

CRECIMIENTO DE PELÍCULAS DELGADAS EN ATMÓSFERA DE OXÍGENO MEDIANTE LA TÉCNICA DE SUBLIMACIÓN-CSVT

Ana María Salomón Preciado¹, Miguel Aleman-Arce², Francisco Javier de Moure Flores³, Jorge Ricardo Aguilar Hernández¹, Osvaldo Vigil Galán¹, Gerardo Silverio Contreras Puente^{1*}

¹Instituto Politécnico Nacional, ESFM. UPALM, Zacatenco, CDMX, 07738, México.

²Instituto Politécnico Nacional, CNMN. UPALM, Zacatenco, CDMX, 07738, México.

³Universidad Autónoma de Querétaro, FQ. Centro Universitario, Santiago de Querétaro, 76010, Qro.

*gscp1953@hotmail.com

<https://doi.org/10.3926/oms.404.4>

Salomón Preciado, A.M., de Moure Flores, F.J., Aguilar Hernández, J.R., Aleman-Arce, M., Vigil-Galán, O., & Contreras-Puente, G.S. (2020). Crecimiento de películas delgadas en atmósfera de oxígeno mediante la técnica de sublimación-CSVT. En E. San Martín-Martínez (Ed.). *Avances de investigación en Nanociencias, Micro y Nanotecnologías. Volumen II*. Barcelona, España: OmniaScience. 63-76.

Resumen

Las celdas solares de CdTe/CdS en película delgada depositadas sobre sustratos flexibles y en la configuración sustrato no han tenido buena respuesta fotovoltaica, dando menores eficiencias que sus homologas desarrolladas en configuración superestrato. Son dos los procesos relacionados con el deterioro de las propiedades de la película absorbente CdTe, estos son: 1) el tratamiento con cloruro de cadmio que se deposita sobre el CdTe antes del CdS no permite que se mejore la unión entre estos semiconductores; 2) el contenido de cobre que se deposita en el contacto trasero de la celda o durante el depósito de CdTe degradando las propiedades de la película. Sin embargo, en el año 2013 se logró desarrollar una celda solar CdTe/CdS sobre sustrato de molibdeno flexible, incorporando de manera controlada capas atómicas de cobre entre el CdTe y el CdS, alcanzando una eficiencia de 11.5 %. Estos resultados dejan claro que aún hay mucho por investigar en cuanto a los materiales disponibles para celdas solares y la importancia que tiene el conocer sus propiedades para entender y dirigir la investigación hacia desarrollo de dispositivos fotovoltaicos eficientes, de bajo costo y que brinden beneficio a largo plazo. En el presente trabajo se presentan los resultados de estudios de las películas delgadas de CdTe depositadas mediante la técnica de sublimación por transporte de vapor en espacio cercano (CSVT, por sus siglas en inglés), sobre sustratos de molibdeno flexible. En estos depósitos se variaron espesores para evaluar la interacción del oxígeno usado durante el depósito en las propiedades estructurales, ópticas, eléctricas, químicas y morfológicas del CdTe. Los resultados mostraron que el oxígeno forma óxidos de telurio y teluratos de cadmio en la superficie de la película de CdTe. Además, se encontró evidencia de defectos comunes del CdTe tales como maclas y fallas de apilamiento.

Palabras clave: Películas delgadas de CdTe; CSVT; Sustrato de molibdeno flexible.

1. Introducción

El telurio de cadmio (CdTe) es un semiconductor del grupo II-VI con un coeficiente de absorción óptica ($>10^4 \text{ cm}^{-1}$) y una banda prohibida de 1.47 eV en volumen, lo que lo hace un material atractivo en su aplicación en celdas solares [1]. La celda convencional de CdTe/CdS sobre vidrio en configuración superestrato ha alcanzado una eficiencia de 22.1 % en el 2016 por First Solar® y es fabricada sobre un sustrato de vidrio [2]. El CdTe muestra tener reproducibilidad y escalabilidad a nivel industrial, lo que ha permitido que las celdas solares de CdTe/CdS hayan alcanzado el 2 % del mercado fotovoltaico a nivel mundial [3]. Sin embargo, las celdas solares fabricadas sobre vidrio presentan fragilidad, rigidez y baja resistencia a cambios bruscos de temperatura. Estas limitantes pueden ser superadas usando sustratos metálicos flexibles en los que se puede obtener celdas solares con una relación costo-eficiencia aceptable. Además, la función de trabajo del molibdeno reportada en el rango de 4.36-4.95 eV le permite formar un contacto óhmico con el CdTe que tiene una afinidad electrónica de 4.4 eV, funcionando así como sustrato y como contacto posterior en la celda solar de CdTe [4]. La máxima eficiencia en celdas solares de CdTe sobre molibdeno flexible se logró en 2013 por Kranz *et al.*, con una eficiencia del 11.5 % [4]. La eficiencia teórica máxima predicha para las celdas de CdTe es 29 % [5], la cual aún no se logra en ninguna de las dos configuraciones y los aumentos en eficiencias en años recientes, permite plantearse más posibilidades de investigación en el CdTe. Son por estas razones, que en este trabajo se presenta el estudio sobre el efecto del oxígeno en las propiedades ópticas, estructurales y morfológicas de películas de CdTe crecidas mediante la técnica de CSVT para su aplicación en celdas solares en configuración sustrato, sobre sustratos de molibdeno flexible.

