



Influencia de la presión y temperatura en el depósito de películas delgadas de ZnTe por Sputtering Rf

Influence of pressure and temperature on the deposition of ZnTe thin films by RF sputtering

Daniel Hernández Pitalúa¹, Isaí Pacheco Tejeda¹, Lizbeth Castañeda Escobar^{1*}

Instituto Tecnológico Superior de Xalapa

*Autor de correspondencia: lizbeth.ce@xalapa.tecnm.mx¹

Recibido 04 de abril 2025; recibido en forma revisada 09 de julio 2025; aceptado 06 de noviembre 2025

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo obtener y caracterizar películas delgadas de Teluro de Zinc (ZnTe) depositadas mediante Sputtering RF, variando parámetros de presión, temperatura del sustrato y espesor, con la finalidad de evaluar su aplicación como capa tipo p+ en celdas solares CdS/CdTe, buscando optimizar la eficiencia mediante la formación de contactos óhmicos con la capa posterior de Cu-Mo. Para ello, se emplearon sustratos de vidrio dopado con óxido de estaño, los cuales fueron sometidos a un proceso riguroso de limpieza, seguido del depósito controlado de ZnTe en un sistema de Sputtering RF equipado con magnetrones, bomba mecánica, bomba turbomolecular y medidores de presión y espesor. Las condiciones experimentales incluyeron variaciones de presión de 7.5 y 15 mTorr y temperaturas de sustrato de 250 °C, 350 °C y 450 °C, obteniéndose espesores promedio cercanos a 500 nm, con diferencias entre las caras conductora y no conductora del vidrio. La caracterización de las muestras incluyó perfilometría, transmitancia y absorción, así como estudios de morfología

mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), donde se observó que la temperatura tiene una influencia directa en el tamaño de grano, formándose granos mayores a 450 °C, lo que favorece la estructura policristalina y mejora la calidad del contacto óhmico. Los resultados evidenciaron que la presión afecta principalmente la razón de depósito y el espesor de las películas, siendo casi el doble a 7.5 mTorr en comparación con 15 mTorr, mientras que la transmitancia mostró valores entre 53% y 71% según las condiciones de depósito. La respuesta fotovoltaica de las celdas fabricadas con capas de ZnTe demostró mejoras significativas en los parámetros eléctricos respecto a las celdas base sin ZnTe, alcanzando incrementos en la eficiencia de 2.5% a 5%, en el voltaje de circuito abierto (Voc) de 450 a 531 mV, en la densidad de corriente de corto circuito (Jsc) de 16 a 27 mA/cm² y en el factor de llenado (FF) de 32 a 35, confirmando la hipótesis de que el ZnTe actúa como una capa p+ eficiente. Además, se observó una reducción en la tasa de degradación de potencia, de 17% en las celdas sin ZnTe a 10% en las celdas con ZnTe, lo que respalda su viabilidad tecnológica y económica. En conclusión, la deposición de ZnTe por Sputtering RF bajo condiciones óptimas de presión y temperatura no solo mejora la morfología de las películas y sus propiedades ópticas, sino que también incrementa de manera significativa el desempeño fotovoltaico de las celdas CdS/CdTe, constituyendo una alternativa prometedora para la optimización de dispositivos de segunda generación y una contribución a la innovación en materiales de contacto en la industria fotovoltaica.

Palabras Clave: Energía solar, películas delgadas, CdTe, ZnTe, sputtering.

