

## Celdas solares de heterounión de CdS/CdTe. Parte 2. Celdas solares procesadas por las técnicas de erosión catódica magneto-planar y GREG

M. Tufiño Velázquez<sup>1,\*</sup>, G. Contreras Puente<sup>2,\*</sup>, M.L. Albor Aguilera<sup>3</sup> y M.A. González Trujillo<sup>4</sup>

*Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional*

*U.P. A. López Mateos, Edif. 9, 07738 México, D.F., Mexico*

*e-mail: <sup>1</sup>mtufino@esfm.ipn.mx; <sup>2</sup>gerardo@esfm.ipn.mx; <sup>3</sup>mlaa@esfm.ipn.mx; <sup>4</sup>magt@esfm.ipn.mx*

A.D. Compaan

*Department of Physics and Astronomy and Center for Materials Science and Engineering, The University of Toledo, Toledo, Ohio 43606, U.S.A.*

*e-mail: office@physics.utoledo.edu*

Recibido el 25 de agosto de 1997; aceptado el 20 de octubre de 1998

Se presenta el procesamiento y caracterización de celdas solares de película delgada de CdS/CdTe depositando CdS por erosión catódica magneto-planar de rf y CdTe por la técnica de crecimiento y recristalización a través de un gradiente, GREG. Se depositó CdS sobre substratos de vidrio conductor LOF<sup>TM</sup> de soda-lima, después CdTe sobre CdS y se evaporaron contactos metálicos de Cu-Au sobre CdTe. Las condiciones de depósito de las películas fueron: para CdS se utilizó una potencia rf de 25 W a una presión de Ar de 18 mtorr y una temperatura de substrato  $T_S$  de 380°C, para CdTe se usó una temperatura de fuente  $T_f$  de 570°C a 650°C y  $T_S$  de 460°C a 480°C bajo una presión de Ar de 500 mtorr. Las películas de CdS y CdTe resultaron policristalinas con orientación preferencial en la dirección (002) para CdS y en la (111) para CdTe; el tamaño de grano fue de 0.1  $\mu\text{m}$  para CdS y 0.5-2  $\mu\text{m}$  para CdTe. Se determinaron los parámetros fotovoltaicos obteniendo valores para las mejores celdas solares de  $V_{OC} = 0.74$  V,  $I_{SC} = 2.3$  mA,  $ff = 55\%$ ,  $SQE_{\text{max}} = 0.7$  electr./fotón a 600 nm y una eficiencia de conversión de energía solar del 8%.

*Descriptores:* Celdas solares; técnica de erosión catódica magneto-planar; técnica GREG

We present the processing and characterization of CdS/CdTe thin film solar cells depositing CdS by rf planar-magnetron sputtering and CdTe by the gradient recrystallization and growth, GREG technique. CdS was deposited on soda-lime LOF<sup>TM</sup> conducting glass substrates, then CdTe on CdS and Cu-Au contacts evaporated on the CdTe film. The films deposition parameters were: for CdS a 25 W rf power was used at 18 mtorr of Ar pressure and a substrate temperature  $T_S$  of 380°C, while for CdTe a source temperature  $T_f$  between 570°C and 650°C and  $T_S$  from 460°C to 480°C were used under a 500 mtorr Ar pressure. CdS and CdTe films were polycrystalline showing preferential orientation in the (002) direction for CdS and in the (111) direction for CdTe; grain size was 0.1  $\mu\text{m}$  for CdS and 0.5-2  $\mu\text{m}$  for CdTe. The photovoltaic parameters were determined yielding the best solar cell performance values of  $V_{OC} = 0.74$  V,  $I_{SC} = 2.3$  mA,  $ff = 55\%$ ,  $SQE_{\text{max}} = 0.7$  electrons/photon at 600 nm and 8% solar energy conversion efficiency.

*Keywords:* solar cells; planar-magnetron sputtering technique; GREG technique

PACS: 84.60.Jt; 73.61.-r

### 1. Introducción

La fabricación de celdas solares de película delgada (CSPD) con eficiencias de conversión altas es una de las formas más utilizadas para reducir costos de producción de electricidad usando dispositivos fotovoltaicos. De entre los materiales que han sido utilizados para desarrollar celdas solares eficientes, el CdTe ha mostrado la ventaja de ser el material que ha sido procesado con mayor facilidad por más de una docena de técnicas de depósito, obteniendo en todos los casos celdas solares con eficiencias superiores al 10% [1], por lo cual se considera el más viable para el procesamiento masivo de módulos fotovoltaicos y la producción en gran escala de energía eléctrica. De acuerdo a lo anterior, un aspecto fundamental a resolver será la selección de la técnica más apropiada

para llevar a cabo esta actividad con costos de producción que sean competitivos con los de producción de electricidad por métodos convencionales.