2. Metodología

2.1. Obtención de películas de CdTe mediante CSVT

Las películas de CdTe se crecieron sobre molibdeno flexible de 100 μm de espesor, con una pureza del 99.9 % de la marca Aldrich, el cual se sometió a un proceso de limpieza de cuatro pasos que consistieron en: 1) lavado en solución ácida al 10 % durante 5 minutos, 2) lavado en agua desionizada durante 5 minutos, 3) lavado en mezcla de alcohol isopropílico y acetona (1:1) durante 5 minutos, 4) lavado con agua desionizada, cada uno en baño de ultrasonido, y finalmente secados con gas nitrógeno. Los sustratos fueron colocados en la cámara de CSVT inmediatamente después del lavado.

Las películas de CdTe se obtuvieron mediante la técnica de CSVT con los siguientes parámetros de depósito: temperatura de fuente de 650 °C, temperatura de sustrato de 500 °C, atmósfera de (Ar/O₂ 50/50 %) usando una presión de 80 mTorr, diferentes tiempos de depósito y una distancia entre el sustrato y la fuente de 7 mm. Se utilizó CdTe en polvo (Alpha Aesar, 99.99 % de pureza), el cual se colocó en un crisol de grafito para la evaporación.

2.2. Caracterización de las películas de CdTe

Los espesores de las películas se midieron en un perfilómetro óptico Ambios Technology XP-100. La morfología y concentraciones atómicas de las películas de CdTe se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopia de rayos-X de energía dispersa (EDS) en un microscopio electrónico de barrido JSM 7800F JEOL, empleando un voltaje de aceleración de 5.0 KV, una distancia de trabajo de 10 mm. Las propiedades estructurales se analizaron por difracción de rayos-X (DRX) en un difractor de rayos X X'pert Pro MRD Panalytical usando configuración de Bragg Bretano, en un rango de 20°-80° con un paso de 0.02°, empleando una fuente de cobre usando radiación Cu-K_α (1.5406 Å); microscopía electrónica de transmisión de alta resolución (HR-TEM) en un microscopio electrónico de transmisión JEM-ARM 200F usando una rejilla de cobre cubierta con carbono como soporte de la muestra. Las mediciones Raman y de fotoluminiscencia (PL) se realizaron a temperatura ambiente con un láser de He-Ne (632.8 nm) con una potencia de 5 mW. La espectroscopia de fotoelectrones emitidos por rayos-X (XPS) se realizó usando un espectrómetro de fotoelectrones inducidos por rayos X Thermo Scientific k-alpha con un monocromador de radiación k-alfa (1486.6 eV) como fuente de rayos X. Las propiedades ópticas se estudiaron mediante espectroscopia UV-Vis en modo reflectancia, en un espectrofotómetro Lambda 35 Perkin Elmer, usando una esfera de integración sin ángulo de inclinación sobre la superficie de la muestra en un rango de longitud de onda de 700 nm a 1100 nm.

3. Resultados y discusión

Las propiedades físicas del CdTe fueron analizadas en función de la variación de su espesor. Los espesores de las películas de CdTe depositadas mediante la técnica de CSVT son superiores a 1µm debido a las altas razones de crecimiento para este semiconductor, mediante esta técnica. Se necesitan de 2 a 8 µm de espesor en las películas de CdTe para obtener una película que absorba la mayor cantidad de fotones incidentes y tener una celda solar eficiente. Por lo anterior, en el presente trabajo, se presentan los resultados de películas de CdTe con espesores dentro de ese rango. En la tabla 1 se resumen algunos resultados

de las muestras denominadas 2a, 2b y 2c donde se puede ver la influencia del tiempo en el espesor y en el tamaño de grano de las películas de CdTe. CdTe, este último se obtuvo a partir de las imágenes obtenidas por MEB. El perfil de crecimiento de películas de CdTe demostró la factibilidad de la técnica de depósito CSVT para el depósito de CdTe sobre molibdeno flexible, ver figura 1, donde se puede observar que en los primeros 5 minutos se tienen razones de crecimiento de aproximadamente $1\mu\text{m}/\text{min}$ para después disminuir a $0.7\mu\text{m}/\text{min}$. Esto puede ser posible a la re-evaporación del CdTe. Contreras-Puente et al. [6] reportaron una razón de crecimiento de aproximadamente $1.3\mu\text{m}/\text{min}$ en películas de CdTe depositadas sobre sustrato de vidrio [6].