ABSTRACT

The objective of this study was to obtain and characterize thin films of Zinc Telluride (ZnTe) deposited by RF Sputtering, varying parameters such as pressure, substrate temperature, and thickness, with the aim of evaluating their application as a p+ type layer in CdS/CdTe solar cells. The goal was to optimize efficiency by forming ohmic contacts with the rear Cu-Mo layer. For this, tin-doped glass substrates were used, subjected to a rigorous cleaning process, followed by the controlled deposition of ZnTe in an RF Sputtering system equipped with magnetrons, a mechanical pump, a turbomolecular pump, and pressure and thickness gauges. Experimental conditions included pressure variations of 7.5 and 15 mTorr and substrate temperatures of 250 °C, 350 °C, and 450 °C, with average thicknesses close to 500 nm, showing differences between the conductive and non-conductive faces of the glass. The characterization of the samples included profilometry, transmittance, and absorption, as well as morphological studies using scanning electron microscopy (SEM), where it was observed that temperature has a direct influence on grain size, with larger grains forming at temperatures above 450 °C, which favors a polycrystalline structure and improves the quality of the ohmic contact. The results showed that pressure mainly affects the deposition rate and thickness of the films, with deposition being almost twice as high at 7.5 mTorr compared to 15 mTorr, while transmittance values ranged between 53% and 71% depending on deposition conditions. The photovoltaic response of the cells fabricated with ZnTe layers demonstrated significant improvements in electrical parameters compared to the base cells without ZnTe, achieving efficiency increases of 2.5% to 5%, an open circuit voltage (Voc) increase from 450 mV to 531 mV, short-circuit current density (Jsc) from 16 mA/cm² to 27 mA/cm², and fill factor (FF) from 32 to 35, confirming the hypothesis that ZnTe acts as an efficient p+ layer. Furthermore, a reduction in the power degradation rate was observed, from 17% in cells without ZnTe to 10% in cells with ZnTe, supporting its technological and economic viability. In conclusion, the deposition of ZnTe by RF Sputtering under optimal pressure and temperature conditions not only improves the morphology and optical properties of the films but also significantly increases the photovoltaic

performance of CdS/CdTe cells, making it a promising alternative for the optimization of second-generation devices and a contribution to innovation in contact materials in the photovoltaic industry.

Keywords: Solar energy, thin films, CdTe, ZnTe, sputtering.

INTRODUCCIÓN

La electricidad es un pilar fundamental para el desarrollo de la humanidad. Su disponibilidad

impulsa la productividad, la innovación y el bienestar social. Sin embargo, el crecimiento constante en la demanda energética ha generado una dependencia significativa de los combustibles fósiles, con las consecuentes implicaciones ambientales como el calentamiento global, la contaminación y la sobreexplotación de recursos naturales. Ante este panorama, el uso de energías limpias se ha convertido en una prioridad mundial.

Entre las energías renovables más prometedoras se encuentra la energía solar, cuya captación mediante celdas fotovoltaicas permite transformar directamente la radiación solar en electricidad. Las celdas solares de película delgada, en particular las basadas en Telurio de Cadmio (CdTe), han mostrado un alto potencial debido a su bajo costo de producción y buena estabilidad térmica. No obstante, aún se requiere mejorar su eficiencia y durabilidad para competir con otras tecnologías fotovoltaicas como el silicio monocristalino.

Diversos estudios (Marroquín, 2012; Chu et al., 1992) han demostrado que la capa de contacto posterior en las celdas CdTe desempeña un papel

crucial en el transporte de carga y en la reducción de la resistencia eléctrica. En este contexto, el Telurio de Zinc (ZnTe) ha surgido como un material alternativo con propiedades ópticas y eléctricas adecuadas para mejorar la eficiencia de conversión energética.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar el depósito de películas delgadas de ZnTe mediante Sputtering RF, analizando la influencia de parámetros de proceso sobre la calidad del material y su impacto en el rendimiento de las celdas CdTe.

METODOLOGÍA

El proceso experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales Semiconductores del Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. Se utilizaron sustratos de vidrio TEC 15 con recubrimiento de óxido de estaño (SnO₂:F), los cuales fueron limpiados en baño ultrasónico con jabón alcalino, agua destilada, alcohol isopropílico y acetona. Posteriormente, los sustratos se secaron con nitrógeno seco (N₂).

Las películas de ZnTe se depositaron mediante la técnica de Sputtering RF en un sistema de vacío con presiones base de 1×10^{-6} mbar. Se emplearon blancos de ZnTe con una pureza del 99.99 %. El gas Argón (Ar) se utilizó como medio de bombardeo a un flujo de 20 sccm. Se evaluaron dos presiones de trabajo: 7.5 mTorr y 15 mTorr, y tres temperaturas de sustrato: 250 °C, 350 °C y 450 °C. El tiempo de depósito fue de 30 minutos en todos los casos.

