

CdTe DEPOSITADO POR SUBLIMACIÓN ISOTÉRMICA A CORTA DISTANCIA EN CELDAS SOLARES DE CdS/CdTe

P. G. ZAYAS-BAZÁN^a, G. CONTRERAS-PUENTE^b, G. SANTANA-RODRÍGUEZ^c, E. HERNÁNDEZ^a, O. CALZADILLA^a, K. GUTIÉRREZ Z-B^a, J. SASTRE-HERNÁNDEZ^b, O. DE MELO^{a†}

a) Facultad de Física- IMRE, Universidad de La Habana, Cuba; omelo@fisica.uh.cu

b) Escuela Superior de Física y Matemática del IPN, Edificio 9, U.P. ALM. Lindavista, Mexico, C.P. 07738, Mexico, D.F

c) Instituto de Investigación en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Cd. Universtaria, A.P. 70-360, Coyoacán 04510, Mexico D.F.

† autor para la correspondencia

Se reporta la preparación de estructuras de CdS/CdTe y el uso preliminar de las mismas para la fabricación de celdas solares. Las capas de CdS fueron preparadas por baño químico y las de CdTe por sublimación isotérmica a corta distancia con exposición alternada de la superficie de crecimiento a las fuentes de Cd y Te. Igualmente el tratamiento térmico en CdCl₂ se realizó exponiendo isotérmicamente la muestra a los vapores de CdCl₂. Estos procedimientos para depositar el CdTe y realizar el tratamiento térmico representan una novedad en este tipo de celdas. Se reportan resultados preliminares de celdas solares fabricadas con estos procedimientos novedosos.

The preparation of CdS/CdTe structures as well as its preliminary use for the fabrication of solar cells is reported. CdS films were prepared using the chemical bath technique while CdTe films by isothermal close space sublimation with alternated exposure to Cd and Te sources in isothermal conditions. Annealings in CdCl₂ were also performed in isothermal conditions by exposing the sample to CdCl₂ vapors. Preliminary results of solar cells fabricated with these novel procedures are reported.

Palabras Clave. Thin films II-V, II-VI solar cells, 88.40.jm; II-VI semiconductors, 81.05.Dz; growth from vapor phase, 81.15.Kk

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe una gran actividad en investigación de celdas solares como consecuencia del interés por resolver los problemas asociados al uso predominante de hidrocarburos como fuente primaria de energía. Debido a la escasez progresiva de petróleo y gas todo indica que en los siguientes 15 a 20 años una fuente renovable de energía cada vez más confiable, robusta y de menor costo será la generación de electricidad a partir de la radiación solar, usando convertidores fotovoltaicos o celdas solares.

Las celdas solares más utilizadas ahora son aquellas basadas en silicio cristalino o poli-cristalino, pero una nueva generación de celdas solares en forma de películas delgadas se está expandiendo rápidamente en el mercado mundial. Los materiales más estudiados con este propósito son el CdTe y el CuInGaSe₂ en contacto con el CdS, el cual es utilizado como la llamada capa ventana. El primero de estos semiconductores ha permitido la realización de celdas solares con eficiencia máxima de 16.5 %. Esta, sin embargo, ha aumentado solamente en menos de 1% en los últimos 15 años; de hecho se han publicado artículos que explican las razones físicas de este estancamiento[1]. Las celdas basadas en el segundo material han llegado a 19.9 %. A pesar de esto, el mayor conocimiento del CdTe y su tecnología debe permitir en el futuro cercano una producción más robusta y con mayor eficiencia.

Esto implica que se deben buscar alternativas que permitan mejorar la eficiencia de celdas solares basadas en CdTe, y puedan superarse algunas limitaciones asociadas a las características de este material. Uno de los aspectos que se propone es el desarrollo de nuevas técnicas de crecimiento que permitan un mejor control de los parámetros de los materiales crecidos. En este trabajo estamos presentando por primera vez el crecimiento del CdTe así como los tratamientos intermedios en cloruro de cadmio, utilizando la técnica de sublimación isotérmica a corta distancia (ICSS por sus siglas en inglés)[2].