Tabla 1. Tiempos de depósito, espesores y tamaños de grano de las películas de CdTe obtenidas.

Muestra	Tiempo (min)	Espesor (μm)	Tamaño de grano (μm)
2a	3	3.8	4.0
2b	5	6.2	4.2
2c	10	8.5	5.1

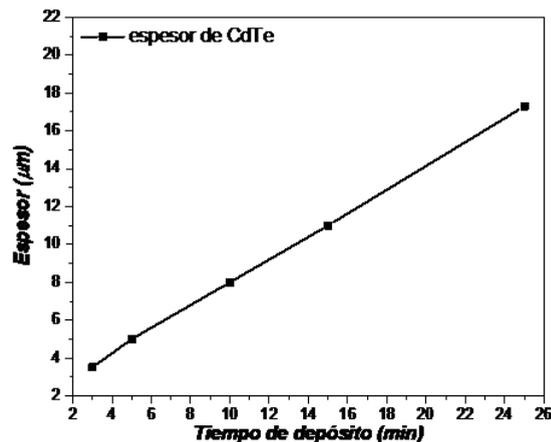


Figura 1. Perfil de crecimiento del CdTe en función del tiempo.

La morfología superficial de las películas de CdTe se muestra en la figura 2. Las imágenes 2a, 2b y 2c muestran un crecimiento homogéneo, denso y sin pin-holes. Se pueden apreciar granos bien facetados con numerosos defectos planares tales como fallas de apilamiento y maclas. Estos defectos intrínsecos son característicos en películas de CdTe policristalino crecido a altas temperaturas, debido a que tiene altas razones de crecimiento, y a las bajas energías de formación de este tipo de defectos [7,8]. Los tamaños de grano aumentan ligeramente al aumentar el espesor de la película.

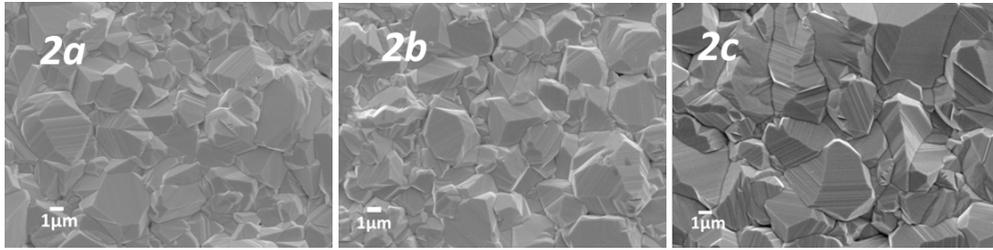


Figura 2. Morfología de películas de CdTe a diferentes espesores:
2a) 3.8 μm , 2b) 6.2 μm y 2c) 8.5 μm

En el difractograma de la Figura 3 se observa la presencia de tres picos con mayor intensidad en $2\Theta = 23.77^\circ$, 39.31° y 46.45° que corresponden a los planos (111), (220) y (311) del CdTe policristalino fase cúbica, tal y como se reporta para CdTe depositado sobre sustratos de molibdeno flexible [9]. La identificación del CdTe se realizó usando la carta cristalográfica PDF 015-0770. En el recuadro del difractograma se observa la región ampliada de $2\Theta = 20^\circ$ a 24° en donde se aprecian dos picos en $2\Theta = 21.40^\circ$ y 23.12° que han sido asignados al plano (011) del TeO_2 en su fase ortorrómbica y al plano (111) del Cd_xTeO_y en fase monoclinica [10,11]. Los picos en $2\Theta = 40.47^\circ$, 58.63° y 73.68° corresponden al sustrato de molibdeno en sus planos (110), (200) y (211) de su fase cúbica [12].

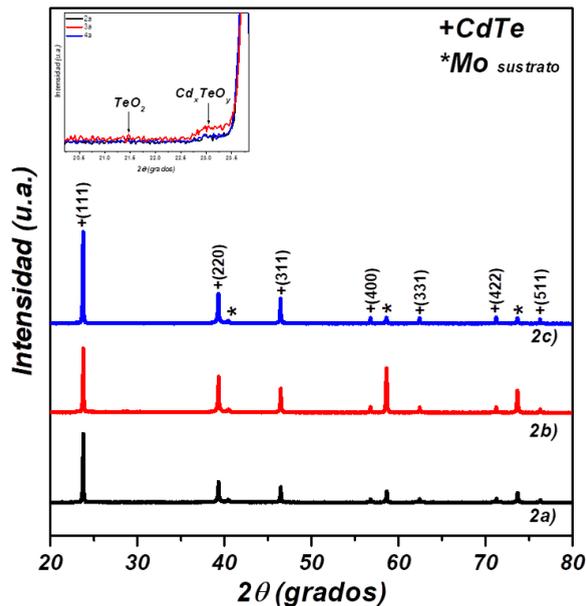


Figura 3. Patrones de difracción de las películas de CdTe con diferentes espesores:
2a) 3.8 μm , 2b) 6.2 μm y 2c) 8.5 μm .

