

Metalización por Sputtering usando un horno porta-sustrato ad-hoc Sputtering metallization using an ad-hoc substrate holder heater

R. Toraya-Echeverría ^a, M. Loeza-Poot ^{b,*}, R. Mis-Fernández ^b, E. Camacho-Espinosa ^b, D. Meneses-Rodríguez ^c
E. Flores ^b

^a División Industrial, Universidad Tecnológica Metropolitana, Mérida, Yucatán, México.

^b Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, CINVESTAV-Unidad Mérida, Mérida, Yucatán, México.

^c IxM-CONAHCYT-Departamento de Física Aplicada, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, CINVESTAV-Unidad Mérida, Mérida, Yucatán, México.

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño, fabricación, y puesta a punto de un horno porta-sustrato utilizado para depositar películas delgadas metálicas por la técnica de Sputtering. El sistema debe ser capaz de soportar condiciones de alto vacío y alta temperatura, así como adecuarse dentro de una cámara de vacío en forma cilíndrica, teniendo como principal reto la distribución de los componentes al tratarse de un sistema compacto y de bajo costo. El horno porta-sustrato fue diseñado de forma octagonal mediante software CAD, usando para su fabricación acero inoxidable, cerámica, grafito, lámparas de cuarzo, entre otros. Para la caracterización del horno, se realizaron curvas de calentamiento ajustando la potencia de las lámparas. Con el fin de evaluar la funcionalidad del sistema, se depositaron y caracterizaron películas delgadas de Ag en sustratos de vidrio; así mismo, se realizó la metalización con Ag de los contactos posteriores de una celda solar de película delgada basada en CdTe.

Palabras Clave: Ag; forma octagonal; celda solar, contacto posterior, calentamiento.

Abstract

This work presents the design, fabrication, and tuning of a heater-substrate-holder used to deposit metallic thin films using the Sputtering technique. The system must be able to withstand high vacuum and temperature conditions, allowing in situ heating of the substrate during film deposition or a post-film heat treatment. The heater-substrate-holder furnace was designed in an octagonal shape using CAD software and manufactured with stainless steel, ceramics, and graphite, using quartz lamps as heat sources. For the characterization of the heater, heating curves were performed by adjusting the lamp power. Ag thin films were deposited and characterized by varying the deposition time. In order to evaluate the system functionality, Ag metallization of the rear contacts of a CdS/CdTe-based thin film solar cell was performed.

Keywords: Ag, octagonal shape, solar cell, back contact, annealing.

1. Introducción

La aplicación de materiales en forma de película delgada es muy amplia, entre ellos podemos mencionar los circuitos conformados por semiconductores complementarios de óxidos metálicos (CMOS, por sus siglas en inglés), pantallas de cristal líquido (LCD, por sus siglas en inglés), recubrimientos ópticos, celdas solares, entre otros. Las películas delgadas metálicas han tenido una amplia aplicación en el área de la electrónica, específicamente en la mejora de las propiedades de los

contactos eléctricos, dado que proporcionan dureza, estabilidad química, resistencia a la corrosión y contribuyen a las propiedades eléctricas y térmicas de los materiales recubiertos y los dispositivos electrónicos (Pecht, 2020). En el caso concreto de las celdas solares de película delgada, donde la colección de la corriente depende en gran medida de las propiedades de sus contactos metálicos, siempre es deseable buscar la menor resistencia eléctrica, que se traduce en una mayor eficiencia de fotoconversión (Heredia-Ríos, *et al.*, 2024). Es por ello, que una de las áreas de investigación que

*Autor para la correspondencia: mariely_lop@hotmail.com

Correo electrónico: raultrec@gmail.com (Raúl Alberto Toraya-Echeverría), mariely_lop@hotmail.com (Mariely Isabel Loeza-Poot), rimis@cinvestav.mx (Ricardo Javier Mis-Fernández), ed_cam_es@hotmail.com (Eduardo Camacho-Espinosa), dmeneses@cinvestav.mx (David Meneses-Rodríguez), eduardo.flores@cinvestav.mx (Eduardo Ernesto Flores Cuevas).

Historial del manuscrito: recibido el 09/09/2024, última versión-revisada recibida el 03/11/2024, aceptado el 04/11/2024, publicado el 12/12/2024. DOI: <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial5.13699>



ha cobrado gran atención es el uso de recubrimientos para el contacto posterior, proceso conocido como metalizado. Se ha reportado que metalizados con Au, Ti y Cr han dado como resultado el efecto deseado de mejorar la eficiencia de la celda solar (Li, *et al.*, 2016). Un aspecto importante a considerar en este proceso es el tratamiento térmico, ya que, estudios realizados sobre otros metales, como el Mo, han resultado en cambios favorables en las propiedades de este metal (Cha, *et al.*, 2011), por lo que es necesario tener la capacidad de variar la temperatura del sustrato con el fin de estudiar sus efectos.

Uno de los metales ampliamente usados como contacto eléctrico en las celdas solares de primera generación basadas en silicio es la plata (Ag), mostrando una mejora en el rendimiento del dispositivo (Ebong, *et al.*, 2012), lo cual lleva a la necesidad de realizar una investigación detallada de este material para ser aplicada en la metalización de los contactos en las celdas solares de película delgada. En este tipo de celdas, unas de las técnicas de depósito que más se utiliza es la pulverización catódica (Sputtering), esto debido a que ofrece ventajas como alta velocidad de depósito, uniformidad, control y escalabilidad (Mattox, 1998). Sin embargo, uno de los retos a los que se enfrenta es la implementación de sistemas compactos, donde el volumen de la cámara de vacío resulta limitado para la distribución de los componentes.

