

Electrodeposición de películas delgadas de calcogenuros de cadmio para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos

Vianey Aracely Candelas-Urrea ^a, Carlos Villa-Angulo ^b, Adrián Ernesto Huizar Nava ^c, Graciela Sánchez Ibarra ^d.

^{a, b, c, d} Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Blvd. Benito Juárez S/N, CP. 21280, Mexicali B.C., vianey.candelas@uabc.edu.mx, villac@uabc.edu.mx, ehuizar@uabc.edu.mx, sanchez.graciela@uabc.edu.mx, Mexicali, B. C., México.

Resumen

La creciente relevancia de los calcogenuros de cadmio (CdS, CdSe, CdTe) en nanotecnología y dispositivos optoelectrónicos, como las celdas solares de película delgada, radica en sus propiedades ópticas, electrónicas y cuánticas excepcionales. Entre las técnicas para sintetizar películas delgadas de estos materiales, la electrodeposición destaca por su bajo costo, simplicidad y capacidad para controlar la composición y morfología, factores clave para optimizar el rendimiento fotovoltaico.

Este trabajo aborda la fabricación de una celda solar multicapa tipo vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag mediante electrodeposición secuencial. La síntesis se realizó utilizando soluciones no acuosas basadas en etilenglicol para asegurar la pureza y calidad de las capas. Cada material se depositó bajo condiciones específicas: CdS a 140°C y 15 mA/cm², y CdTe a 90°C y 2.5 mA/cm², seguidas de tratamientos térmicos para mejorar la adherencia y propiedades cristalinas. La capa final de Ag se depositó a temperatura ambiente con un tratamiento térmico adicional.

La celda resultante mostró un excelente desempeño, evidenciado por parámetros como una tensión de circuito abierto (Voc) de 0.6 V, densidad de corriente de cortocircuito (Jsc) de 22 mA/cm² y eficiencia de conversión energética (PCE) del 6.82%. Estos resultados reflejan la efectividad de la técnica y su potencial para aplicaciones fotovoltaicas avanzadas, destacando la importancia del control en el proceso de electrodeposición para maximizar la eficiencia de los dispositivos.

Palabras clave — Calcogenuros de cadmio, Celda solar multicapa, Desempeño fotovoltaico, Electrodeposición, Películas delgadas.

Abstract

The growing relevance of cadmium chalcogenides (CdS, CdSe, CdTe) in nanotechnology and optoelectronic devices, such as thin-film solar cells, lies in their exceptional optical, electronic, and quantum properties. Among the techniques for synthesizing thin films of these materials, electrodeposition stands out due to its low cost, simplicity, and ability to control composition and morphology—key factors for optimizing photovoltaic performance.

This work focuses on the fabrication of a multilayer solar cell of the type glass/ITO/CdS/CdTe/Ag using sequential electrodeposition. The synthesis was carried out using non-

aqueous solutions based on ethylene glycol to ensure layer purity and quality. Each material was deposited under specific conditions: CdS at 140°C and 15 mA/cm², and CdTe at 90°C and 2.5 mA/cm², followed by thermal treatments to improve adhesion and crystalline properties. The final Ag layer was deposited at room temperature with an additional thermal treatment.

The resulting solar cell demonstrated excellent performance, as evidenced by parameters such as an open-circuit voltage (Voc) of 0.6 V, short-circuit current density (Jsc) of 22 mA/cm², and power conversion efficiency (PCE) of 6.82%. These results reflect the effectiveness of the technique and its potential for advanced photovoltaic applications, highlighting the importance of process control in electrodeposition to maximize device efficiency.

Keywords — Chalcogenides, Electrodeposition, Multilayer solar cell, Photovoltaic performance, Thin films.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los semiconductores pertenecientes a los grupos II-VI de la tabla periódica, como el sulfuro de cadmio (CdS), seleniuro de cadmio (CdSe) y telurio de cadmio (CdTe), han ganado atención significativa en el campo de la nanotecnología debido a sus excepcionales propiedades ópticas, electrónicas y de transporte cuántico [1]. Estas características los han convertido en materiales clave para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, especialmente celdas solares de película delgada. A escalas nanométricas, los calcogenuros de cadmio exhiben bandas de energía discretas, un alto coeficiente de extinción, la posibilidad de generar múltiples excitones y propiedades cuánticas únicas, lo que refuerza su potencial en aplicaciones avanzadas.

