

## Celdas solares de heterounión de CdS/CdTe. Parte I. Celdas solares procesadas por la técnica 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*

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:* adc@physics.utoledo.edu

Recibido el 21 de mayo de 1997; aceptado el 2 de septiembre de 1998

En este trabajo presentamos el procesamiento y caracterización de celdas solares de película delgada de CdS/CdTe, obtenidas por la técnica de crecimiento y recristalización a través de un gradiente, GREG. Las celdas fueron depositadas sobre sustratos de vidrio conductor LOF<sup>TM</sup> de soda-lima y se depositaron contactos metálicos de Cu-Au sobre la película de CdTe. Las condiciones de deposición de las películas fueron: para CdS la temperatura de la fuente  $T_f$  varió entre 750°C y 800°C, y la temperatura del sustrato  $T_s$  entre 480°C y 550°C, mientras que para CdTe  $T_f$  varió entre 570°C y 650°C, y  $T_s$  de 460°C a 480°C; ambas películas fueron depositadas a una presión constante en una atmósfera de Ar. Las películas fueron caracterizadas por difracción de rayos X, microscopía de fuerza atómica, absorción óptica y fotoluminiscencia. Se obtuvieron películas de CdS y CdTe policristalinas con orientación preferencial en la dirección [002] para CdS y en la [111] para CdTe; el tamaño de grano de las películas fue de 0.2–1  $\mu\text{m}$  para CdS y de 0.5–5  $\mu\text{m}$  para CdTe. Se determinaron los parámetros fotoconductorivos de las celdas solares obteniendo valores típicos para las mejores celdas de  $V_{OC} = 0.7$  V,  $J_{SC} = 31$  mA/cm<sup>2</sup>,  $ff = 50\%$ ,  $SQE_{max} = 0.6$  electr./fotón a 550 nm y eficiencia de conversión de energía solar del 8%.

*Descriptor:* Celdas solares; técnica GREG

In this paper we present the processing and characterization of thin film CdS/CdTe solar cells obtained by the gradient recrystallization and growth technique, GREG. The cells were deposited on soda-lime LOF<sup>TM</sup> conducting glass substrates and Cu-Au contacts were evaporated on top of the CdTe film. The films deposition conditions were: for CdS the source temperature  $T_f$  varied between 750°C and 800°C and the substrate temperature  $T_s$  varied between 480°C and 550°C, while for CdTe  $T_f$  varied between 570°C and 650°C and  $T_s$  from 460°C to 480°C; both films were deposited under a constant Ar gas pressure. The films were characterized by X-ray diffraction, atomic force microscopy, optical absorption and photoluminescence. Both CdS and CdTe films were polycrystalline with preferential orientation in the [002] direction for CdS and in the [111] direction for CdTe; the grain size ranges for the films were 0.2–1  $\mu\text{m}$  for CdS and 0.5–5  $\mu\text{m}$  for CdTe. The solar cell photoconductive parameters were determined yielding the best cell performance values of  $V_{OC} = 0.7$  V,  $J_{SC} = 31$  mA/cm<sup>2</sup>,  $ff = 50\%$ ,  $SQE_{max} = 0.6$  electr./photon at 550 nm and 8% solar energy conversion efficiency.

*Keywords:* Solar cells; GREG technique

PACS: 84.60.Jt; 73.61.-r

### 1. Introducción

En este trabajo se presenta el desarrollo y obtención de celdas solares de película delgada (CSPD) consistentes en heterouniones de CdS/CdTe, las cuales alcanzaron eficiencias de conversión del  $\sim 8\%$  y fueron procesadas en su totalidad por la técnica de transporte de vapor en espaciado cercano por pared caliente (HW-CSVT: Hot-wall close-spaced vapor transport), a la cual se ha denominado como crecimiento y recristalización por un gradiente (GREG: gradient recrystallization and growth) [1]. Una de las formas más exploradas para abaratar costos de obtención de celdas solares (CS) con altas eficiencias de conversión es fabricarlas en forma de película delgada. La técnica CSVT convencional [2], también llamada de sublimación en espaciado cercano (CSS: close-