La técnica de erosión catódica magneto-planar de radio frecuencia (RF-PMS: *Radio-Frequency Planar Magnetron Sputtering*) [2], es una técnica muy promisoría que presenta ciertas ventajas tales como bajo costo, alta confiabilidad, excelente control del espesor y la posibilidad de usar bajas temperaturas de substrato para la fabricación de CSPD de CdTe; además, es una técnica competitiva que puede ser usada a nivel industrial para la fabricación masiva de CSPD [2]. En la actualidad, el grupo de investigación en dispositivos fotovoltaicos de la Universidad de Toledo, en Ohio, Estados Unidos, tiene el récord de la eficiencia de conversión más alta alcanzada del 11.6% [3], para heterouniones de CdS/CdTe

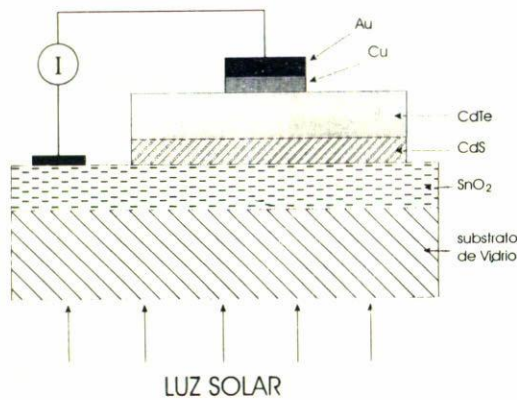


FIGURA 1. Esquema que muestra la estructura típica de una celda solar de película delgada desarrollada y procesada en este trabajo.

procesadas en su totalidad por esta técnica. Estos resultados son muy alentadores en comparación con los reportados para la eficiencia más alta alcanzada en el presente para el sistema CdS/CdTe del 15.8%, la cual fue obtenida por C. Ferekides y colaboradores de la Universidad del Sur de Florida [4]. En dicho trabajo el CdS fue procesado por depósito en baño químico (CBD: *Chemical Bath Deposition*) y el CdTe por sublimación en espaciado cercano (CSS: *close-spaced sublimation*), que es otra forma de denominar a la técnica CSVT.

En este trabajo se presenta el desarrollo de celdas solares de película delgada (CSPD) de heterounión de CdS/CdTe, en las cuales las películas de CdS fueron depositadas por erosión catódica magneto-planar de radio-frecuencia, RF-PMS [2] y las películas de CdTe por la técnica de transporte de vapor en espaciado cercano a través de pared caliente (HW-CSVT: *Hot-Wall Close-Spaced Vapor Transport*), denominada también de crecimiento y recrystalización por un gradiente (GREG: *Gradient Recrystallization and Growth*) [5]. En los laboratorios de la ESFM-IPN hemos instrumentado un sistema de crecimiento de películas delgadas por la técnica GREG [6], que es una versión modificada de la técnica CSVT convencional [7], y la cual ofrece la ventaja de ser una técnica sencilla, con velocidades de depósito de varias micras por minuto y adecuada para el depósito de películas semiconductoras sobre una gran variedad de sustratos de bajo costo como portamuestras de vidrio pyrex, vidrios de soda-lima, cerámicas, etc. Estas características y la simplicidad en el diseño del sistema de depósito, facilita su escalabilidad para la fabricación industrial de módulos fotovoltaicos.

En el artículo previo de esta serie (Parte 1), se reportaron CSPD de CdS/CdTe procesadas en su totalidad por la técnica GREG para las que se alcanzaron eficiencias de conversión del 8%, al igual que las presentadas en este trabajo. La caracterización de las películas de CdS y CdTe se realizó por difracción de rayos X, microscopía de fuerza atómica, absorción óptica y fotoluminiscencia. Para las CSPD se determinaron parámetros fotovoltaicos como voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ , corriente de corto circuito  $I_{SC}$ , factor de llenado  $ff$  y eficiencia de conversión, así como las características  $I$  vs.  $V$  y eficiencia cuántica espectral (SQE) de las CS procesadas.