En nuestro trabajo usaremos la configuración típica de la celda que posee tres capas: una fina capa de óxido de Indio y Estaño (ITO) como conductor transparente para el contacto anterior; una capa de CdS como ventana y región n de la junta; y una capa de CdTe como absorbente. Sobre esta capa se depositó el contacto posterior de Cu/Ag.

PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES

a) Crecimiento del CdS por la técnica de Deposición en Baño Químico.

Las capas de CdS se obtuvieron por el método de Deposición por Baño Químico (Chemical Bath Deposition, CBD, en inglés). Esta técnica consiste en la precipitación controlada de un compuesto sobre un sustrato conveniente a partir de soluciones que contie-

nen a los reactantes. Para ello se prepara un baño con una solución que contiene una sal de cadmio; ya sea en forma de nitrato, cloruro, sulfato o acetato, y además con una solución de un agente reductor que contiene azufre. De esta forma en la solución alcalina el agente reductor se descompone y suministra los iones S^{2-} al baño químico y los cationes Cd^{2+} se obtienen de su respectiva sal.

En este trabajo se usó $CdCl_2$ y Tiourea ($CS(NH_2)_2$) como agente reductor. El Baño químico entonces estuvo formado por una mezcla de las siguientes soluciones acuosas: $CdCl_2$ (20 ml), KOH (50 ml), NH_4NO_3 (20 ml), $CS(NH_2)_2$ (20 ml). Cada solución fue preparada disolviendo en 100 ml de agua bidestilada 0.365g de $CdCl_2$, 12.00g de NH_4NO_3 , 1.52g de $CS(NH_2)_2$ y para el caso de el KOH se disolvieron 7.01g en 250 ml de agua bidestilada. Los sustratos que se utilizaron fueron vidrios de Corning recubiertos con una capa de óxido de Indio y Estaño (ITO). Vertiendo en un beaker todas las soluciones excepto la Tiourea. Este se sumerge en un baño de maría con temperatura controlada y agitación magnética como se muestra en la Fig. 1. Cuando la mezcla llega a una temperatura de 65 °C se le agrega la Tiourea y cuando la solución comienza a colorearse los sustratos son sumergidos verticalmente, manteniéndolos el tiempo de crecimiento, que fue de 2 horas. A lo largo de todo el crecimiento se toman medidas del pH el cual varía de 10 (al comienzo de la reacción) a 7 (cuando termina el crecimiento). Al final de este tiempo se enjuagan con abundante agua destilada, observándose una capa amarilla en la superficie (Fig. 2).

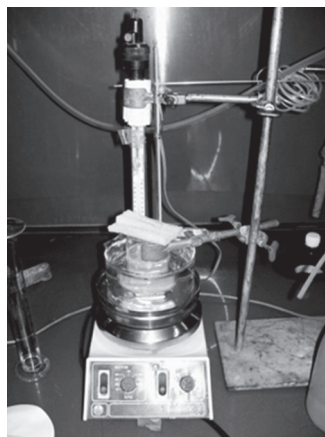


Figura 1: Montaje experimental de la técnica de Deposición por Baño Químico

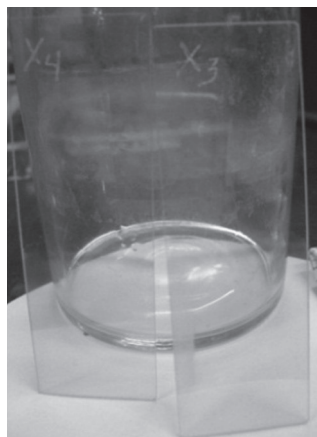


Figura 2: Vidrios después del crecimiento

Los factores que influyen directamente en la velocidad de crecimiento de la capa de CdS son la temperatura del baño, la concentración de los reaccionantes y el pH de la disolución. De aquí que un correcto control de todos estos factores propicia la obtención de una capa de gran calidad.

b) Crecimiento del CdTe por la técnica de Sublimación Isotérmica a Corta Distancia (SICD).