El análisis mediante HR-TEM se realizó con el propósito de determinar la estructura atómica de los defectos presentes en las películas de CdTe previamente observados mediante MEB. En la Figura 4a se observa la presencia principalmente de defectos tales como maclas, ocasionados por invertir simétricamente la secuencia de apilamiento, y fallas de apilamiento ocasionados por remover o agregar una subsecuente capa atómica; los cuales se observan de manera intrínseca en CdTe policristalino. También se determinó la distancia interplanar en una franja con menos defectos, con un valor de $3.69 \pm 0.06 \text{ \AA}$, correspondiente al plano (111) del CdTe [13]. Los anillos de Debye-Scherrer obtenidos mediante la difracción de electrones en área seleccionada (SAED, por sus siglas en inglés) muestran que los planos cristalográficos corresponden al CdTe cúbico sin una orientación preferencial ya que los anillos tienen casi la misma intensidad y continuidad, como se observa en la Figura 4b. Se puede observar también que se tiene una sola fase, CdTe cúbico pues no se tiene la presencia de puntos discretos ni anillos discontinuos entre anillos, mismos que son característicos de óxidos de telurio o telurio elemental. En la Figura 4c se muestra una imagen de TEM de baja resolución donde se observa la alta cristalinidad del CdTe obtenido, y la presencia de los defectos detallados previamente.

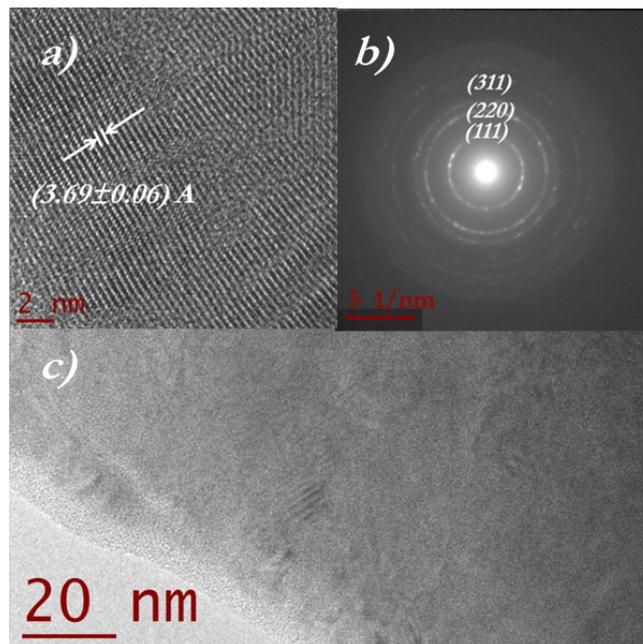


Figura 4. a) Imagen de HR-TEM, b) Imagen de patrón SAED y c) imagen TEM de la película de CdTe de la muestra 2a (3.8 μm de espesor).

Se ha reportado que los espesores de las películas de CdTe, en los rangos de 3-6 μm y 4-6 μm , sobre molibdeno flexible son óptimos para obtener celdas CdS/CdTe con eficiencias de 8% y 11.5%, respectivamente [6]. La muestra 2a con espesor de 3.8 μm dentro de los rangos mencionados, analizada mediante XPS, fue erosionada durante 15 segundos con iones de argón con el propósito de remover de la superficie los óxidos formados durante la exposición al ambiente. En la Figura 5 se muestran los resultados de las mediciones de las energías de enlace características de los elementos Cd y Te, realizadas sobre la superficie de película de CdTe de la muestra marcada como 2a, la cual tiene un espesor de 3.8 μm . En la Figura 5a se observan las energías de enlace del Te, las bandas localizadas en 404.78 eV y 411.58 eV corresponden a la señal del enlace Cd-Te con una diferencia de energía de 6.8 eV entre las señales Cd $3d_{5/2}$ y $3d_{3/2}$. Esta señal de cadmio se confirma por la diferencia teórica de $\Delta E = 6.74$ eV. En la Figura 5b se observan señales en 572.18 eV y 575.68 eV, relacionadas con los enlaces Te-Cd y Te-O, respectivamente. La diferencia que hay entre estas dos es de aproximadamente 3 eV, lo que se atribuye a que se tiene Te^{4+} dentro del TeO_2 . También se encuentran señales localizadas en 582.58 eV y 586.08 eV. La señal en 572.18 eV se localiza a 10.4 eV de la señal en 582.58 eV, lo que permite confirmar la existencia de dichos enlaces, ya que la diferencia teórica es de $\Delta E = 10.39$ eV [14,15].