spaced sublimation), ya ha sido utilizada con anterioridad para la obtención de CSPD [3]; sin embargo, la técnica GREG representa una versión mejorada de la misma, pues mediante el uso de una cámara de paredes calientes del mismo material de los bloques calefactores (grafito conductor de alta pureza), se logra un gradiente uniforme de temperaturas desde la fuente hasta el sustrato, lo cual permite la obtención de películas policristalinas de gran calidad con propiedades similares a las de material monocristalino [4]. Con base en lo anterior y a que con la técnica CSVT se han alcanzado a la fecha las eficiencias de conversión más altas para CSPD [5], aunado a que el sistema de crecimiento empleado fue instrumentado en su totalidad en nuestros laboratorios [6], los resultados reportados en este trabajo resultan alentadores y proporcionan un panorama promisorio para el futuro cercano.

El interés de este trabajo surgió por varias razones: 1) las condiciones favorables que tiene México para el aprovechamiento de la energía solar mediante el uso de CSPD; 2) desde principios de esta década se ha reportado sistemáticamente la obtención de CSPD con eficiencias de conversión superiores al 10% fabricadas con diversas técnicas [7]; y 3) con la técnica CSVT, cuya versión mejorada se utiliza en esta investigación, se han procesado a la fecha las CSPD del sistema CdS/CdTe con las eficiencias de conversión más altas. En relación a esto último, en mayo de 1993 fue reportada por C. Ferekides y colaboradores de la Universidad del Sur de Florida la obtención de CSPD de CdS/CdTe con eficiencias de conversión del 15.8% [5], que es en el presente la eficiencia récord más alta alcanzada para heterouniones de este tipo. En dicho trabajo el CdS fue procesado por deposición en baño químico (CBD: chemical bath deposition) y el CdTe por su blimación en espaciado cercano CSS. Por otra parte, en la 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, celebrada en mayo de 1996, el mismo grupo reportó la fabricación del mismo tipo de CSPD, depositando ambas películas por CSVT sobre substratos de vidrio de soda-lima recubiertos con SnO<sub>2</sub>:F, con eficiencias de conversión de 14.2% [8], la cual fue verificada en el NREL (National Renewable Energy Laboratory) de los Estados Unidos. No obstante que ésta no es la eficiencia más alta obtenida para el sistema CdS/CdTe, debido a la simplicidad de la técnica y al bajo costo del substrato, este resultado se considera como uno de los más importantes en la actualidad para aplicaciones terrestres [9], y en particular para las investigaciones futuras que realicemos respecto a este trabajo.

En relación a los resultados reportados en otros materiales como el CuInSe<sub>2</sub> (CIS) y sus aleaciones y el Si policristalino, materiales que han sido utilizados primordialmente porque tienen valores de banda prohibida ideales para la conversión de luz solar en electricidad, podemos decir que aunque se han alcanzado eficiencias de conversión más altas que con CdTe, la complejidad de los procesos de deposición y el costo de estos materiales hacen que se encuentren en desventaja frente al CdTe en la actualidad. Además, el CdTe ha mostrado la ventaja de ser el material que ha sido procesado con mayor facilidad por un gran número de técnicas de deposición, obteniendo en todos los casos películas de calidades y aplicaciones similares para la fabricación de dispositivos electrónicos y fotovoltaicos [10]. Por esta razón, se considera que el CdTe es actualmente el candidato más viable para fabricar CSPD en forma masiva para el aprovechamiento de la energía solar [10].

Finalmente, en relación a la elección de la técnica empleada en este trabajo, aunque se han obtenido CSPD de CdS/CdTe con eficiencias mayores al 11.5% mediante técnicas tales como la electrodeposición [11], rocío pirólítico [12], ablación láser (LPVD: Laser-driven Physical Vapor Deposition) [13] y erosión catódica magneto-planar (sputtering) [14], la técnica GREG ofrece la ventaja de ser una técnica sencilla, de bajo costo, con velocidades de deposición del orden de micras/min y alta eficiencia en el trans-

