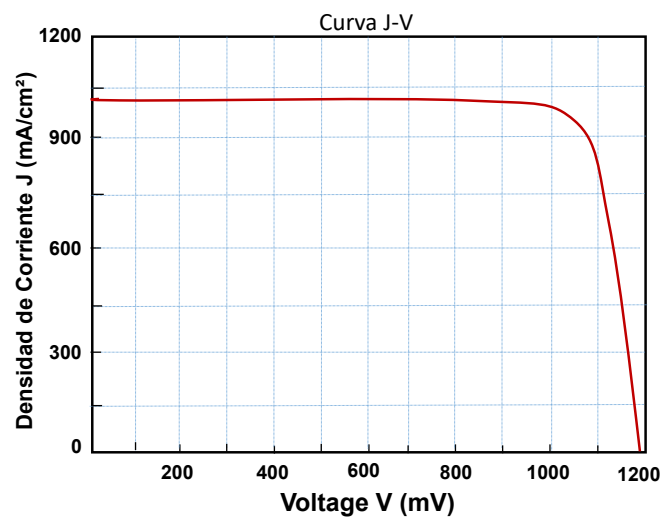


Figura (7). Curva característica I-V obtenida teóricamente.

Tabla (3.1). Resultados teóricos del desempeño del dispositivo fotovoltaico.

Parámetro	Valor
Voltaje de circuito abierto (V_{oc})	0.93 V
Densidad de corriente de corto circuito (J_{sc})	1185 mA/cm ²
Voltaje a máxima potencia (V_{maxpot})	0.81 V
Densidad de corriente a máxima potencia (J_{maxpot})	1150 mA/cm ²
Densidad de potencia máxima ($J_{P_{max}}$)	931.5 mW/cm ²
Eficiencia de conversión (η)	9.31 %
Factor de llenado (FF)	84.52 %
Área transversal del dispositivo (A_{trans})	6.25 cm ²

La Figura (8) muestra el dimensionamiento teórico del dispositivo diseñado.

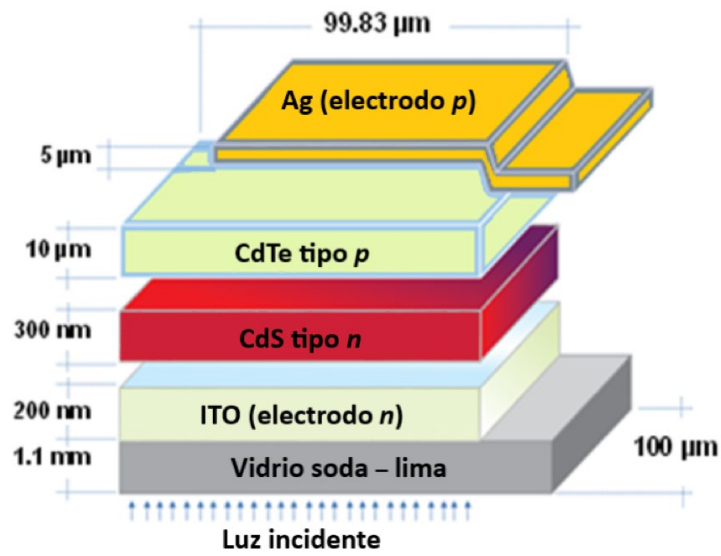


Figura (8). Dimensionamiento teórico del dispositivo diseñado.




CAPÍTULO IV.



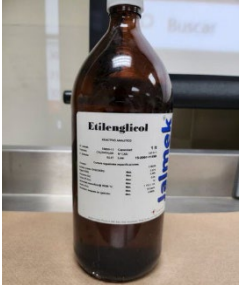


Electrodeposición del dispositivo fotovoltaico con estructura Vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag.



4.1 Materiales.

La Tabla (4.1) muestra los materiales y reactivos utilizados en la electrodeposición del dispositivo fotovoltaico con estructura Vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag. En la tabla se encuentra una descripción de las características técnicas más importantes de cada material. Como medida de precaución, previo a la utilización de cada reactivo se obtuvieron y leyeron las cartas de seguridad de cada uno de ellos.

