

Depósito y caracterización  
eléctrica de contactos óhmicos de  
Au para celdas fotovoltaicas de  
CdTe/CdS/ITO.

Autor: Marisol Mayorga Garay

2016



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería



Nombre de la tesis:  
“DEPÓSITO Y CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE  
CONTACTOS ÓHMICOS DE Au PARA CELDAS  
FOTOVOLTAICAS DE CdTe/CdS/ITO”

Tesis  
Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
INGENIERO EN NANOTECNOLOGÍA

Presenta:

Marisol Mayorga Garay

Centro Universitario Agosto 2016



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería



DEPÓSITO Y CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE CONTACTOS ÓHMICOS DE  
Au PARA CELDAS FOTOVOLTAICAS DE CdTe/CdS/ITO.

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

INGENIERO EN NANOTECNOLOGÍA

**Presenta:**

Marisol Mayorga Garay

**Dirigido por:**

Dra. María Lucero Gómez Herrera

Dra. María Lucero Gómez Herrera

Presidente

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. José Santos Cruz

Secretario

\_\_\_\_\_  
Firma

Dr. Francisco Javier De Moure Flores

Vocal

\_\_\_\_\_  
Firma

Dra. Rebeca Castanedo Pérez

Sinodal

\_\_\_\_\_  
Firma

Centro Universitario  
Querétaro, Qro.  
Agosto 2016  
México

## **RESUMEN**

El presente trabajo se realizó pensando en ayudar a solventar la problemática energética actual, debida a la gran dependencia que existe de los combustibles fósiles. Lo anterior se pretendió realizar en dos pasos. Primero al establecer un laboratorio nuevo en la Universidad Autónoma de Querétaro de estudio de contactos óhmicos, los cuales son un componente sumamente importante de las celdas solares y una de las partes menos estudiadas y que limitan el procedimiento de fabricación y encapsulación de dispositivos semiconductores para uso del consumidor final. Se presenta el procedimiento de cotización, adquisición e instalación del equipo principal, un equipo de sputtering con un blanco de oro. El segundo paso pretendido hace referencia al depósito de contactos de oro en películas de CdTe para celdas solares con CdS y su posterior caracterización. La caracterización de las muestras iniciales se llevó a cabo utilizando interferometría de corrimiento de fase y su análisis se realizó utilizando el software de uso libre denominado Gwyddion.

**(Palabras clave:** Contactos Óhmicos. Sputtering. Celdas solares. Perfilometría.)

## **ABSTRACT**

The present work was made to contribute to solve the problems with energy that the world is currently facing due to the high demand of fossil fuels. The last was aimed to be done in two steps. First, establishing a new laboratory in the Universidad Autónoma de Querétaro for study of ohmic contacts, which in turn, are really important components of solar cells and one of the less studied parts that slow the process of fabrication and encapsulation of semiconductor devices for its use for the final customer. It is presented the process of searching, acquiring and installing the main equipment, a sputtering coater with a gold target. The second intended step is about the growing of gold contacts over CdTe thin films for solar cells with CdS and its characterization. Such characterization of the first samples made by this equipment was done by phase shifting interferometry and its analysis was made using the free software Gwyddion.

**(Key words:** Ohmic Contacs. Sputtering. Solar Cells. Profilometry.)

## DEDICATORIA

### ***A mi padre:***

*Por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizaban y que me inculcó siempre, por el valor mostrado para salir adelante, por su amor y por todo su apoyo para alcanzar esta meta.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer a la directora de esta Tesis, Dra. María Lucero Gómez Herrera, por guiarme y apoyarme durante todo este proceso, por su constante disposición para ayudarme a resolver todos los problemas presentados durante este proyecto. Por apoyarme e inspirarme a mantenerme en el camino de la investigación.

A la sinodal Dra. Rebeca Castanedo Pérez por sus consejos y asesoría en la realización de esta tesis y por sus aportaciones al proyecto. A los sinodales Dr. José Santos Cruz y Dr. Francisco Javier De Moure Flores por su apoyo presentado en la realización de esta tesis, los comentarios atinados y su aportación al proyecto.

Al Dr. Gerardo Torres Delgado por sus correcciones y consejos al proyecto y sus aportaciones a este trabajo.

Al Ing. José Alfredo Muñoz Salas por su apoyo en la instalación del equipo y las pruebas preliminares. Por su gran interés en el proyecto y en apoyarme.

