



## **Contribución al desarrollo sustentable a través de la fabricación de celdas solares con el uso del telurio de zinc**

Daniel Hernández-Pitalua<sup>1</sup>, Rogelio Mendoza-Perez<sup>2</sup>, Maria Graciela Hernández-Orduña<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico Superior de Xalapa. Sección 5ª Reserva Territorial s/n, Colonia Santa Bárbara, Xalapa-Enriquez 91096, Veracruz, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma de la Ciudad de México. San Lorenzo Tezonco, Calle Prolongación San Isidro núm. 151, Col. San Lorenzo Tezonco, Delegación Iztapalapa 09790, CDMX, México.

<sup>3</sup>El Colegio de Veracruz, Carrillo Puerto núm. 26, Zona Centro, Xalapa 91000, Veracruz, México.

\*Autor de correspondencia: [ghernandez@colver.info](mailto:ghernandez@colver.info)

Recibido 15 de agosto de 2020; aceptado 28 de septiembre de 2020

### **RESUMEN**

El presente artículo muestra el avance más reciente en el desarrollo experimental del proceso de depósito y análisis de nanoestructuras de telurio de zinc (ZnTe) como material de prueba para la contribución y desarrollo de celdas solares fotovoltaicas de película delgada, a través de una matriz experimental. Dentro de la experimentación y la caracterización de la celda prototipo completa, vale la pena recalcar que se obtuvo respuesta fotovoltaica, lo cual quiere decir que, a pesar de la relativa baja eficiencia de la misma, existen buenos parámetros de voltaje, corriente, factor de llenado, entre otros (parámetros frecuentemente evaluados en el desempeño de cualquier tipo de celda fotovoltaica) que permiten contribuir en trabajos futuros de este material en la fabricación de celdas solares de este

tipo. Con este proyecto se contribuye al desarrollo de celdas de película delgada (de mayor eficiencia y economía) en nuestro país y en el mundo.

**PALABRAS CLAVE:** Teluro de cadmio, película delgada, celda fotovoltaica.

### **ABSTRACT**

This article shows the most recent advance in the experimental development of the process for depositing and analyzing zinc tellurium (ZnTe) nanostructures as a test material for the contribution and development of thin film photovoltaic solar cells, through a design of experiment. Within the experimentation and characterization of the complete prototype cell, it's worth emphasizing that a photovoltaic response was obtained, which means that, despite its relative low efficiency, there are good parameters of voltage, current and filling factor, among others (parameters frequently evaluated in the performance of any type of photovoltaic cell) that allow to contribute in future works of this material in the manufacture of solar cells of this type. This project contributes to the development of thin film cells (of greater efficiency and economy) in our country and in the world.

**KEY WORDS:** Cadmium tellurium, thin film, photovoltaic cell.

## INTRODUCCIÓN

La ubicación geográfica de México resulta ideal para el aprovechamiento de la energía solar, ya que la irradiación global media diaria en el territorio nacional es de 5.5 kWh/m<sup>2</sup>/día, siendo uno de los países con mayor potencial en el mundo (Sener, 2013).

Lo anterior debe ser una especial motivación para generar nuestra propia tecnología y aprovechar el recurso solar disponible, lo cual se hace posible con una cuidadosa planificación y previsión de diferentes tipos de artefactos, capaces de convertir energía solar en electricidad Szokolay (1980), tal como lo es el desarrollo de diferentes tipos de celdas fotovoltaicas que hoy en día se investigan, dentro de las cuales existen las celdas de película delgada (thin-films technologies) hechas a base de diferentes materiales, como cobre (Cu), indio (In), galio (Ga) o selenio (Se) y el telurio de cadmio (CdTe), este último compuesto a partir de nanoestructuras de dos dimensiones, conocidas como nanocapas.

Los retos principales para las celdas fotovoltaicas de cualquier tipo, y especialmente para las de película delgada, son el incremento de la eficiencia de conversión de energía solar en energía eléctrica, la

reducción en sus costos de fabricación y el alcanzar un mayor tiempo de vida útil. Los grupos de investigación trabajan de forma interdisciplinaria e interinstitucional, sintetizando/modificando nuevos materiales y desarrollando nuevas configuraciones (Zuñiga et al., 2019)

El uso de diversos materiales en la fabricación de modernos dispositivos electrónicos va siempre acompañado de un profundo conocimiento de las características físicas que lo hacen funcionar (Mabil 2016), por lo que la caracterización de cualquier dispositivo es de suma importancia.