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

Materiales	
Imagen	Descripción
Vidrio soda – lima con recubrimiento de ITO	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dimensiones: L 20 mm x W 20 mm x T 1.1 mm ○ Transmitancia: > 90% ○ Recubrimiento de ITO: 200 nm ○ Resistividad: < 10 Ω/sq ○ Estado físico: solido ○ Color: transparente ○ Porcentaje de pureza: ≥ 99%
Azufre (S)	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso molecular: 32.065 g/mol ○ Densidad 2.07 g/cm³ ○ Punto de fusión: 112 – 120 °C ○ Punto de ebullición: 444.6 °C ○ Solubilidad en agua: insoluble ○ Estado físico: solido (polvo) ○ Color: amarillo ○ Olor: inodoro ○ Porcentaje de pureza: ≥ 99%
Cloruro de cadmio (CdCl ₂)	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso molecular: 183.31 g/mol ○ Densidad 4.05 g/cm³ ○ Punto de fusión: 356 – 409 °C ○ Punto de ebullición: 960 °C ○ Solubilidad en agua: 457 g/l a 20 °C ○ Estado físico: solido (polvo) ○ Color: blanco ○ Olor: inodoro ○ Porcentaje de pureza: ≥ 99%
Yoduro de potasio (KI)	

	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso molecular: 166 g/mol ○ Densidad 3.12 g/cm³ ○ Punto de fusión: 681 °C ○ Solubilidad en agua: 1,430 g/l a 25 °C (totalmente soluble) ○ Estado físico: solido (polvo) ○ Color: blanco ○ Olor: inodoro ○ Porcentaje de pureza: ≥ 99%
Tetracloruro de telurio (TeCl ₄)	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso molecular: 269.41 g/mol ○ Densidad 3.01 g/cm³ ○ Punto de fusión: 224 °C ○ Punto de ebullición: 380 °C ○ Estado físico: solido (polvo) ○ Color: blanco a amarillo ○ Olor: inoloro ○ Porcentaje de pureza: ≥ 99%
Etilenglicol (CH ₂ OHCH ₂ OH)	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso molecular: 62.07 g/mol ○ Punto de fusión: -13 – -16°C ○ Punto de ebullición: 197.6 °C ○ Solubilidad en agua: miscible ○ Estado físico: liquido viscoso ○ Color: incoloro ○ Olor: inodoro ○ Porcentaje de pureza: ≥ 98% ○ Límites máximos: <ul style="list-style-type: none"> ○ Acidez (como CH₃COOH): 0.01% ○ Agua (H₂O): 0.50% ○ Cloruro (Cl) 0.5% ○ Color (Pt–Co): 10 ○ Hierro (Fe): 0.2 ppm ○ Residuos después de ignición: 0.005%
Electrodo de acero inoxidable	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dimensiones: L 6.3 cm x D 6 mm ○ Estado físico: sólido ○ Color: plateado
Acetona (C ₃ H ₆ O)	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso molecular: 58.08 g/mol ○ Punto de fusión: -94.6°C ○ Punto de ebullición: 56.5°C ○ Solubilidad en agua: miscible ○ Estado físico: liquido volátil ○ Color: incoloro ○ Olor: similar a la menta ○ Porcentaje de pureza: 100%

Alcohol isopropílico (C ₃ H ₈ O)	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Peso molecular: 60.1 g/mol ○ Punto de fusión: -89°C ○ Punto de ebullición: 82.3°C ○ Solubilidad en agua: miscible ○ Estado físico: líquido ○ Color: incoloro ○ Olor: alcohol ○ Porcentaje de pureza: ≥ 99%
Pintura conductiva de plata (Ag)	
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Resistividad: < 60 mΩ/sq/mil ○ Conductividad térmica: 0.04 J/cm-s°C (0.01 cal/cm-s°C) ○ Coeficiente de expansión: 3 x 10⁻⁵ m/m/°C ○ Punto de ebullición: 126.11 a 140 °C ○ Sólidos de plata 43% +/- 3% ○ Solubilidad en agua: soluble ○ Estado físico: líquido ○ Color: Gris ○ Olor: Frutal (ligeramente)

4.2 Equipo.

La Tabla (4.2) muestra el equipo de seguridad personal utilizado en el manejo y manipulación de materiales y reactivos durante el proceso de electrodeposición. Tomando como recomendación lo especificado en las hojas de seguridad de los reactivos los equipos de seguridad son, de izquierda a derecha, bata de laboratorio, cubre bocas, guantes y lentes de seguridad. Este equipo fue utilizado para evitar contacto de los reactivos con la piel y cualquier aspiración de gases tóxicos evitando algún daño en la salud. La Tabla (4.3) muestra el equipo de laboratorio utilizado en el proceso de electrodeposición. Para la limpieza del sustrato de vidrio soda-lima recubierto de ITO se utilizó un limpiador ultrasónico. Para la preparación de soluciones y electrolitos se utilizó una báscula gramera, vasos de precipitado, cucharas y pinzas, y para el control de la electrodeposición una fuente de voltaje regulable y un multímetro de alta resolución. Para la electrodeposición se colocó dentro de la campana de extracción de humos y vapores, una plancha calefactora con agitación magnética y diversos accesorios para el sostén de electrodos y cables de suministro de voltaje y corriente, a su vez también se utilizó un termómetro infrarrojo para corroborar la temperatura suministrada durante el proceso de electrodeposición.

Tabla (4.2). Equipo de protección personal.