Al Ing. Carlos Ávila Herrera por su apoyo, consejos y sugerencias sobre la caracterización por interferometría.

A los profesores de la ingeniería en Nanotecnología por sus enseñanzas y paciencia durante los nueve semestres de la carrera, que me ayudaron a la realización exitosa de este proyecto.

Al Ing. Raúl Trejo por su apoyo incondicional, aportaciones y todo el trabajo que realizó durante este proyecto.

A mi familia por el apoyo absoluto en cada meta que me propongo. Por estar siempre unidos y siempre a mi lado. Y por ser tan compasivos en mis días de estrés.

A mis amigos por el apoyo mutuo, las buenas experiencias y toda la ayuda brindada en este trabajo.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Querétaro haberme brindado la oportunidad de recibir estudios profesionales de tan alta calidad, inculcarme valores y motivación a alcanzar mis metas.

Agradezco finalmente a la población mexicana en general por haber financiado en gran medida mis estudios al contribuir a la economía del país mediante sus impuestos.

## INDICE GENERAL

	<b>Página</b>
RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE GENERAL .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
CAPITULO I. INTRODUCCION.....	1
CAPITULO II. ANTECEDENTES.....	3
2.1 Contactos Óhmicos. ....	3
2.2 Modelo Schottky.....	4
2.3 Modelos de conducción. ....	6
2.4 Técnicas de depósito de contactos.....	7
2.4.1 Pulverización catódica.....	7
2.4.2 Evaporación al vacío.....	13
2.4.3 Recubrimiento Iónico.....	15
2.4.4 Deposición Química de Vapor (CVD).....	15
2.4.5 Fitolitografía.....	16
2.5 Caracterización de espesor de contactos óhmicos.....	18
2.6 Celdas solares.....	21
2.6.1 Unión p-n.....	21
2.6.2 Principio de funcionamiento.....	22
2.6.3 Tecnologías de fabricación de celdas solares.....	23
2.6.4 Celdas fotovoltaicas de CdTe/CdS/ITO.....	24
2.6.5 Contactos óhmicos para celdas de CdS/CdTe.....	26
CAPITULO III. JUSTIFICACIÓN.....	29

CAPITULO IV. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	34
4.1. Objetivos.....	34
4.1.2 Objetivos Generales.....	34
4.1.2 Objetivos Particulares.....	34
4.2. Hipótesis.....	35
CAPITULO V. METODOLOGÍA.....	36
5.1. Diseño del laboratorio.....	36
5.1.1 Equipo.....	36
5.1.2 Reactivos y Materiales de depósito.....	36
5.2. Implementación del equipo.....	38
5.2.1 Instalación.....	39
5.2.2 Pruebas de funcionamiento.....	40
5.3. Estandarización del equipo.....	41
5.3.1 Altura.....	41
5.3.2 Ubicación.....	41
5.3.3 Tiempo.....	42
5.4 Depósito oro con mascarilla.....	42
5.4.1 Diseño de la máscara.....	42
5.4.2 Metodología de depósito.....	42
5.4.2.1 Tiempo.....	42
5.4.2.2 Ubicación.....	42
5.5 Caracterización de espesor mediante perfilometría.....	43
CAPITULO VI. RESULTADOS Y DISCUSION.....	44
6.1 Guía de usuario.....	44
6.2 Estandarización del equipo.....	44
6.2.1 Análisis cualitativo.....	53
6.2.2 Análisis cuantitativo.....	54
6.3 Depósito de oro con mascarilla.....	61
CAPITULO VII. CONCLUSIONES.....	65
CAPITULO VIII. BIBLIOGRAFIA.....	67

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
<b>Tabla 5.1</b> Comparación de equipos de sputtering cotizados.....	36
<b>Tabla 5.2</b> lista de materiales.....	37
<b>Tabla 6.1</b> Valores de espesores obtenidos a diferentes alturas con 2 minutos de depósito. ....	55
<b>Tabla 6.2</b> Valores de espesores obtenidos a diferentes alturas con 2 minutos de depósito. ....	55
<b>Tabla 6.3</b> Valores de espesor obtenidos a diferentes alturas con 3 minutos de depósito. ....	56
<b>Tabla 6.4</b> Valores de espesor obtenidos a diferentes alturas con 4 minutos de depósito. ....	56
<b>Tabla 6.5</b> Valores de espesor obtenidos a diferentes tiempos, con la altura máxima de depósito.....	57
<b>Tabla 6.6</b> Espesores a diferentes tiempos con mascara circulares.....	64