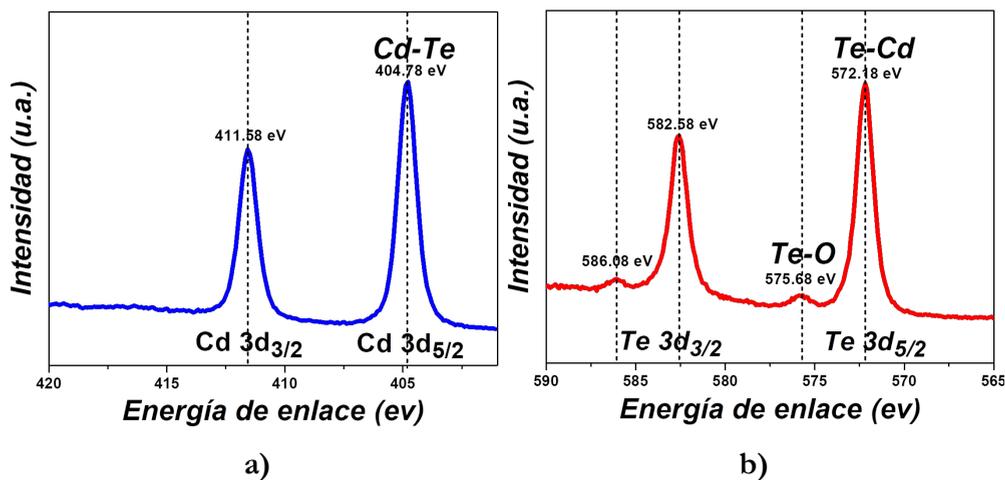


Figura 5. Mediciones de XPS de la película de CdTe de la muestra 2a:
 a) rango de energías de enlace del Cd y b) rango de energías de enlace del Te.

La Figura 6 muestra los espectros de fotoluminiscencia de las películas de CdTe; muestras 2a, 2b y 2c con espesores de 3.8 μm , 6.2 μm y 8.5 μm , respectivamente. Estas muestras presentan emisión luminiscente a temperatura ambiente que se atribuye a buena calidad cristalina [16], características que presentan

películas de CdTe obtenidas mediante sublimación en espacio cercano (CSS, por sus siglas en inglés) crecidas a temperaturas por encima de los 500°C y después de tratamiento térmico con CdCl₂ [17]. Las muestras 2a, 2b y 2c presentan una banda ancha (FWHM promedio de 55 meV) asimétrica cuyo máximo está localizado alrededor de 1.52 eV. Esta banda ancha podría componerse de dos bandas principales localizadas alrededor de los 1.51 eV y 1.54 eV, asociadas a la probable emisión radiativa (B-E) resultado de la aniquilación de excitones ligados a las vacancias de cadmio (V_{cd}), y la banda principal atribuida a la recombinación radiativa de electrones que decaen de la banda de conducción a la banda de valencia (B-B). La diferencia de energía entre estas dos bandas es en promedio de 21 meV, valor cercano al reportado por Aguilar et al. [18] en el estudio de fotoluminiscencia a temperatura ambiente para el CdTe policristalino [18,19].