Por lo antes expuesto, el objetivo de este proyecto es encontrar los parámetros idóneos para diseñar una celda fotovoltaica basada en nanoestructuras (particularmente de Telurio de Zinc -ZnTe-), que permitan contribuir a los retos antes mencionados y caracterizar las nanoestructuras realizadas con diferentes matrices de experimentación para garantizar su funcionamiento. Dicho objetivo se basa en que existen estudios que confirman que las nanoestructuras de las películas delgadas de ZnTe son un excelente candidato para equipos optoelectrónicos (Rajeshkumar,2014), lo cual se llevó a cabo a través de 4 fases. La primera se refiere a la

búsqueda y análisis de literatura especializada para poder definir la técnica de depósito y los rangos de los parámetros disponibles en los equipos; en la segunda se estableció un diseño de experimentos que permitió definir el número de tratamientos, variables a considerar, así como los parámetros a modificar; en la tercera se evaluaron estos tratamientos a través de diferentes técnicas de caracterización; por último, en la cuarta fase, se realizó un dispositivo completo, es decir, se fabricó una celda solar completa con la película delgada óptima resultante de la nanoestructura del telurio de zinc (ZnTe) para poder comparar y realmente evaluar el desempeño completo. Existen experimentos con ZnTe pero con otras técnicas de depósito y arquitecturas distintas; de hecho, muy pocos grupos de investigación en el país están probando con ZnTe como capa tipo p+, entre los cuales figuran el CINVESTAV y el ESFM (en México), por lo que este trabajo es pionero al estudiar esta técnica.

La aportación de este trabajo consiste en proporcionar un método y rangos de los parámetros de los depósitos realizados con los mejores resultados, así como determinar la matriz del diseño de experimentos óptimo para el estudio y la caracterización de la celda solar

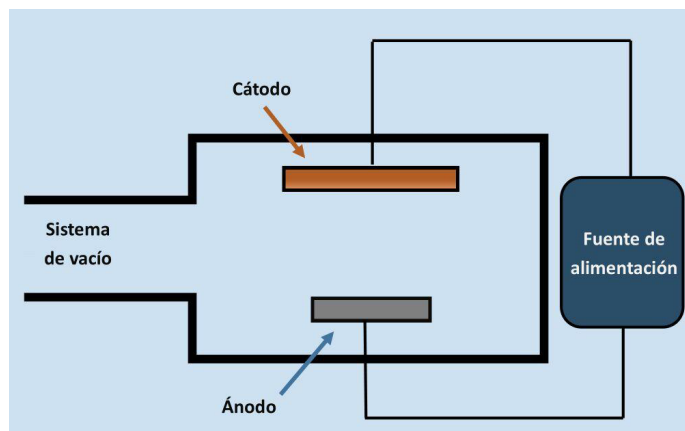
prototipo, obteniendo sus curvas de desempeño corriente vs voltaje, factor de forma y eficiencia para que sirvan de base para futuros estudios.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### La técnica de erosión catódica magneto planar

Actualmente, existen gran variedad de técnicas para obtener películas delgadas del material ZnTe (Rajeshkumar, 2014). Por mencionar algunas, se encuentran la evaporación térmica, vapor químico metal-orgánico (MOCVD), electroquímica, epitaxia de capa atómica (ALE) y recientemente impresión de pantalla y láser pulsado (PLD), además de la técnica de erosión catódica magneto planar (SPUTTERING), la cual puede presentarse en dos modalidades: corriente directa (DC) y radio frecuencia (RF), dispositivo este último que representa la técnica más simple donde se genera plasma. Tanto el diodo RF como el diodo DC son visualmente muy parecidos, y se logran mediante el arreglo ánodo-cátodo (ver figura 1), cuando se alcanzan las condiciones adecuadas de voltaje a través de los electrodos y una adecuada presión del gas, en este caso argón, el cual se descompone dentro de una descarga del plasma, donde se

descarga el potencial del plasma que es uniforme y muy cercano al potencial del ánodo.