Como ya se ha mencionado, la metalización es un tema de suma importancia para la mejora de las propiedades de los contactos eléctricos en diversos dispositivos, sin embargo, durante el depósito del material metálico, se puede requerir de un proceso adicional que implique el calentamiento del material a recubrir (sustrato) ya sea durante o después de realizar la metalización; lo anterior implica hacer uso de un calentador de sustratos u horno porta-sustrato como se denomina en este trabajo. Con base en ello, este manuscrito presenta dos puntos clave del proceso de metalización: 1) la fabricación de un horno porta-sustrato y 2) la aplicación del metalizado en celdas solares. Tomando en cuenta que el proceso se llevará a cabo dentro de un sistema de Sputtering compacto, el cual opera en condiciones de alto vacío. Dado que se cuenta con una cámara de vacío cilíndrica, el horno debe ser suficientemente pequeño para entrar en la cámara, pero tener suficiente espacio para albergar en su interior un sistema de calentamiento. Una vez construido el horno porta-sustrato, se depositarán películas delgadas de Ag, las cuales serán caracterizadas estructural, morfológica y eléctricamente (DRX, SEM, método de cuatro puntas, respectivamente), analizando los efectos que propicia la temperatura. Finalmente, se examinará la funcionalidad del sistema fabricado mediante la metalización de los contactos eléctricos de una celda solar, comparando las curvas J-V obtenidas antes y después del metalizado.

2. Detalles experimentales

Este trabajo tiene como objetivo la fabricación de un horno porta-sustrato para ser utilizado en el depósito de películas delgadas metálicas mediante la técnica de RF-Sputtering. Por lo tanto, el estudio se llevó a cabo en cuatro etapas:

- **Etapla 1:** El diseño mediante software CAD con las especificaciones requeridas.

- **Etapla 2:** La construcción, ensamble y puesta a punto del horno porta-sustrato.

- **Etapla 3:** El depósito y caracterización de las películas delgadas metálicas.

- **Etapla 4:** Verificación de la funcionalidad del sistema mediante la aplicación del metalizado en un dispositivo fotovoltaico.

A continuación, se describen los procesos, los materiales y las técnicas de caracterización empleadas en cada una de estas etapas.

2.1. Diseño mediante software CAD

Como primer paso, se consideraron las dimensiones de la cámara de vacío, la cual tiene una forma cilíndrica y está fabricada de vidrio Pyrex® con un diámetro interior de 13.3 cm y una altura de 30 cm, cuya base y tapa son de acero inoxidable. Considerando las restricciones y especificaciones descritas anteriormente, se diseñó el horno porta-sustrato mediante el software SolidWorks 2019 usando la función de chapa metálica. El diseño se basa en encontrar la forma y la distribución de los componentes que permitan optimizar el espacio y obtener el depósito adecuado de algún metal. La Figura 1 muestra un esquema de las dimensiones con la que cuenta la cámara de vacío y los espacios para el posicionamiento del horno porta-sustrato, contando con una altura aproximada de 20 cm, correspondiente a la distancia comprendida entre la parte superior del magnetrón y la tapa de la cámara.

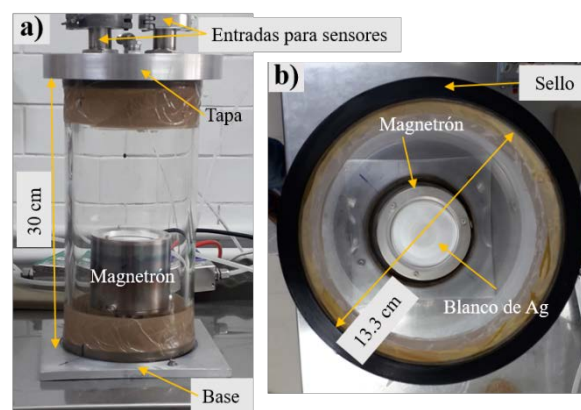


Figura 1. Cámara de vacío donde se adecuará el horno porta-sustrato para el depósito de películas metálicas: a) vista frontal y b) vista superior.

2.2. Construcción, ensamble y puesta a punto del horno porta-sustrato

Los materiales seleccionados para la fabricación del horno porta-sustrato deben de soportar las condiciones de vacío, atmósfera controlada y temperatura a la que serán sometidos durante el proceso de metalización, puesto que su estabilidad evitará cualquier tipo de contaminación al interior de la cámara de vacío durante el depósito. Uno de los materiales que cumple con estas características es el acero inoxidable 316 (A. inox), con el cual fue fabricado el cuerpo del horno. En la Tabla 1, se

enlistan los materiales, algunas de sus especificaciones y la función que cumplen dentro del diseño.

Una vez maquinados todos los componentes del sistema, las piezas fueron sometidas a un proceso de limpieza que consistió en lavados sucesivos de 10 min dentro de un baño ultrasónico en soluciones de agua + jabón, acetona y metanol, cada uno seguido de un enjuague con agua destilada. Finalmente, los componentes fueron secados y ensamblados.

La caracterización del sistema se llevó a cabo suministrando diferentes potencias (20, 40 y 60 %) a las lámparas con ayuda de un autotransformador variables (Variac) y monitoreando la temperatura alcanzada por el sustrato. Lo anterior se realizó en condiciones de vacío a una presión de 1×10^{-5} Torr y partiendo de temperatura ambiente.

Tabla 1. Materiales utilizados para la fabricación del horno.