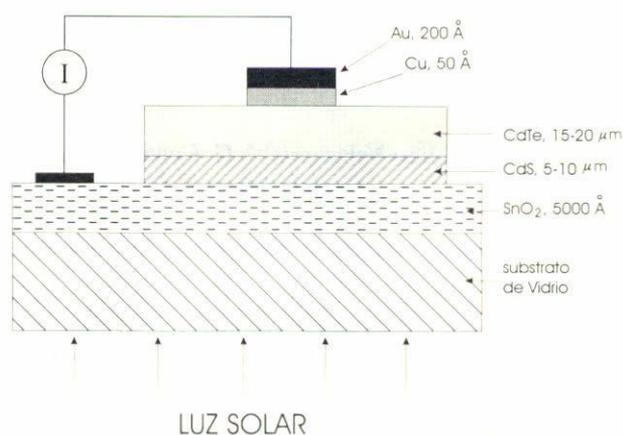


FIGURA 1. Esquema que muestra la estructura típica de una celda solar de película delgada desarrollada y procesada en este trabajo.

porte del fundente efectuada en condiciones de vacíos bajos a temperaturas moderadas. Además de estas características, la simplicidad en el diseño del sistema de deposición facilita la escalabilidad del mismo para la fabricación de módulos fotovoltaicos. Con las eficiencias de conversión de las celdas, se reportan los valores de los parámetros fotoconductorivos, los resultados sobre la caracterización de las películas de CdS y CdTe, así como las características  $I$  vs.  $V$  y la eficiencia cuántica espectral (SQR) de las CSPD procesadas.

## 2. Desarrollo experimental

### 2.1. Preparación de los substratos

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 en su totalidad por la técnica GREG, empleando para su deposición substratos consistentes en vidrios conductores de soda-lima comerciales marca LOF<sup>TM</sup> (libbey-Owens-Ford), los cuales están recubiertos con una película de SnO<sub>2</sub>:F, con espesores y resistencias laminares típicas de 5000 Å y 10 ohm/cuadro respectivamente. El SnO<sub>2</sub> es un material conductor transparente a la radiación visible, por lo cual se utiliza comúnmente como electrodo posterior a través del cual se iluminan las CSPD; el flúor se emplea para mejorar la conductividad de la película de SnO<sub>2</sub>. Los substratos fueron limpiados previamente a la deposición de las CS en una solución jabonosa empleando detergente de baja alcalinidad y posteriormente en agua deionizada dentro de un baño ultrasónico, para eliminar cualquier rastro de grasa o impureza sobre su superficie.

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

La Fig. 2 muestra el diagrama del sistema GREG, el cual está constituido básicamente de dos bloques calefactores, uno para la fuente y otro para el substrato, y una cámara de paredes

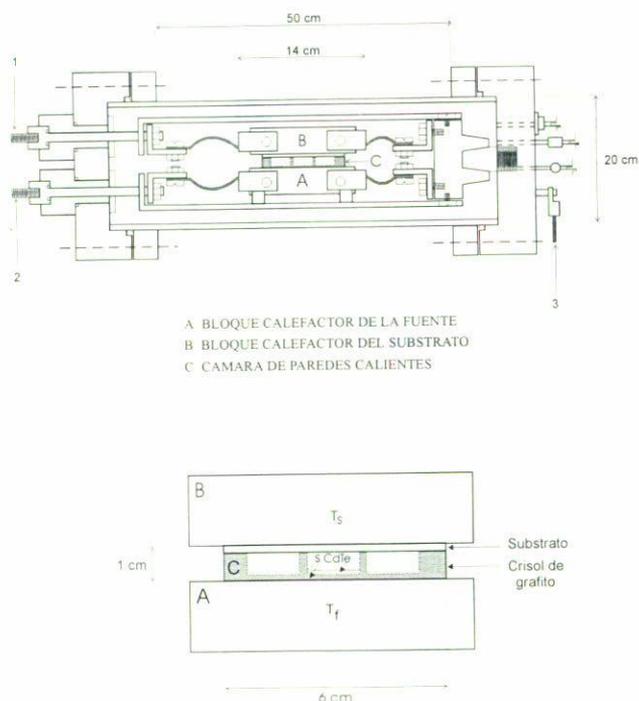


FIGURA 2. Diagrama del sistema GREG empleado para la deposición de películas delgadas y el procesamiento de celdas solares de película delgada.

calientes consistente en una chalupa-crisol, contenidos dentro de una cámara de evaporación. Para llevar a cabo la deposición de las películas, se deposita el material en polvo en la chalupa y encima de ésta se coloca el sustrato; ambos objetos se montan entre los bloques y el dispositivo ensamblado se inserta en la cámara de vacío; el procedimiento para la deposición de las películas semiconductoras se describe en forma detallada en otras referencias [1-6].