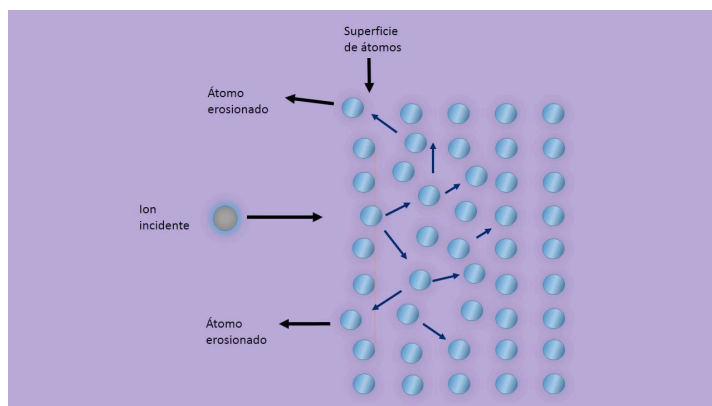


**Figura 1.** Esquema del diodo RF y DC del equipo Sputtering. Copyright 2015 por León-Bonilla (reimpreso con permiso).

Cerca del cátodo, existe un espacio oscuro donde se encuentra un campo eléctrico, los iones son acelerados rápidamente a través de la cubierta e impactan al cátodo; como parte de esta colisión, se erosiona material y se liberan electrones conocidos como secundarios, los cuales adquieren energía, que es usada al colisionar con átomos del gas y forma nuevamente más iones para mantener la descarga, como se muestra en la figura 2.

Esta manera de llevar a cabo el depósito de los materiales pertenece a las técnicas PVD (deposición física de vapor) la cual presenta diferentes ventajas

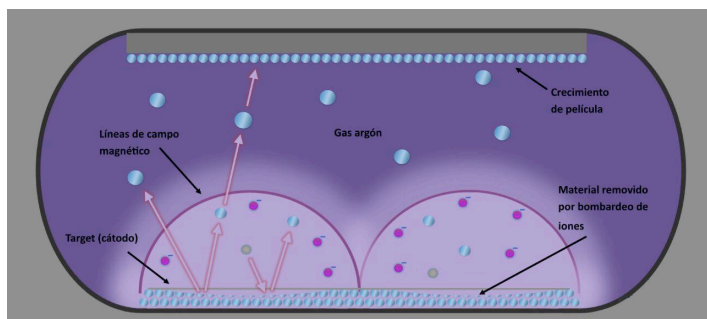
respecto a otras, entre ellas estequiometría deseable, equipos simples y un tiempo relativamente corto para el proceso de fabricación. Tales características han hecho que exista un gran interés en esta técnica en los últimos años, debido a que las películas que se obtienen presentan buena adherencia al sustrato y permiten obtener mayor uniformidad, incluso en áreas relativamente grandes.



**Figura 2.** Principio de erosión del equipo Sputtering. Copyright 2015 por León-Bonilla Reimpreso con permiso.

El depósito de películas por esta técnica, tiene aplicaciones en obleas de semiconductores, recubrimiento de herramientas, recubrimientos refractivos en ventanas de cristal, recubrimiento de superficies de automóviles, entre otras más; también es usada en el crecimiento de películas delgadas (thin-films technologies). Este proceso se lleva a cabo por medio de un plasma generado por partículas cargadas, las cuales son aceleradas hacia una

superficie (material a depositar), que es polarizado negativamente; este fenómeno produce la erosión de la superficie por el bombardeo de iones positivos (partículas cargadas) de un gas inerte normalmente, Argón (Ar), y el material erosionado se deposita posteriormente en el sustrato que se encuentra justo frente a él. Dicho proceso se lleva a cabo dentro de una cámara al alto vacío de unas cuantas unidades de presión (mTorr), como puede verse en la figura 3.



**Figura 3.** Sistema de erosión del equipo Sputtering.

Copyright 2015 por León-Bonilla Reimpreso con permiso.

Las características de erosión se relacionan con la energía de las partículas cargadas (iones) incidentes (Seshan, 2002).

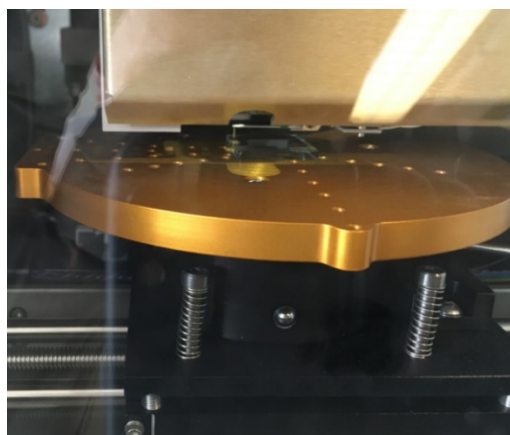
### **Técnicas de caracterización.**

La morfología nos permite conocer las características superficiales de la muestra, logrando medir, por

