

# Influencia del $\text{CHClF}_2$ durante el proceso de activación de celdas solares de películas delgadas basadas en $\text{CdTe}^*$

## Influence of $\text{CHClF}_2$ during the activation process of $\text{CdTe}$ -based thin film solar cells

Adolfo López Sánchez<sup>a\*</sup>, Ricardo Mis Fernández<sup>b</sup> y José Luis Cabellos Quiroz<sup>a</sup>

### Resumen / Abstract

En este trabajo se presentan los resultados del efecto del tratamiento térmico o activación de celdas solares de películas delgadas  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  tratadas en atmósferas reactivas de cloro ( $\text{CHClF}_2$ ) con una mezcla de gases, Oxígeno y Nitrógeno, variando la presión parcial del  $\text{CHClF}_2$  en: 3, 6, 12 y 18 % de la presión total. La presión complementaria del  $\text{CHClF}_2$  fue formado por 80%  $\text{N}_2$  y 20%  $\text{O}_2$ . Después del proceso de activación, se producen cambios morfológicos sobre la superficie de  $\text{CdTe}$ . Los cambios en la superficie son principalmente erosiones en los límites de granos, esto se determinó por un análisis FE-SEM. Las celdas solares obtenidas se caracterizaron mediante las mediciones de eficiencia cuántica y la curva (J-V) a temperatura ambiente. Las mediciones de eficiencia cuántica dan evidencia que con el aumento de concentración de  $\text{CHClF}_2$  mejora la corriente fotogenerada, pero un exceso de  $\text{CHClF}_2$  degrada la celda solar. Un resultado similar mostró las curvas de J-V, que las propiedades eléctricas mejoran con el aumento de la presión del  $\text{CHClF}_2$ , sin embargo, resulta perjudicial cuando es en exceso.

**Palabras clave:**  $\text{CdTe}$ , tratamiento térmico, tecnología fotovoltaica.

*This work presents the results of the effect of heat treatment or activation of  $\text{CdS}/\text{CdTe}$  thin film solar cells treated in reactive chlorine atmospheres ( $\text{CHClF}_2$ ) with a mixture of gases, Oxygen, and Nitrogen, varying the partial pressure of  $\text{CHClF}_2$  by 3, 6, 12, and 18 % of the total pressure. The complementary pressure of  $\text{CHClF}_2$  was formed by 80%  $\text{N}_2$  and 20%  $\text{O}_2$ . After the activation process, morphological changes occur on the surface of  $\text{CdTe}$ . The surface changes are mainly erosions at the grain boundaries, this was determined by FE-SEM analysis. The obtained solar cells were characterized by quantum efficiency measurements and the (J-V) curve at room*

\*. **Agradecimientos.** Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Tapachula y al Cinvestav Unidad Mérida por todas las facilidades otorgadas para la realización de esta investigación.

**Declaración de conflicto de intereses.** Los autores declaran que no tienen competencia en intereses financieros ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo que se presenta en este documento.

a. Los Doctores López Sánchez y Cabellos Quiroz pertenecen a la Universidad Politécnica de Tapachula, Carretera Tapachula - Puerto Madero, Km. 24 + 300, C.P., 30830, Tapachula, Chiapas, México. Correo electrónico del coautor responsable: adolfo.lopez@uptapachula.edu.mx.

b. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, Km. 6 Antigua Carretera a Progreso, A.P. 73-Cordemex, C.P. 97310, Mérida, Yucatán, México.

temperature. The quantum efficiency measurements give evidence that with increasing  $\text{CHClF}_2$  concentration the photogenerated current improves, but an excess of  $\text{CHClF}_2$  degrades the solar cell. A similar result showed from the J-V curves, that the electrical properties improve with increasing  $\text{CHClF}_2$  pressure, however, it is detrimental when in excess of total solids of 80.15 % at 120 min with a distance between electrodes of 1 cm. These conditions were established as optimal and were evaluated on a pilot scale, finding an elimination of 90.12 % of solids. The results highlight the high efficiency under sustainable treatment.

**Keywords:** CdTe, heat treatment, photovoltaic technology.

## Introducción

El CdTe es un semiconductor considerado uno de los principales candidatos rentables para aplicaciones fotovoltaicas [1]. Tiene una banda prohibida de energía directa casi óptima de 1.5 eV y, debido a su alto coeficiente óptica de absorción ( $>10^5 \text{ cm}^{-1}$ ), unos pocos micrómetros pueden absorber más del 90 % del espectro de luz [2, 3]. Estas propiedades lo hacen atractivo para aplicaciones fotovoltaicas, que según el costo nivelado de la electricidad (LCOE) [4, 5, 6], la energía solar fotovoltaica se está convirtiendo en uno de los segmentos de más rápido crecimiento comercial debido a su bajo costo de producción y alto rendimiento [7, 8].