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
Figura 2.1.	Contactos metal-semiconductor de acuerdo al modelo de Schottky. Las partes superiores e inferiores muestran el sistema metal-semiconductor antes y después del contacto, respectivamente.....	4
Figura 2.2.	Contactos tipo agotamiento en sustratos tipo n, a diferentes concentraciones de dopaje. ....	6
Figura 2.3.	Sistema de depósito mediante pulverización catódica.....	8
Figura 2.4.	Posibles efectos del bombardeo. 2) Emisión de electrones secundarios, 3) emisión de átomos neutros, 4) desorción, 5) adsorción, 6) difusión, 7) reacción en la superficie, 8) implantación, 9) calentamiento, 10) emisión de fotones y 11) emisión de grupos de átomos.....	9
Figura 2.5.	Regímenes de sputtering que se presentan de acuerdo a la energía. ....	10
Figura 2.6.	Proceso de Sputtering utilizando un magnetrón.....	12
Figura 2.7.	Sistema de depósito mediante evaporación al vacío.....	14
Figura 2.8.	Esquema completo del proceso de fotolitografía. Se esquematizan en 6 pasos. ....	17
Figura 2.9.	Perdida de precisión debido al tamaño de la punta en perfilometría.....	18
Figura 2.10.	Interferómetro de Michelson.....	20
Figura 2.11.	Interferómetro de Michelson usando lentes para generar una imagen de área.....	21
Figura 2.12.	Esquema de una unión p-n. ....	21
Figura 2.13.	Esquema de las cargas en una unión p-n. ....	22
Figura 2.14.	Conexión de una celda solar a un circuito con carga R.....	23
Figura 2.15.	Composición básica de la celda CdTe/ CdS/ITO. ....	26

Figura 3.1	Eficiencia en celdas durante los últimos años en diferentes centros con diferentes materiales. ....	31
Figura 3.2	Costos en USD por kWh a diferentes radiaciones. ....	32
Figura 3.3	Radiación en kWh/m <sup>2</sup> /Día, promedio anual en México, NREL. ....	33
Figura 5.1	Diseño de portablancos realizado con Solid Works. Las dimensiones se encuentran en milímetros.....	37
Figura 5.2	Esquema de la unidad general del equipo de sputtering MNT-JS1600.....	38
Figura 5.3	Cámara de vacío. ....	39
Figura 5.4	Instalación del equipo. Conexión de los componentes. ....	40
Figura 6.1	Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con dos minutos de depósito a una altura media en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra.....	45
Figura 6.2	Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con dos minutos de depósito a una altura máxima en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra. ....	46
Figura 6.3	Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con tres minutos de depósito a una altura media en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra. ....	47
Figura 6.4	Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con tres minutos de depósito a altura máxima a en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra. ....	48
Figura 6.5	Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con cuatro minutos de depósito a una altura media en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra. ....	49

Figura 6.6	Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con cuatro minutos de depósito a una altura máxima en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra. ....	50
Figura 6.7	Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con cinco minutos de depósito a una altura máxima en centro de la muestra en diferentes zonas a), b), c) y las vistas en 3d de cada zona. Y d) Muestra una gráfica de perfilometría de la muestra. ....	51
Figura 6.8	Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con seis minutos de depósito a una altura máxima en el centro de la muestra a) y b) y c) una vista en 3d de la muestra.....	52
Figura 6.9	Gráfica del crecimiento del depósito a altura media en el centro del portamuestras.....	58
Figura 6.10	Gráfica del crecimiento del depósito a altura media en los extremos del portamuestras.....	58
Figura 6.11	Gráfica del crecimiento del depósito a altura máxima en el centro del portamuestras.....	59
Figura 6.12	Gráfica del crecimiento del depósito a altura máxima en los extremos del portamuestras.....	59
Figura 6.13	Depósitos de oro utilizando mascara. 6 minutos de depósito a la altura máxima de depósito, perfiles realizados en a) el centro de la muestra, b) y c) en dos extremos opuestos de la muestra. ....	61
Figura 6.14	Depósitos de oro utilizando mascara. 4 minutos de depósito a la altura máxima, perfiles realizados en el centro de la muestra.....	62
Figura 6.15	Depósitos de oro utilizando mascara. 2 minutos de depósito a la altura máxima, perfil realizado en el centro de la muestra.	63

## **CAPITULO I. INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, existen diferentes problemas relacionados con la generación de energía, causados principalmente por el uso intensivo de combustibles fósiles, cuyas principales desventajas son su alta generación de contaminantes y el hecho de que no son renovables.