ejemplo, el tamaño del grano, medición que se logra mediante el uso de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM por sus siglas en inglés). La técnica SEM es una herramienta de investigación muy útil, y su principio de operación se apoya en el barrido de un haz de electrones sobre la superficie a analizar. Posterior al barrido, se obtiene un haz de electrones reflejado que es recolectado por un tubo de rayos catódicos; después se obtiene una imagen que representa las características de la superficie de la muestra. Para poder realizar dicha medición, es necesario que la muestra sea conductora eléctricamente, sin importar que esta se encuentre pulida, de no ser así, se debe de realizar un recubrimiento superficial metálico para los materiales no conductores. Una de las particularidades de la técnica SEM es el obtener aumentos de 10x a 300000x, logrando con esto gran profundidad de campo, y dependiendo del voltaje de aceleración del sistema experimental. El equipo utilizado para tal fin fue la marca Joel, modelo JSM-6360LV, con un poder de magnificación de 3 a 300000x, una resolución de 3.00 nm y un voltaje de aceleración de 0 a 30 kVolts, localizado en los laboratorios del departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV-IPN en su sección de electrónica de estado sólido.

### Perfilometría.

Todo tipo de material presenta superficies muy complejas y diferentes respecto a su interior. Materiales considerados con superficies relativamente lisas, al ser observados a pequeña escala, muestran una gran diversidad de formas geométricas. La perfilometría es una técnica que permite medir el espesor y la rugosidad superficial de los materiales a depositar, y el dispositivo con el que se realiza es conocido como perfilómetro. El principio de operación del dispositivo es simple, por medio del movimiento electromecánico de una punta fina en contacto con la superficie a medir, se realiza un barrido en dirección lineal, y las variaciones verticales que detecta esta punta se traducen en una señal eléctrica que origina el perfil de la muestra, y tales mediciones se registran en forma de gráfica. El perfilómetro empleado en este trabajo para las mediciones de espesores y rugosidad de las películas de  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  fue un perfilómetro Step Profiler modelo Dektak-IIA  $\pm 1$  nm (ver figura 4).



**Figura 4.** Perfilómetro step profiler

Fuente: elaboración propia

### Curvas de Corriente vs Voltaje.

La manera estándar de evaluar el desempeño de una celda solar fotovoltaica consiste en la determinación de las curvas de corriente-voltaje en corriente directa, bajo diferentes intensidades de radiación incidente en el dispositivo y diferentes longitudes de onda. Dicha medición se realiza en tiempo real entre los contactos mediante un dispositivo capaz de medir estos parámetros. Las mediciones de corriente-voltaje se obtienen con la aplicación de un potencial que inicia en 0 volts, condiciones de corto circuito (short circuit), a un potencial de circuito abierto (open circuit), bajo una iluminación constante. La corriente de corto circuito (ISC) y el voltaje de corto circuito (VOC) son parámetros que dependen de la intensidad de la radiación que incide en el dispositivo.

Para el caso de la corriente de corto circuito, esta se incrementa linealmente cuando la intensidad de la luz también se incrementa; en cuanto al voltaje de circuito abierto, este presenta un incremento logarítmico asintótico. Específicamente en este trabajo se utilizó el equipo Oriel Sol3A Class AAA Solar Simulators (simulador solar) para evaluar curvas de corriente y voltaje de celdas.

**Factor de forma (fill factor)**

Relacionado con las curvas corriente-voltaje, existe el llamado factor de forma, que es una expresión matemática que nos indica que tan cuadrada es la curva (ecuación 1) directamente proporcional con la calidad del módulo fotovoltaico, factor que relaciona la potencia máxima que es capaz de transformar el dispositivo con la potencia que realmente podría ofrecer, cuya magnitud usualmente varía entre 0.7 y 0.8.

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{SC}} \dots\dots \text{Ecuación 1}$$

Donde

FF = Factor de forma

VM = Voltaje máximo

IM = Corriente máxima

VOC = Voltaje de circuito abierto

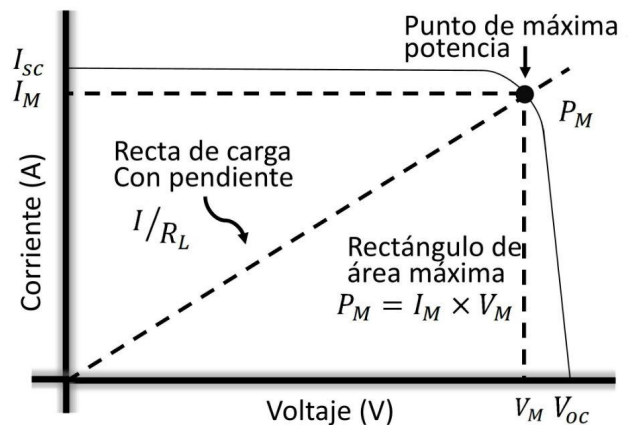
ISC = Corriente de circuito abierto.