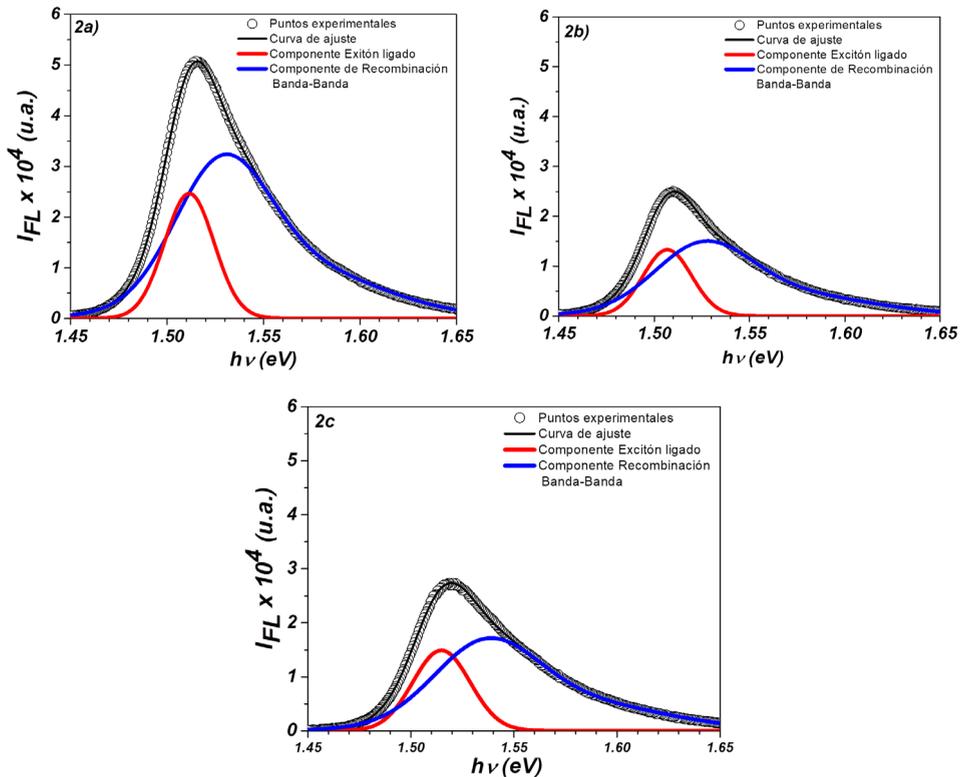


Figura 6. Espectros de fotoluminiscencia de las películas de CdTe y deconvolución de la banda principal de las muestras 2a) 3.8 μm , 2b) 6.2 μm y 2c) 8.5 μm .

En la Figura 7 se muestran los espectros Raman obtenidos para cada una de las películas de CdTe. Estas muestras presentan fluorescencia en la línea base en aumento conforme se tiene un mayor corrimiento en el número de onda. Los

espectros de las muestras 2a, 2b y 2c tienen tres bandas ubicadas en 139.5 cm^{-1} , 163.6 cm^{-1} y en $\sim 329 \text{ cm}^{-1}$ las cuales corresponden a los modos vibracionales de TO, LO y 2LO del CdTe, respectivamente. También se observan bandas poco intensas en 87 cm^{-1} y 114 cm^{-1} , las cuales corresponden a modos vibracionales de Te (E_1), Te (A_1), respectivamente. Estos resultados comprobaron la formación del CdTe, confirmando la información obtenida por difracción de rayos-X y XPS.

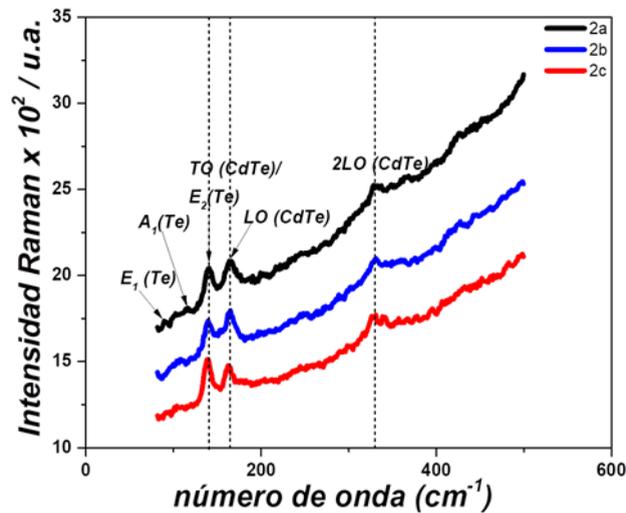


Figura 7. Espectros Raman de las películas de CdTe con espesores: 2a) $3.8 \mu\text{m}$, 2b) $8.5 \mu\text{m}$ y 2c) $6.2 \mu\text{m}$. El análisis Raman se realizó a temperatura ambiente.

Las propiedades ópticas se estudiaron mediante espectroscopia UV-Vis, en el rango de 700 nm a 1000 nm , rango en el que se encuentra el borde de absorción para el CdTe. Los espectros de reflectancia muestran el borde principal de absorción correspondiente al CdTe entre 850 nm y 830 nm , y un segundo borde de absorción entre 820 nm y 800 nm (Figura 8). Esto se podría atribuir a defectos en el material. El ancho de banda prohibida se calculó, a partir de los espectros de la Figura 8a, mediante las ecuaciones 1 y 2:

$$2\alpha t = \ln \left[\frac{(R_{max} - R_{min})}{(R - R_{min})} \right] \quad (1)$$

Donde α es el coeficiente de absorción, t es el espesor de la película y R es la reflectancia. Considerando que el coeficiente de absorción de un material semiconductor de energía prohibida directo es:

$$\alpha h\nu = A (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2)$$

Mediante las mediciones de máximos y mínimos de la reflectancia, haciendo uso de la ecuación 1 se grafica el cuadrado de $\ln \left[\frac{(R_{max} - R_{min})}{(R - R_{min})} \right]$ en función de $h\nu$, la intersección con la abscisa proporciona el valor de la banda prohibida. Los valores calculados de la banda de energía prohibida E_g para el borde de absorción principal presentes en el espectro de reflectancia E_{g1} y para el borde de absorción secundario E_{g2} , se muestran en la Tabla 2. Los valores de E_{g1} están dentro de los valores de E_g reportados para CdTe que van de 1.429 eV a 1.542 eV; que le permiten coincidir con el espectro solar y aprovechar más del 90% de la radiación solar [5]. Para comprender la naturaleza del borde de absorción secundario presente, se requiere estudio mediante fotoluminiscencia a baja temperatura.