Equipo de protección personal			
Bata	Cubrebocas	Guantes	Lentes de seguridad
			

Tabla (4.3). Equipo utilizado en el laboratorio.

Equipos de laboratorio		
Vasos de precipitado	Cucharas	Bascula
		
Pinzas	Limpiador ultrasónico	Cinta térmica
		
Caimanes eléctricos	Fuente de voltaje	Multímetro
		
Agitador termomagnético	Campana extractora de gases	Plancha
		

Termometro infrarrojo



4.3. Limpieza del sustrato de vidrio soda – lima con ITO.

Para iniciar con el proceso de limpieza, se colocó un vaso de precipitado dentro de la cabina de vibración del limpiador ultrasónico, posteriormente se colocó el sustrato dentro del vaso y se le adhirió acetona (C_3H_6O) hasta cubrirlo por completo, a continuación, se procedió a encender el limpiador durante 5 minutos tal como se muestra en la Figura (9). Este proceso se repitió una vez más, pero en lugar de acetona se utilizó alcohol isopropílico (C_3H_8O), y posteriormente se dejó secar el sustrato a temperatura ambiente.



Figura (9). Limpieza del sustrato con ITO.

Posterior al proceso de limpieza del sustrato de vidrio soda–lima con ITO se identificó en cuál de sus caras se encontraba depositada la película de ITO. Para este propósito se utilizó un medidor de continuidad. Colocando las puntas del medidor sobre la misma cara del sustrato se identificó cuál de ellas mostraba continuidad, tal como se ilustra en Figura (10).

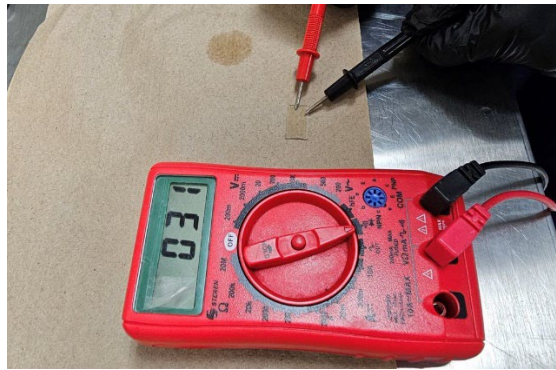


Figura (10). Medición de continuidad en un sustrato.

4.4 Electrodeposición de la película de sulfuro de cadmio (CdS).

4.4.1 Preparación de la solución electrolítica

Para preparar la solución electrolítica se vierten 50 ml de etilenglicol ($\text{CH}_2\text{OHCH}_2\text{OH}$) en un vaso precipitado, se pesan 335 mg de cloruro de cadmio (CdCl_2) y 165 mg de azufre (S), mientras se agita etilenglicol se vierten los 335 mg de CdCl_2 y los 165 mg de S al vaso con etilenglicol, tal como se muestra en la Figura (11). Se continúa mezclando por varios minutos hasta mostrar una mezcla homogénea. En caso de que haya quedado algún grumo se procede a romperlos de forma manual con algún objeto sólido y limpio (por ejemplo, una minicuchara), una vez destrozados se sigue agitando durante varios minutos hasta mostrar una mezcla homogénea.

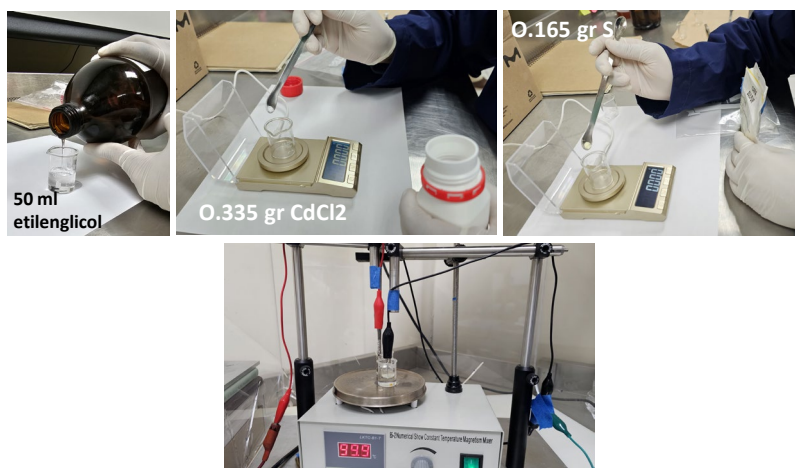


Figura (11). Preparación de la solución electrolítica.

4.4.2 Establecimiento del sistema de electrodeposición.

Para establecer el sistema de electrodeposición se utilizó una fuente de voltaje y un multímetro en serie para medir el voltaje y la corriente del circuito en todo momento. El negativo de la fuente se conectó directamente al sustrato de vidrio soda-lima con recubrimiento de ITO en donde se desea realizar el depósito, y el positivo de la fuente se conecta a una terminal del multímetro y la otra terminal del multímetro se conecta al electrodo inerte que es una barra cilíndrica de acero inoxidable, tal como se muestra en Figura (12).