**Eficiencia de conversión fotovoltaica.**

Esta se define como la razón entre la potencia generada en el punto de máxima potencia (PM) y la potencia de la radiación incidente (PI), expresada mediante la siguiente relación:

$$\eta = \frac{P_M}{P_I} \dots\dots \text{Ecuación 2}$$

Donde la potencia máxima está definida por  $P_M = V_M \times I_M$  y la potencia de la radiación incidente por  $P = G \times S$ , donde  $G$  es la irradiancia pico (1,000 W/m<sup>2</sup>) y  $S$  es la superficie activa de la celda solar (ver la figura 5).





**Figura 5.** Curva de parámetros eléctricos de una celda solar. Copyright 2015 por León Bonilla (reimpreso con permiso).

### Procesamiento de telurio de zinc

Como parte de la colaboración en el proyecto del Tecnológico Nacional de México (TecNM) “Procesamiento de nanoestructuras semiconductoras de telurio de zinc, por erosión catódica magneto planar y su aplicación en celdas fotovoltaicas”, se buscan obtener parámetros de depósito de este material para que contribuyan a la mitigación de la problemática descrita en la introducción, es decir, lograr que la manufactura del material sea económico y estable al paso del tiempo, entre otras características. Se experimentó con el material Telurio de Zinc (ZnTe) procesado por Sputtering-DC, que se depositó variando parámetros como potencia, temperatura de sustrato y presión en la cámara, y posteriormente se caracterizó para obtener morfología y perfilometría de las diferentes muestras con la intención de obtener las mejores características del ZnTe, que permitan lograr una nanoestructura que contribuya en la operatividad de conversión fotovoltaica de la celda solar. Una vez llevada a cabo la

experimentación en este material y encontrado los mejores parámetros de depósito, se procedió a llevar a cabo una celda prototipo completa con nanoestructuras de otros materiales desarrollados por otros investigadores previamente, para evaluar el desempeño del ZnTe en una celda solar completa de película delgada y obteniendo así las curvas de corriente-voltaje, factor de llenado y eficiencia de conversión final.

En la tabla 1 se muestra la matriz de experimentación para los depósitos de ZnTe.

**Tabla 1.** Matriz experimental de depósitos de ZnTe.

<b>Presión (mTorr)</b>	<b>Temperatura(°C)</b>
7.5	250°C
	350°C
	450°C
15	250°C
	350°C
	450°C

Fuente: elaboración propia

Las personas involucradas en el proyecto tienen ya una trayectoria en este ámbito; sin embargo, a los alumnos

involucrados, fue necesario capacitarlos en el manejo de los equipos del laboratorio, instrumental y cuidado de los mismos, utilizando el equipo de protección personal como guantes, cubrebocas y bata para el manejo de sustancias químicas, tales como agua destilada-desionizada, propanol, acetona y gas nitrógeno seco (N<sub>2</sub>), utilizadas en el lavado del vidrio conductor de área pequeña 2.5 x 2.5 cm. La figura 6 muestra el vidrio donde e hicieron los depósitos del material.



**Figura 6.** Depósitos de ZnTe realizados en vidrios TEC 15 marca Pilkington. Fuente: elaboración propia.

Para todo el procedimiento de depósito, es necesario lavar el sustrato para eliminar cualquier impureza que puede estar presente e interfiera en la calidad de la película depositada. Este proceso se inició con el lavado de seis sustratos de 2.5 x 2.5 cm, los cuales se colocan en un porta-sustrato diseñado para tal fin. El porta-sustrato es un recipiente refractario que contiene agua destilada-desionizada, que una vez contenidos los nueve sustratos en el refractario, éste se colocó en la parrilla eléctrica, regulando su temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición. El proceso se realizó durante un tiempo de 10 min., y se llevó a cabo la capacitación en el manejo del sistema de erosión catódica magneto planar en modo corriente directa (Sputtering - RF), marca Intercovamex, parte medular del procesamiento de películas delgadas, a través del cual se pueden depositar de forma consecutiva varios materiales diferentes a diferentes temperaturas de sustrato, ya que se encuentra equipado con varios magnetrones sin romper el vacío de la cámara.