Materiales	Detalles	Función
Lámina A. inox	d=0.6 mm	Formar el cuerpo
Tornillos A. inox	Ø=318 mm	Sujeción de piezas
Lámparas de cuarzo	100 W	Fuente de calor
Placa de grafito	d = 8 mm	Conducir el calor
Sockets cerámicos	h = 35 mm	Soporte lámparas
Lamina cerámica	d = 1 mm	Aislante eléctrico
Cable fibra de vidrio	---	Conductor
Termopar	Tipo k	Sensor de temp.

d: espesor, Ø: diámetro, h: altura, temp.: temperatura

2.3. Depósito y caracterización de películas metálicas

Para el proceso de metalización se escogió la técnica de RF-Sputtering, la cual tiene la ventaja de generar recubrimientos de forma controlada, homogénea y repetible; en este trabajo el metal seleccionado fue la plata (Ag), dada las propiedades eléctricas que presenta. Las películas delgadas se depositaron sobre sustratos de vidrio Corning® de $50 \times 25 \text{ mm}^2$. El proceso inició con el corte y lavado de los sustratos (similar al descrito para las piezas metálicas). Usando como material fuente un blanco de Ag de la marca Kurt J. Lesker con diámetro de 76.38 mm y una pureza de 99.99 %. La cámara de vacío se evacuó a una presión base de 1×10^{-5} Torr. Los depósitos se realizaron en una atmósfera de argón (Ar), utilizando un flujo de 3 SCCM y una presión de trabajo de 20 mTorr en vacío dinámico, mientras que la potencia de RF-Sputtering se estableció en 60 W.

Con el fin de conocer la razón de depósito, se realizaron tres muestras a temperatura ambiente (TA) y variando el tiempo depósito (5, 10 y 15 min). Posteriormente, se definió un tiempo para obtener un espesor aproximado de 200 nm. A partir de ello, se analizaron los efectos de la temperatura depositando películas delgadas de Ag variando la temperatura del sustrato (TA y 100 °C) o realizando un tratamiento térmico (TT) posterior al depósito a TA. Las muestras obtenidas se caracterizaron mediante las siguientes técnicas:

- **Caracterización estructural.** Difracción de rayos X (DRX), usando un difractómetro Siemens D-5000. Este equipo cuenta con una fuente de radiación monocromática de $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$) a 34 kV y 25 mA. Las mediciones se realizaron en la configuración de haz rasante con un ángulo de inclinación de 3° , haciendo un barrido de 2θ desde 10° hasta 80° , con una velocidad de paso de 0.02° cada 3 segundos.

- **Caracterización morfológica.** Los espesores se obtuvieron mediante perfilometría, usando un perfilómetro de contacto KLA Tencor modelo D-120 haciendo barridos de 2 y 5 mm en diferentes zonas de las muestras. Las imágenes de la superficie y sección transversal de las muestras fueron obtenidas mediante un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo (FE-SEM, por sus siglas en inglés) Jeol JSM-7600F.

- **Caracterización eléctrica.** La resistencia eléctrica se obtuvo por el método de cuatro puntas, utilizando un sistema desarrollado en el laboratorio que consiste en un cabezal con puntas separadas en 1 mm. El procesamiento de los datos se llevó a cabo con un equipo 2420 Source-Meter de la marca Keithley.

2.4. Metalizado de una celda solar

La funcionalidad del sistema fue evaluada mediante la metalización de los contactos posteriores de una celda solar de película delgada basada en CdTe con una estructura compuesta por Mo/Cu/CdTe/CdS/ZnO/ITO/Vidrio. Las técnicas de depósito implementadas en la fabricación del dispositivo fotovoltaico fueron el RF-Sputtering y la sublimación en espacio cercano (CSS, por sus siglas en inglés), los detalles del depósito y los procesos que se llevaron a cabo se describen en un trabajo previo (López-Sánchez, *et al.*, 2022). La celda fue caracterizada mediante curvas de densidad de corriente-voltaje (J-V) antes y después de la metalización, midiéndolas en un sistema desarrollado en el Laboratorio, el cual consta de una matriz de lámparas halógenas calibradas con una celda de silicio a la intensidad de 1 Sol. Las mediciones se llevaron a cabo a temperatura ambiente en un rango de voltaje de -0.4 a 1.0 V, usando un Keithley 2420, controlado con un software Lab View diseñado para la adquisición y análisis de los datos.

3. Análisis de resultados y discusión

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las tres etapas en las que se dividió el trabajo.

3.1. Etapa 1: Diseño mediante software CAD

Considerando la forma cilíndrica que posee la cámara de vacío y la necesidad de dejar al menos 1 cm de distancia entre sus paredes y las del horno, se cuenta con un volumen máximo comprendido en un círculo con diámetro de 11.3 cm (100.3 cm^2) y una altura de 6 cm. Esta última fue seleccionada con base a la altura de los sockets cerámicos, la cual es de 3.5 cm y se han dejado 2.5 cm de separación con la tapa. Por tanto, como primera opción se contempló una forma cilíndrica para el horno, tal como se suelen fabricar típicamente (Márquez-Herrera, A., *et al.*, 2010) (Rendón, G., *et al.*, 2012) y adicionalmente, se consideró una forma octagonal (inscrita en el círculo), los diseños obtenidos con sus respectivas medidas se muestran en la Figura 2a y 2b, y con mayor detalle en los Apéndices A y B. En términos de fabricación la forma cilíndrica sería la más sencilla de realizar dado que estaría formada por una única lamina sin dobleces, mientras que, por cuestiones de espacio, la forma octagonal abarcaría un menor