Entre las ventajas que posee los dispositivos fotovoltaicos basados en CdTe con respecto a otros materiales, se encuentra su coeficiente de temperatura y una mejor respuesta espectral, el cual es 3% más en climas cálidos y hasta un 4% en condiciones de humedad [9], respectivamente. Sin embargo, obtener altas eficiencias requiere realizar un tratamiento térmico, conocido como activación. Típicamente, el tratamiento térmico se lleva a cabo depositando  $\text{CdCl}_2$  sobre la capa de CdTe y posteriormente un recocido en un rango de temperatura y tiempo de 380 a 500 °C hasta por 90 minutos [10, 11, 12, 13, 14, 15], respectivamente. Dicho proceso, mejora las propiedades eléctricas del CdTe generando una recristalización, lo que conduce a la reducción de los límites de granos y consecuentemente, la pasivación de los centros de recombinación. Así mismo, se propicia una interdifusión entre el CdS y el CdTe que se asocia a la reducción de defectos en la interfase [3, 16, 17, 18]. Por otro lado, se han propuesto algunas alternativas para la activación que parecen ser prometedoras, entre ellas se encuentran el cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ) [19] y difluoroclorometano ( $\text{CHClF}_2$ ) [20], en este último se han realizado en diferentes atmósferas: Ar,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , o en aire [20, 21, 22, 23]. Sin embargo, no se ha reportado el efecto de la variación del  $\text{CHClF}_2$ . Por lo tanto, en este trabajo se evalúa el efecto de la concentración  $\text{CHClF}_2$  utilizada en la mezcla de gases ( $\text{N}_2$ - $\text{CHClF}_2$ ); las presiones parciales del  $\text{CHClF}_2$  fueron de 3, 6, 12 y 18 %, de una presión total de 200 mbar. La mezcla de gases se complementará con 80% de Nitrógeno y 20% de Oxígeno. Al término del proceso, se culminó en celda y se caracterizaron las propiedades optoelectrónicas de dichas celdas.

## 2. Materiales y métodos

Todas las muestras se prepararon en la configuración de superestrato en vidrio de aluminosilicato de boro alcalino comercial de Delta Technology recubierto con óxido de indio y estaño (ITO) de 200 nm. Se depositó una capa de ZnO de 100 nm a partir de un target de Zn (4N) mediante pulverización catódica por RF reactiva en atmósfera de Ar/O<sub>2</sub>, a 400 °C. La capa de ventana de CdS también se depositó mediante RF-Sputtering con un espesor de 120 nm en una atmósfera de argón puro a 300°C y la capa de CdTe (8 μm) se depositó mediante sublimación en espacio cercano (CSS), estableciendo la temperatura de la fuente y del sustrato a 590 °C y 550 °C, respectivamente, en atmósfera de Ar/ O<sub>2</sub>.

Las activaciones de la estructura Vidrio/ZnO/CdS/CdTe se realizó en un horno tubular de cuarzo, el cual se evacuó hasta una presión base de 10<sup>5</sup> mbar, en cada proceso de activación se varió las presiones parciales del CHClF<sub>2</sub> como se resume en la Tabla 1, posteriormente se inyecta una mezcla gaseosa de O<sub>2</sub>, (20%) y N<sub>2</sub>, (80%) de la presión complementaria. La temperatura de activación se mantuvo constante a 400°C durante 30 minutos.

Tabla 1. Presiones parciales porcentual de la mezcla de gases (N<sub>2</sub> - CHClF<sub>2</sub> - O<sub>2</sub>)

Nombre	CHClF <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Presión total
	(%)	(%)	(%)	(mbar)
MA	3	80	20	200
MB	6	80	20	200
MC	12	80	20	200
MD	18	80	20	200

Fuente:

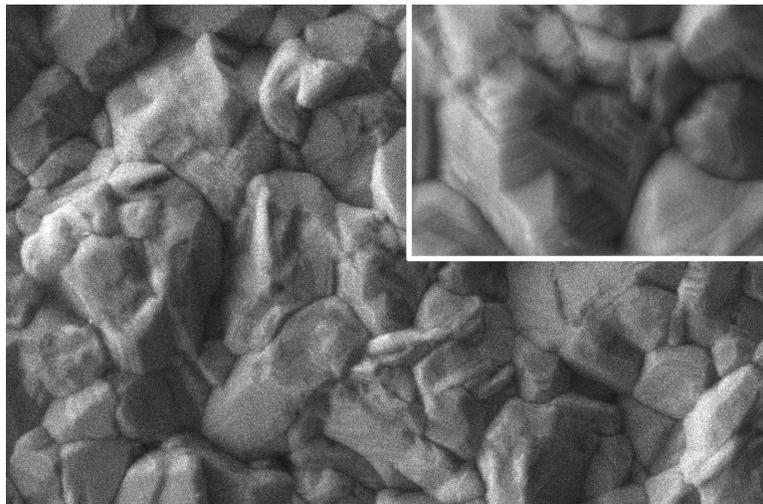
Previo al depósito del contacto posterior, todas las muestras reportadas en la Tabla 1 fueron limpiadas con una solución con bromo/metanol (Br/MeOH) para depositar una bicapa de Cu/Mo con un espesor de 3 nm y 800 nm, respectivamente, por medio de la técnica RF-Sputtering. El área estándar de las células solares se fijó en 18,6 mm<sup>2</sup>, utilizando una fina máscara de molibdeno. Finalmente, las muestras se recocieron a 200 °C durante 20 minutos en una atmósfera de Ar. Los análisis morfológicos se realizaron en un JEOL-FESEM modelo 7600F. La eficiencia de las celdas solares se midió mediante un sistema de lámparas halógenas calibrado por un simulador solar Sol2A de Newport Oriel bajo iluminación AM1.5, donde las mediciones de las curvas J-V se llevaron a cabo utilizando un Source-Meter 2420 de Keithley y un software casero. El EQE se midió mediante una lámpara Xe montada en un Newport 67005 que albergaba un monocromador H20VIS Jobin-Yvon y un filtro Newport 81388 AM1.5 y se utilizó como referencia un diodo de Si calibrado Newport 71560.