La solución muy probablemente se encuentre en el aumento del uso y el mejoramiento de energías alternativas, como son: eólica, hidrotérmica, geotérmica, solar, entre otras, siendo la solar un tipo de energía muy prometedora.

La principal forma de aprovechar la energía solar es mediante su conversión a energía eléctrica utilizando celdas fotovoltaicas **[1]**.

Las celdas solares fotovoltaicas funcionan debido al efecto fotoeléctrico. Cuando una cantidad de fotones impacta en una placa semiconductor, los electrones en ella pueden absorberlos y liberarse de sus átomos.

Si se conectan dos placas semiconductoras, se crea una diferencia de potencial a causa de los electrones liberados en una de las placas; dicho potencial se puede aprovechar si el sistema se conecta a un circuito eléctrico **[2]**.

La forma de conectar la celda y aprovechar dicho potencial es mediante contactos metálicos, los cuales sirven de interfaz entre la celda y el circuito eléctrico que utilizará o almacenará la energía eléctrica. Los contactos metálicos preferentes para esta aplicación son los contactos óhmicos.

Los contactos óhmicos deben presentar un comportamiento lineal o casi lineal en sus características de voltaje. Así mismo, deben ser estables térmicamente, para que no modifiquen la estructura de las placas semiconductoras con las que estarán en contacto, deben presentar poca resistencia, para reducir pérdidas por calentamiento y aumentar la eficiencia, y deben poderse hacer de manera reproducible **[3]**.

Se realizará la implementación de un laboratorio de depósitos de contactos óhmicos para celdas solares de CdTe/CdS/ITO mediante la técnica sputtering, caracterizando el funcionamiento del equipo en depósitos de oro para determinar las condiciones óptimas de operación.

Se espera que este laboratorio ayude a la producción de conocimiento en el área de depósito de contactos para sistemas semiconductores, con lo que se podrá mejorar la calidad y eficiencia de dispositivos como celdas solares, reduciendo entonces la dependencia de combustibles fósiles y sus consecuencias, lo que mejorará finalmente la calidad de vida.

## **CAPITULO II. ANTECEDENTES**

En todos los dispositivos semiconductores hay contactos y todos los contactos tienen resistencia de contacto, he ahí la importancia de caracterizarlos. Estos contactos son principalmente una unión metal-semiconductor aunque también puede ser semiconductor-semiconductor: de cristal único, policristalino o amorfo. [4] El primer dispositivo semiconductor fue un contacto metal-semiconductor en forma de un rectificador de punto de contacto. Walter H. Schottky sugirió que el comportamiento de rectificación podría surgir de una barrera de potencial como resultado de las cargas espaciales estables en el semiconductor. El modelo resultante de este concepto se conoce como la barrera de Schottky. [5]

Los contactos metal-semiconductor también pueden ser no rectificantes; es decir, el contacto tiene resistencia despreciable independientemente de la polaridad de la tensión aplicada. Este tipo de contacto se conoce como contacto óhmico. Los contactos óhmicos deben tener características lineales o cuasi lineales corriente-voltaje. Los contactos deben ser capaces de suministrar la corriente necesaria al dispositivo, y la caída de tensión en el contacto debe ser pequeña en comparación con las caídas de tensión en las regiones activas del dispositivo. Un contacto óhmico no debe degradar el dispositivo de ninguna manera significativa, y no debe agregar portadores minoritarios. [4]

Todos los dispositivos semiconductores y los circuitos integrados necesitan contactos óhmicos para hacer conexiones a otros dispositivos en un sistema electrónico.