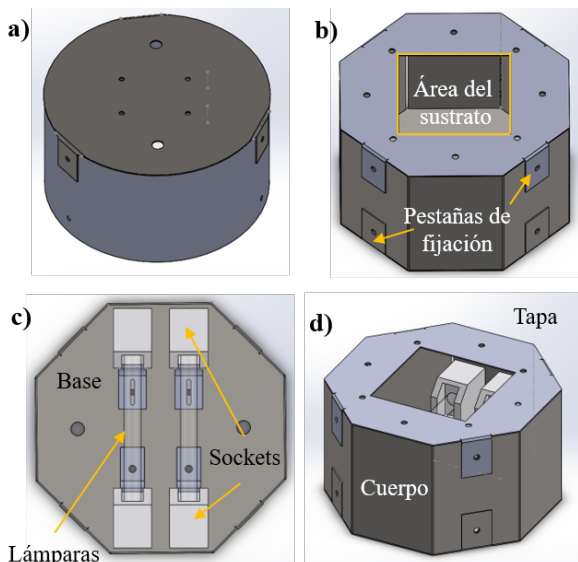


Figura 3. (a y b) Diseños propuestos para la fabricación del horno, c) vista interior y d) vista general.

volumen. Analizando ambas posibilidades desde el punto de vista de la optimización del espacio para el sistema de Sputtering compacto y la fijación de los componentes dentro del horno, se optó por la forma octagonal, cuyas paredes también quedarían más alejadas de la pared principal de la cámara, reduciendo de esta forma su calentamiento.

El diseño resultante fue un prisma octagonal de 42.33 mm de lado y una altura de 60.6 mm, con un espacio cuadrangular para colocar el sustrato (50×50 mm²). El cuerpo del horno se diseñó como una lámina de una sola tira con dobleces de 45°. Se incluyeron todos los agujeros para tornillos y en la tapa se usaron pestañas exteriores para la sujeción de estas en el cuerpo del horno. En cuanto al sistema de calentamiento, se usaron lámparas halógenas de 7.8 cm de longitud, que cuentan con un soporte cerámico y dadas las dimensiones del sistema,

fue posible colocar dos lámparas con una distancia entre ellas de 12 mm. En las Figuras 2c y 2d se muestra el diseño completo del horno porta-sustrato con sus componentes principales.

3.2. Etapa 2: Construcción, ensamble y puesta a punto

Para la construcción del horno se imprimió el diseño realizado en SolidWorks en hoja tamaño tabloide y se adhirió a una lámina de acero inoxidable para tener una plantilla y poder hacer el corte manual (Figuras 3a); se perforaron y roscaron las posiciones de los tornillos (Figuras 3b). Cabe resaltar que el uso de A. inox para la fabricación del horno se hizo con base a las características que presenta como lo son su alta resistencia a la corrosión, baja tasa de degasificación, resistencia a las ralladuras en comparación con el aluminio, la posibilidad de conexiones de bridas, entre otras. Por lo anterior, este material es ampliamente usado en la construcción de cámaras o componentes en la tecnología de vacío (Leybold, 2016). Adicionalmente, la disponibilidad del A. inox, la facilidad de maquinación y la relación costo beneficio con respecto a otros materiales lo hacen adecuado para su implementación en este tipo de trabajos.

Como se había mencionado anteriormente, dos lámparas halógenas fueron utilizadas como fuente de calor, cuyos sockets cerámicos se sujetaron a la base del horno mediante unas pestañas en forma de L y se conectaron eléctricamente en un circuito en paralelo (Figura 3c), esto con el fin de que el funcionamiento de cada una de las lámparas sea independiente. El hecho de utilizar las lámparas en la fabricación del horno, se debió a que en caso de usar una atmósfera reactiva estas pueden ser más resistentes a la corrosión puesto que su filamento se encuentra recubierto con el vidrio de cuarzo; además, de su bajo costo en comparación con algunos materiales que se utilizan para la resistencia. Adicionalmente, se debe de considerar la flexibilidad y sencillez del sistema, puesto que al ser compacto el uso de las lámparas facilita su