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. Las condiciones de deposición fueron las siguientes: para CdS se empleó una temperatura de fuente  $T_f$  entre 750°C y 800°C, y para el sustrato temperaturas  $T_s$  de 480°C a 550°C en una atmósfera de Ar a una presión de 100 a 500 mTorr. Para CdTe se utilizaron temperaturas de fuente  $T_f$  entre 570°C y 700°C y temperaturas de sustrato  $T_s$  de 460°C a 480°C, efectuándose la deposición a una presión de Ar de 500 mTorr a 1 Torr.

### 2.3. Deposición y procesamiento de las celdas solares

Se depositan las películas de CdS 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 deposición 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

TABLA I. Parámetros fotoconductorivos de trabajo de las CS de CdS/CdTe, en la que las películas de CdS y CdTe fueron depositadas por la técnica GREG.

CSPD CdS/CdTe	$V_{OC}$ (V)	$J_{SC}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$ff\%$	$\eta\%$	f. calidad n
GREG1421	0.671	31.77	52.25	7.97	4.73
GREG1103	0.732	30.74	46.87	6.60	5.65
GREG1424	0.668	31.77	48.22	6.41	6.94
GREG1101	0.739	30.74	44.48	6.32	7.93

para ambos materias. Sobre la estructura de CdS/CdTe se depositó una película delgada de cloruro de cadmio, CdCl<sub>2</sub>, por ablación láser con espesores típicos de 0.2 a 0.4 μm. Aunque el papel del CdCl<sub>2</sub> en CS de CdTe no ha sido entendido del todo, se emplea comúnmente para mejorar la difusión del Cu en el CdTe y obtener mejores contactos óhmicos, eliminando posiblemente vacancias de Cd en CdTe y conformando centros A.

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 al vacío de Cu, 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 3mm 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 y así poder alcanzar un buen contacto óhmico. De esta forma, fueron procesadas un total de 42 celdas solares, de las cuales se enlistan en la Tabla I los valores de los parámetros fotoconductorivos para un grupo representativo de las mejores CSPD procesadas.

### 2.4. 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 estructura 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 difractor Mca. Siemens Mod. Kristalloflex 500 conectado a una PC a través de una interfase mediante un sistema DA-CO para automatizar y archivar en memoria la toma de espectros. Las componentes del sistema de caracterización por fotoluminiscencia eran: la fuente luminosa de excitación de alta intensidad fue un láser de Argón Mca. Spectra Physics Mod. 2020, como espectrómetro se tenía un doble monocromador Mca. SPEX Mod. 1403 y como sensor un tubo foto-

multiplicador Mca. RCA Mod. C31034. El equipo empleado para analizar las muestras por MFA fue un microscopio de fuerza atómica Mca. Park Scientific Instruments Mod. Auto-Probe. Finalmente las mediciones de AO se efectuaron con un espectrofotómetro Mca. Beckman Mod. DK-2A.

### 2.5. 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  $100 \text{ mW/cm}^2$  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), empleando una CS patrón. 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 y CdTe depositadas por la técnica GREG 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. La estructura cristalina de las películas de CdS corresponde a la fase hexagonal de la estructura tipo wurtzita con orientación cristalina preferencial en la dirección [002] [15, 16]. La estructura de las películas de CdTe corresponde a la fase cúbica de la estructura tipo zincblenda con orientación preferencial en la dirección [111] [17, 18]. Por otra parte, los resultados de las mediciones de fotoluminiscencia en ambas películas indican y reafirman la obtención de películas de buena calidad cristalina. Para CdS y CdTe se obtuvieron sus espectros a 300 K y aparece una señal característica de fotoluminiscencia en ambos casos, a pesar de haber sido medida sin haber hecho ningún tratamiento previo a la superficie de las películas. Para confirmar estos resultados, se midió dicha señal a una temperatura de 10 K, la cual reveló la presencia de transiciones radiativas asociadas a excitones