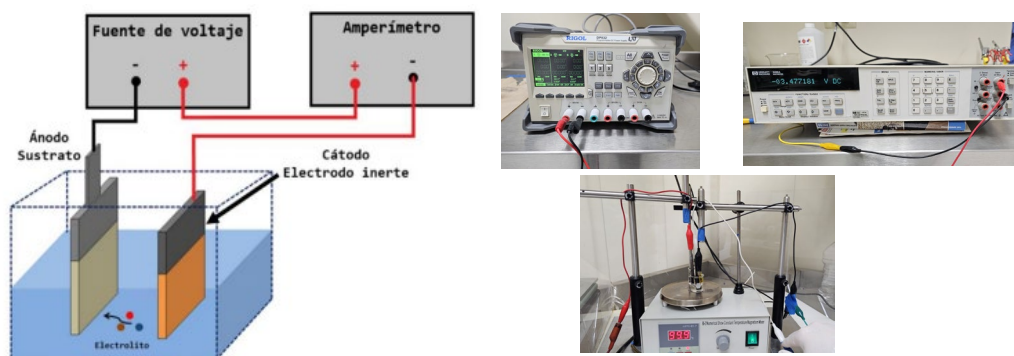


Figura (12). Sistema de electrodeposición.

4.4.3 Realización de la electrodeposición.

Una vez establecido el sistema de electrodeposición, así como preparado la solución electrolítica en el vaso de precipitado, este se colocó sobre la plancha calefactora del sistema y se encendió la plancha y el agitador magnético. Manteniendo una velocidad de agitación baja se esperó a que la solución electrolítica llegara a 90 °C. Posteriormente, se coloca la terminal negativa de la fuente al sustrato y el electrodo de acero inoxidable a la terminal positiva. Se sumergieron el sustrato y el electrodo de acero inoxidable a la solución electrolítica, con la cara con ITO de frente al electrodo. Se encendió la fuente de voltaje y este se fue aumentando hasta obtener una corriente de 15 mA en el multímetro. Cabe mencionar que debido a las reacciones químicas en el electrolito la corriente puede aumentar o disminuir, entonces se deben aumentar o bajar el voltaje de forma manual para mantener una corriente constante de 15 mA durante todo el proceso de electrodeposición. El proceso se dejó encendido durante 35 minutos. Se aseguró que durante todo el depósito la solución electrolítica se estuviera agitando para evitar que las partículas se precipitaran, así como se verificó que la temperatura se mantuviera a 90 °C. Después de los 35 minutos de electrodeposición se obtiene una película relativamente uniforme de color intenso, tal como se muestra en la Figura (13a). Es importante mencionar que una vez transcurrió el tiempo

de depósito, se apagó la fuente, se retiró el sustrato de la solución electrolítica y se dejó secar a temperatura ambiente por 10 minutos. Se formó en el sustrato una pequeña capa de un residuo verde tal como se muestra en la Figura (13b). Una vez que el sustrato secó, se colocó dentro del limpiador ultrasónico durante 2 minutos para remover los residuos de tonos verdosos oscuros mencionados y obteniendo la película mostrada en la Figura (13a).

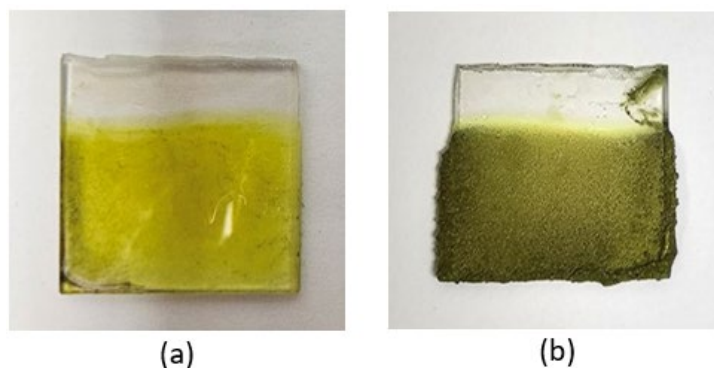


Figura (13). Película de CdS electrodepositada; (a) depósito final; (b) residuo inmediato a la electrodeposición.

4.5 Electrodeposición de la película de telururo de cadmio (CdTe).

4.5.1 Preparación de la solución electrolítica

Al preparar la solución electrolítica para el electrodepósito del CdTe, se vierten 10 ml de etilenglicol en un vaso precipitado, mientras se agita el etilenglicol se agrega un mol de CdCl_2 , 0.16 mol de yoduro de potasio (KI) y 0.01 mol de tetracloruro de telurio (TeCl_4). Se continúa mezclando por varios minutos hasta mostrar una apariencia homogénea. Igual que en el caso anterior, si se observan algunos grumos en la solución se proceden romper de forma manual con algún objeto sólido y limpio hasta mostrar una mezcla homogénea.