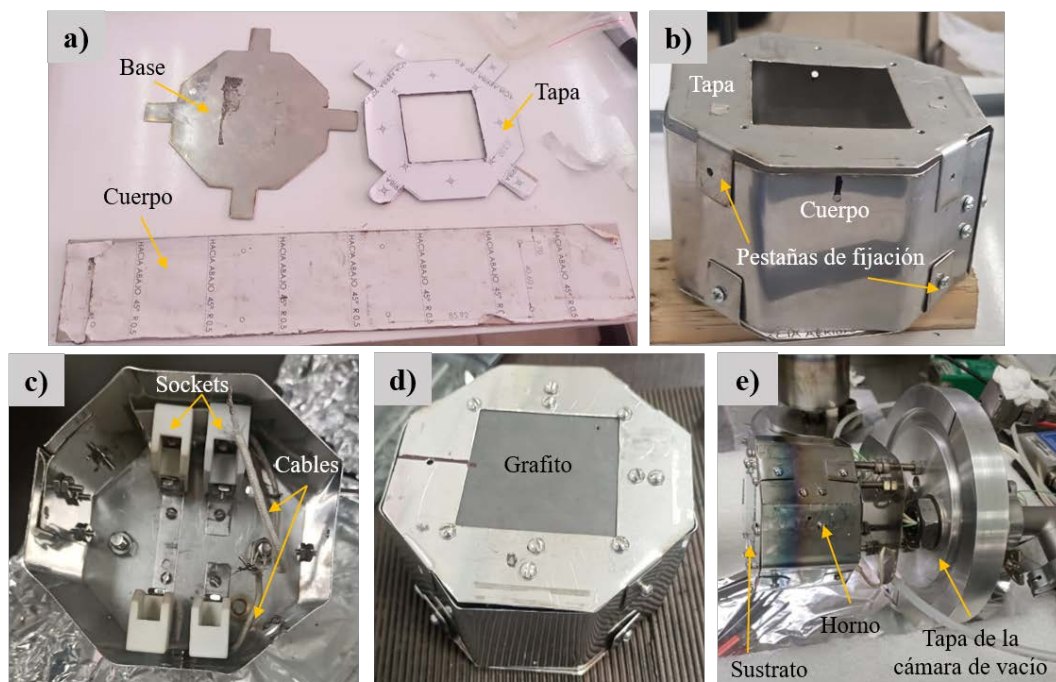


Figura 2 Horno porta-sustrato: a) corte y b) maquinación de la lámina de A. Inox; instalación de c) las lámparas y d) el grafito. e) Montaje del horno en la cámara de vacío.

manejo y remplazo, esto en comparación con algún sistema de resistencias las cuales se encuentran embebidas en algún soporte cerámico. Cabe resaltar que el uso de sockets cerámicos presenta la ventaja de ser estables a las altas temperaturas y un aislante eléctrico, lo que lo hace idóneo para ser aplicado en el diseño. Para el soporte del sustrato, se utilizó una placa de grafito cuadrada de 7 cm de lado y 0.8 cm de espesor, la cual en la parte lateral cuenta con una perforación para embeber el termopar y poder medir la temperatura (Figura 3d). La selección del grafito como material conductor del calor generado por las lámparas hacia el sustrato se realizó tomando en consideración su excelente conductividad térmica y la alta resistencia a los cambios de temperatura. Una vez ensambladas todas las piezas, se procedió a montar el horno porta-sustrato dentro de la cámara de vacío, fijándolo en la tapa de la misma con ayuda de unos tornillos que se sujetan a la base del horno (Figura 3e).

Para llevar a cabo la caracterización del horno, se realizó vacío a la cámara hasta alcanzar una presión base de 1×10^{-5} Torr. Posteriormente, se conectaron las lámparas a un autotransformador Variac ajustando la potencia total en 20, 40 y 60 %, y dejando evolucionar la temperatura del sustrato desde temperatura ambiente (TA) hasta 250 °C aproximadamente, tomando un registro cada 2 min, los resultados obtenidos se presentan en la Figura 4.

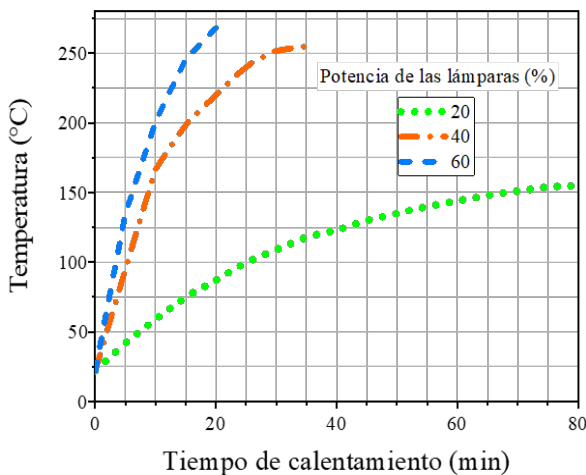


Figura 4. Variación de la temperatura del sustrato en función del tiempo, usando diferentes potencias en las lámparas.

Aumentando la potencia suministrada a las lámparas se alcanza una mayor temperatura con un menor tiempo de calentamiento. Se tiene un aumento en la temperatura durante los primeros 20 min de TA a 85, 220 y 270 °C para las potencias de 20, 40 y 60 %, respectivamente. Aunque es posible alcanzar mayores valores de temperatura con el horno diseñado en este trabajo, se decidió no sobrepasar los valores registrados puesto que al contar con un sistema de dimensiones reducidas se corre el riesgo de transferir calor por radiación hacia otros componentes dentro de la cámara de vacío y dañarlos (Omar, *et al.*, 2022).

3.3. Películas metálicas: depósito y caracterización

Los depósitos de las películas delgadas de Ag se realizaron sobre sustratos de vidrio, usando las condiciones

experimentales descritas en la sección anterior y variando el tiempo de depósito en 5, 10 y 15 min. El espesor de las muestras obtenidas en función del tiempo se presenta en la Figura 5, mostrando un crecimiento lineal. Correlacionando ambos parámetros, el espesor (d) de las películas de Ag puede escribirse en función del tiempo de depósito (t) como se muestra en (1). Teniendo una razón de depósito de 17.5 nm/min. A partir de los resultados anteriores, se estimó un tiempo de depósito de 11.5 min para obtener una película de aproximadamente 200 nm.

$$d = 17.5 * t - 28.3 \quad (1)$$

En la Figura 5b se muestra la imagen FE-SEM de la sección transversal para la película de Ag depositada durante 5 min, teniendo una medida del espesor de 65 nm, un valor muy cercano al obtenido en las mediciones de perfilometría. Por otro lado, la morfología superficial de la película está conformada por granos redondos con diámetros menores a los 100 nm, tal como se puede apreciar en la Figura 5c.