### **2.1 Contactos óhmicos**

Existen varios tipos de contactos de entre los cuales destacan los que existen entre metal-metal, metal-semiconductor y semiconductor-semiconductor, usados en diferentes dispositivos. Este trabajo está enfocado en los contactos que hay entre metal-semiconductor del tipo óhmico.



que se puede presentar la función de trabajo del metal  $\phi_M$  con respecto a la función de trabajo del semiconductor  $\phi_S$ . En la **Fig. 2.1a**  $\phi_M < \phi_S$ , en **Fig. 2.1b**  $\phi_M = \phi_S$  y en **Fig. 2.1c**  $\phi_M > \phi_S$  [4]. Tras el contacto se forma una barrera de potencial cuya altura está definida por:

$$\phi_B = \phi_M - \chi \quad (2.1)$$

Donde  $\chi$  es la afinidad electrónica del semiconductor, definida como la diferencia de potencial entre el fondo de la banda de conducción y el nivel de vacío, en la superficie del semiconductor. De acuerdo a la teoría de Schottky, la altura de la barrera depende solo de la función de trabajo del metal  $\phi_M$  y la afinidad electrónica del semiconductor  $\chi$  y es independiente de la densidad de dopaje del semiconductor. Esto hace que el controlar la altura de la barrera se logre simplemente utilizando metales con la apropiada función de trabajo para implementar alguno de los tres posibles tipos de barreras de la **Fig. 2.1**, denominadas de acumulación, **Fig. 2.1a**, neutral, **Fig. 2.1b**, y de agotamiento **Fig. 2.1c**, debido a que los portadores mayoritarios se acumulan, se mantienen igual o se agotan en comparación a su densidad en el sustrato neutro [6].

Para contactos óhmicos se prefieren barreras de tipo acumulación debido a que la barrera para que los electrones fluyan de o hacia el semiconductor es menor que en los otros dos tipos. En la práctica es difícil modificar la altura de la barrera solamente variando la función de trabajo de los metales, y se ha observado experimentalmente que la altura de la barrera es relativamente independiente del metal para semiconductores comunes como Ge, Si, AsGa y otros del grupo III-V por lo que los valores experimentales de altura de la barrera varían en algunos casos de los calculados de la ecuación (2.1).

Esta diferencia en el comportamiento se atribuye a la interfaz metal-semiconductor. La teoría de la unión metal-semiconductor ideal supone que tanto el metal como el semiconductor se encuentran totalmente puros, que no existe interacción alguna entre ellos y que no hay una capa interfacial. Esto no es totalmente cierto en la práctica, ya que pueden ocurrir reacciones químicas entre el metal y el semiconductor, lo que altera la altura de la barrera [7].



## **2.4 Técnicas de depósito de contactos.**

Existe una gran cantidad de técnicas diferentes para depositar materiales con el fin de fabricar contactos metal-semiconductor, de entre las cuales algunas de las más importantes se describen en este apartado.

### **2.4.1 Pulverización catódica**

Más comúnmente conocido como Sputtering debido al fenómeno en que se basa. Existen diferentes métodos de fabricación de películas delgadas y una de las más importantes es la pulverización catódica, la cual funciona gracias a un proceso físico relativamente sencillo.

El proceso consiste en el bombardeo de partículas como iones, átomos neutros, neutrones, electrones o fotones, sobre un sólido, denominado blanco. Esto da como resultado que átomos sean arrancados del blanco, los cuales pueden depositarse sobre un sustrato para formar la película delgada del mismo material que el blanco [9].

#### **Descripción de la técnica**

El proceso se lleva a cabo dentro de una cámara con un gas inerte la presión es muy baja (inferiores a  $1 \times 10^{-1}$  mbar en algunos equipos y  $1 \times 10^{-4}$  mbar en otros más sofisticados).

Dentro de la cámara se encuentran un cátodo [-] y un ánodo [+] separados por el gas inerte; el blanco se coloca sobre el cátodo, mientras que el sustrato se encuentra frente a él, de forma que intercepte el flujo de partículas expulsadas del blanco.

El bombardeo del blanco se produce gracias al voltaje entre los dos electrodos; cuando se produce la descarga eléctrica los átomos del gas pueden ionizarse y formar un plasma, compuesto de átomos del gas cargados positivamente y electrones.

Los iones positivos entonces son atraídos y acelerados hacia el blanco debido al cátodo, lo que produce el bombardeo. Cuando el ion incidente tiene suficiente energía cinética (mayor a 10 eV), la colisión provoca que el átomo impactado se

desplace de su posición. El átomo desplazado puede colisionar con uno o más átomos del blanco y transferirles energía suficiente para desplazarse de su posición y colisionar a su vez con más átomos, generando un efecto en cadena denominado cascada de colisiones.