Algunas de las técnicas de crecimiento de transporte químico de fase vapor emplean la configuración de sublimación a distancia cercana. Las capas son depositadas a partir de la sublimación del compuesto que se quiere crecer, en un ambiente cerrado con el menor volumen posible con el objetivo de facilitar el transporte de los vapores entre la fuente y el sustrato. En el

modo tradicional tradicional de esta técnica la fuente y el sustrato son colocados a una distancia muy pequeña, con la fuente a una temperatura más alta que el sustrato. Generalmente, tanto la fuente como el sustrato son del mismo material y es la diferencia de temperatura la fuerza motriz del crecimiento. Si se utilizase una configuración de sublimación a corta distancia en condiciones isotérmicas uno podría esperar que, desde el punto de vista termodinámico, el crecimiento no ocurriría. Una o unas pocas capas atómicas del compuesto fuente sobre el sustrato (de otro material) serían suficientes para inhibir el crecimiento, al alcanzarse la igualdad de potenciales químicos (presiones de vapor) entre la fuente y la capa sobre el sustrato. Por lo que se necesitaría algo más para que el crecimiento ocurra en estas condiciones.

El sistema utilizado se muestra en la Fig. 3. Los compartimentos separados para las fuentes elementales y el agujero para la purga de vapores fueron diseñados para evitar la impurificación (mezcla) entre las fuentes. La parte deslizante, además de servir como soporte del sustrato, permite su exposición secuencial a las fuentes elementales manteniendo la configuración de distancia cercana sobre ellas. El procedimiento de crecimiento de la muestra se realiza exponiéndola secuencialmente a cada fuente elemental y a la purga. Un ciclo de crecimiento consiste en la exposición, en secuencia, del sustrato a cada fuente y luego a la purga. Repitiendo el ciclo las veces que uno desee se puede obtener una muestra con un espesor proporcional al número de ciclos usados.

Esta exposición alternada es la que garantiza el crecimiento en régimen isotérmico ya que la fuerza motriz del crecimiento será la diferencia de presiones de vapor entre la fuente elemental y la superficie de crecimiento. Así, durante la exposición a una de las fuentes se producirá el recubrimiento de la superficie con el material de la fuente. Como la temperatura es igual en la fuente y en la superficie, el sistema se encuentra cerca del equilibrio y la presión de vapor es muy cercana o igual a la presión de equilibrio a la temperatura dada. Esto hace que se cumplan las condiciones de la adsorción multicapas. Al exponer la superficie de crecimiento al orificio de purga, entonces se desorbe parte de la fina capa depositada en la exposición anterior y si el tiempo en la purga es suficientemente grande, sólo quedará una capa de cerca de 1 monocapa. En estas condiciones se puede obtener epitaxia a capas atómicas. Sin embargo, si el tiempo en la purga es pequeño (o en el límite nulo), entonces no alcanza el tiempo para que se desorba toda la capa y el crecimiento puede ocurrir a razones de crecimiento mayores en cada ciclo. Adicionalmente, en el caso de tiempos de purga pequeños, puede también ocurrir que parte del gas de una fuente pueda ser transportada a la otra fuente. Cualquiera de los dos efectos arriba explicados, conducen a una velocidad de crecimiento que puede llegar a ser relativamente alta. Esto es lo que ha motivado a los autores el uso de esta técnica para el crecimiento de la capa absorbente de la celda solar, que debe tener algunas micras para una completa absorción de la radiación. La técnica presenta la ventaja de que la temperatura puede ser un poco más baja que la usada tradi-

cionalmente en la configuración a distancia cercana dado que la evaporación de las fuentes elementales puede ocurrir a temperaturas sustancialmente menores que aquellas necesarias para evaporar los compuestos. Por otra parte, el control del espesor puede ser más preciso debido a que una vez calibrado el proceso de crecimiento depende solo del número de ciclos. Otra ventaja es que no es necesario contar con los compuestos que generalmente tienen un costo mayor. Por último, en esta configuración isotérmica se requiere sólo el control de una temperatura y no de dos lo que simplifica de alguna manera la construcción del equipamiento necesario. Por otra parte, existe la desventaja de que se necesita un actuador automatizado para garantizar el movimiento del sustrato sobre las fuentes.