4.5.2 Realización de la electrodeposición.

Para la electrodeposición del CdTe se utilizó el sistema de electrodeposición establecido previamente para el depósito del CdS. Una vez preparadas la solución electrolítica en el vaso de precipitado se colocó sobre la plancha calefactora del sistema y se encendió la plancha y el agitador magnético. Manteniendo una velocidad de agitación baja se esperó a que la solución electrolítica llegara a 112 °C. Posteriormente, se detuvo la agitación y se coloca la terminal negativa de la fuente al sustrato con el depósito de CdS y el electrodo de acero inoxidable a la terminal positiva. Se

sumergieron el sustrato y el electrodo de acero inoxidable a la solución electrolítica, con la cara del depósito de CdS de frente al electrodo. Se encendió la fuente de voltaje y este se ajustó en un voltaje para una corriente de 2.5 mA. El proceso se dejó encendido durante 15 minutos, después de los 15 minutos se obtuvo una película relativamente uniforme de color intenso, tal como se muestra en la Figura (14). Es importante mencionar que una vez transcurrió el tiempo de depósito, se apagó la fuente, se retiró el sustrato de la solución electrolítica y se puso a sacar sobre una plancha durante 15 minutos a una temperatura de 270 °C.

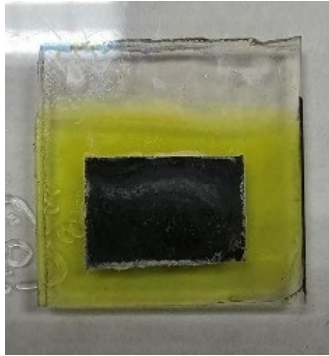


Figura (14). Película de CdTe electrodepositada sobre CdS.

4.5.3 Deposición de la película de plata (Ag).

Para depositar el metal de contacto trasero, se utilizó pintura de Ag (líquida). La película de Ag se depositó sobre la película de CdTe. Se agitó vigorosamente el depósito de Ag líquida hasta obtener una mezcla homogénea. Se utilizó la técnica por goteo que consiste depositar una o dos gotas de Ag líquida en el área deseada auxiliándose de la brocheta incluida en el tapón del depósito de Ag líquida. Se dispersó la plata sobre la capa de CdTe con ayuda de la brocheta y se tuvo cuidado de no presionar con demasiada fuerza con la brocheta al dispersar la Ag líquida para evitar dañar las películas anteriores [Figura (15)]. Posteriormente, se dejó secar la Ag líquida por 24 horas.

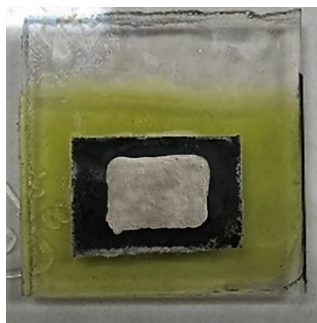


Figura (15). Dispositivo fotovoltaico fabricado por electrodeposición con estructura Vidrio/CdS/CdTe/Ag.

CAPÍTULO V.

Caracterización del dispositivo fotovoltaico vidrio soda – lima/ITO/CdS/CdTe/Ag.

Al dispositivo fotovoltaico fabricado se les realizaron mediciones de voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y de corriente de corto circuito (I_{sc}), con estos se calculan el factor de llenado (FF) y la eficacia de conversión (η). Para estas pruebas se utilizó una lámpara de xenón de 100 mW/cm^2 , un conjunto de resistencias de diferente valor, un multímetro digital HP 3458A y un multímetro marca Steren como los mostrados en la Figura (16).



Figura (16). Multímetros utilizados para la medición de voltaje y corriente.

5.1 Realización de mediciones.

Para medir el V_{oc} se conectó en paralelo el dispositivo fotovoltaico fabricado con un medidor de voltaje. Posteriormente, se encendió la lámpara de xenón de 100 mW/cm^2 y se registró el voltaje entregado por el dispositivo. De igual manera, para medir la I_{sc} se conectó en serie el dispositivo fotovoltaico fabricado con un medidor de corriente. Posteriormente, se encendió la lámpara de xenón de 100 mW/cm^2 y se registró la corriente entregada por el dispositivo. Para obtener la curva característica I–V se armó el circuito mostrado en la Figura (17), después se fue variando la resistencia y para cada valor establecido se midió el voltaje en el dispositivo y la corriente en la malla.