Cuando este efecto llega a átomos cercanos a la superficie del blanco pueden ser desplazados con una trayectoria tal, que son expulsados del material (fenómeno denominado "sputtering"). Los átomos expulsados viajan en línea recta en todas direcciones por lo que algunos de ellos llegan al sustrato, lo que inicia el crecimiento de cúmulos de átomos, formando así la película compuesta por átomos del blanco [10].

La Fig. 2.3 muestra un esquema general del proceso de pulverización catódica.

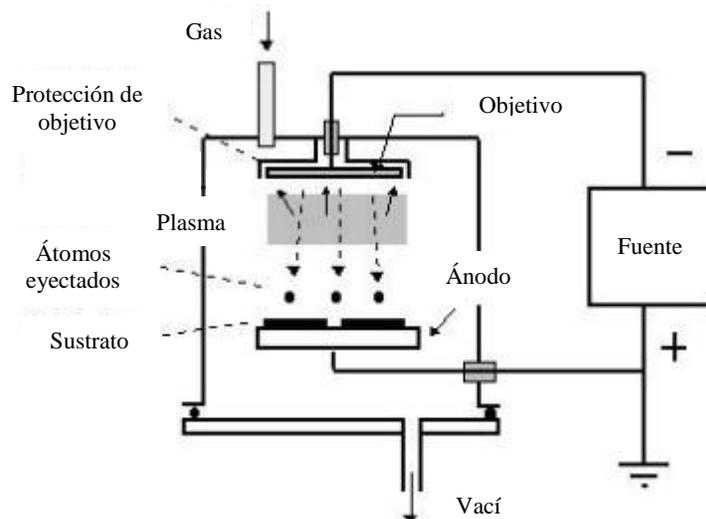


Fig. 2.3 Sistema de depósito mediante pulverización catódica

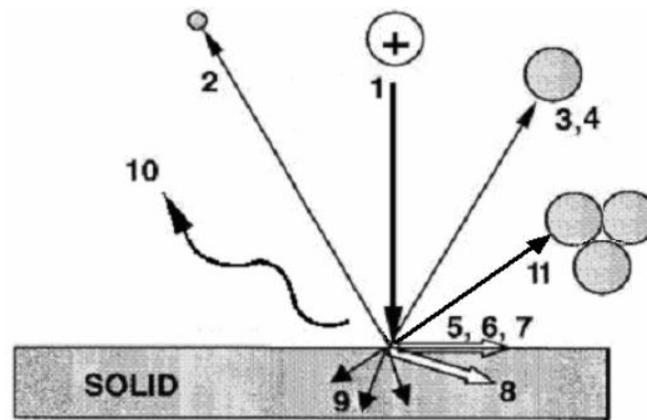
### Otros fenómenos presentados por el bombardeo

Además del efecto sputtering, el bombardeo de iones sobre la superficie del blanco puede producir los siguientes fenómenos:

- Emisión de átomos ionizados del blanco.
- Emisión de átomos en estado excitado.
- Emisión de grupos de átomos.
- Emisión de electrones secundarios.
- Desorción de átomos.

- Adsorción de átomos.
- Difusión.
- Reacciones químicas en la superficie.
- Implantación de iones.
- Calentamiento
- Emisión de fotones.

De la emisión de átomos del blanco, aproximadamente entre el 80 y el 95% son átomos neutros individuales, entre el 5 y el 20% son grupos de átomos, 1% son átomos electrónicamente excitados y 1% son átomos ionizados.



**Fig. 2.4** Posibles efectos del bombardeo. 2) Emisión de electrones secundarios, 3) emisión de átomos neutros, 4) desorción, 5) adsorción, 6) difusión, 7) reacción en la superficie, 8) implantación, 9) calentamiento, 10) emisión de fotones y 11) emisión de grupos de átomos

De los fenómenos anteriores se destaca la importancia de los electrones secundarios, los cuales son acelerados hacia el ánodo y pueden chocar con moléculas neutras del gas, ionizándolo y generando más plasma, haciendo que este sea autosostenido.