Antes de iniciar el depósito, es importante recalcar que se hace la ruptura de vacío dentro de la cámara para evitar que entren contaminantes dentro de la misma. Los vidrios cuentan con una parte conductora (SnO<sub>2</sub>) y una parte no conductora; para este caso, dos vidrios se acomodaron

para que el material fuera depositado en la parte conductora, que se identifica con una prueba de continuidad con el multímetro, después se monta en el Sputtering y se enciende verificando que exista la presión adecuada. Se inicia entonces la generación de vacío en el interior de la cámara; en la capa del material que se va formando, así como en el panel del control, se encuentra un medidor que indica la cantidad de material que se deposita. Se eligió que el indicador esté en el filme 3, correspondiente al ZnTe.

Por otro lado, se verifica que el sustrato haya llegado a la temperatura deseada de depósito; al momento que todo está listo, se acciona el Shutter para que éste abra el obturador y, de esta manera, empieza el proceso de erosión en el material mediante el bombardeo de los iones, y posteriormente el crecimiento de la película del ZnTe en nuestro sustrato. Durante todo este proceso, se verifica continuamente que los parámetros sean estables y que el plasma no se interrumpa, y se corrobora observando por la mirilla que en el interior se estuviera erosionando el material.

La secuencia de apagado del equipo conlleva el alcance del crecimiento de la película al espesor, se cierra el Shutter que acciona nuevamente al obturador que cubre

el material, obteniendo como resultado que el material deje de seguir expuesto a la erosión. De esta forma, se continua con la disminución de 10W/min. hasta llegar a 0 y se apaga la fuente de acoplamiento; simultáneamente, se inicia la rampa de descenso de temperatura con la finalidad de no afectar de manera brusca los sustratos, después se apaga el flujómetro y se da inicio al paro de la bomba de vacío, verificando que llegué a las 0 rpm, además de proporcionar el tiempo para que el sistema alcance una temperatura de 80 °C, posibilitando el apagado de la fuente de calefacción y se lleva el equipo a paro general “off”; también se apaga el equipo de enfriamiento Chiller y se cierra el tanque de Argón y la compresora.

Al llegar a temperatura ambiente, se extraen las muestras para poder analizarlas. Así, para cada una de las muestras experimentales, en la tabla 2 se muestra el tiempo de depósito, la tasa de depósito medida en Angstrom/segundo y el espesor medido en nanómetros con la matriz experimental original como referencia.

Con base en estas mediciones, se determina que: 1.- Si la presión dentro de la cámara de vacío es baja, la tasa de depósito (rate, medido en Å/s) es mayor, no importando significativamente la temperatura, lo que contribuye a

llevar a cabo el depósito a un menor costo de fabricación (a menos energía menos precio). 2.- Si la presión dentro de la cámara de vacío es baja, el tiempo de depósito también es bajo, sin importar significativamente la temperatura, lo que contribuye a llevar a cabo el depósito a un mejor costo de fabricación. 3.- Se obtiene un mayor espesor de la capa de ZnTe si la temperatura es mayor, sin importar significativamente la presión de la cámara de vacío. Por lo tanto, se decide fabricar la celda completa con la presión de 7.5 MTorr y 350° C, para lo cual fue necesario llevar a cabo nuevamente los procedimientos de depósito para realizar el prototipo de la celda completa.

**Tabla 2.** Tiempo de depósitos, tasa de depósito, y espesor de ZnTe.

Fuente: Elaboración propia

Presión (mTorr)	Temperatura(°C)	Tiempo (minutos )	Rate (Å/s)	Espesor (nm)
7.5	250°C	20	4.8	483
	350°C	23:30	3.9	480
	450°C	21:40	4.4	578
15	250°C	37:30	2.4	415
	350°C	37:30	2.7	489
	450°C	36:20	2.7	561



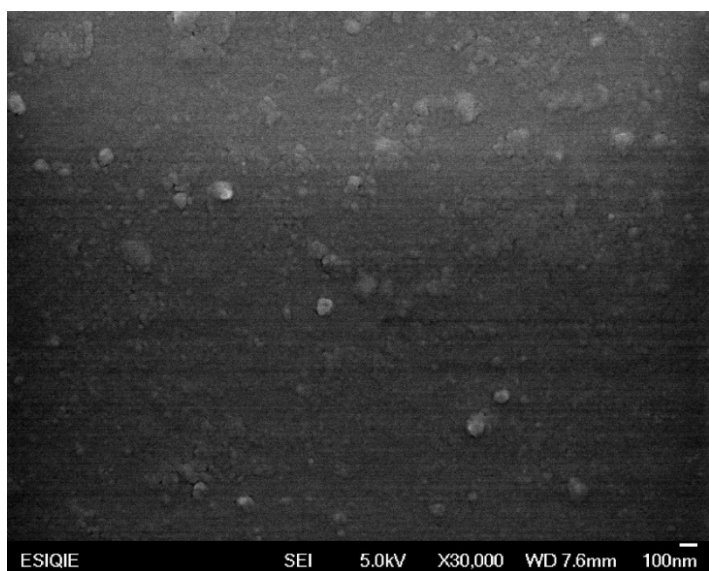
**Figura 7.** Celda completa experimental CS239.