### 3. Resultados y discusiones

#### 3.1 Propiedades morfológicas del CdTe: antes y después del proceso de activación

En la figura 3.1 se muestra la micrografía de la estructura sin activar. La muestra sin activar es homogénea, sin grietas o agujeros; los granos tienen forma irregular, algunos tienen forma alargada con límites de granos muy marcadas. El tamaño de grano varía entre .

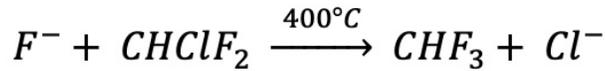
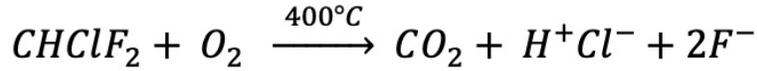
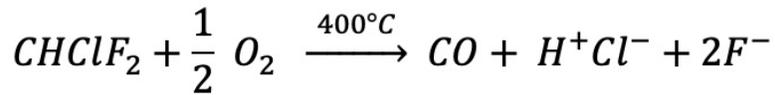
Figura 3.1. Imagen FE-SEM de la estructura de vidrio/ITO/ZnO/CdS sin activar



Fuente:

Después del proceso de activación la superficie de la película de CdTe presentan cambios morfológicas (Figura 3.2). Justamente en el cambio morfológico superficial se encuentra la evidencia experimental de la reactividad del proceso de activación en presencia de los gases  $\text{CHClF}_2$ , Oxígeno y Nitrógeno. En la figura 3.2 se muestran las micrografías SEM de las celdas solares activadas. En la muestra MA de la figura 3.2 a), que fue activada con presión parcial de 3% de  $\text{CHClF}_2$ , los granos mostraron una superficie en forma de terrazas con una configuración casi hexagonal, y se pueden observar erosiones poco profundas en la superficie de los granos. En la muestra MB de la figura 3.2b, activada con el 6% de presión parcial de  $\text{CHClF}_2$ , los granos son ligeramente mayores (entre 2 a 5  $\mu\text{m}$ ) que los granos antes del proceso de activación, también presentan erosiones en los límites y en la superficie de los granos. En la muestra MC de la figura 3.2c activada con el 12% de presión parcial de  $\text{CHClF}_2$ , presenta granos de forma irregular, erosiones en la superficie y en los límites de granos, además, es evidente la formación de granos en forma de escamas y puntos blancos.

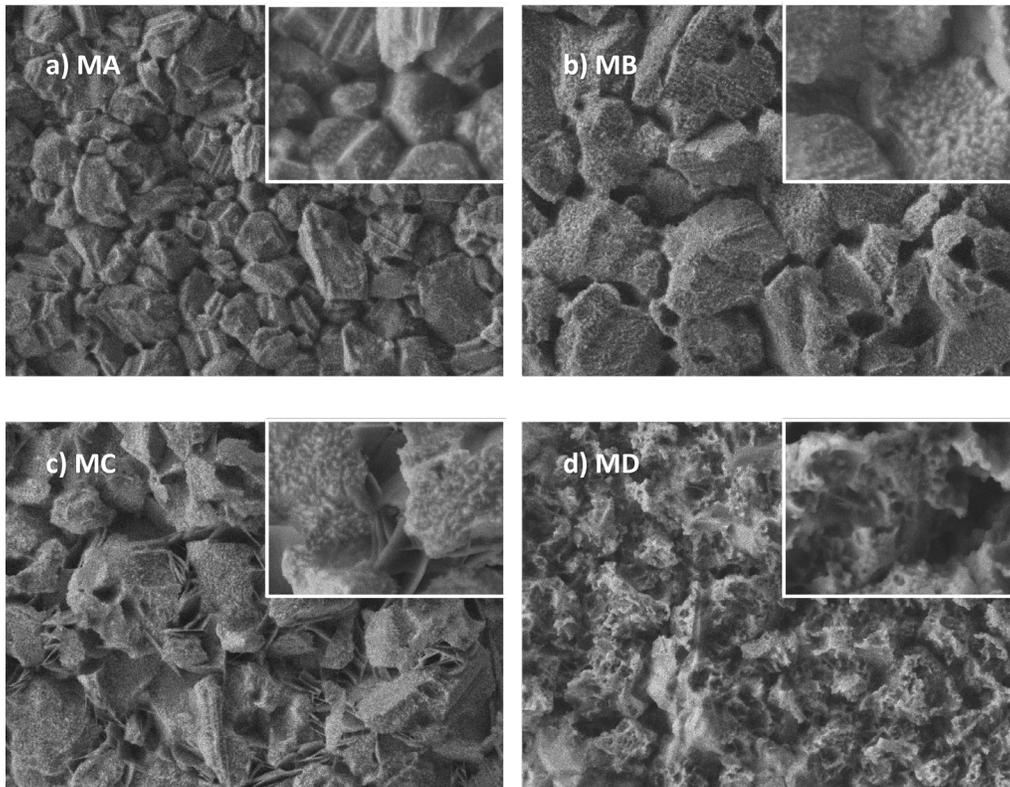
La presencia de puntos blancos sobre los granos de CdTe al incrementar la presión parcial del  $\text{CHClF}_2$  en la atmósfera del proceso de activación, fue observada de igual manera por Romeo *et al.* [20] y Hernández-Rodríguez *et al.* [22], quienes atribuyeron a la descomposición parcial del  $\text{CHClF}_2$ , causando erosión en la superficie del material y cuyas posibles reacciones son las siguientes [22]:



Por último, en la imagen de la muestra MD de la figura 3.2 d), se puede ver que la morfología fue afectada por erosiones profundas en toda la superficie del CdTe, esto puede deberse al exceso de ácidos durante el proceso de activación, al formarse HCl y HF. Se sabe que estos ácidos son altamente corrosivos, y se forman también por la descomposición del  $\text{CHClF}_2$ .

Por lo tanto, dado que nuestras condiciones experimentales fueron diferentes para todas las muestras, atribuimos las diferencias de la figura. 3.2a-d a la formación de iones de cloro y flúor que interactúan con el CdTe, dando lugar a una mayor erosión superficial y formando otros compuestos, como óxidos.

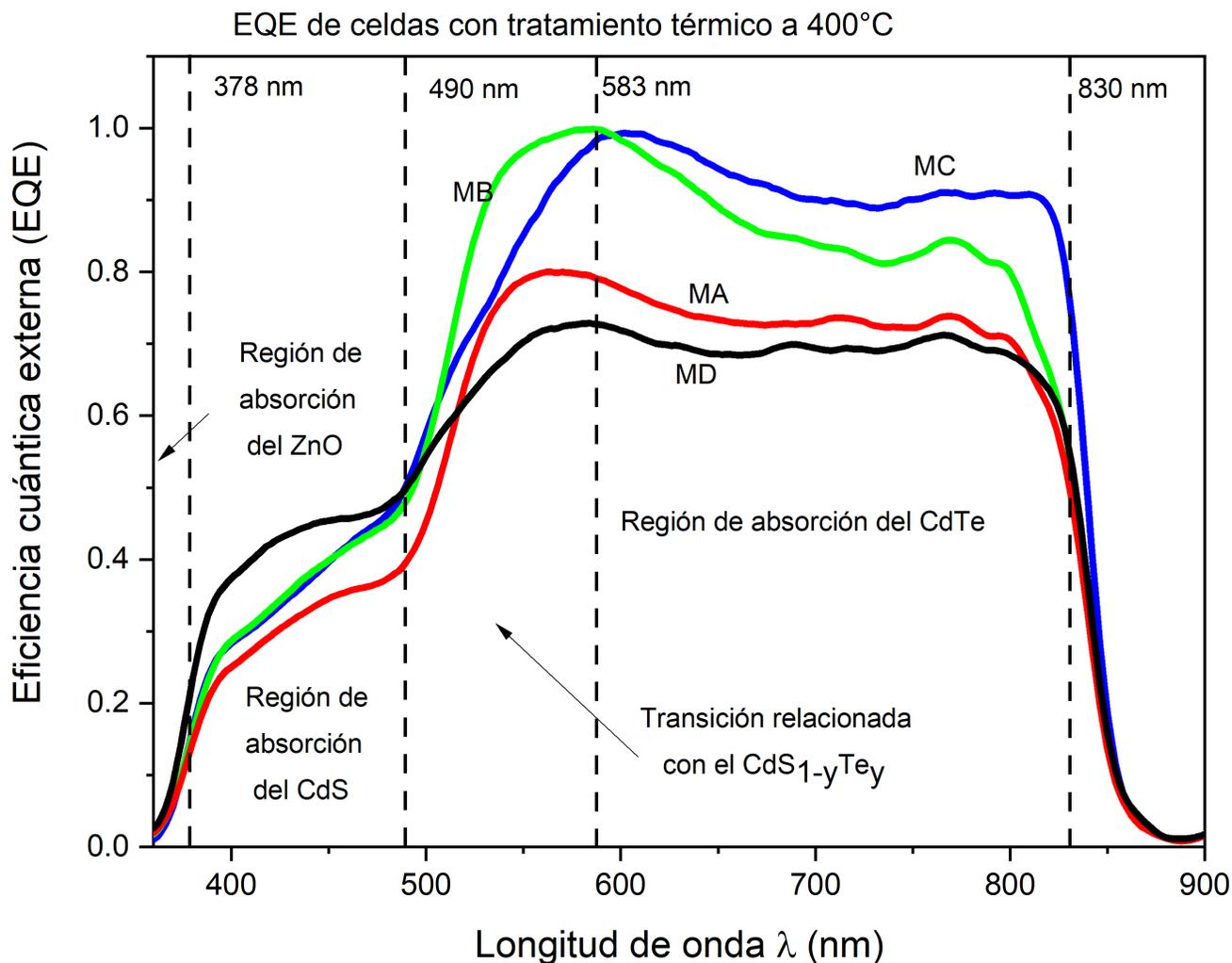
Figura 3.2. Micrografías FE-SEM de la estructura Vidrio/ITO/ZnO/CdS/CdTe activadas con presiones parciales de  $\text{CHClF}_2$  a: a) 3%, b) 6%, c) 12% y c) 18%, a 200 mbar de presión total