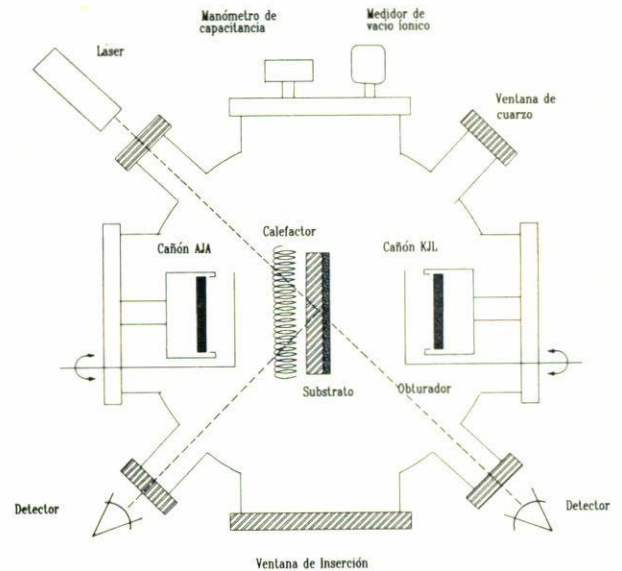


FIGURA 2. Esquema que muestra la vista superior del sistema de crecimiento de películas delgadas por la técnica de erosión catódica magneto planar de radio frecuencia.

## 2. Desarrollo experimental

### 2.1. Preparación de los sustratos

La estructura de las CSPD estudiadas se muestra en la Fig. 1 y corresponde a la configuración vidrio/SnO<sub>2</sub>:F/CdS/CdTe/Cu-Au. Las celdas fueron procesadas por las técnicas RF-PMS y GREG para el depósito de CdS y CdTe respectivamente. Los sustratos empleados consistieron en vidrios de soda-lima comerciales marca LOF (Libbey-Owens-Ford), los cuales fueron limpiados previamente al depósito de las CS en una solución jabonosa, en la cual se utilizó un detergente de baja alcalinidad y posteriormente se enjuagaron con agua deionizada dentro de un baño ultrasónico, para eliminar cualquier rastro de grasa o impureza sobre su superficie.

### 2.2. Depósito de películas delgadas por la técnica de erosión catódica (RF-PMS)

Las películas de CdS fueron depositadas por la técnica RF-PMS, proceso que se llevó a cabo en la Universidad de Toledo de los Estados Unidos y las cuales fueron proporcionadas para el depósito de las películas de CdTe por la técnica GREG. Un diagrama esquemático de la vista superior del sistema RF-PMS se muestra en la Fig. 2, en el cual se aprecian las principales componentes del sistema dentro de la cámara de evaporación. El proceso de depósito se lleva a cabo en una atmósfera de Argón a una presión constante con valores entre 3 y 50 mtorr. El sistema utiliza un generador de 13.56 MHz y un monitor de potencia de un sistema CVD de plasma. Una descripción más detallada del sistema RF-PMS se da en la Ref. 2.

### 2.3. Crecimiento de películas delgadas por la técnica GREG

El sistema GREG, que utiliza una variante de la técnica CSVT [7], está constituido básicamente de un bloque calefactor para el sustrato, un bloque calefactor para la fuente y una cámara de paredes calientes consistente en una chalupa-crisol, contenidas dentro de una cámara de evaporación. La descripción del sistema GREG y del procedimiento para el depósito de las películas semiconductoras se describe en forma detallada en las Refs. 5 y 6.

Para el procesamiento de las CSPD se utilizó CdTe Mca. Balzers con 99.99% de pureza y CdS Mca. Aldrich con 99.999% de pureza. Las películas de CdTe crecen tipo-*p* y las de CdS tipo-*n* en forma policristalina con orientación cristalina preferencial sobre su superficie. Las condiciones de depósito fueron las siguientes: para CdS se utilizó una potencia rf de 25 W, a una presión de Argón de 18 mtorr y una temperatura de sustrato de 380°C. Para CdTe se utilizaron temperaturas de fuente  $T_f$  entre 570°C y 650°C y temperaturas de sustrato  $T_s$  de 460°C a 480°C, efectuándose el depósito a una presión de Ar de 500 mtorr.