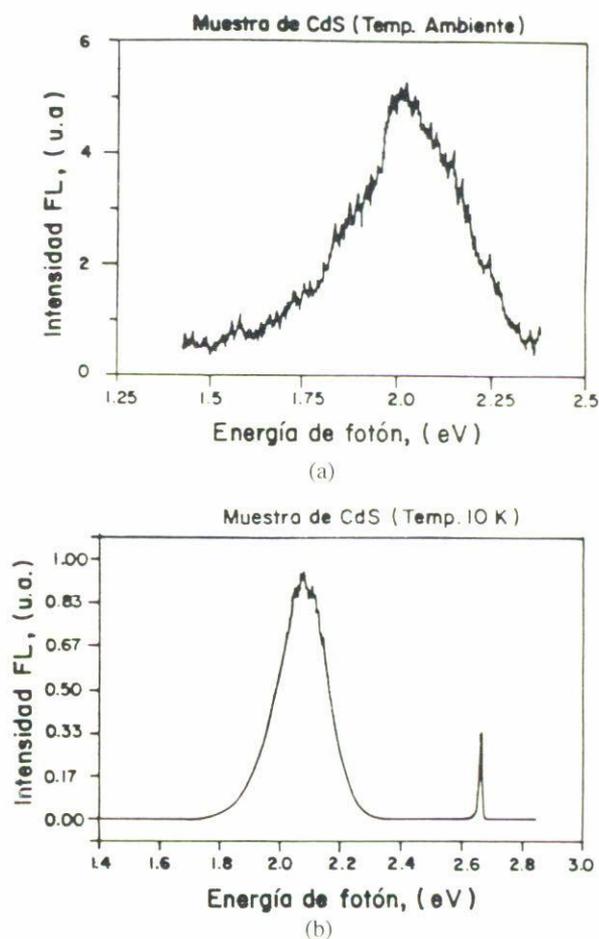


FIGURA 3. Espectros típicos de fotoluminiscencia de películas de CdS crecidas por la técnica GREG tomadas a las temperaturas de (a) 300 K y (b) 10 K.

ligados [19]; los espectros correspondientes a estas mediciones para CdS y CdTe se muestran en las Figs. 3 y 4, respectivamente.

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  $0.2\text{--}1 \mu\text{m}$  y espesores de  $5$  a  $10 \mu\text{m}$  para CdS; para CdTe el tamaño de grano de las películas fue de  $0.5\text{--}2 \mu\text{m}$  con espesores de  $15$  a  $20 \mu\text{m}$ . 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 ( $1 \text{ mW}$ ), se midió la intensidad de la radiación incidente  $I_o$  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  $I = I_o \exp(-\alpha d)$ . Para CdTe se procedió de manera similar empleando un láser de He-Ne de baja intensidad ( $1 \text{ mW}$ ), 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.

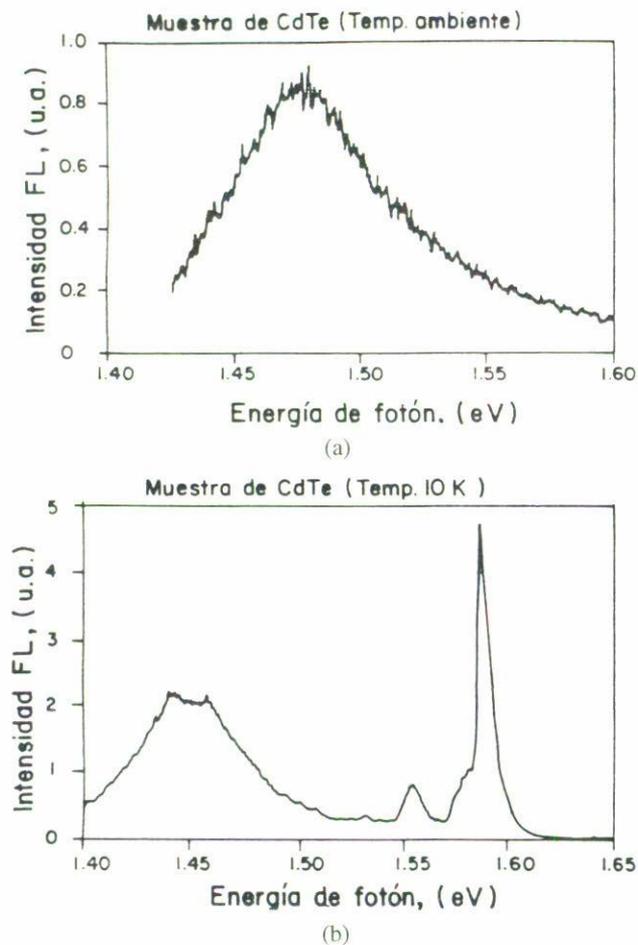


FIGURA 4. Espectros típicos de fotoluminiscencia de películas de CdTe crecidas por la técnica GREG tomadas a las temperaturas de (a) 300 K y (b) 10 K.