Entre los métodos de síntesis disponibles para producir películas delgadas de estos materiales, la técnica de electrodeposición ha destacado por su versatilidad, simplicidad y bajo costo [2]. Este proceso electroquímico permite un control preciso sobre la composición, morfología y propiedades físicas de las películas depositadas, lo que resulta esencial para optimizar su rendimiento en dispositivos fotovoltaicos. En particular, la electrodeposición potenciostática se ha destacado como un método ideal para aplicaciones donde la uniformidad, pureza y composición específica de las películas son factores críticos [3].

Las investigaciones recientes han puesto de manifiesto la importancia de los parámetros de electrodeposición en la síntesis de calcogenuros de cadmio, destacando que variables como la temperatura, la composición del electrolito y los parámetros de corriente afectan directamente la calidad de las películas depositadas [4]. Estos avances han permitido no solo mejorar la estructura cristalina y las propiedades ópticas de las películas delgadas, sino también optimizar su eficiencia en aplicaciones fotovoltaicas. Además, la implementación de estrategias avanzadas, como el uso de electrolitos no acuosos y temperaturas controladas, ha demostrado ser clave para ampliar el espectro de absorción y mejorar la respuesta fotoeléctrica, consolidando a la electrodeposición como una técnica esencial para el

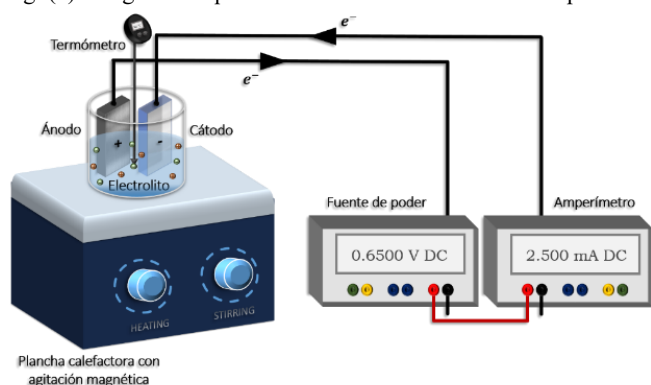
desarrollo de dispositivos optoelectrónicos de alto rendimiento [5].

En este trabajo se presenta la fabricación de dispositivos fotovoltaicos basados en calcogenuros de cadmio, empleando la electrodeposición secuencial como técnica de síntesis principal. En particular, se investigan estrategias para la optimización de la capa activa en celdas solares con estructuras multicapa tipo vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag, controlando los aspectos fundamentales del proceso de crecimiento.

2. TÉCNICA DE CRECIMIENTO POR ELECTRODEPOSICIÓN

El equipo requerido para llevar a cabo el proceso de electrodeposición es relativamente simple. Como se muestra en la Figura 1, los componentes básicos incluyen el electrodo de trabajo (cátodo), el contraelectrodo o pieza a recubrir (ánodo), el electrodo de referencia (termómetro), la solución electrolítica, la fuente de poder y una plancha calefactora con agitación magnética.

Fig. (1). Diagrama esquemático de un sistema de electrodeposición.



Fuente: Elaboración propia.

El proceso de electrodeposición comienza con la inmersión del cátodo en el electrolito contenido en un recipiente (celda), junto con el ánodo. Para permitir el flujo de corriente eléctrica en el circuito, ambos electrodos se conectan a la fuente de poder. Este arreglo facilita la conversión de iones metálicos o sus derivados en átomos metálicos o compuestos, que posteriormente se depositan en la superficie del sustrato o pieza a recubrir [6]. Los parámetros del proceso, como la composición de la solución, la temperatura, la densidad de corriente y la duración de la deposición, se optimizan para obtener películas de alta calidad con las propiedades deseadas. El grosor de la capa electrodepositada en el sustrato depende directamente de la duración del tiempo de exposición en el baño químico, de manera que un mayor tiempo de permanencia resulta en una capa más gruesa [4].