### 2.4. Depósito y procesamiento de las celdas solares

Se depositan las películas de CdS por la técnica RF-PMS sobre el sustrato de vidrio conductor previamente limpiado y posteriormente las de CdTe por la técnica CSVT-pared caliente (GREG). La técnica y los parámetros de depósito de las películas se describirán en las siguientes secciones de este trabajo. El espesor de las películas se determinó efectuando medidas de transmisión óptica y empleando los coeficientes de absorción apropiados para ambos materiales. Sobre la estructura de CdS/CdTe se depositó una película delgada de cloruro de cadmio, CdCl<sub>2</sub>, por ablación láser o por inmersión en una solución de metanol sobresaturada con CdCl<sub>2</sub> con espesores típicos de 0.2 a 0.4 μm.

La estructura obtenida es sometida a un tratamiento térmico de 385°C durante 20 minutos y posteriormente enjuagada en agua deionizada durante 8 minutos, con la finalidad de remover la capa remanente y los restos de CdCl<sub>2</sub>. Los contactos metálicos son depositados por la evaporación de Cu al vacío, con un espesor promedio de 50 Å, seguido de la evaporación de Au, con un espesor de 200 Å. La forma de los contactos fueron círculos de 3 mm de diámetro. Finalmente se hornearon las estructuras obtenidas a una temperatura de 150°C durante 30 minutos con el objeto de lograr que se difunda el Cu en el CdTe para alcanzar un buen contacto óhmico. De esta forma, fueron procesadas un total de 96 celdas solares, de las cuales las más importantes se enlistan en la Tabla I.

### 2.5. Caracterización de las películas semiconductoras

Las películas delgadas de CdS y CdTe se caracterizaron por diversas técnicas con el propósito de determinar su calidad cristalina y para correlacionar sus propiedades tales como es-

TABLA I. Parámetros fotovoltaicos de trabajo de las CS de CdS/CdTe. La película de CdS fue depositada por la técnica RF-PMS y la de CdTe por la técnica GREG.

CSPD CdS/CdTe	$V_{OC}$ (V)	$I_{SC}$ (mA)	$ff\%$	$\eta\%$	f. calidad <i>n</i>
PMS07	0.693	2.344	53.71	7.92	8.13
PMS08	0.739	2.173	50.02	7.10	7.55
PMS03	0.674	2.100	54.38	6.82	6.23
PMS11	0.621	2.051	47.39	5.34	12.09

tructura cristalina, espesor, tamaño de grano, etc. con las características mostradas por las CS fabricadas con estas películas. Las técnicas empleadas fueron difracción de rayos X (DRX), fotoluminiscencia (FL), microscopía de fuerza atómica (MFA) y absorción óptica (AO).

La caracterización mediante DRX se efectuó con un difractómetro marca Siemens Mod. Kristalloflex 500 conectado a una PC a través de una interfase mediante un sistema DACO para automatizar y archivar en memoria la toma de espectros. Las componentes del sistema de fotoluminiscencia son: fuente luminosa de excitación de alta intensidad consistente en un láser de Argón marca Spectra Physics Mod. 2025, el espectrómetro es un doble monocromador marca SPEX Mod. 1403 y el detector de luz un tubo fotomultiplicador marca RCA Mod. C31034. El equipo empleado para analizar las muestras por MFA es un microscopio de fuerza atómica marca Park Scientific Instruments Mod. AutoProbe. Finalmente las mediciones de AO se efectuaron con un espectrofotómetro marca Beckman Mod. DK-2A.

### 2.6. Caracterización de las celdas solares

Se determinaron las características corriente vs. voltaje ( $I$  vs.  $V$ ) de las CS procesadas, bajo iluminación y en polarización directa o positiva conectando el material tipo-*p*, que en este caso corresponde al CdTe, a la terminal positiva de la fuente de voltaje. Como fuente de iluminación se utilizó una lámpara de tungsteno halógena, la cual fue ajustada para que la irradiancia que emitiera sobre la CS a ser caracterizada fuese de aproximadamente 100 mW/cm<sup>2</sup> correspondiente a la condición atmosférica global AM1.5 (air-mass 1.5). Las características  $I$  vs.  $V$  de las CSPD se obtuvieron variando el voltaje aplicado con la fuente y midiendo la corriente generada en la CS iluminada.