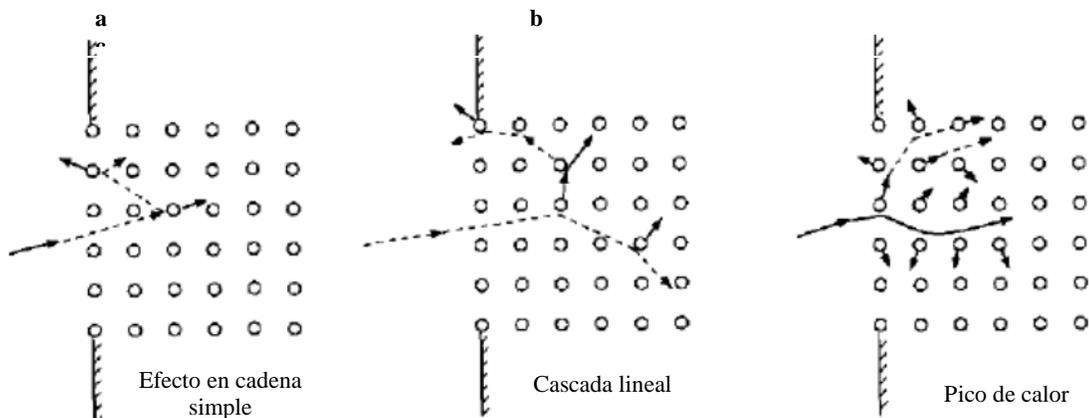
### Regímenes

Dependiendo de la energía del ion incidente se pueden presentar tres casos o regímenes diferentes de colisiones en cadena **Fig. 2.5**:

- El régimen de efecto en cadena simple (**Fig. 2.5a**) no se crean cascadas de colisión. La partícula expulsada es impactada por una partícula que fue

golpeada directamente por el ion incidente. Este régimen predomina cuando la energía es menor a 1 keV.

- El régimen de cascada lineal (**Fig. 2.5b**) está caracterizado por la formación de una cascada de colisión en la que la interacción entre dos átomos en movimiento es despreciable. El rango de energía en el cual se produce este régimen es entre 1 keV y 300 keV.
- El régimen de pico de calor (**Fig. 2.5c**) produce cascadas de colisión en las que las interacciones entre átomos en movimiento y otros átomos del blanco no son despreciables. Es decir, las colisiones ocurren muy cerca unas de otras, lo que lleva a que la zona de colisiones se funda. Si la zona está lo suficientemente cerca de la superficie muchos átomos pueden ser expulsados. Se presenta cuando la energía es mayor a 100 keV pero puede presentarse a energías más bajas si los iones son muy pesados o colisionan en un flujo muy grande [10].



**Fig. 2.5** Regímenes de sputtering que se presentan de acuerdo a la energía.

## RF-Sputtering

Un problema importante se presenta en el sputtering cuando se quieren realizar depósitos de películas de materiales aislantes o semiconductores de alta resistividad (Ejemplos:  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ). Cuando se generan los iones positivos y

se aceleran al blanco, al ser este poco conductor, los iones se acumulan y neutralizan la carga negativa del blanco, deteniendo el proceso de sputtering.

El problema puede ser resuelto si se utiliza una fuente de poder alterna. La frecuencia más común de trabajo es de aproximadamente 13.56 Mhz. En la mitad del ciclo cuando el blanco se encuentra cargado negativamente el plasma es generado y acelerado hacia el blanco, bombardeándolo e iniciando el proceso de sputtering.

En la segunda mitad del ciclo el blanco adquiere carga positiva de la fuente de poder, lo que hace que los electrones se aceleren hacia él, neutralizando los iones positivos acumulados en la superficie, liberándolo. Posteriormente vuelve a iniciar el ciclo y el proceso de sputtering continua, permitiendo el crecimiento de películas que en condiciones normales no se podría [11].

### **Sputtering reactivo**

Durante el proceso de pulverización catódica existe la posibilidad de depositar materiales compuestos al introducir en la cámara un gas reactivo en lugar o en mezcla con el gas inerte. El gas reactivo que se introduzca depende del compuesto que se desea obtener. De esta forma, al introducir oxígeno se pueden obtener óxidos del material del blanco o si se introduce nitrógeno se pueden obtener nitruros. En este caso, la formación del compuesto dependerá de factores como la temperatura, la tasa de crecimiento o de la misma naturaleza del compuesto.