Fuente:

### 3.2 Eficiencia cuántica externa (EQE)

En la figura 3.3, se muestran las eficiencias cuánticas externas de las celdas solares activadas a diferentes presiones parciales de  $CHClF_2$ , se puede observar que en la región de menor longitud de onda  $\lambda < 378 \text{ nm}$ , todas las celdas muestran la misma una transición debido al band gap del ZnO cercano a 3.2 eV. Lo que representa una pérdida asociada con la absorción del ZnO. En la región de longitudes de onda de  $378 \text{ nm} < \lambda < 490 \text{ nm}$  corresponde a la región de absorción del CdS, en relación con lo reportado por Burgelman [24], a menor amplitud de EQE mayor espesor de CdS, de acuerdo con los experimentos, la celda MA implicaría que tiene menor del espesor el CdS, y a mayor concentración de  $CHClF_2$  mayor disminución del espesor del CdS, como se puede ver en las muestras MB, MC y MD. De acuerdo con Brian McCandless [25], la interdifusión del Te hacia el CdS, implicaría que el band gap del CdS disminuye, lo cual sugiere la posible formación del ternario  $CdS_{1-y}Te_y$ , por lo tanto, la interdifusión del Te implica una transición hacia la derecha en la EQE en la región de  $490 \text{ nm} < \lambda < 583 \text{ nm}$ , todas las celdas presentan una transición con diferente pendiente. Cuando la pendiente en la zona de interdifusión es menor indica mayor difusión del Te en el CdS. Se ha reportado que el tratamiento con cloro favorece la difusión del Te hacia el CdS y del S hacia el CdTe [25]. Podemos notar que, aunque los fotones pueden ser absorbidos en toda la estructura de la celda, es en la unión donde aparece el efecto de la absorción de tal forma que se genera un campo eléctrico intenso que es capaz de separar los pares electrón-hueco generados, y esto permite que se produzca el flujo de corriente que son colectados en las terminales eléctricas. Podemos observar en las celdas MB y MC que con el aumento de porcentaje de mejora considerablemente la EQE en la región de longitud de onda entre  $583 < \lambda < 830 \text{ nm}$  que corresponde a la región de absorción del CdTe, podemos apreciar una cresta en la curva lo cual indica que la mayoría de los fotones absorbidos generan pares electrón-hueco que contribuye a la fotocorriente, principalmente a la absorción de fotones cercana a la zona de carga espacial del dispositivo. El aumento de la amplitud de la EQE se le atribuye a la incorporación del cloro y oxígeno durante el proceso de activación de la celda solar, el cuál promueve la difusión del Te hacia el CdS y del S hacia el CdTe [21], y como resultado se tiene una buena calidad en la unión. Pero en la medida que la longitud de onda aumenta ( $\lambda < 583 \text{ nm}$ ) para todas las celdas y en particular para la celda MB, el valor de la amplitud de la EQE se ve afectada por la recombinación de pares electrón-hueco en el CdTe. A longitudes de onda , la celda MA y MB tienen una transición muy similar debido a la difusión del S al CdTe, y la EQE de las celdas MC y MD se desplazan ligeramente a la derecha comparadas con las celdas MA y MB, es sabido que bajas concentraciones de S en el CdTe tiende a disminuir su band gap [25]. En caso de exceso de difusión del S en el CdTe ocurre un desplazamiento de la EQE hacia la izquierda por el aumento de band gap.