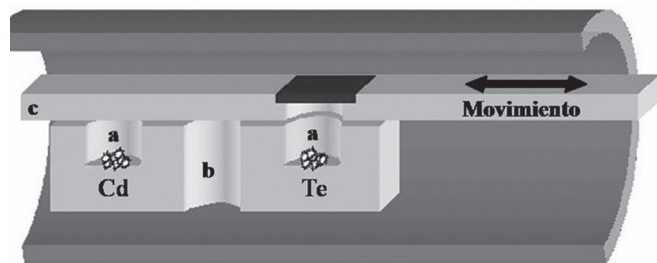


Figura 3: Esquema del sistema de sublimación isotérmica a corta distancia para el crecimiento del CdTe

Para el crecimiento de las capas de CdTe se utilizaron fuentes sólidas de Cd y Te de alto grado de pureza (provisitas por Goodfellow) y como sustrato una muestra de CdS, crecida por la técnica de Deposición por Baño Químico, de dimensiones de 9x9 mm. El Te se raspó cuidadosamente para eliminar la capa de óxido de su superficie y el Cd se atacó químicamente en una solución de HNO_3 : H_2O (1:1). La muestra de CdS que será utilizada como sustrato para el crecimiento de CdTe es sumergida durante aproximadamente 1 min en agua bidestilada hirviendo y luego durante 30 s en alcohol isopropílico, dejándola secar sobre un papel de filtro.

Para el crecimiento el sustrato se coloca en el portasustrato (c, en la Fig. 3) y las fuentes elementales separadas en los orificios (a, en la Fig. 3). Se coloca el bote en un reactor de cuarzo donde primeramente se pasa un flujo de helio durante 30 min para evacuar los gases no deseados y después se hace vacío con un sistema de bombas mecánica y difusora hasta llegar a una presión en el orden de 10⁻⁵ mbar. Ya a esta presión, la temperatura del reactor se eleva hasta 400 °C que es la temperatura de crecimiento en todos los casos. El sustrato se mantiene sobre el orificio de purga (b, en la Fig. 3) durante el calentamiento. Una vez alcanzada la temperatura de crecimiento, el sustrato se desplaza cíclicamente sobre las fuentes elementales, sometiéndolo a sus vapores durante el tiempo de crecimiento que se determine en cada caso. Este movimiento se realiza por medio de un actuador lineal LINAK controlado por un controlador lógico programable (PLC). Entre las exposiciones a las fuentes elementales, la cavidad del sustrato se purga sobre el orificio pasante (b, en la Fig. 3) durante el tiempo de purga. Una vez concluido el crecimiento se comienza a enfriar el sistema hasta la temperatura ambiente, se elimina el vacío y se extraen tanto la muestra como los residuos del crecimiento.