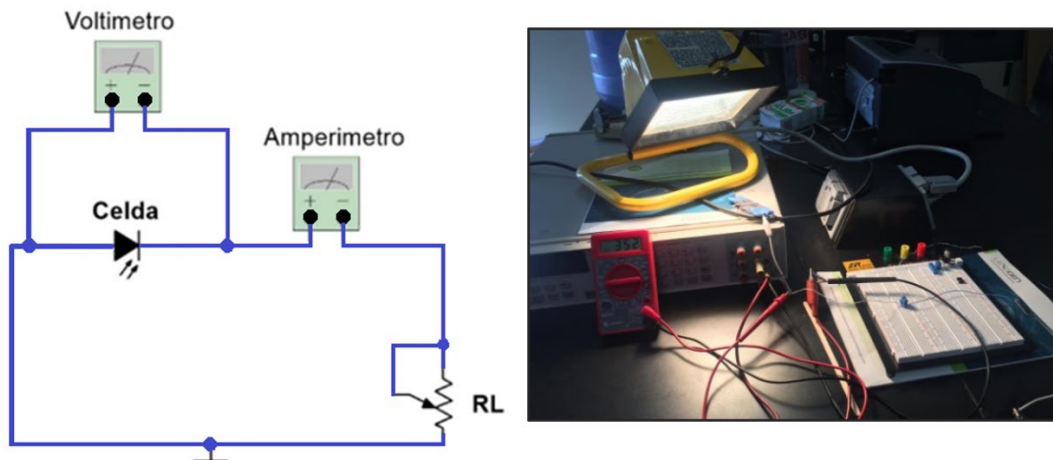


Figura (17). Circuito eléctrico armado para obtener la curva I-V.

5.2 Resultados obtenidos.

Como se mencionó anteriormente, para obtener la curva característica I-V se armó el circuito mostrado en la Figura (17) y posteriormente se fue variando la resistencia de carga. Para cada valor establecido en la resistencia de carga se midió el voltaje en el dispositivo y la corriente en la malla. La Tabla (5.1) muestra un resumen de 18 valores de resistencia, voltaje y corriente incluyendo el V_{oc} y I_{sc} obtenidos de la variación de la resistencia de carga. La Figura (17) muestra la curva I-V característica resultante de las mediciones realizadas. Esta grafica muestra un comportamiento de generación de voltaje y corriente ordinario de un dispositivo fotovoltaico. De esta grafica se observa que desde para voltajes generados desde 0 hasta 300 mV la corriente autogenerada permanece constante. Sin embargo, es importante notar que para voltajes generados mayores a 400 mV la corriente disminuyo rápidamente hasta llegar a cero.

La tabla (5.2) muestra un resumen de los parámetros de desempeño arrojados por el dispositivo fabricado. En esta tabla se puede observar que el dispositivo genero un $V_{oc}= 0.53$ V y una I_{sc} de 32 mA que son comunes en celdas de calcogenuros de cadmio. De misma manera, de la curva característica I-V se obtuvieron la P_{maxpot} , el V_{maxpot} , la I_{maxpot} y se calcularon la R_{maxpot} , FF y η utilizando las ecuaciones (30), (31), (32) y (33), respectivamente. Es importante notar que FF y η de 63.3 % y 1.71 % respectivamente son valores prometedores que sugieren que al integrar más dispositivos en el mismo sustrato estas características de desempeño pueden incrementar hasta lograr valores cercanos a los comerciales.

Tabla (5.1). Valores de voltaje y corriente en el dispositivo fabricado.

Prueba	Resistencia (Ω)	Voltaje (V)	Corriente (A)
1 (V_{oc})	NA	0.530	0
2	10 M Ω	0.546	0.003
3	5 M Ω	0.534	0.005
4	1 M Ω	0.523	0.008
5	700 K Ω	0.511	0.010
6	600 K Ω	0.500	0.014
7	500 K Ω	0.480	0.018
8	400 K Ω	0.450	0.023
9	300 K Ω	0.415	0.028
10	200 K Ω	0.380	0.030
11	100 K Ω	0.305	0.031
12	80 K Ω	0.235	0.031
13	60 K Ω	0.190	0.031
14	40 K Ω	0.140	0.032
15	20 K Ω	0.100	0.032
16	10 K Ω	0.070	0.032
17	5 K Ω	0.035	0.032
18 (I_{sc})	NA	0	0.032

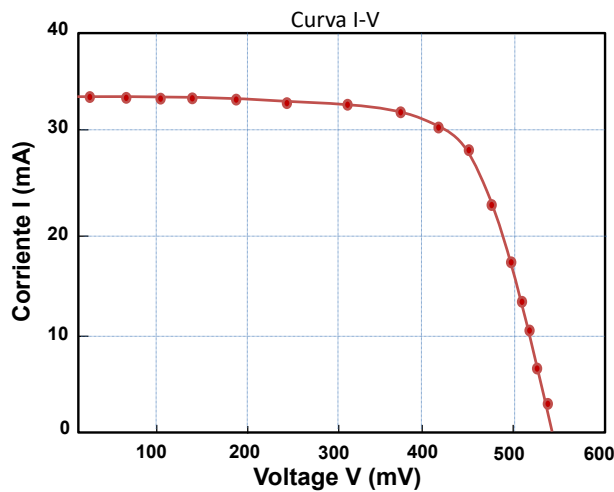


Figura (18). Curva I-V característica del dispositivo fotovoltaico fabricado.