Figura 3.3. Eficiencia cuántica externa de celdas solares activadas con  $\text{CHClF}_2$ 

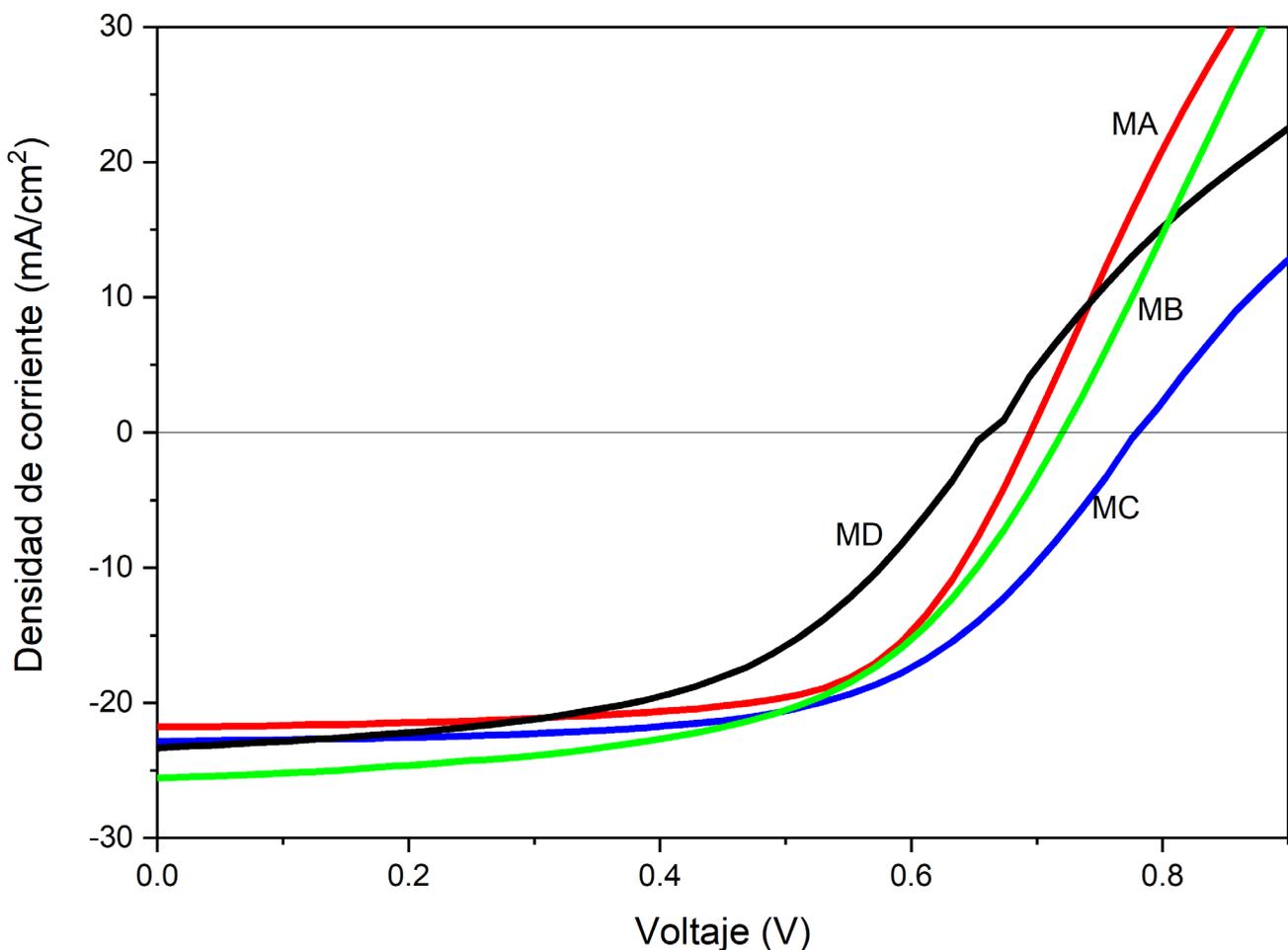
Fuente:

### 3.3 Análisis de corriente – voltaje (J-V)

En la figura 3.4 se muestran las mediciones de J-V, donde se puede observar la tendencia de las curvas obtenidas de las celdas MA, MB, MC y MD que fueron activadas a diferentes presiones parciales de . En la tabla 3.1 se muestran los parámetros eléctricos, donde se puede observar cambios apreciables en todos los parámetros de las celdas solares. Está claro que, el voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ) cambia significativamente en la medida que el  $\text{CHClF}_2$  aumenta de concentración, por otro lado, un ligero aumento en la densidad de corriente de corto circuito ( $J_{sc}$ ) es observado. Como fue discutido en la sección 3.2 que a mayor amplitud de EQE, mayor es la fotogeneración de portadores de carga, tal como se da evidencia en las celdas MB y MC. De acuerdo con el análisis de la degradación del  $\text{CHClF}_2$  los iones cloro y flúor se pueden difundir fácilmente a lo largo de las

fronteras de granos ya que en éstos la compactación no es favorable [26], por lo tanto, el exceso de iones puede degradar las celdas solares, afectando la interfaz del CdS/CdTe. Este efecto se puede observar con la tendencia de los valores del  $V_{oc}$  mostrados en la tabla 3.1. Es notorio que el voltaje de circuito abierto y la resistencia de fuga están directamente relacionados con el factor de llenado. Esto puede explicarse por un consumo excesivo de CdS en la película de CdTe [27]. La eficiencia es el parámetro determinante en el rendimiento de la celda sola, en la tabla 3.1 podemos observar la tendencia de aumento de las eficiencias  $\geq 10\%$ , sin embargo, se ve afectado cuando la presión parcial del  $\text{CHClF}_2$  es del 18%. Esta disminución de eficiencia, como ya fue discutido en el apartado 4.1.1 se debe al exceso de ácidos formados durante el proceso de activación, lo cual actuó de manera destructiva en la superficie del CdTe y en la unión p-n de la celda solar.