c) Tratamiento térmico con CdCl₂

Un tratamiento térmico con CdCl₂ es esencial para el mejoramiento de la eficiencia de las celdas solares de CdS/CdTe [3]. Aunque ha habido durante mucho tiempo discrepancias sobre los efectos de estos tratamientos, todo parece indicar que de alguna manera tienen influencia en la estructura cristalina e interfacial de la estructura. En nuestros experimentos usamos dos variantes de tratamiento térmico en CdCl₂, la primera consistió en colocar una pequeña pieza en un tercer hueco del bote de grafito (no mostrado en la Fig. 3) y realizar el tratamiento inmediatamente después de terminar el crecimiento sin sacar la muestra al exterior. La segunda variante, la colocación fue similar pero la estructura fue crecida en un proceso independiente y el tratamiento fue realizado después. Como resultados de algunas pruebas se observó que los tratamientos in-situ realizados según la primera variante, produjeron capas de CdTe con bordes no bien definidos y extendidas hacia los bordes del CdS. Probablemente los vapores de CdCl₂ presentes durante el crecimiento modificaron las condiciones del crecimiento, tal vez cooperando con un transporte excesivo de material. En cambio con la variante 2 las capas de CdTe presentaron bordes bien definidos. Por esta razón se escogió la segunda variante en lo adelante. Para realizar los tratamientos se eleva la temperatura del sistema hasta 380 °C, manteniendo el sustrato en el orificio de purga (b, en la Fig. 3). Cuando la temperatura del tratamiento está establecida, la muestra se desplaza hacia la fuente elemental, dejándola sobre esta durante aproximadamente 8 minutos. Este tiempo fue elegido debido a que para tiempos de tratamiento superiores, las capas de CdTe, luego de algún tiempo se fracturaban.

CARACTERIZACIÓN ÓPTICA DE LAS ESTRUCTURAS

Para la caracterización de las muestras usamos un fotospectrómetro Hitachi UV- VIS 150-20 en el rango 200-900nm con el que se obtuvieron espectros de transmitancia y reflectancia de las capas de CdTe/CdS en diferentes configuraciones. Para el caso de las capas de CdS se hicieron mediciones de transmisión en las que se observaron franjas de interferencia en la zona de transparencia (500 – 900 nm) que permitieron ajustar el espesor. Esto no pudo hacerse con el CdTe, debido a que el ancho de la banda prohibida de este semiconductor está alrededor de 850 nm muy próximo al borde superior del rango de nuestro espectrómetro (900 nm). Entonces utilizamos el siguiente procedimiento para estimar el espesor de las capas de CdTe.

Se conoce que para los semiconductores de gap directo la relación entre la absorbancia (α) y la energía de los fotones ($\hbar\omega$) es:

$$(\alpha d)^2 = (A d)^2 (\hbar\omega - E_g) \quad (1)$$

Donde d es el espesor de la muestra, E_g la energía del ancho de la banda prohibida y A una constante que depende del semiconductor de que se trate. Por lo que si se grafica $(\alpha d)^2$ como función de $\hbar\omega$, se puede obtener el espesor de la muestra a través de la pendiente m de la parte lineal de la curva, con tal de que se conozca el valor de la constante A. De esta misma parte de la curva

también es posible obtener el valor de la energía del ancho de la banda prohibida mediante el intercepto con el eje de las energías.

En la Fig. 4 se observan los espectros de transmisión de varias muestras con diferentes espesores del CdTe. De estos gráficos se observa cualitativamente que estas muestras tienen diferentes espesores. Esto se manifiesta en que las muestras más finas pueden aún dejar pasar luz de longitudes inferiores a la correspondiente al ancho de la banda prohibida y también al hecho de tener diferentes pendientes en la región de absorción de acuerdo con la ecuación (1). De la ecuación de la absorbancia anteriormente expuesta tenemos que la pendiente del gráfico de $(\alpha d)^2$ en función de $\hbar\omega$ es:

$$m = (A d)^2 \quad (2)$$

De los gráficos de $(\alpha d)^2$ vs. $\hbar\omega$ de la Fig. 4 se obtuvo la pendiente mediante un ajuste de la parte lineal de la curva. Como no se conoce el valor de A, estos valores de la pendiente deben ser calibrados para poder determinar el espesor de las muestras. Para ello, el espesor de varias muestras se midió directamente usando un perfilómetro. Luego se realizó un gráfico de $m/2$ en función de d y la constante A se obtuvo a partir de la pendiente de este gráfico. En el inserto de la Fig. 4 se muestra el ajuste realizado para el cálculo de esta constante, para la cual obtuvimos un valor de $0.012 \pm 0.002 \text{ [eV}^{-1/2} * \text{nm}^{-1}]$. En este cálculo la incertidumbre se obtuvo a partir de la composición cuadrática de dos componentes. La primera se corresponde con el ajuste por mínimos cuadrados en el gráfico de $m/2$ vs d y la segunda con la incertidumbre combinada de m (proveniente del ajuste de la parte lineal de la curva de $(\alpha d)^2$ vs. $\hbar\omega$) y d (tomada como la resolución del perfilómetro).

Luego de obtener la constante A, el valor aproximado del espesor del resto de las muestras se puede calcular de la ecuación (2), sin tener que volver a medir con el perfilómetro. En la Tabla II se muestran los distintos valores de las pendientes y espesores calculados por este método, el valor de la energía del ancho de la banda prohibida, así como las incertidumbres obtenidas para cada caso. En la tabla se aprecia que todas las muestras poseen, aproximadamente, el mismo valor de energía del ancho de la banda prohibida (E_g) y que además este coincide con los valores reportados, por la literatura, para el CdTe. Las incertidumbres relativas de los espesores obtenidos por este método se encuentran dentro del 11 %. Aunque estos valores de incertidumbre son relativamente altos, este procedimiento permite obtener un estimado del espesor de la capa de CdTe, que es un dato importante para la construcción de una celda solar. Es útil usar este método sobre todo si no se tiene un perfilómetro en el laboratorio.

Un aspecto interesante a controlar en la fabricación de la heteroestructura es el espesor de la capa ventana de CdS. Este puede ser determinado mediante el espectro de transmisión antes del crecimiento del CdTe. Resulta interesante conocer su valor después del crecimiento de CdTe pues los procesos de evaporación durante el crecimiento del CdTe y de interdifusión entre ambos materiales pueden afectar el espesor de la capa de CdS.

Como en la interfaz de la capa de CdS y el vidrio los índices de refracción cumplen la relación $n_{\text{vidrio}} < n_{\text{CdS}}$, entonces la condición de máximo que se obtiene es: $2nd = m\lambda$.

Si hacemos incidir el haz de luz por la cara contraria al CdTe (o sea, desde el vidrio), entonces la fracción de luz que se reflejará contendrá la información acerca del espesor de la capa de CdS luego del crecimiento del CdTe y del tratamiento térmico en CdCl₂. Como los índices de refracción cumplen la siguiente relación $n_{\text{vidrio}} < n_{\text{CdS}} < n_{\text{CdTe}}$, la condición de máximo es la misma que en la transmisión para el CdS sobre vidrio.

Tabla I. Características de las muestras de CdTe crecidas sobre CdS a partir de los espectros de transmisión

	m	Espesor (μm)	E _g (eV)
A	587 ± 60	2,0 ± 0,4	1.48 ± 0.21
B	1125 ± 57	2,8 ± 0,5	1.49 ± 0.11
C	1273 ± 12	2,9 ± 0,5	1.48 ± 0.19

En la Fig. 5 se pueden apreciar claramente un máximo y un mínimo en cada curva. Están ligeramente desplazados de una curva a la otra. El máximo en la curva de reflectancia que se encuentra alrededor del 400 nm corresponde con el punto crítico E1 del CdTe y la pequeña ondulación en la misma curva cerca de 520 nm con el ancho de la banda prohibida del CdS. Obsérvese que esta ondulación coincide aproximadamente con el comienzo de la caída abrupta de la transmisión en el espectro de transmisión. Como la condición de máximo es la misma para ambos casos, suponiendo que el índice de refracción no varía considerablemente y que ambos máximos son del mismo orden; entonces podemos plantear la siguiente relación entre las longitudes de ondas correspondientes a estos máximos en los espectros de transmisión, $\lambda(\text{trans})$ y de reflectancia, $\lambda(\text{ref})$ y los espesores antes (d_{antes}) y después ($d_{\text{después}}$) del crecimiento de la capa de CdTe:

$$\frac{\lambda_{\text{máx(trans)}}}{\lambda_{\text{máx(ref)}}} = \frac{d_{\text{antes}}}{d_{\text{después}}} = 1.06$$

Esto confirma una pequeña aunque prácticamente despreciable disminución del espesor de la capa de CdS debida al proceso posterior a su preparación.