Tabla (5.2). Características de desempeño en la celda solar unitaria.

Características de desempeño							
V_{oc}	I_{sc}	P_{maxpot}	V_{maxpot}	I_{maxpot}	R_{maxpot}	FF	η
0.53 V	0.032 A	0.01075 W	0.43 V	0.025 A	0.028 Ω	63.3 %	1.71 %

CAPÍTULO VI.

Comparación de resultados.

6.1 Resultados teóricos vs resultados prácticos.

La Tabla (6.1) muestra un resumen de las características de desempeño del dispositivo fotovoltaico obtenidas de manera teórica y de manera práctica. Los dos parámetros de desempeño más importantes, FF y η , son significativamente más grandes en los resultados obtenidos de forma teórica. Esto se debe principalmente a que al diseñar teóricamente un dispositivo fotovoltaico ciertos parámetros o condiciones se consideran como ideales, por ejemplo, temperatura, coeficientes de los materiales, control en el ancho en las películas, etc. Sin embargo, cuando se fabrica un dispositivo fotovoltaico utilizando la técnica de electrodeposición es muy complicado controlar con alta precisión el ancho de las películas depositadas, lo que aleja la corriente fotogenerada y del valor obtenido teóricamente. Y como consecuencia aumenta la diferencia de los valores de parámetros de desempeño obtenidos prácticamente comparados con los encontrados teóricamente.

Tabla (6.1). Características de desempeño en la celda solar unitaria.

Características de desempeño teóricos							
V_{oc}	J_{sc}	$J_{P_{maxpot}}$	V_{maxpot}	J_{maxpot}	R_{maxpot}	FF	η
0.93 V	1.185 A/cm ²	935.1 mW/cm ²	0.81 V	1.150 A/cm ²	0.1126 Ω	84.52 %	9.31 %
Características de desempeño prácticos							
V_{oc}	I_{sc}	P_{maxpot}	V_{maxpot}	I_{maxpot}	R_{maxpot}	FF	η
0.53 V	0.032 A	0.01075 W	0.43 V	0.025 A	0.028 Ω	63.3 %	1.71 %

CAPÍTULO VII.

Conclusión y trabajo futuro.

7.1. Conclusión

En este trabajo de tesis se diseñó teóricamente y se implementó prácticamente un dispositivo fotovoltaico con estructura Vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag. Para el diseño teórico se calculó la tasa de generación de exítonos (G_L) utilizando la técnica de la matriz de transferencia óptica, el ancho de la zona de depleción y concentración de cargas en la unión pn mediante el algoritmo de Gummel modificado, se graficó la curva J-V del dispositivo diseñado y se obtuvieron las características de desempeño del dispositivo. Para la implementación práctica se utilizó la técnica de electrodeposición para depositar las películas de CdS y CdTe. Para el caso del diseño teórico, el dispositivo tiene un $V_{oc}= 0.93$ V, una J_{sc} de 1.185 A/cm², una FF y η de 63.3 % y 1.71 %, respectivamente. Mientras que, para el caso de la implementación práctica, el dispositivo generó un $V_{oc}= 0.53$ V y una I_{sc} de 32 mA y una FF y η de 63.3 % y 1.71 % respectivamente. La diferencia en los parámetros de desempeño obtenidos en el diseño teórico y los obtenidos de la implementación práctica se atribuyen principalmente a que al diseñar teóricamente ciertos parámetros se consideran como ideales, por ejemplo, temperatura, coeficientes de los materiales, control en el ancho en las películas, que cuando se utiliza la técnica de electrodeposición para fabricar es difícil controlar con alta precisión el ancho de las películas depositadas, lo que aleja la corriente fotogenerada y del valor obtenido teóricamente. Y como consecuencia aumenta la diferencia de los valores de parámetros de desempeño obtenidos prácticamente comparados con los encontrados teóricamente.

Por otro lado, se puede asegurar que la hipótesis de este trabajo que establece que utilizando la técnica de electrodeposición es posible depositar películas delgadas de CdS y CdTe con características que satisfacen los requerimientos de aplicación de absorbentes fotónicos con aplicación en dispositivos fotovoltaicos se satisface en su totalidad.

7.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone trabajar en la fabricación de varios dispositivos en el mismo sustrato. Con respecto a proceso de electrodeposición se propone obtener las curvas de tiempo de deposición vs ancho de la película depositada para ambos casos CdS y CdTe.