Figura 3.4. Gráficas de curvas J-V para celdas activadas a una presión total de 200 mbar



Fuente:

Tabla 3.1. Parámetros eléctricos de celdas solares activadas

Muestras	$R_s$ $\Omega\text{cm}^2$	$R_{sh}$ $\Omega\text{cm}^2$	$J_{ph}$ ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	$V_{oc}$ $\text{mV}$	$FF$ (%)	$Ef.$ (%)
MA	88	13 336	21.8	695	66.3	10.0
MB	16	3 630	25.3	720	56.4	10.3
MC	128	6 122	22.7	779	59.9	10.6
MD	182	2 375	23.2	661	52.8	8.0

Fuente:

Además, en la mejora de los parámetros eléctricos después del proceso de activación, otro aspecto importante a considerar es el contacto posterior. De acuerdo con la medición J-V, las celdas MC y MD presenta Roll-over en el contacto posterior. La razón del roll-over se les atribuye a las propiedades eléctricas del CdTe, por la presencia de una barrera Schottky (CdTe/Cu/Mo), que afecta principalmente el transporte de huecos por el aumento de la energía de barrera en el contacto posterior [27, 28]. La presencia de la barrera Schottky sugiere que un exceso o baja concentración de Cu que no formaron el compuesto  $\text{Cu}_x\text{Te}$  puede ser la causa del roll-over. Este efecto sugiere que la superficie del CdTe tiene mayor concentración de Cd, esto puede causar la recombinación de los pares electrón-hueco antes de ser recolectados.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se estudiaron los efectos del  $\text{CHClF}_2$  variando las presiones parciales en el proceso de activación de celdas solares de CdTe, este compuesto es una fuente de Cl alternativa del método convencional ( $\text{CdCl}_2$ ). En todos los casos, se estudiaron la morfología y las propiedades optoelectricas. Mostraron que mejora la morfología, sin embargo, el exceso del compuesto de  $\text{CHClF}_2$  degrada las celdas, este efecto también se observó con la eficiencia cuántica externa y las curvas J-V. Por lo tanto, el control de la cantidad de  $\text{CHClF}_2$  en el proceso de activación puede ser la clave para obtener celdas solares de altas eficiencias.

#### Referencias bibliográficas

- [1] S. Rühle, «Tabulated vales of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells,» *Solar Energy*, vol. 130, pp. 139-147, 2016.
- [2] D. Bonnet y P. Meyers, «Cadmium-telluride -Material for the thin film solar cells,» *Journal of Material Research*, vol. 13, nº 10, pp. 2740-2753, 1998.
- [3] K. Nakamura, T. Fujihara, T. Toyama y H. Okamoto, «Influence of  $\text{CdCl}_2$  Treatment on

- Structural and Electrical Properties of Highly Efficient 2-mm-Thick CdS/CdTe Thin Film Solar Cells,» *The Japan Society of Applied Physics*, vol. 41, pp. 4474-4480, 2002.
- [4] LAZARD, «www.lazard.com,» October 2021. [En línea]. Available: <https://www.lazard.com/media/451881/lazards-levelized-cost-of-energy-version-150-vf.pdf>. [Último acceso: 26 01 2022].
- [5] L. Sens, U. Neuling y M. Kaltschmitt, «Capital expenditure and levelized cost of electricity of photovoltaic plants and wind turbines - Development by 2050,» *Renewable Energy*, vol. 185, pp. 525-537, 2022.
- [6] T. T. Tran y A. D. Smith, «Incorporating performance-based global sensitivity and uncertainty analysis into LCOE calculations for emerging renewable energy technologies,» *Applied energy*, vol. 216, pp. 157-171, 2018.
- [7] NREL, «NREL Transforming ENERGY,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cadmium-telluride-solar-cells.html>. [Último acceso: 19 03 2020].
- [8] N. Strevel, L. Trippel, C. Kotarba, I. Khan, First Solar, Perrysburg, Ohio y USA, «Improvement in CdTe module reliability and long-term degradation through advances in construction and device innovation,» *Photovoltaics International*, vol. 22, pp. 1-8, 2016.
- [9] F. Solar, «www.firstsolar.com,» Enero 2020. [En línea]. Available: <http://www.firstsolar.com/-/media/First-Solar/Technical-Documents/Series-6-Datasheets/Series-6-Datasheet.ashx>. [Último acceso: 02 04 2020].
- [10] H. Bayhan, S. Özden, J. Major, M. Bayhan, E. Dagdeviren y K. Durose, «A comparison of the effect of CdCl<sub>2</sub> and MgCl<sub>2</sub> processing on the transport properties of n-CdS/p-CdTe solar cells and a simple approach to determine their back contact barrier height,» *Solar Energy*, vol. 140, pp. 66-72, 2016.
- [11] A. H. Munshi, J. M. Kephart, A. Abbas, T. M. Shimpi, K. L. Barth, J. M. Walls y w. S. Sampath, «Polycrystalline CdTe photovoltaic with efficiency over 18% through improved absorber passivation and current collection,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 176, pp. 9-18, 2018.
- [12] N. Romeo, A. Bosio, R. Tedeschi y V. Canevari, «Back contacts to CSS CdS/CdTe solar cells and stability of performances,» *Thin Solid Films*, Vols. %1 de %2361-362, pp. 327-329, 2000.
- [13] A. Salavei, I. Rimmaudo, F. Piccinelli, P. Zabierowski y A. Romeo, «Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells,» *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 112, pp. 190-195, 2013.
- [14] E. Regalado-Pérez, M. G. Reyes-Banda y X. Mathew, «Influence of oxygen concentration in the CdCl<sub>2</sub> treatment process on the photovoltaic properties of CdTe/CdS solar cells,» *Thin Solid Films*, vol. 582, pp. 134-138, 2015.
- [15] R. Luo, B. Liu, X. Yang, Z. Bao, B. Li, J. Zhang, W. Li y L. Wu, «The large-area CdTe thin film for CdS/CdTe solar cell prepared by physical vapor deposition in medium pressure,» *Applied Surface Science*, vol. 360, pp. 744-748, 2016.