Fuente: Elaboración propia

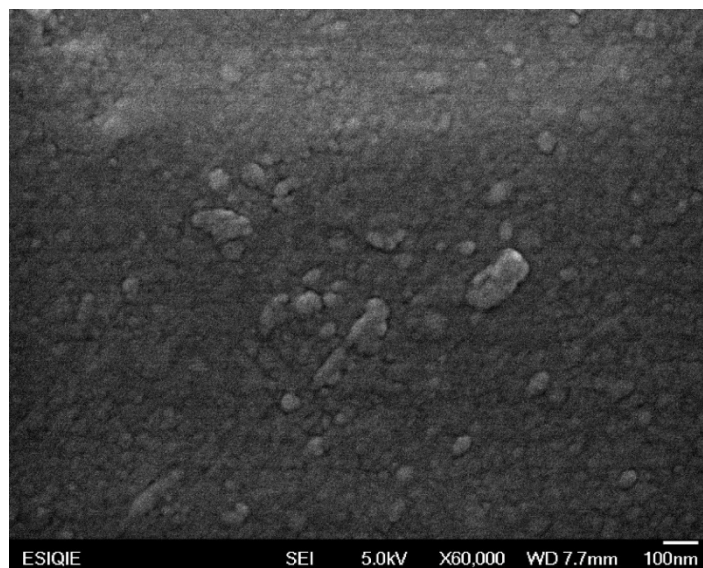
## RESULTADOS

### Morfología

Para las muestras de telurio de zinc en áreas 2.5 x 2.5 cm, se llevó a cabo un estudio de microscopia electrónica (SEM), como se puede ver en la figura 10 y 11, que corresponden a las muestras procesadas de ZnTe a 250 °C y de ZnTe a 350 °C, ambas con una presión de 7.5 mTorr, lo cual se lleva a cabo para observar a detalle la superficie del depósito y encontrar la correlación existente, si es que existe, entre la temperatura y el tamaño del grano cuando el grano es más uniforme las propiedades mecánicas y eléctricas del sustrato son mejores. Como puede verse en la figura 8, el tamaño del grano es más uniforme que con respecto al tamaño del grano de la figura 9



**Figura 8.** Morfología del tratamiento de ZnTe a 7.5 mTorr a 250 °C. Fuente: Elaboración propia



**Figura 9.** Morfología del tratamiento de ZnTe a 7.5 mTorr a 350 °C. Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, el estudio en la variación de la morofología del ZnTe aún esta en proceso, por lo que este trabajo contribuye al estado del arte de este tipo de celdas.

### Perfilometría

La tabla 3 muestra los espesores del ZnTe del lado conductor medido en nanómetros. Cabe señalar que esto se llevó a cabo con la colaboración de personal del laboratorio.

**Tabla 3.** Espesores medidos del lado conductor al ZnTe.

Presión (mTorr)	Temperatura(°C)	Espesor (nm)
7.5	250°C	483
	350°C	480
	450°C	578
15	250°C	415
	350°C	489
	450°C	561

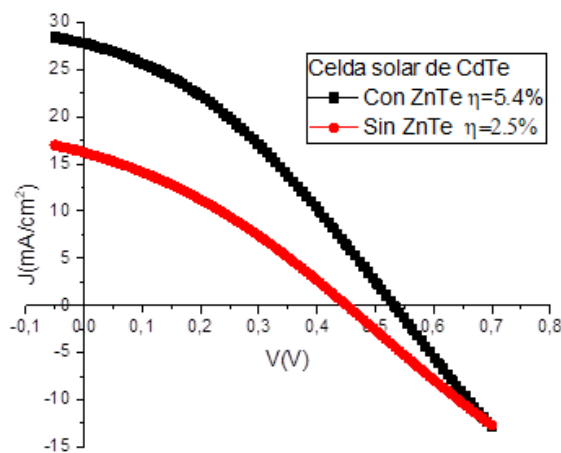
Fuente: elaboración propia

### Curva corriente vs Voltaje

Al emplear un semiconductor de tipo P+ de ZnTe, se ve beneficiado el contacto entre el semiconductor tipo P del Teluro de Cadmio (CdTe), otra de las capas utilizadas en la fabricación de las celdas de película delgada con el contacto posterior de cobre-molibdeno (Cu-Mo), de modo que se reduce la resistencia entre estos dos materiales, razón por la que se observa en la curva característica de corriente-voltaje un aumento en algunos de los parámetros fotovoltaicos.