DIFRACCIÓN DE RAYOS- X

Las características estructurales de las muestras de CdS/CdTe fueron estudiadas por medio de la difracción de R-x. Los difractogramas fueron realizados en un Difractómetro de polvos Siemens D500 en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Autónoma de Madrid. En la Fig. 6 se puede apreciar un difractograma típico de una estructura con tratamiento térmico de CdCl₂ de 8 min a 400 °C en la configuración $\theta-2\theta$. Se pueden observar los picos provenientes de las tres capas presentes: ITO, CdS y CdTe. No se observó ningún otro pico adicional que pueda ser debido a alguna fase espúrea. Empleando el método de Scherrer se determinó el tamaño de las

crystalitas tanto para el CdS como para el CdTe. Los resultados son mostrados en la tabla II. No hubo diferencias apreciables para diferentes muestras con este mismo tratamiento.

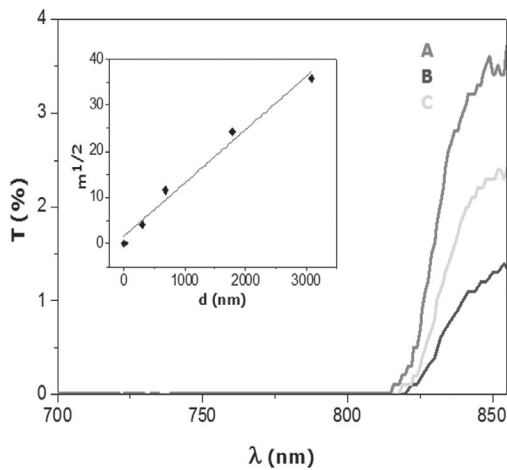


Figura 4: Espectros de transmisión de estructuras de CdS/CdTe con diferentes espesores del CdTe

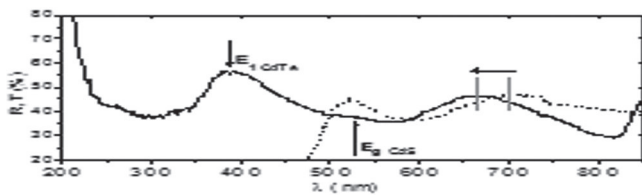


Figura 5: Espectro de transmisión de una muestra de CdS y de reflectancia de la misma muestra haciendo incidir la luz desde el vidrio. Se aprecia un pequeño corrimiento de los máximos y mínimos hacia longitudes de ondas menores luego del crecimiento del CdTe.

Tabla II. Tamaño de cristalita calculado para los diferentes picos en cada caso y los valores promedios obtenidos

Material	Pico	Cristalita (nm)	Cristalita promedio (nm)
CdTe	111	60.02	55.40
	220	52.94	
	311	53.24	
	400	47.19	
	331	54.72	
	422	53.14	
	333	64.46	
	440	53.69	
	531	59.21	
CdS	002	22.69	24.29
	020	25.89	

EFFECTO FOTOVOLTAICO

Para verificar la existencia de efecto fotovoltaico en muestras con CdTe crecido por sublimación isotérmica a corta distan-

cia se prepararon celdas fotovoltaicas usando películas de CdS/ITO/vidrio obtenidas en el departamento de Química- Física de la Universidad de Barcelona obtenidas según ref. [4]. Sobre el CdTe se depositaron contactos de Cu (2 nm) y seguidamente de Ag (200 nm) a través de máscaras de unos 2 mm² por evaporación. Esto fue realizado en la Escuela Superior de Física Matemática del Instituto Politécnico Nacional de México donde también fueron medidas las curvas I-V oscuras e iluminadas de algunas muestras. Otras mediciones de los parámetros fotovoltaicos fueron realizadas en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la Universidad Nacional Autónoma de México.