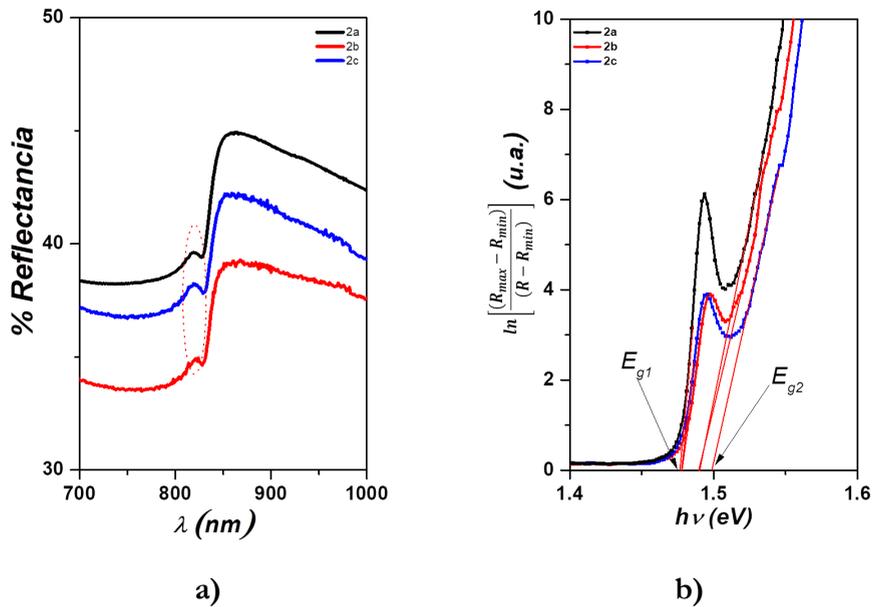


Figura 8. a) Espectros de reflectancia y b) banda de energía prohibida para las películas de CdTe con diferentes espesores.

Tabla 2. Bandas de energía prohibida de las películas CdTe del borde de absorción principal E_{g1} , borde de absorción secundario E_{g2} y E_g promedio.

Muestra	E_{g1} (eV)	E_{g2} (eV)
2a	1.48	1.49
2b	1.48	1.49
2c	1.48	1.49

4. Conclusiones

Se obtuvieron películas de CdTe policristalino mediante la técnica de CSVT sobre sustratos flexibles de molibdeno. El efecto de espesor de la película no influyó de manera importante en las propiedades morfológicas del CdTe, manteniéndose un tamaño de grano entre 4 y 5 μm . En Difracción de Rayos X se pudo determinar la presencia CdTe policristalino en su fase zinc blenda, con planos (111), (220) y (311), además de TeO_2 y Cd_xTeO_y , lo que se confirma mediante XPS en las bandas 575.68 eV y 586.08 eV. Mediante TEM se confirmó la presencia de defectos tipo maclas y defectos de apilamiento que se aprecian en la imagen de MEB, característicos de CdTe policristalino crecido a altas temperaturas. Los espectros de fotoluminiscencia refieren la presencia de oxígeno en la película de CdTe, emisión banda-banda y transición radiativa debida a la aniquilación de un excitón ligado a una impureza; o a la buena calidad cristalina del material, por lo que se requiere medición a bajas temperaturas para tener una decisión acertada en la asignación de dicha banda. Los resultados presentados en este trabajo son alentadores en la opción del procesamiento de celdas solares a base de películas de CdTe con espesores de 3.8 μm en la configuración sustrato, depositadas sobre sustrato de molibdeno flexible usando la técnica de CSVT, ya que las propiedades físicas de las películas de CdTe son similares a las obtenidas en películas de CdTe sobre sustratos rígidos.