Una vez establecido el espesor, se procedió a depositar tres películas de Ag, dos de ellas a TA y una con temperatura de sustrato de 100 °C. Adicionalmente, la muestra depositada a TA fue sometida a un tratamiento térmico (TT) posterior al depósito a 100 °C. Se analizaron los efectos de la temperatura en las propiedades estructurales y eléctricas de la Ag. En la Tabla 2 se muestra la nomenclatura y los detalles experimentales de estas.

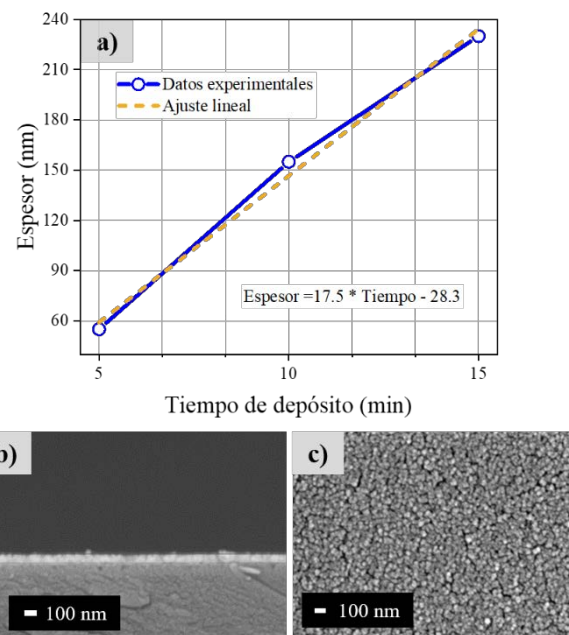


Figura 5. a) Determinación de la razón de depósito de las películas delgadas de Ag. Imágenes FE-SEM en b) sección transversal y c) superficial.

Tabla 2: Nomenclatura de las muestras depositadas a diferentes temperaturas

Muestra	Temperatura (°C)	TT (°C)
A1	TA	---
A2	100	---
A3	TA	100

La Figura 6 presenta los patrones de DRX de las muestras de Ag, en todos los casos estos coinciden con la carta JCPDS # 01-087-0717 correspondiente a la fase cristalina cúbica de Ag, mostrando una orientación preferencial a lo largo del plano (111), la cual es la estructura de crecimiento típica de la Ag (Ning, et al., 2023). Se puede apreciar que la temperatura a la cual se sometió el sustrato durante y después del depósito no afectan la estructura cristalina del material y tampoco da lugar a la formación de fases secundarias identificadas por DRX, esto debido a que no se encontró coincidencia con picos diferentes de Ag.

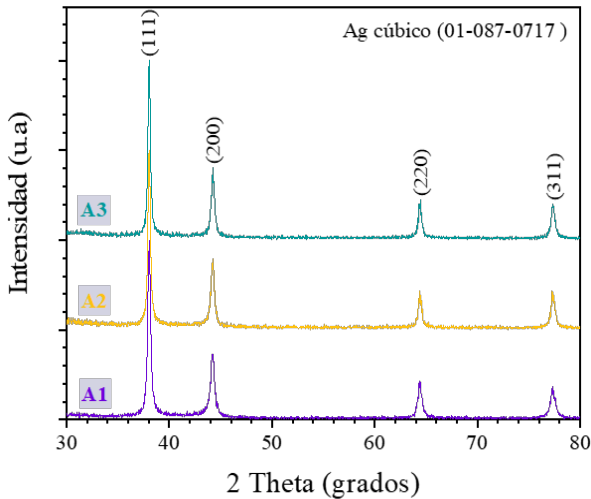


Figura 6. Patrones de DRX de las películas delgadas de Ag.

En la Figura 7 se muestra la resistividad eléctrica (ρ) de las películas de Ag (A1, A2 y A3) obtenida mediante el método de cuatro puntas. Dicho valor fue calculado usando la ecuación (2) reportada por Huang (Huang *et al.*, 2007), donde s representa la distancia de separación entre las puntas (1 mm), R es el valor medido de la resistencia eléctrica y B_0 es el factor de corrección entre la razón del espesor de la película (d) y el espaciado de las puntas (s), en este caso para el que $d/s < 1$ se tienen que $B_0 = 1.5064(s/d)$.espaciado de las puntas (s), en este caso para el que $d/s < 1$ se tienen que $B_0 = 1.5064(s/d)$.

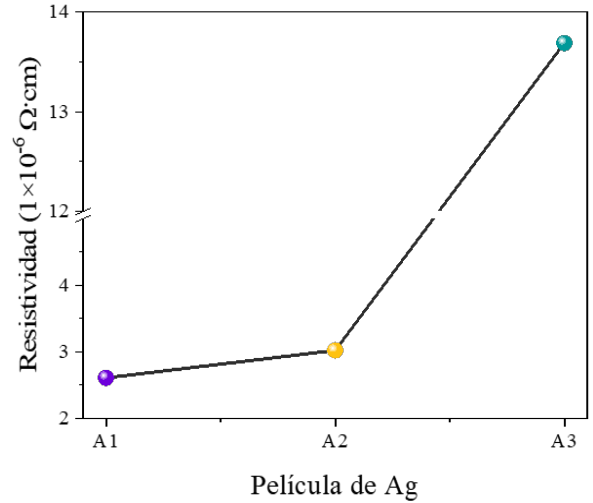


Figura 7. Resistividad eléctrica de las películas delgadas de Ag depositadas bajo diferentes condiciones de temperatura.