Para determinar la cantidad de portadores fotogenerados por fotón incidente por unidad de área y tiempo se usó la técnica de eficiencia cuántica espectral (SQE: spectral quantum efficiency). El sistema de medición utilizó como fuente de luz una lámpara de Xe de 200 W, un modulador de luz (chopper) y como elemento dispersor un monocromador; el haz proveniente del monocromador se enfocaba sobre la CS.

Se utilizó un amplificador tipo lock-in, sincronizado al modulador de luz, para medir la señal generada proveniente de la CS.

### 3. Resultados

#### 3.1. Caracterización de las películas delgadas de CdS y CdTe

Las películas de CdS depositadas por la técnica RF-PMS tienen un aspecto granular vistas directamente al microscopio; son bastante uniformes en espesor y están libres de "poros" sobre su superficie. El análisis de DRX revela que se obtienen películas policristalinas con orientación cristalina preferencial sobre su superficie; su estructura cristalina corresponde a la fase hexagonal de la estructura tipo wurtzita con orientación cristalina preferencial en la dirección (002) [8, 9]. Por su parte, las películas de CdTe depositadas por la técnica GREG también se obtuvieron uniformes y policristalinas con estructura correspondiente a la fase cúbica de la estructura tipo zincblenda con orientación preferencial en la dirección (111) [10, 11]. Los resultados de las mediciones de fotoluminiscencia de las películas de CdTe indican y reafirman la obtención de películas de muy buena calidad cristalina. Se hicieron mediciones a 300 K para las películas de CdTe y aparece una señal característica de fotoluminiscencia para CdTe a pesar de haber sido medida sin haber hecho ningún tratamiento previo a la superficie de las películas. Para verificar estos resultados, se midió la señal a una temperatura de 10 K, la cual reveló la presencia de transiciones radiativas asociadas a excitones ligados y sus correspondientes réplicas fonónicas de CdTe [12].

El análisis por microscopía de fuerza atómica (MFA) nos permitió analizar la topografía de la superficie de las películas de CdS y CdTe. Como se mencionó, el aspecto de las películas es granular con tamaños de grano del orden de  $0.1 \mu\text{m}$  y espesores de  $0.3 \mu\text{m}$  para CdS; para CdTe el tamaño de grano de las películas fue de  $0.5\text{--}2 \mu\text{m}$  con espesores de  $2$  a  $8 \mu\text{m}$ . El espesor se obtuvo de la siguiente forma: para CdS se empleó la línea  $4579 \text{ \AA}$  de un láser de Ar a baja intensidad (1 mW), se midió la intensidad de la radiación incidente  $I_0$  y transmitida  $I$  a incidencia normal, y empleando un coeficiente de absorción de  $\alpha = 7.5 \mu\text{m}^{-1}$  para CdS a esta longitud de onda, se determinó el espesor  $d$  a partir de la relación  $I = I_0 \exp(-\alpha d)$ . Para CdTe se procedió de manera similar empleando un láser de He-Ne de baja intensidad (1 mW), cuya línea es de  $6328 \text{ \AA}$ , y usando un coeficiente de absorción de  $\alpha = 4.53 \mu\text{m}^{-1}$  para CdTe a esta longitud de onda.

Finalmente, se obtuvieron los espectros de absorción óptica a temperatura ambiente de las películas de CdS y CdTe, los cuales revelan que las películas de ambos materiales son transparentes hasta el borde de absorción, ubicado para CdTe en  $827 \text{ nm}$  o  $1.5 \text{ eV}$  y para CdS en  $512 \text{ nm}$  o  $2.42 \text{ eV}$ , que corresponden al valor de la banda prohibida  $E_g$  de cada material. Esto reafirma la obtención de películas de buena ca-

TABLA II. Parámetros de crecimiento de las películas delgadas de CdS, las cuales fueron depositadas por la técnica RF-PMS. Para todas las películas se matuvieron fijas:  $P_{RF} = 25 \text{ W}$ ,  $T_S = 380^\circ\text{C}$   $P(\text{Ar}) = 18 \text{ mtorr}$ .

CdS	$P_c(\text{W})$	$\Delta t(\text{min})$	$t_{gr} (\mu\text{m})$	$d (\mu\text{m})$
PMS03	60	21'19"	1.0	0.3
PMS07-PMS08	80	23'14"	1.0	0.3
PMS11	100	27'	1.0	0.3

lidad óptica y estructural, casi libres de defectos. Se puede decir que en el volumen de las películas existe una proporción mucho mayor de material cristalino de buena calidad respecto de la proporción de material con abundancia de defectos, los cuales son debidos principalmente a material intergrano [13].