Las películas obtenidas por electrodeposición son caracterizadas mediante diversas técnicas avanzadas, tales como microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia de absorción óptica, difracción de rayos X (XRD), espectroscopia de fotoluminiscencia (PL), fluorescencia de rayos X (XRF), microscopía de fuerza atómica (AFM), espectroscopia Raman y estudios

fotoelectroquímicos, que permiten evaluar su morfología, estructura cristalina y propiedades ópticas y eléctricas [7]. Se ha demostrado que las películas de CdS, CdSe, CdTe y CdHgTe obtenidas por electrodeposición presentan alta pureza, una estructura cristalina bien definida y una excelente adherencia a los sustratos, lo que las hace altamente apropiadas para su utilización en aplicaciones tecnológicas avanzadas [8].

2.1. ELECTRODEPOSICIÓN DE CALCÓGENUROS DE CADMIO

En los últimos años, se ha incrementado el interés en comprender los procesos de nucleación y crecimiento de los cristales de calcogenuros de cadmio durante la electrodeposición, así como los factores que determinan la calidad de las películas depositadas. Este interés ha llevado al desarrollo de diversas estrategias orientadas a mejorar la eficiencia del proceso de electrodeposición, con el objetivo de obtener películas con propiedades optimizadas para su implementación en dispositivos electrónicos, fotónicos y optoelectrónicos. La optimización de materiales semiconductores es crucial para mejorar las propiedades ópticas y electrónicas de las celdas solares, como también se ha señalado en trabajos teóricos recientes sobre configuraciones avanzadas [9]. En este contexto, estudios como el de Kamal Premaratne y colaboradores han investigado la electrodeposición de películas delgadas de calcogenuros de cadmio (CdS y CdS_xSe_{1-x}) sobre vidrios recubiertos con una capa conductora de óxido de indio-estaño (ITO) a partir de soluciones no acuosas y bajo condiciones galvanostáticas. Los resultados obtenidos muestran mejoras en la fotorespuesta del material y evidencian que la variación en la composición influye en la estructura del material, además de resaltar la importancia del recocido a altas temperaturas para mejorar la eficiencia de las células fotoelectroquímicas [10]. Por otro lado, investigaciones adicionales han documentado el proceso de electrodeposición de películas de CdTe sobre sustratos flexibles, empleando un electrolito no acuoso a 140°C, con resultados que indican un crecimiento compacto y uniforme de las películas, lo que sugiere su potencial para aplicaciones en energía solar, detección de radiación y electrónica [5].

El análisis de los estudios mencionados previamente permite establecer una comparación detallada de las condiciones operativas empleadas en la electrodeposición de CdS, CdTe y CdHgTe, considerando variables como la composición de la solución electrolítica, la temperatura, el pH y las condiciones experimentales, lo cual es esencial para entender el impacto de estos factores en las propiedades de las películas. A través de esta comprensión, se han desarrollado estrategias orientadas a mejorar la calidad y eficiencia de estas películas, con aplicaciones destacadas en celdas solares de alta eficiencia y sensores. En paralelo, los avances en la optimización de los electrolitos para la electrodeposición han permitido un mayor control sobre la uniformidad, adherencia y composición química de las películas, lo que contribuye al desarrollo de dispositivos con

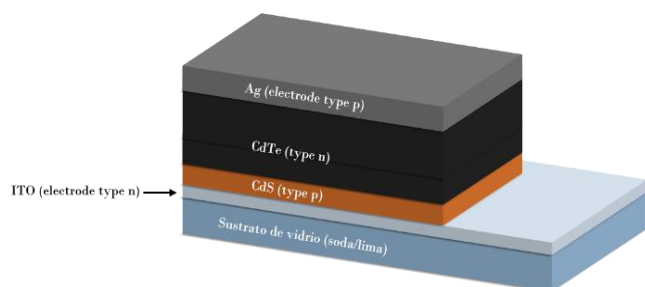
propiedades ópticas y eléctricas mejoradas. En este trabajo, se presentan los mecanismos y procesos involucrados en la fabricación mediante electrodeposición secuencial de una celda solar de tipo vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag.