En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos, donde se puede observar que la ρ se encuentra en el orden de $10^{-6} \Omega \text{cm}$, teniendo el valor mínimo la muestra depositada a TA (A1), mientras que el depósito con TT presenta el máximo valor.

$$\rho = \frac{2\pi s}{B_0} R \quad (2)$$

3.4. Evaluación de la funcionalidad: metalización de las celdas solares

Como se explicó al principio, el sistema del horno porta-sustrato diseñado y fabricado en este trabajo tiene como función principal la metalización de dispositivos electrónicos, uno de los cuales puede ser las celdas solares. Con el fin de evaluar la funcionalidad del sistema, se realizó la metalización de los contactos posteriores de una celda solar de película

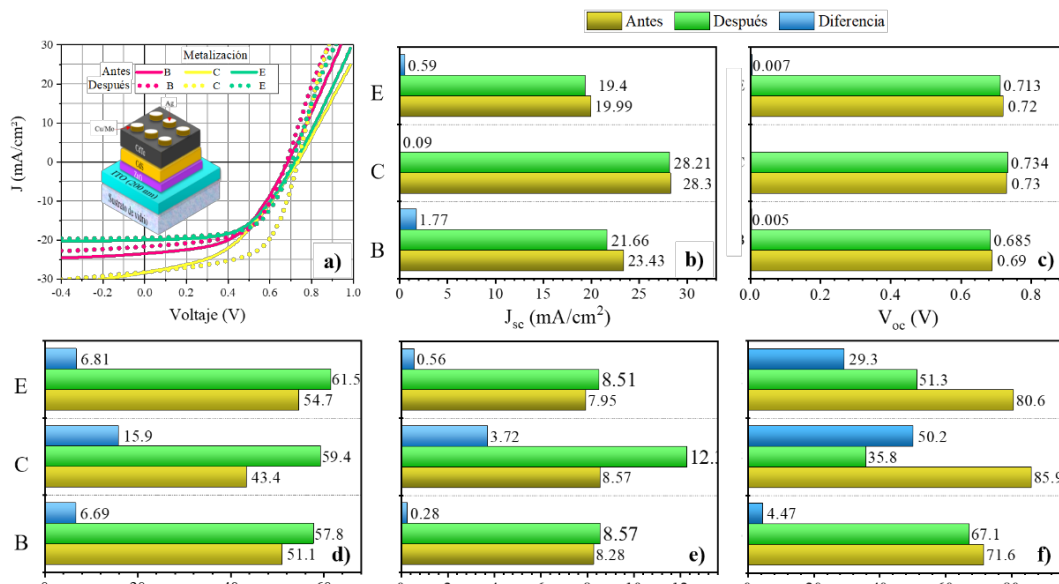


Figura 8. a) Curvas J-V y parámetros eléctricos (b) J_{sc} , c) V_{oc} , d) FF, e) η y f) R_s) de la celda solar de CdS/CdTe antes y después del metalizado con Ag.

delgada basada en CdS/CdTe. Con el fin de cuantificar los cambios que este proceso produce en el desempeño del dispositivo, se llevaron a cabo mediciones de las curvas J-V antes y después del proceso de metalización, ver Figura 8.

El dispositivo fotovoltaico que se analizó, está conformado por 6 celdas individuales con un área de 0.13 cm^2 nombradas en orden alfabético (A-F), cabe mencionar que solo tres celdas (B, C y E) son presentadas puesto que las otras se encontraban en corto circuito. En todos los casos, después del proceso de metalización (líneas punteadas) se observa una mejora en la forma de la curva, con una tendencia a incrementar la cuadratura de la región localizada en el cuarto cuadrante. De las curvas J-V es posible obtener los parámetros eléctricos del dispositivo como son la corriente de corto circuito (J_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el factor de llenado (FF), la resistencia en serie (R_s) y la eficiencia de fotoconversión (η). Los valores correspondientes a estos parámetros se muestran en la Figura 8 para cada una de las celdas analizadas, antes y después de realizarse el proceso de metalización, así mismo en barras azules se presenta la diferencia entre ambos. En las gráficas se puede apreciar que las celdas B, C y D tuvieron un incremento en todos los parámetros eléctricos, siendo los más notorios la reducción de la resistencia en serie y el incremento del factor de llenado, este último, se encuentra directamente relacionado con la forma cuadrada de las curvas J-V (Qi, *et al.*, 2013). En conjunto, todos estos cambios generaron una mejora en la eficiencia de hasta en 3.72 %, pasando de 8.5 a 12 % para la celda C, corroborando de esta forma los beneficios que se obtienen al metalizar los contactos eléctricos con una pequeña capa (200 nm) de un material conductor en este caso, de plata, tal como recomiendan otros autores (Peña, *et al.*, 2011).

Conclusiones

Fue posible la adecuación de un sistema de Sputtering compacto para llevar a cabo un proceso de metalización. Para ello se diseñó y fabricó un horno porta-sustrato de forma octagonal, el cual permitió la optimización del espacio tanto de la cámara de vacío como al interior del horno, facilitando de esta forma la disposición de todos los elementos que los conforman. Con dicho sistema se depositaron películas delgadas de plata (Ag) con estructura cúbica y resistividad eléctrica del orden de $10^3 \Omega \cdot \text{cm}$. La funcionalidad del sistema fue evaluada mediante la metalización con Ag de los contactos posteriores de una celda solar de película delgada con una estructura conformada por Mo/Cu/CdTe/CdS/ZnO/ITO/Vidrio. La caracterización eléctrica de las celdas antes y después del proceso de metalización indican que existe una mejora en el desempeño del dispositivo después de la aplicación de una capa de 200 nm de Ag depositada a 100°C , mostrando cambios significativos en el factor de llenado y la resistencia en serie. Dando como resultado un incremento de la eficiencia de fotoconversión en 3.7 puntos porcentuales, pasando de 8.5 a 12.2 %.