#### 3.2. Caracterización de las celdas solares

##### 3.2.1. Parámetros fotovoltáicos de las CSPD

La Tabla I muestra los valores obtenidos de los parámetros fotovoltáicos de las CS procesadas de CdS/CdTe. Se indican los valores de las siguientes cantidades: voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ , corriente de corto-circuito  $I_{SC}$ , factor de llenado  $ff$  y eficiencia de conversión  $\eta$ . También se indica el valor del factor de calidad de cada CS, el cual se obtuvo efectuando los ajustes correspondientes de las características  $I$  vs.  $V$  a la ecuación del diodo.

Con el propósito de correlacionar el funcionamiento de las CS con las características de las PD de CdS y CdTe, en las Tablas II y III se muestran los valores de los parámetros de crecimiento de las películas de CdS y CdTe respectivamente. Las películas de CdS se depositaron por la técnica RF-PMS manteniendo fijos los parámetros de crecimiento, a excepción de la potencia del calentador  $P_C$  y el tiempo de depósito  $\Delta t$ ; se indican además el tamaño de grano  $t_{gr}$  y el espesor  $d$  con que se obtuvieron. Los parámetros que se mantuvieron fijos fueron: la potencia de radio-frecuencia  $P_{RF} = 25 \text{ W}$ , la temperatura del sustrato  $T_S = 380^\circ\text{C}$  y la presión de la atmósfera inerte en la cámara de evaporación  $P(\text{Ar}) = 18 \text{ mtorr}$ .

En la Tabla III se muestran los valores de los parámetros de crecimiento de las películas de CdTe para las CSPD. Se indican los valores de la temperatura de la fuente  $T_f$ , la temperatura de sustrato  $T_S$ , la presión del gas  $P(\text{Ar})$  en la cámara de evaporación, el tiempo de crecimiento  $\Delta t$ , así como el tamaño de grano  $t_{gr}$  y el espesor  $d$  con que se obtuvieron las películas. El valor de los parámetros de crecimiento de las películas de CdTe se fue cambiando con el propósito de ir mejorando las características de las CS procesadas, hasta que se logró optimizar el proceso de depósito para obtener las CS de máxima eficiencia. No sólo se modificaron las temperaturas de fuente, sustrato y la presión de la atmósfera inerte, sino también el tiempo de depósito para obtener las películas con el espesor adecuado.

TABLA III. Parámetros de crecimiento de las películas de CdTe, depositadas por la técnica GREG.

CdTe	$T_f$ (°C)	$T_S$ (°C)	$P_{(Ar)}$ (mtorr)	$\Delta t$ (min)	$t_{gr}$ ( $\mu\text{m}$ )	$d$ ( $\mu\text{m}$ )
PMS07-PMS03	650	480	500	1	0.5	4
PMS08-PMS11	650	480	500	2	0.5	8

Las Tablas II y III muestran que las mejores CS fueron aquellas en las que las películas de CdTe fueron depositadas con los tiempos más cortos, resultando así con los espesores más pequeños. De esta forma, el espesor se hizo comparable con la longitud de difusión de portadores minoritarios, gracias a lo cual éstos pueden alcanzar el contacto metálico. Se debe tener en cuenta que cuanto menor es el espesor de las películas éstas serán menos resistivas, contribuyendo a que la resistencia en serie de las CS sea menor; además, la interdifusión de especies atómicas jugará un papel más importante y contribuirá a mejorar las características de las celdas. Así, el funcionamiento de las CSPD fue determinado principalmente por el espesor de las películas de CdTe, el cual quedó definido por el tiempo de crecimiento y por la presión de Ar en la cámara de evaporación. Como en este caso no cambió el espesor de las películas de CdS no obtuvimos conclusiones sobre este aspecto; sin embargo, es bien conocido que el espesor de las películas de CdS juega un papel decisivo en el comportamiento de las CS. Para espesores mayores de 1  $\mu\text{m}$  la colección de portadores se hace un proceso muy ineficiente, y por consiguiente, la calidad de la celda es mala.