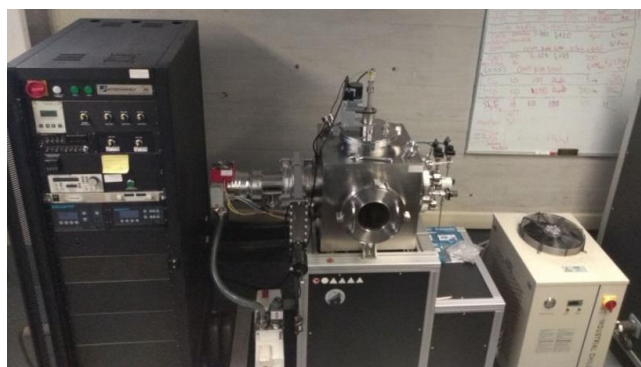


Figura 1. Sputtering-RF con sus complementos cámara de vacío y enfriador.

Posteriormente, se realizó un tratamiento térmico con CdCl₂ a 450 °C durante 40 minutos para mejorar la cristalización del CdTe y la adherencia de la capa ZnTe. Finalmente, se depositaron contactos metálicos de Cu/Mo mediante Sputtering DC para completar la estructura fotovoltaica.

Las muestras se caracterizaron mediante perfilometría (para determinar espesor), espectrofotometría UV-Vis (para analizar transmitancia y absorción), y microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar la morfología superficial. Caracterización.

Las muestras se analizaron mediante:

- Perfilometría: para determinar espesores de película.
- Transmitancia y absorción óptica: mediante espectrofotometría.
- Microscopía electrónica de barrido (SEM): para observar morfología superficial.

Posteriormente, se realizaron depósitos de CdTe mediante el sistema CSS (*Close Spaced Sublimation*) y tratamientos térmicos con CdCl₂ a 450 °C durante 40 min para mejorar la cristalinidad. Finalmente, se depositaron los contactos Cu/Mo mediante *Sputtering DC*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mostraron que las películas depositadas a menor presión (7.5 mTorr) presentan

una mayor tasa de crecimiento, alcanzando espesores promedio de 500 nm, en comparación con 445 nm a 15 mTorr. Este comportamiento se debe a la mayor energía de los iones en condiciones de baja presión, lo cual incrementa la movilidad superficial de los átomos y favorece la densificación del material.

En cuanto a la morfología, las imágenes SEM revelaron que el aumento de temperatura de 250 °C a 450 °C promueve el crecimiento de granos más grandes y homogéneos, mejorando la conductividad y reduciendo la presencia de defectos estructurales. A 350 °C se observó la mejor combinación entre homogeneidad, adherencia y tamaño de grano, por lo que se considera la temperatura óptima de depósito.

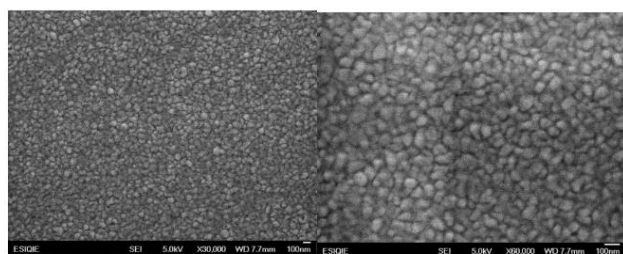


Figura 2 Morfología de las muestras procesadas de ZnTe, por medio del Sputtering RF a 450 °C

Las propiedades ópticas confirmaron que las películas presentan una transmitancia promedio

entre 60 % y 71 %, dependiendo del espesor y de la presión de trabajo. Este rango es consistente con los valores reportados por Pal et al. (1989), quienes señalaron que el ZnTe exhibe un comportamiento semiconductor directo con un ancho de banda prohibida (E_g) cercano a 2.26 eV, ideal para capas de contacto en celdas CdTe.