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 nm o 1.5 eV y para CdS en 512 nm o 2.42 eV, que corresponden al valor de la banda prohibida  $E_g$  de cada material. Esto reafirma la obtención de películas de buena calidad 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 [4].

### 3.2. Caracterización de las celdas solares

#### 3.2.1. Parámetros fotoconductivos de las CSPD.

La Tabla I muestra algunos de los mejores valores obtenidos de los parámetros fotoconductivos para las CS procesadas de CdS/CdTe. Se indican los valores de las siguientes cantidades: voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ , densidad de corriente de corto circuito  $J_{SC}$ , factor de llenado  $ff$  y eficiencia de con-

TABLA II. Parámetros de crecimiento de las películas de CdS y CdTe para el procesamiento de CSPD.

CSPD	$T_f(^{\circ}C)$	$T_s(^{\circ}C)$	$P(Ar)$	$\Delta t(min)$	$t_{gr}(\mu m)$	$d(\mu m)$
GREG1421						
CdS	759	550	500	5	0.2	10
CdTe	660	480	500	1	0.8	20
GREG1103						
CdS	750	550	200	6	0.4	12
CdTe	650	480	500	1	0.8	20

versión  $\eta$ . También se indica el valor del factor de calidad de cada CS, el cual se obtuvo efectuando los ajustes correspondientes de las características  $J$  vs.  $V$  a la ecuación del diodo.

En la Tabla II se muestran los valores de los parámetros de crecimiento de las películas de CdS y CdTe para las CS GREG1421 y GREG1103. Se indican los valores de la temperatura de la fuente  $T_f$ , la temperatura de sustrato  $T_s$ , la presión del gas  $P(Ar)$  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 ambas películas.

Debido a las altas razones de crecimiento que se tienen con la técnica GREG, las películas de CdS y CdTe resultaron inicialmente muy gruesas. Se sabe que en CS de este tipo, se tienen pérdidas importantes en la capa de CdTe, debido a la alta concentración de defectos que en ella se forman y hacen a esta capa resistiva [4], lo cual limita la eficiencia de la celda. Este factor se torna más crítico cuando el espesor de la película de CdTe es excesivo, como ocurrió en nuestro caso, haciendo que la concentración de defectos aumente y provocando que la resistencia en serie de la CS aumente, limitando a su vez la corriente que puede proporcionar. No obstante, la razón de deposición, el tamaño de grano y por consiguiente el espesor de las películas se controlaron reduciendo el tiempo de crecimiento y ajustando la presión de Ar en la cámara de evaporación. Simultáneamente, los parámetros de crecimiento de las películas de CdS y CdTe se fueron cambiando para mejorar las características de las CSPD procesadas, hasta optimizar el proceso de deposición para obtener las CS de máxima eficiencia en este trabajo. Para asegurar que estas condiciones encontradas eran las óptimas, se procesaron nuevas CS con los mismos parámetros de crecimiento habiéndose obtenido resultados completamente similares, por lo que las CSPD reportadas en la Tabla I son representativas de las 18 obtenidas bajo estas condiciones.

Por otra parte, las Tablas I y II muestran que las mejores CS fueron aquellas en las que las películas de CdS fueron depositadas a una presión de Ar de 500 mTorr, las cuales resultaron con el tamaño de grano más pequeño [20]. Esto se debe a que las películas de grano más pequeño tienen mejor calidad cristalina y menor densidad de defectos [19]. Como se observa de las características de las películas depositadas de CdS y CdTe, los valores de los parámetros fotoconducti-