2.2. IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UNA CELDA SOLAR MULTICAPA DE TIPO Vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag

La fabricación de la celda solar multicapa de tipo vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag (Fig. (2)) se llevó a cabo utilizando la técnica de electrodeposición secuencial. Este enfoque permitió la deposición controlada de películas delgadas de los materiales semiconductores y metálicos necesarios para su construcción. Como sustrato se utilizó vidrio soda-lima recubierto con óxido de indio y estaño (ITO), con una resistencia laminar de 10 Ω /rectángulo.

La Figura 3 muestra el equipo ensamblado y listo para el proceso de electrodeposición. Se destacan los componentes clave: electrodos (flechas rosa y roja), solución electrolítica (amarilla), fuente de poder (anaranjada), plancha calefactora (verde) y amperímetro (azul), dispuestos estratégicamente para asegurar una ejecución eficiente.

Fig. (2). Celda solar formada por heterounión pn de tipo: Vidrio soda-lima/ITO/CdS/CdTe/Ag.



Fuente: Elaboración propia.

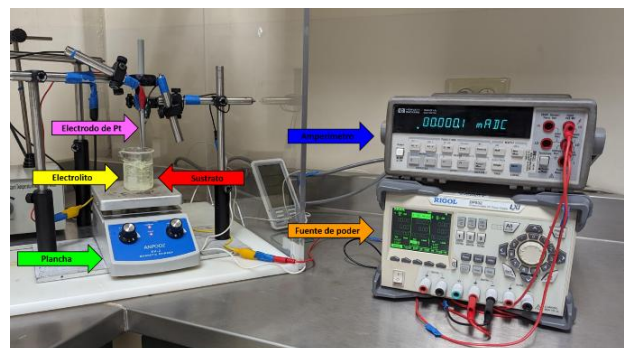
La electrodeposición se realizó en soluciones no acuosas empleando etilenglicol (EG, 99%) como electrolito de soporte, y para cada material se prepararon electrolitos específicos con diferentes reactivos y concentraciones. En el caso del sulfuro de cadmio (CdS), la solución contenía 50 ml de EG, 0.036M de cloruro de cadmio (CdCl_2) y 0.102M de azufre (S). Para el telurio de cadmio (CdTe), se utilizó una solución compuesta por 20 ml de EG, 1M de CdCl_2 , 0.160M de yoduro de potasio (KI) y 0.010M de cloruro de telurio (TeCl_4).

El proceso empieza con la limpieza ultrasónica de los sustratos en acetona y alcohol isopropílico a 50 W durante 300 s, seguida de un secado a temperatura ambiente. Posteriormente, los electrolitos se prepararon bajo agitación magnética en una placa calefactora a 40°C hasta lograr soluciones homogéneas. Para cada material, se ajustaron las condiciones experimentales específicas de densidad de corriente, temperatura y tiempo de electrodeposición.

La película de CdS fue depositada a 140°C con una densidad de corriente de 15 mA/cm² durante 35 minutos, seguida de una limpieza ultrasónica adicional en alcohol isopropílico para asegurar la calidad de la película (Fig. (4a)).

La deposición de CdTe se realizó a 90°C con una densidad de corriente de 2.5 mA/cm² durante 20 minutos, aplicando un tratamiento térmico a 180°C durante 300 segundos para mejorar la adherencia con la capa subyacente de CdS (Fig. (4b)).

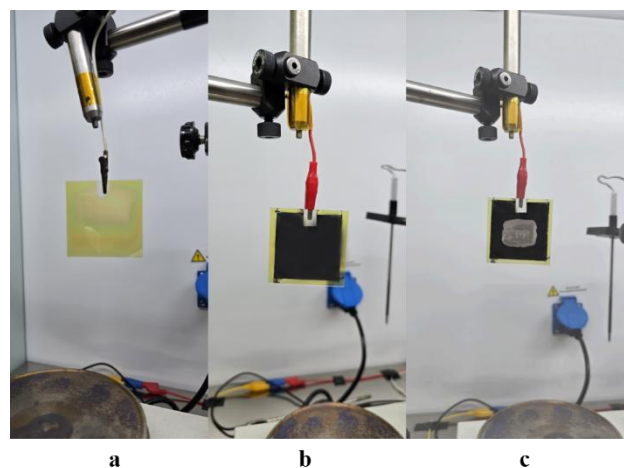
Fig. (3). Equipo montado y listo para el proceso de electrodeposición.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la capa de Ag se depositó a temperatura ambiente con una diferencia de potencial constante de 3 V durante 10 minutos, seguida de un tratamiento térmico a 180°C durante 60 segundos para optimizar la adherencia con la capa de CdTe (Fig. (4c)). El sistema empleado en la electrodeposición para CdS y CdTe constaba de tres electrodos: un electrodo de trabajo (sustrato), un contraelectrodo (lámina de platino) y un electrodo de referencia (termómetro). Para la deposición de Ag, se utilizó un sistema simplificado de dos electrodos.