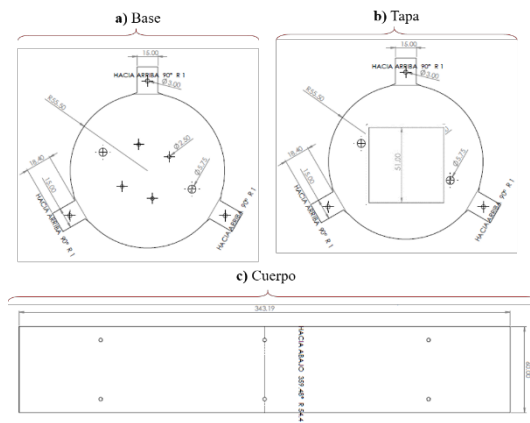
Agradecimientos

A LANNBIO Cinvestav-Unidad Mérida por las mediciones (FOMIX-Yucatán No. 2008-108160). M. Loeza-Poot (CVU: 556332) agradece al CONAHCYT por la beca posdoctoral.

Referencias

- Cha J.H., Ashok, K., Kissinger N.J.S., Ra, Y.H., Sim J.K., Kim J.S., Lee C.R., (2011). Effect of thermal annealing on the structure, morphology, and electrical properties of Mo bottom electrodes for solar cell applications. *Journal of the Korean Physical Society* 3 59, 2280-2285. DOI: 10.3938/jkps.59.2280
- Ebong A., Chen N., (2012). Metallization of crystalline silicon solar cells: A review. *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies* 2012, 102-109. DOI: 10.1109/HONET.2012.6421444
- Heredia-Rios, M.J., Henández-Martínez, L., Linares-Aranda, M., Moreno-Moreno, M., Flores Méndez, J., (2024). Analysis of losses associated with series resistance (R_s) in simple-structured c-Si solar cells. *Energies* 17, 1520. DOI: 10.3390/en17071520
- Huang, X., Gao, C., Li, M., He, C., Hao, A., Zhang, D., Yu, C., Wang, Y., Sang, C., Cui, X., Zou, G., (2007). Finite element analysis of resistivity measurement with four point probe in a diamond anvil cell. *Journal of Applied Physics* 101, 064904. DOI: 10.1063/1.2712173
- Li, J., Ohno T.R., Wolden, C.A. (2016). The impact of different metallization layers on CdTe solar cells contacted with ZnTe:Cu buffer layers. 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). DOI: 10.1109/PVSC.2016.7749862
- López-Sánchez, A., Rimmaudo, I., Mis-Fernández, R., Camacho-Espinosa E., Peña, J.L., (2022). Effect of the air humidity on the chorine treatment for CdTe thin films solar cells. *Solar Energy* 239, 129-138. DOI: 10.1016/j.solener.2022.04.063
- Márquez-Herrera, A., Hernández-Rodríguez, E., Cruz-Jáuregui, M.P., Zapata-Torres, M., Zapata-Navarro, A., (2010). Calentador de sustratos compacto y de bajo costo para tratamiento térmico in situ de películas delgadas depositadas por rf-sputtering. *Revista Mexicana de Física* 1 56, 85-91.
- Mattox, D.M., 1998. *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing. Film formation adhesion, surface preparation and contamination control*. New Jersey: Noyes Publication Westwood.
- Ning, Z., Wang, Y., Li, S., Tang, K., Wen, M., 2023. The sputtering performance of Al sputtering targets with different microstructure. *Vacuum* 210, 111888. DOI: 10.1016/j.vacuum.2023.111888
- Omar, A.A., Kashapov, N.F., Luchkin, A.G., Amor, A.A., Amar, A.A., 2022. Effect of cooling system design on the heat dissipation of the magnetron sensitive components with rectangular target during Sputtering by Ar+. *Results in Engineering* 16, 100696. DOI: 10.1016/j.rineng.2022.100696
- Pecht, M., (2020). Contact Plating. In editor (Kyeong, S.) *Electronical Connectors: Design, Manufacture, Test, and Selection*. Vol I. Wiley-IEEE Press, Ch., pp. 43-65.
- Peña J.L., Arés O., Rejón, V., Rios-Flores, A., Camacho, J.M., Romeo, N., Bosio, A., 2011. A detailed study of the series resistance effect on CdS/CdTe solar cells with Cu/Mo back contact. *Thin Solid Films* 520, 680-683. DOI: 10.1016/j.tsf.2011.04.193
- Qi B., Wang J., (2013). Fill factor in organic solar cells. *Physical Chemistry Chemical Physics* 15, 8972-8982. DOI: 10.1039/c3cp51383a
- Rendón, G., Poot, P., Oliva, A.I., Espinosa-Faller, F.J., (2012). A simple substrate heater device with temperature controller for thin film preparation. *Journal of Applied Research and Technology* 10, 549-556.
- Umrath, W., 2016. *Fundamentals of vacuum technology*. https://www.leyboldproducts.com/media/pdf/87/a8/be/FVT_Fundamentals_of_Vacuum_Technology_EN58774555441f3.pdf
- Wang S., Wu, H., Ge, Y., Liu, S., Ahmed Amer, R., 2024. A series resistance extraction method for health evaluation of photovoltaic modules. *Frontiers in Energy Research* 12, 1319813. DOI: 10.3389/fenrg.2024.1319813

Apéndice A. Diseño circular del horno porta-sustrato



Apéndice B. Diseño octagonal del horno porta-sustrato