La Fig. 7 muestra las curvas I-V de una estructura. Como se observa las estructuras produjeron efecto fotovoltaico apreciable, aunque lejos de los mejores valores obtenidos en celdas de este tipo. Los principales parámetros obtenidos de estas curvas fueron:

Corriente de Corto Circuito: $I_{sc} \approx 0.153 \text{ mA}$.
 Voltaje a circuito abierto: $V_{oc} \approx 0.420 \text{ volts}$
 Resistencia característica: $R_{CH} \approx 2748.7 \Omega$
 Corriente generada por la Luz: $I_l \approx 0.196 \text{ mA}$
 Factor de llenado: $FF \approx 31\%$

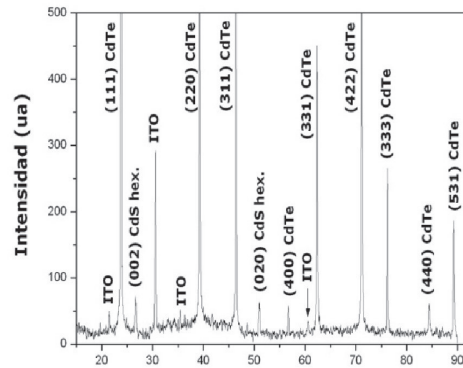


Fig. 6: Difractograma de una estructura de CdS/CdTe

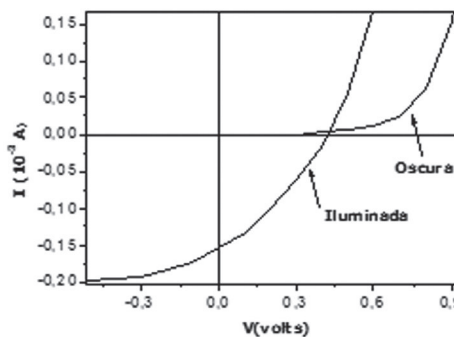


Fig. 7: Curvas IV oscuras e iluminada de una celda solar construida con las estructuras analizadas en este trabajo

CONCLUSIONES

Se obtuvieron heteroestructuras de CdS/CdTe y se fabricaron celdas solares a partir de ellas. La capa de CdTe y también el tratamiento térmico en CdCl₂ fueron realizados usando la sublimación isotérmica a corta distancia, lo cual simplifica de alguna manera el proceso de fabricación de las celdas. Resulta

tados preliminares indican la obtención de efecto fotovoltaico apreciable en las celdas fabricadas de este modo.

AGRADECIMIENTOS

O. de M. agradece la financiación del Programa de intercambio, formación y capacitación de recursos humanos latinoamericanos del Instituto de Ciencia y Tecnología del Distrito Federal (ICyTDF) en colaboración con el Centro Latinoamericano de Física (CLAF).

[1] Arturo Morales-Acevedo, *Solar Energy Mat. & Solar Cells* 90, 2213-2220 (2006)

[2] E. Larramendi, E. Purón, L. C. Hernández, M. Sánchez, S. De Roux, O. de Melo, G. Romero- Paredes, R. Peña- Sierra, M. Tamura, *J. Crystal Growth* 223 (2001) 447

[3] A. Romeo et al., *Proceedings of the 2nd World Conference and Exhibition on Photovoltaic Solar Energy Conversion*, 6-10 July 1997, Vienna, Austria

[4] O. Calzadilla, E. Hernández, E. M. Larramendi, F. Caballero-Briones, M. Zapata-Torres, M. Meléndez-Lira, A. Zapata-Navarro, *Physica Status Solidi (b)* 242 (2005) 1993