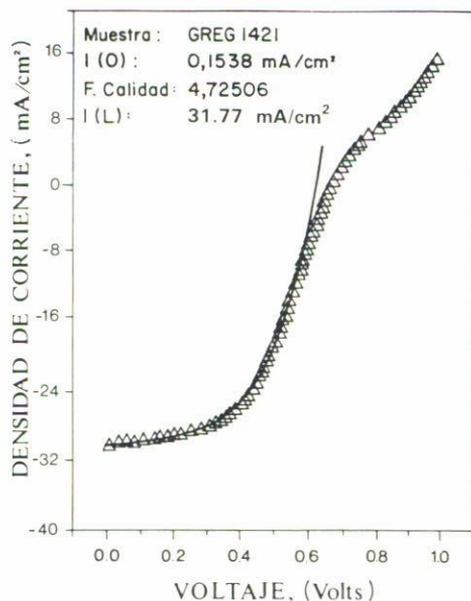


FIGURA 5. Características corriente-voltaje típicas de las CSPD desarrolladas en este trabajo. La curva mostrada corresponde a la celda solar GREG 1421.

vos y el comportamiento de las CSPD fueron determinados primordialmente por la calidad de las películas así como por otros dos factores: el espesor de las películas de CdS y por la presión de Ar en la cámara de evaporación.

### 3.2.2. Características corriente-voltaje ( $J$ vs. $V$ ) y eficiencia cuántica espectral (SQE) de las CSPD

La Fig. 5 muestra una curva  $J$  vs.  $V$  típica de las CS procesadas en este trabajo, en la cual se observan los rasgos característicos de la curva del diodo, aunque en la subida de la curva aparece una desviación de dicho comportamiento en forma de hombro. Como ya se mencionó, el efecto debido al espesor excesivo de las películas de CdTe produce un aumento en la resistencia en serie de las CS, limitando el valor de la corriente que proporciona la celda; este hecho se aprecia en nuestro caso por los valores bajos de la densidad de corriente de corto circuito observados en la Tabla I. Por otra parte, la aparición del hombro en la subida de la curva  $J$  vs.  $V$  se asocia a la existencia de una barrera de potencial, la cual se origina posiblemente por la presencia de un contacto bloqueante, producido por la formación de una capa de óxido entre la película de CdTe y el contacto metálico de Cu, la cual contribuye también a que se incremente la resistencia de las 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. 6 y en ella se observa una subida muy abrupta que se inicia a una longitud de

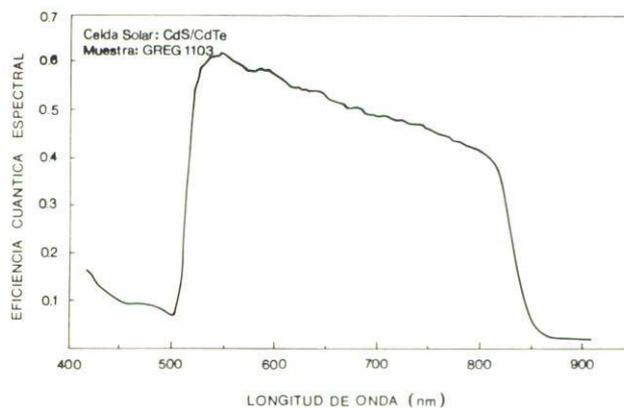


FIGURA 6. Curva típica de la eficiencia cuántica espectral para las CSPD desarrolladas en este trabajo. La curva mostrada corresponde a la celda solar GREG 1103.

onda de aproximadamente 855 nm, la cual corresponde al valor de la energía de la banda prohibida para CdTe (1.45 eV). El hecho de que la SQE 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 gran 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  $\sim 530$  nm, región donde el compuesto ternario  $CdS_xTe_{1-x}$  tiene su energía de banda prohibida para valores pequeños de  $x$ . Finalmente se observa una disminución completamente abrupta que termina exactamente en el valor de la energía de la banda prohibida de CdS. Este comportamiento indica claramente que la calidad cristalina de las películas de CdS depositadas por la técnica GREG es muy buena, ya que para energías de fotón mayores de este valor ya no hay fotogeneración de portadores de carga, debido a que la luz que incide sobre la CS a través de la película de CdS es absorbida por ésta y no permite su transmisión hacia la unión para la fotogeneración de pares electrón-hueco. Este efecto se hace más pronunciado si la película de CdS tiene un espesor de varias micras, como ocurre en nuestro caso.