La Fig. 3 muestra una curva  $I$  vs.  $V$  típica de las CS procesadas en este trabajo, en la cual se observan los rasgos característicos de la curva del diodo. En la subida de la curva se observa una leve desviación del comportamiento tipo diodo ideal, la cual tiene su origen debido a la formación de un contacto bloqueante entre la película de CdTe y el contacto metálico. Esto es causado por la aparición de una capa de óxido entre la película y el contacto, la cual provoca el surgimiento de una barrera de potencial entre ambos [14]. También se considera que este efecto pudiera deberse o acentuarse más debido a que las películas de CdTe resultaron gruesas. Cualquiera que sea la causa final, ésta provoca que se incremente la resistencia en serie de la CS. Otro factor que contribuye a incrementar más la resistencia en serie de la CS puede deberse al hecho de que el grado de interdifusión de especies atómicas entre las películas de CdS y CdTe no haya sido lo suficientemente bueno, por lo cual no se tendría un buen ajuste gradual en la unión entre los bordes de las bandas prohibidas de ambos compuestos.

La curva de eficiencia cuántica espectral (SQE) típica para las CS procesadas se muestra en la Fig. 4 y en ella se observa una subida muy abrupta que se inicia a una longitud de onda de aproximadamente 855 nm, la cual corresponde al valor de la energía de la banda prohibida para CdTe (1.45 eV) a temperatura ambiente. El hecho de que el valor de la SQE

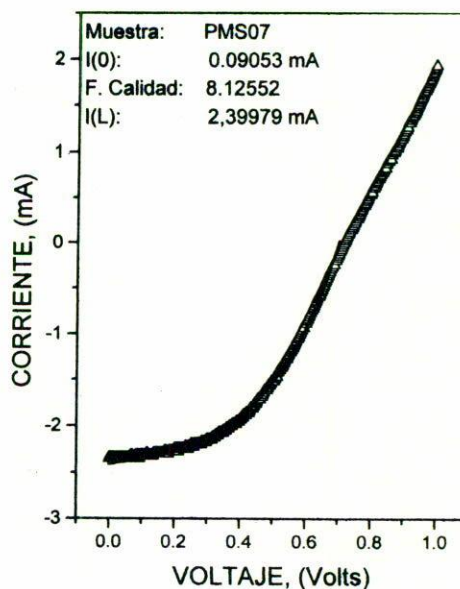


FIGURA 3. Características corriente-voltaje típicas de las CSPD desarrolladas en este trabajo. La curva mostrada corresponde a la celda solar PMS07.

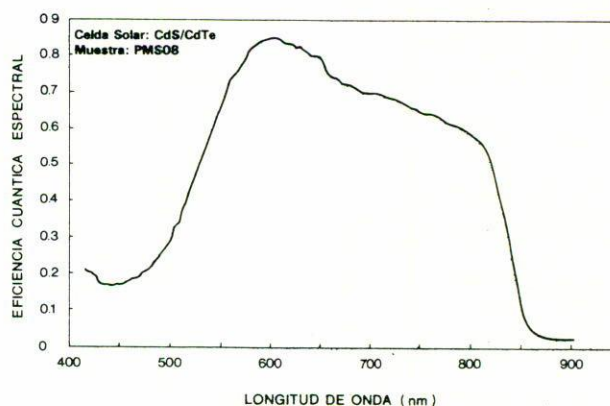


FIGURA 4. Curva típica de la eficiencia cuántica espectral para las CSPD desarrolladas en este trabajo. La curva mostrada corresponde a la celda solar PMS08.

sea cero para longitudes de onda mayores de 830 nm y tenga una subida abrupta a partir de la misma hacia longitudes de onda menores, refleja la alta calidad cristalina de la película de CdTe depositada por la técnica GREG. Las curvas tienen un valor máximo  $SQE_{max}$  a una longitud de onda de  $\sim 600$  nm, región donde el compuesto ternario  $CdS_xTe_{1-x}$  tiene su energía de banda prohibida, y a partir de este valor se observa una disminución suave o gradual que termina aproximadamente en 450 nm. Este comportamiento indica que la película de CdS es lo suficientemente delgada para que la luz la atraviese, permitiendo la generación de pares electrón-hueco en esta región. Por otra parte, en comparación con las curvas de SQE para CS procesadas en su totalidad por la técnica GREG, reportadas en la Parte 1 de esta serie, la calidad cristalina de las películas de CdS depositadas por la técnica GREG resultó ser mejor que las de películas depo-