- [16] B. McCandless, L. Moulton y R. Birkmire, «Recrystallization and Sulfur diffusion in Cd-Cl<sub>2</sub>-Treated CdTe/CdS Thin Films,» *Progress in photovoltaic: Research and applications*, vol. 5, pp. 249-260, 1997.
- [17] A. Taylor, J. Major, G. Kartopu, D. Lamb, J. Duenow, R. Dhere, X. Maeder, S. Irvine, K. Durose y B. Mendis, «A comparative study of microstructural stability and sulphur diffusion in CdS/CdTe photovoltaic devices,» *Solar Energy Materials y Solar Cells*, vol. 141, pp. 341-349, 2015.
- [18] S. Mazzamuto, L. Vaillant, A. Bosio, N. Romeo, N. Armani y G. Salviati, «A study of the CdTe treatment with a Freon gas such as CHF<sub>2</sub>Cl,» *Thin Solid Film*, vol. 516, pp. 7079-7083, 2008.
- [19] J. Major, R. E. Treharne, L. J. Phillips and K. Durose, «A low-cost-non-toxic post-growth activation step for CdTe solar cells,» *Nature*, pp. 334-337, 2014.
- [20] N. Romeo, A. Bosio y A. Romeo, «An innovative process suitable to produce high-efficiency CdTe/CdS thin-film modules,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 2-7, 2010.
- [21] V. Rejón, I. Riech y J. Peña, «Study of CdS/CdTe solar cells activated with an oxygen-CHClF<sub>2</sub> gas mixture,» *Solar Energy*, vol. 95, pp. 319-324, 2013.
- [22] E. Hernández-Rodríguez, V. Rejón, I. Riech, M. Acosta y J. Peña, «Morphological and chemical study of CdTe thin films annealed in CHClF<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> gas mixture,» *Solar Energy*, vol. 107, pp. 305-313, 2014.
- [23] E. Camacho-Espinosa, V. Rejón, E. Hernández-Rodríguez, R. Mis-Fernández, A. I. Oliva, E. Rosendo, I. Rimmaudo y J. L. Peña, «CHClF<sub>2</sub> gas mixture to activate all-sputtered CdS/CdTe solar cells,» *Solar Energy*, vol. 144, pp. 729-734, 2017.
- [24] M. Burgelman, «Cadmium Telluride Thin Film Solar Cell: Characterization, Fabrication and modeling,» de *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications*, England, John Wiley y Sons, Ltd, 2006, pp. 277-324.
- [25] B. E. McCandless y J. R. Sites, «Cadmium Telluride Solar Cells,» de *Handbook of photovoltaic science and engineering*, USA, WILEY, 2003, pp. 617-657.
- [26] D. R. Askeland, *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 3 ed., México: Thomson Editores, 1998.
- [27] A. Salavei, I. Rimmaudo, F. Piccinelli, P. Zabierowski y A. Romeo, «Study of difluorochloromethane activation treatment on low substrate temperature deposited CdTe solar cells,» *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 190-195, 2013.
- [28] S. H. Demtsu y J. R. Sites, «Effect of back-contact barrier on thin-film CdTe solar cells,» *Thin Solid Films*, n° 510, pp. 320-324, 2006.

### **Contribuciones de los coautores al documento**

**Doctor Adolfo López Sánchez.** Idea original, investigación, metodología, financiamiento, escritura de manuscrito, supervisión y escritura final del manuscrito.

**Doctor Ricardo Mis-Fernández.** Investigación, metodología y escritura inicial del manuscrito.

**Doctor José Luis Cabellos Quiroz.** Investigación y escritura inicial del manuscrito