## 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 de CdTe se obtuvieron con buena calidad cristalina y óptica, como lo muestran los resultados obtenidos por difracción de rayos X, fotoluminiscencia, absorción óptica y microscopía de fuerza atómica para ambos compuestos. Debido a las razones grandes de crecimiento que se tienen con la técnica GREG, el espesor de ambas películas resultó más grande de lo debido. A pesar de que este factor limita el funcionamiento de las CS procesadas por esta técnica, las excelentes características de las películas que se obtienen han permitido fabricar CSPD con eficiencias de conversión bastante aceptables. El efecto debido al espesor excesivo de las películas de CdS y sobre de

CdTe, lo cual produce un aumento en la resistencia en serie de las CS, fue muy marcado en este caso, y la presencia de un contacto bloqueante por la formación de una capa de óxido entre la película de CdTe y el contacto de Cu se reflejó en la desviación del comportamiento tipo diodo de la curva  $J$  vs.  $V$ .

Las CSPD con los mejores parámetros fotoconductorivos fueron aquellas que se obtuvieron con el tamaño de grano (décimas de micra) y el espesor más pequeños para CdS y CdTe, lo cual fue debido a que éstas tienen mejor calidad cristalina que las películas con tamaño de grano más grande, ya 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 deberá controlarse será el espesor de las películas de CdTe

y principalmente el de las películas de CdS; para ello se deberán establecer las condiciones óptimas de deposición para obtener películas con el espesor adecuado. También será necesario continuar buscando cual es el 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 interfase, tratamiento con CdCl<sub>2</sub>, deposición de los contactos, etc.; sobre todo en la parte de tratamientos térmicos posteriores, en 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 de COFAA-IPN.

1. C. Menezes, C. Fortmann, and S. Casey, *J. Electrochem. Soc.* **132** (1985) 706.
2. F. H. Nicoll, *J. Electrochem. Soc.* **110** (1963) 1165.
3. T.C. Anthony, A.L. Fahrenbruch, M.G. Peters, and R.H. Bube, *J. Appl. Phys.* **57** (1985) 400.
4. O. Zelaya Angel, Tesis Doctoral, CINVESTAV-IPN, México, 1985.
5. J. Britt and C. Ferekides, *Appl. Phys. Lett.* **62** (1993) 2851.
6. M.L. Albor Aguilera y M.A. González Trujillo, Tesis Profesional, ESFM-IPN, México, 1995.
7. K. Zweibel, *Thin Films: Past, Present and Future, Report for Progress in Photovoltaics* (April 1995); NREL/TP-413-7486 (DE95004084).
8. C.S. Ferekides *et al.*, *Proc. 25th IEEE PV Spec. Conf.*, Washington, D.C., (1996) 751.
9. D.L. Morel and C. S. Ferekides, *Advanced Processing Technology for High-Efficiency, Thin-Film CuInSe<sub>2</sub> and Cd-Te Solar Cells*, Final Report (1996); NREL/TP-451-20590 (DE96000513).
10. A. Catalano, *Proc. 1st IEEE World Conf. on PV Energy Conversion; 24th IEEE PV Spec. Conf.* (Hawaii, 1994) 52.
11. J.M. Woodcock, A.K. Turner, M.E. Ozsan, and J.G. Summers, *Proc. 22nd IEEE PV Spec. Conf.* (Florida, 1991) 842.
12. R.K. Ahrenkiel, B.M. Keyes, L. Wang, and S.O. Albringt, *Proc. 22nd IEEE PV Spec. Conf.* (Florida, 1991) 940.
13. A. Compaan *et al.*, *Mat. Res. Soc. Proc.* (1996) paper J13.4.
14. M. Sha *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 3045.
15. Landolt-Börnstein, *Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology, New Series*, edited by O. Madelung (Springer-Verlag, Berlin, 1987).
16. Tablas ASTM de Rayos X para CdS en polvo 6-0314.
17. M. Aven and J.S. Prener, *Physics and Chemistry of II-VI Compounds*, (North-Holland, The Netherlands, 1967).
18. K. Zanio, *Cadmium Telluride, Semiconductors and Semimetals*, Vol. VII, edited by R.K. Willardson and A C. Beer, (Academic Press, New York, 1975).
19. M. Tufiño Velázquez, Tesis Doctoral, ESFM-IPN, México, 1997.
20. K.L. Chopra, *Thin Film Phenomena*, (McGraw-Hill, New York, 1969).