En la figura 10 se muestra un comparativo entre dos celdas de película delgada de CdTe, una con ZnTe a una temperatura de 350 °C, presión de 7.5mTorr (la celda experimental completa llevada a cabo en este proyecto),

llamada CS239 por la numerología consecutiva del laboratorio, así como una celda solar sin el ZnTe. Como se logra apreciar, la celda experimental sin el ZnTe tiene una eficiencia de un 2.5%, y la celda experimental que cuenta con el material de estudio (ZnTe) tiene un porcentaje de eficiencia de conversión de 5.4% (más del doble), por lo que se demuestra que el ZnTe es un material altamente potencial para la construcción de celdas solares de película delgada. El material activo en la celda sin ZnTe es el telurio de cadmio (CdTe)



**Figura 10.** Comparativo de Curvas I-V de celda experimental CS239 con ZnTe y sin ZnTe

Fuente: elaboración propia

El hecho de introducir un material de tipo P+ mejora la interface (unión) entre el conductor tipo P (teluro de

cadmio en este caso) y el contacto posterior cobre-molibdeno).

## CONCLUSIONES

En el estudio de morfología de ZnTe, al ser depositado por la técnica de erosión magneto planar (Sputtering RF), se obtienen granos a temperaturas mayores de 350 °C. Al formar este tipo de morfología, podemos concluir que habría un contacto óhmico funcional para un material tipo P+.

Respecta a las mediciones de las celdas fotovoltaicas completas, vale la pena comentar que el empleo de una nanoestructura de ZnTe como semiconductor genera una respuesta fotovoltaica favorable al aumentar la eficiencia de conversión de 2.5 a 5%, el Voc de 450 a 531 mV, la Jsc (densidad de corriente) de 16 a 27 mA/cm<sup>2</sup> y el factor de llenado de 32 a 35.

Con todo lo anterior, se reafirma que el ZnTe es un material que vale la pena estudiar para poder fabricar celdas solares con las características semiconductoras que este material ofrece, específicamente las de película delgada. Asimismo, la comprobación al incremento de eficiencia que muestran estos resultados podría contribuir a reducir el consumo de

electricidad por medio de quema de combustibles fósiles, que es un recurso mayoritario en nuestro país, y con ello al desarrollo sustentable.

## BIBLIOGRAFÍA

- B.Rajeshkumar, B.Hymavathi, T.Subbarao (2014). Investigations on physical Properties of Nanostructured ZnTe Thin Films prepared by DC Reactive Magnetron Sputtering. Department of Physics, GITAM Institute of Technology, GITAM University. A.P.India.
- E. Zúñiga, D. P. Fernández, F. Salazar, E. Carvajal (2019) Octava Reunión Anual de la División de Estado Sólido – Sociedad Mexicana de Física
- León Bonilla (2015). Procesamiento y caracterización de Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> y su aplicación en celdas solares de CdTe. Tesis de maestría no publicada, Universidad Veracruzana.
- Mabil Pedro (2016) Modelado y Caracterización de un Fotodiodo Orgánico PEDOt:PSS/ZnPc. Tesis de Maestría no publicada, Centro de Investigación en micro y nanotecnología, Veracruz-Boca del Rio.

Pedro Mabil Espinoza, Jaime Martínez-Castillo,  
Alejandro Vega y Alfredo Márquez (2016).  
Modeling and Characterization of a  
Photodetector PEDOT:PSS, ZnPc. 2016 IEEE  
International Engineering Summit, II Cumbre  
Internacional de las Ingenierías (IE-Summit),  
Centro de Investigación en Micro y  
Nanotecnología y Centro de Investigación en  
Materiales Avanzados.

SENER (2012) Prospectiva de Energías Renovables  
2012-2026

SENER (2013) Estrategia Nacional de Energías 2013-  
2027

Szokolay, S.V., 1980, World Solar Architecture,  
Architectural Press, London. 216