Referencias

- [1] Melek C. K. y Saile (2004). Applications of LIGA technology to precision manufacturing of high-aspect-ratio micro-components and –system: A review. *Microelectron, J(35)*, 131–143.
- [2] Brener A. (1963). *Electrodeposit of alloy*, New York, Academic Press.
- [3] Landolt D. (1994). Electrochemical and materials science aspects of alloy deposition. *Electrochemical Acta*, 39, 1075-1090.
- [4] Jordan M. (2000). *Electrodeposition of tin-lead alloys*, M (Ed.), *Modern Electrodeposition*, fourth ed. New York, NY: John Wiley and Sons.
- [5] Guckel H. (1993), Formation of microstructures by multiple level deep X-ray lithography with sacrificial metal layers. Madison, WI: Wisconsin Alumni Research Foundation.
- [6] Massoud-Ansari S. Magat P. S., Klein J. y Guckel H., (1996), A multi-nivel, LIGA-like process of three dimensional actuators. In: *The 9th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, IEEE, San Diego CA USA.
- [7] Keller R. M., Baker S. P. y Arzt E. (1999), Stress-temperature behavior of unpassivated thin copper films. *Acta Mater*, 47, 415-426.
- [8] Stoney G. G (1909), The tension of metallic films deposited by electrolysis. *Proc. R. Soc. Lond.* 82, 172-175.
- [9] Chinthakindi A. K., Bhusari D., Dusch B. P. et al., (2002), Electrostatic actuators with intrinsic stress gradient. I. *Materials and structures Soc.* 149, H139 – H145.
- [10] Klingenmaier O. J. y Dobrash S. M., Peel test for determining the adhesión of electrodeposits on metallic substrates. In: *Mittal K. L. (Ed), Adhesion measurement of thin films, thick films and bulk coating*, Philadelphia, PA: ASTM.
- [11] Dani J. W., (1993), *Electrodepositions: The materials science of coating and substrates*. Norwich, NY: Noyes Publication.
- [12] Lowenheim F. A., (1995), *Electroplating*. Bristol: Technical References Publications.
- [13] Amblard J. Epelboin I, Froment M. y Maurin G., (1979), Inhibition and nickel electrocrystallization. *J. Appl. Electrochem.*, 9, 233-242.
- [14] Safranek W. H., (1986), *The properties of electrodeposited metals and allows*. Orlando FL, American Electroplaters and Surface Finishers Society.
- [15] Xiang Y., Chen X. y Viassak J. J., (2002), The mechanical properties of electroplated Cu thin films measured by means by means of the bulge test technique. In: *Ozkan, C. S. et al., (Eds), Thin films: Stress and mechanical properties IX*, pp. 198-195 (*Meter. Res. Soc. Sym. Proc.* 695, Wrendale, PA, 2002).
- [16] Harper J. M., Cabarl Jr. C., y Andricacos, P. C. et al., (1999), Mechanism for microstructure evolution in electroplated copper thin films near room temperatura. *J. Appli. Phys.* 86, 2516-2525.
- [17] Perez-Prado M. T. y Vlassak J. J., (2002), Microstructural evolution in electroplated Cu thin films. *Scripta Mter.*, 47, 817-823.
- [18] Czerwinski F. y Zspunar J. A., (2000), Texture instability in Ni electrodeposit applied in optical disk technology, *J. Matter. Sci.* 35, 331-335.
- [19] Thuvander M., Abraham M., Cerezo A. y Smith G. D. W., (2021), Termal stability of electrodeposited nanocritaline nickel and iron-nickel alloys. *Meter. Sci. Technol.*, 17, 961-970.
- [20] Li H. Q., y Ebrahimi F., (2003), An investigation of thermal stability and microhardness of electrodeposited monocrystalline nickel – 21% iron alloys. *Acta Mater.* 51, 3905-3913.
- [21] Choi Y. S., Al-Kassab T., Gartner F., Kreye H. y Kirchheim R., (2003), Thermal stability of nanocristalline nickel-18% at % tugsten alloys investigated with the tomographic atom probe. *Mater. Sci. Eng.* A353, 74-79.
- [22] Talin A. A., Marquis E. A., Goods S. H. Kelly J. J. y Miller M. K., (2006), Thermal stability of Ni-Mn electrodeposits. *Acta Meter.* 54, 1935-1947.
- [23] Xie R. C. and Shang J. K., Morphological control in solvothermal synthesis of titanium oxide, *Journal of material science*, 42, 6583.
- [24] L. Onsager, "Initial Recombination of Ions," *Phys. Rev.*, 54, 554, 1938.

[25] C. Braun, "Electric field assisted dissociation of charge transfer states as a mechanism of photo- carrier production," *J. Chem. Phys.*, 80, 4157, 1984.