Bibliografía

1. Zanio, K. (1978). *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 13 (Cadmium Telluride). Academic Press, New York. [https://doi.org/10.1016/S0080-8784\(08\)60064-2](https://doi.org/10.1016/S0080-8784(08)60064-2)
2. S.K. (First S. Inc). *First Solar Achieves Yet Another Cell Conversion Efficiency World Record* (2016). <https://investor.firstsolar.com/news/press-release-details/2016/First-Solar-Achieves-Yet-Another-Cell-Conversion-Efficiency-World-Record/default.aspx>.
3. Koebrich, S., Bowen, T., & Sharpe, A. (2018). *Renewable Energy Data Book*, 149. <https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75284.pdf>.
4. Kranz, L., Gretener, C., Perrenoud, J., Schmitt, R., Pianezzi, F. La Mattina, F. et al. (2013). Doping of polycrystalline CdTe for high-efficiency solar cells on flexible metal foil. *Nat. Commun.*, 4. <https://doi.org/10.1038/ncomms3306>
5. Shockley, W., & Queisser, H.J. (1961). Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J. Appl. Phys.*, 32, 510-519. <https://doi.org/10.1063/1.1736034>

6. Contreras-Puente, G., Vigil-Galán, O., Vidal-Larramendi, J., Cruz-Gandari-lla, F., Hesiquio-Garduño, M., Aguilar-Hernández, J. et al. (2001). Influence of the growth conditions in the properties of the CdTe thin films deposi- ted by CSVT. *Thin Solid Film*, 387, 50-53. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(01\)00798-2](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(01)00798-2)
7. Gu, H., Ren, A., Zhang, J., Li, K., Li, C., Wang, W., & Xu, H. (2017). The study of oxygen concentration in the CdTe thin film prepared by vapor transport deposition for CdTe photovoltaic devices. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 28, 9442-9449. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6686-z>
8. Yan, Y., Al-Jassim, M.M. & Demuth, T. (2001). Energetics and effects of planar defects in CdTe. *J. Appl. Phys.*, 90, 3952-3955. <https://doi.org/10.1063/1.1405138>
9. Hodges, D.R. (2008). Development of CdTe Thin Film Solar Cells on Flexible Foil Substrates, *Vasa*. <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf>.
10. Su, J., Minegishi, T., & Domen, K. (2017). Efficient hydrogen evolution from water using CdTe photocathodes under simulated sunlight. *J. Mater. Chem. A.*, 5, 13154-13160. <https://doi.org/10.1039/C7TA03761A>
11. Abdul-Manaf, N.A., Salim, H.I., Madugu, M.L., Olusola, O.I., & Dharmada- sa, I.M. (2015). Electro-plating and characterisation of CdTe thin films using CdCl₂ as the cadmium source. *Energies*, 8, 10883-10903. <https://doi.org/10.3390/en81010883>
12. Naghdi, S., Rhee, K.Y., Kim, M.T., Jaleh, B., & Park, S.J. (2016). Atmospher- ic chemical vapor deposition of graphene on molybdenum foil at diffe- rent growth temperatures. *Carbon Lett.*, 18, 37-42. <https://doi.org/10.5714/CL.2016.18.037>
13. Al-Jassim, M.M., Yan, Y., Moutinho, H.R., Romero, M.J., Dhere, R.D., & Jo- nes, K.M. (2001). TEM, AFM, and cathodoluminescence characterization of CdTe thin films. *Thin Solid Films*, 387, 246-250. [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(00\)01707-7](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(00)01707-7)
14. Briggs, D. (2005). X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). *Handb. Adhes.* (2nd Ed.). 621–622. <https://doi.org/10.1002/0470014229.ch22>

15. Jun-Feng, H., Liu, X., Li-Mei, C., Hamon, J., & Besland, M.P. (2015). Investigation of oxide layer on CdTe film surface and its effect on the device performance. *Mater. Sci. Semicond. Process.*, 40, 402-406. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.06.086>
16. Giles-Taylor, N.C., Bicknell, R.N., Blanks, D.K., Myers, T.H., & Schetzina, J.F. (1985). Photoluminescence of CdTe: A comparison of bulk and epitaxial material. *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces Film*, 3, 76-82. <https://doi.org/10.1116/1.573250>
17. Spalatu, N., Hiie, J., Mikli, V., Krunks, M., Valdna, V., Maticiu, N., Raadik, T., & Caraman, M. (2015). Effect of CdCl₂ annealing treatment on structural and optoelectronic properties of close spaced sublimation CdTe/CdS thin film solar cells vs deposition conditions. *Thin Solid Films*, 582, 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2014.11.066>
18. Aguilar-Hernández, J., Contreras-Puente, G., & Zelaya-Angel, J.M.F.E. (1994). Photoluminescence studies of semiconducting polycrystalline cdte films. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 33, 37. <https://doi.org/10.1143/JJAP.33.37>
19. Aguilar-Hernández, J., Contreras-Puente, G., Flores-Llamas, H., Yee-Madeira, H., & Zelaya-Angel, O. (1995). The temperature-dependence of the energy band gap of cvst-grown cdte films determined by photoluminescence. *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 28, 1517-1520. <https://doi.org/10.3390/en81010883>
20. Kumar, V., Sharma, Kr., Sharma, T.P., & Singh, V. (1999). Band gap determination in thick films from reflectance measurements. *Opt. Mater. (Amst)*, 12, 115-119. [https://doi.org/10.1016/S0925-3467\(98\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0925-3467(98)00052-4)