Fig. (4). Secuencia de las películas electrodepositadas: a) CdS; b) CdS/CdTe; c) CdS/CdTe/Ag.



Fuente: Elaboración propia.

Cada etapa del proceso se llevó a cabo con precisión para garantizar la uniformidad y calidad de las capas depositadas. Este enfoque permitió obtener celdas solares funcionales con parámetros eléctricos y estructurales óptimos, destacándose la buena cristalinidad de las películas y una adecuada coincidencia de interfaces entre las capas. Estas características reducen las pérdidas por recombinación y

optimizan la generación de fotocorriente, elementos clave para el desempeño del dispositivo fotovoltaico.

El proceso de cableado de la celda solar unitaria se realizó con el objetivo de garantizar conexiones eléctricas fiables y adecuadas para las mediciones de caracterización. Para ello, se utilizó cobre (Cu) como material conductor, asegurando un contacto firme entre las películas de óxido de indio y estaño (ITO) y plata (Ag) mediante una combinación de cinta adhesiva y deposición adicional de Ag líquida. Inicialmente, una tira de Cu fue fijada al sustrato en la región correspondiente a la película de ITO, utilizando una pequeña porción de cinta adhesiva para inmovilizar el contacto. Posteriormente, una segunda tira de Cu se colocó en contacto con la película de Ag. Para fortalecer esta conexión, se aplicó una gota de Ag líquida en el punto de contacto, formando una configuración Ag/Cu/Ag. Finalmente, las puntas de los contactos se estañaron para optimizar la interacción con los caimanes de las conexiones eléctricas, y se aseguraron con cinta adhesiva, dejando la celda lista para su caracterización. Este procedimiento garantizó una conexión estable y reproducible, esencial para evaluar las propiedades eléctricas y de conversión de energía de la celda solar.

La caracterización de la celda solar fabricada se llevó a cabo mediante la medición de parámetros eléctricos y ópticos bajo condiciones controladas. Para este propósito, se utilizó una lámpara de xenón con una irradiancia constante de 1000 W/m² y un rango espectral de 350 a 1700 nm, asegurando la uniformidad en las pruebas. La curva corriente-densidad de corriente frente a voltaje (J-V) obtenida permitió determinar parámetros clave como la tensión de circuito abierto (Voc), la densidad de corriente de cortocircuito (Jsc), la eficiencia de conversión de energía (PCE) y el factor de llenado (FF).

2.3. RESULTADOS

El análisis de las capas depositadas de CdS, CdTe y Ag mediante espectroscopía de energía dispersiva (EDS) y espectroscopía de absorción óptica demostró la pureza y calidad de los materiales obtenidos. Para la capa de CdS (Fig. (5a)), el EDS reveló una composición libre de impurezas, excepto por un pequeño pico de carbono atribuido a trazas residuales de etilenglicol o dióxido de carbono ambiental. Su espectro de absorción mostró un comportamiento característico con alta absorción por debajo de los 500 nm y un mínimo alrededor de 550 nm, validando su idoneidad para aplicaciones optoelectrónicas. En el caso del CdTe (Fig. (5b)), el análisis EDS corroboró resultados similares en cuanto a la pureza del material, mientras que su espectro de absorción presentó una caída rápida en longitudes de onda menores a 500 nm y un pico de emisión fotoluminiscente centrado en 780 nm, destacando su eficiencia como material absorbente de luz. Finalmente, la capa de Ag (Fig. (5c)) depositada mostró un espectro de absorción con una marcada disminución entre 300 y 400 nm, reflejando las propiedades ópticas típicas del material. Estos resultados confirman la uniformidad y calidad de las capas depositadas, esenciales para el desarrollo de dispositivos optoelectrónicos de alto rendimiento.