sitadas por RF-PMS, ya que para energías de fotón mayores al valor correspondiente de energía de la banda prohibida de CdS ya no se observa fotogeneración de portadores de carga, debido a que la luz que incide sobre la CS a través de la película de CdS es absorbida en su totalidad por ésta y no permite su transmisión hacia la unión para la fotogeneración de pares electrón-hueco.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se obtuvieron CSPD de CdS/CdTe con eficiencias de conversión del 8% cuyas características principales son las siguientes: las películas de CdS y en particular las de CdTe se obtuvieron con calidad cristalina y óptica excelentes, como lo muestran los resultados obtenidos por difracción de rayos X, fotoluminiscencia, absorción óptica y microscopía de fuerza atómica. Debido a las grandes razones de crecimiento que se tienen con la técnica GREG, el espesor de las películas de CdTe fue más grande de lo deseado, a pesar de lo cual la excelente calidad cristalina de las películas de CdTe permitieron la obtención de CSPD con eficiencias de conversión aceptables. La desviación del comportamiento tipo diodo de las curvas  $I$  vs.  $V$  para las CS procesadas se atribuye principalmente a la formación de una barrera de potencial entre la película de CdTe y el contacto metálico, por la

aparición de una capa de óxido entre ambos; el efecto debido al espesor excesivo de las películas de CdTe, el cual produce un aumento en la resistencia en serie de las CS, también contribuye parcialmente a este comportamiento.

Las CSPD con los mejores parámetros fotovoltaicos fueron aquellas que se obtuvieron con el espesor más pequeño para CdTe, lo cual se debe a que con las películas más delgadas se tienen CS con resistencias en serie más bajas. Por consiguiente, para mejorar las características de las CS uno de los factores críticos que debe controlarse es el espesor de las películas de CdTe, para ello se deberán buscar las condiciones óptimas de depósito para obtener películas con el espesor adecuado. También será necesario continuar en la búsqueda del procesamiento más adecuado para las CSPD: tratamiento de CdS antes de depositar CdTe, control del grado de interdifusión de especies atómicas a través de la interfaz, tratamiento con CdCl<sub>2</sub>, exploración de materiales para la obtención de mejores contactos óhmicos, etc. Una de las etapas más críticas es la de tratamientos térmicos posteriores a la obtención de la CS, donde el manejo de los diagramas de fase de los distintos compuestos con respecto a la temperatura juega un papel muy importante. En el futuro inmediato se continuará trabajando en estos aspectos, por lo que de lograrse un incremento en la eficiencia de conversión de nuestros dispositivos, será motivo de un reporte subsecuente.

\* Becario COFAA-Instituto Politécnico Nacional

1. K. Zweibel, Report for *Progress in Photovoltaics* (April 1995); NREL/TP-413-7486 (DE95004084).
2. M. Shao, Ph. D. Thesis, The University Of Toledo (1995).
3. M. Shao *et al.* *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 3045.
4. C. Ferekides, J. Britt, Y. Ma, and L. Killian, *Proc. 23rd IEEE PV Spec. Conf.* (1993) 389; J. Britt and C. Ferekides, *Appl. Phys. Lett.* **62** (1993) 2851.
5. C. Menezes, C. Fortmann, and S. Casey, *J. Electrochem Soc.* **132** (1985) 706.
6. M.L. Albor Aguilera y M.A. González Trujillo, Tesis Profesional, E.S.F.M.-I.P.N., México (1995).
7. F.H. Nicoll, *J. Electrochem. Soc.* **110** (1963) 1165.
8. Landolt-Börnstein, *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology*, New Series, edited by O. Madelung, (Springer-Verlag, 1987).
9. *Tablas ASTM de Rayos X para CdS en polvo* 6-0314.
10. M. Aven and J.S. Prener, *Physics and Chemistry of II-VI Compounds*, (North-Holland, 1967).
11. K. Zanio, in *Semiconductors and Semimetals*, Vol. VII, edited by R.K. Willardson and A.C. Beer, (Academic Press, Inc., 1975).
12. M. Tufiño Velázquez, Tesis Doctoral, E.S.F.M.-I.P.N., México (1997).
13. O. Zelaya Angel, Tesis Doctoral, CINVESTAV-I.P.N., México (1985).
14. V.P. Singh, O.M. Erickson, and J.H. Chao, *J. Appl. Phys.* **78** (1995) 4538.