Los análisis eléctricos demostraron una mejora significativa en las celdas que incorporaron una capa de ZnTe p+ entre el CdTe y el contacto Cu-Mo. Se registró un incremento en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) de 450 mV a 531 mV, una corriente de cortocircuito (J_{sc}) de 16 mA/cm² a 27 mA/cm² y una eficiencia global que pasó de 2.5 % a 5 %. Estos resultados se atribuyen a una mejor alineación de bandas y menor resistencia de contacto en la interfaz CdTe/ZnTe.

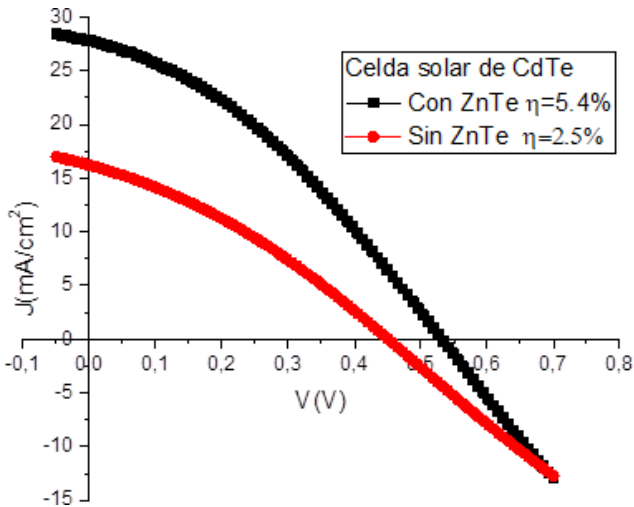


Figura 3 Curva IV comparación celda con ZnTe y sin ZnTe

Además, la estabilidad de las celdas se incrementó considerablemente. Después de 500 horas de operación continua bajo iluminación simulada, las celdas con ZnTe mostraron una degradación del 10 %, frente al 17 % observado en las celdas convencionales, lo cual confirma la contribución de este material en la durabilidad de los dispositivos.

CONCLUSIONES

El estudio demostró que el Telurio de Zinc (ZnTe) es un material viable como capa intermedia o de contacto posterior en celdas solares de CdTe. Su

incorporación mejora la eficiencia, reduce la resistencia de contacto y contribuye a la estabilidad a largo plazo del dispositivo. Las condiciones óptimas de depósito se alcanzaron a una presión de 7.5 mTorr y temperatura de 350 °C, obteniendo películas con buena morfología, adherencia y propiedades ópticas adecuadas.

Los resultados abren la posibilidad de integrar el ZnTe en estructuras avanzadas de celdas de película delgada, impulsando la investigación hacia tecnologías fotovoltaicas más limpias, económicas y sostenibles.

BIBLIOGRAFÍA

- Pal, U., Saha, S., Chaudhuri, A. K., Rao, V. V., & Banerjee, H. D. (1989). Some optical properties of evaporated zinc telluride films. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 22(7), 965.
- Chu, T. L., Chu, S. S., Ferekides, C., & Britt, J. (1992). Films and junctions of cadmium zinc telluride. *Journal of applied physics*, 71(11), 5635-5640.

SENER (2018) Prospectiva de Energías Renovables.

advances in construction and device innovation.

Tonda M. J. (2012) El oro solar y otras fuentes de energía S.L. fondo de cultura económica de España.

León Bonilla (2015). Procesamiento y caracterización de Sb₂Te₃ y su aplicación en celdas solares de CdTe. Tesis de maestría no publicada, Universidad Veracruzana.

Neumann-Spallart, M., & Königstein,

C. (1995). Electrodeposition of zinc telluride. Thin solid films, 265(1-2), 33- 39.

<https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/radio-frequency-sputtering>

Improvements in CdTe module reliability and long-term degradation through advances in Nicholas Strevel, Lou Trippel, Chad Kotarba & Imran

Khan, First Solar, Perrysburg, Ohio, USA

Marroquín 2012, Energía solar para un desarrollo sustentable, el caso de las celdas fotovoltaicas en México.

Nicholas Strevel, Lou Trippel, Chad Kotarba & Imran Khan, (2018)First Solar, Perrysburg, Ohio, USA Improvements in CdTe module reliability and long-term degradation through