Los resultados experimentales indicaron un Voc de 0.6 V, una Jsc de 22 mA/cm², una PCE del 6.82% y un FF del 51.7%. Estos valores reflejan la alta calidad de los materiales electrodepositados y las interfaces formadas, donde la buena cristalinidad de las capas y la coincidencia óptima entre las películas contribuyeron a minimizar pérdidas y maximizar la absorción de luz, favoreciendo una generación eficiente de fotocorriente. Este desempeño, evidenciado en la curva J-V (Fig. (6)), confirma el éxito del proceso de fabricación y cableado, y subraya el potencial de las celdas solares multicapa fabricadas mediante la técnica de electrodeposición secuencial.

Fig. (5). Resultados de caracterización de las capas CdS, CdTe y Ag: a1) patrones de EDS de CdS, a2) absorción de CdS en función de la longitud de onda; b1) patrones de EDS de CdTe, b2) absorción de CdTe en función de la longitud de onda; c1) patrones de EDS de Ag, c2) absorción de Ag en función de la longitud de onda.

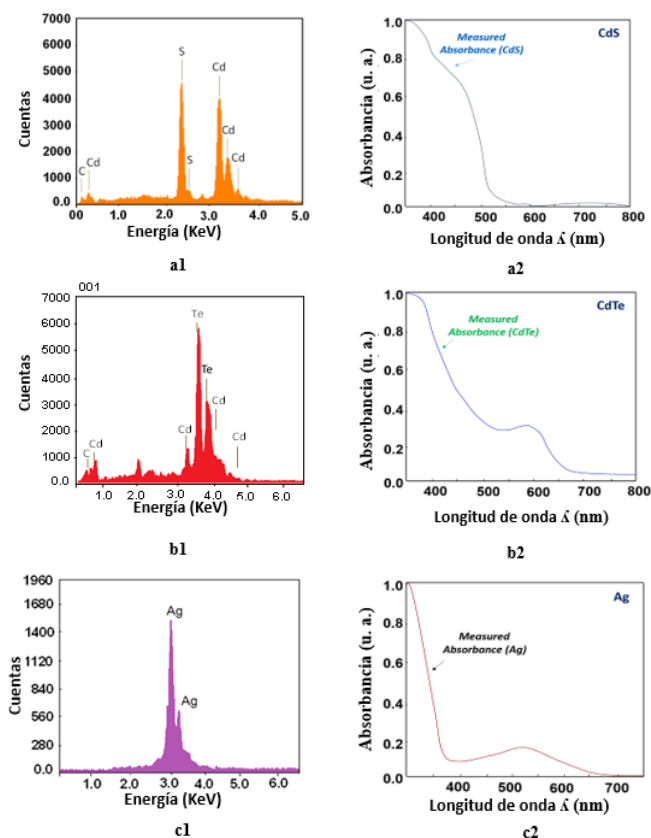
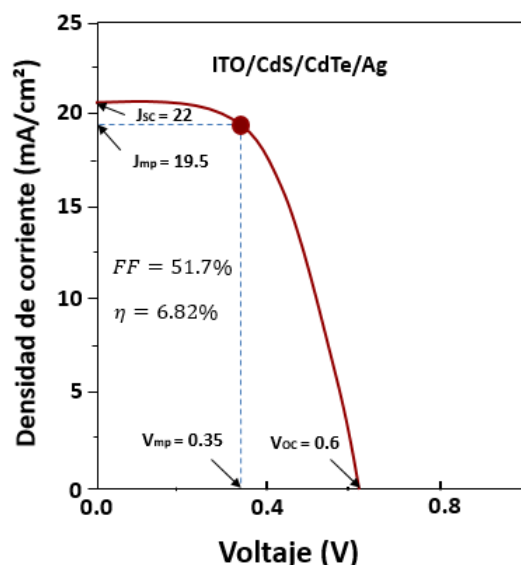


Fig. (6). Curva J-V (Densidad de corriente vs voltaje).



3. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

La técnica de electrodeposición empleada para fabricar la celda solar multicapa vidrio/ITO/CdS/CdTe/Ag demostró ser altamente eficiente y versátil, permitiendo un control preciso sobre la composición y morfología de las capas. Los parámetros de síntesis, como la densidad de corriente, la temperatura y los tratamientos térmicos, fueron fundamentales para garantizar la pureza, adherencia y cristalinidad de las películas. Adicionalmente la utilización del EG como disolvente universal de reactivos para cada depósito garantizó la compatibilidad evitando alta degradación en depósitos secuenciales.

La celda fabricada mostro un buen desempeño fotovoltaico, con un Voc de 0.6 V, una Jsc de 22 mA/cm² y una PCE del 6.82%. Los resultados destacan la importancia de optimizar las condiciones de crecimiento y caracterización para maximizar la eficiencia de los dispositivos, posicionando a la electrodeposición como una técnica clave para el desarrollo de celdas solares avanzadas.

3.1. OBSERVACIONES GENERALES

El autor le agradece al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico a los estudios de Vianey Aracely Candelas Urrea, así como a Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por permitirle el uso de las instalaciones y el equipo necesario para la realización de este trabajo.

4. REFERENCIAS

[1] A. Majid, M. Bibi, "Cadmium based II-VI Semiconducting Nanomaterials", Topics in mining metallurgy and materials engineering, 2018

<https://doi.org/10.1007/978-3-319-68753-7>

[2] S. Saha, M. W. Johnson, F. Altayaran, Y. Wang, D. Wang, Q. Zhang, "Electrodeposition Fabrication of Chalcogenide Thin Films for Photovoltaic Applications", *Electrochem*, 1(3), pp 286-321, 2020
<https://doi.org/10.3390/electrochem1030019>

[3] S. S. V. Tatiparti, F. Ebrahimi, "Potentiostatic versus galvanostatic electrodeposition of nanocrystalline Al-Mg alloy powders", *Journal Of Solid State Electrochemistry*, 16(3), pp 1255-1262, 2011
<https://doi.org/10.1007/s10008-011-1522-5>

[4] S. A. M. Al-Bat'hi, "Characterization of Electrodeposited Zn (Se, Te) Thin Films/ Polymer (PEO – Chitosan Blend) Junction for Solar Cells Applications", PhD thesis; Malaya University, 2007

[5] D. P. Sali, N. B. Chaure, "Electrodeposition and Characterization of CdTe thin films for photovoltaic applications", *Materials Today: Proceedings*, 42, pp 1647-1650, 2021a
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.475>

[6] S. A. M. Al-Bat'hi, "Electrodeposition of Nanostructure Materials", InTech eBooks, 2015
<https://doi.org/10.5772/61389>

[7] A. R. Weerasinghe, "Solar cells based on electrodeposited thin films of ZnS, CdS, CdSSe and CdTe", PhD thesis; Sheffield Hallam University, 2013

[8] V. A. Candelas, C. Villa, Iván O. Hernández, R. Morales, R. Villa, "All-Layer Electrodeposition of a CdTe/Hg_{0.1}Cd_{0.9}Te/CdTe Photodetector for Mid-Wavelength Infrared Detection", *Coatings*, 14(9), 2024
<https://doi.org/10.3390/coatings14091133>

[9] V. A. Candelas, C. Villa, R. Villa, "Optical Absorption and Conversion Efficiency Improvement by a QW Insertion in the Active Layer of PN Solar Cell", *Revista Aristas* 10(18), pp 260-264, 2023
http://revistaaristas.tij.uabc.mx/index.php/revista_aristas/article/view/307/310

[10] K. Premaratne, S. N. Akurathilaka, I. M. Dharmadasa, A. Samantilleka, "Electrodeposition using non-aqueous solutions at 170 °C and characterisation of CdS, CdS_xSe_(1-x) and CdSe compounds for use in graded band gap solar cells", *Renewable Energy*, 29(4), pp 549-557, 2004
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.08.002>