Gases que son inertes en condiciones normales pueden ser reactivos cuando forman plasma debido a colisiones que forman átomos neutrales disociados o átomos cargados. Por ejemplo el  $N_2$  forma especies que pueden ser reactivas como  $N$ ,  $N^+$ ,  $N^-$ ,  $N_2^+$ .

Los gases reactivos más usuales y los compuestos que forman son:

- Oxígeno: se combina con blancos de aluminio, silicio, titanio, zirconio, hafnio, niobio, estaño, indio, entre otros. Forma compuestos como  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $HfO_2$ , ITO, etc.
- Nitrógeno: se combina con blancos de titanio, zirconio, cromo, aluminio, silicio para formar películas de  $TiN$ ,  $ZrN$ ,  $CrN$ ,  $AlN$ ,  $Si_3N_4$ .

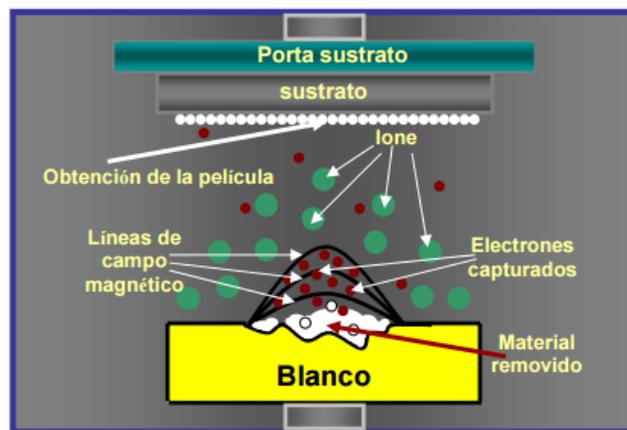
- Dióxido de carbono: para depositar recubrimientos óxidos.
- Acetileno: para depositar películas de carbono con propiedades similares al diamante o películas de hidrocarburos.
- Metano: para aplicaciones similares al acetileno [9].

### **Magnetron sputtering.**

Se incluye un sistema de imanes permanentes bajo el cátodo para obtener campos magnéticos del orden de cientos de Gauss. Estos campos magnéticos confinan las cargas en la superficie del cátodo, lo que incrementa la posibilidad de que se ionicen y aumenta la tasa de depósito. Así mismo, evita que los electrones libres se aceleren hacia el sustrato y generen calentamiento no deseado.

De esta forma se aumenta la tasa de erosión del blanco en aproximadamente un factor de 10 que si no se usara magnetron [12].

La **Fig 2.6** ilustra el confinamiento de electrones gracias al campo magnético generado por el magnetron.



**Fig. 2.6** Proceso de Sputtering utilizando un magnetron [C]

### **Ventajas y desventajas**

La pulverización catódica presenta algunas ventajas que la hacen una de las técnicas de fabricación de película delgada más usadas.

- Gran versatilidad. Existen diseños con diferentes geometrías como cónicas o cilíndricas, lo que permite depositar películas sobre una gran variedad de sustratos.
- Reproducibilidad. En esta técnica es relativamente sencillo controlar y repetir las condiciones en las que se desarrollan los depósitos.
- Se pueden depositar diferentes películas con un mismo blanco si se emplean diferentes gases.
- Se pueden realizar depósitos a temperatura ambiente, lo que hace posible aplicar la técnica en aplicaciones en las que los sustratos son sensibles al calor.
- Las películas formadas por pulverización catódica presentan una buena adherencia entre el sustrato y la película gracias a la alta energía cinética con la que los átomos o moléculas llegan al sustrato [9] [11].
- Permite realizar depósitos de todo tipo, metales puros, aleaciones, cerámicos, polímeros, etc.

Por otro lado, una de las principales desventajas es que el gas que se utilice para bombardear al objetivo puede quedar atrapado en la película depositada, lo que en ocasiones puede afectar adversamente las propiedades finales del depósito. Además es un proceso más complicado y lento en comparación a otros procesos de deposición [13] [14].

#### **2.4.2 Evaporación al vacío**

En este método el material que va a depositarse, denominado fuente, se calienta a una temperatura suficientemente alta como para evaporarse o sublimarse. Este procedimiento se lleva a cabo en una cámara al vacío, lo que disminuye sustancialmente la temperatura requerida para vaporizar el material en comparación a la que se requeriría a presión atmosférica normal. Además, el vacío ayuda a evitar la oxidación del material fuente a altas temperaturas.

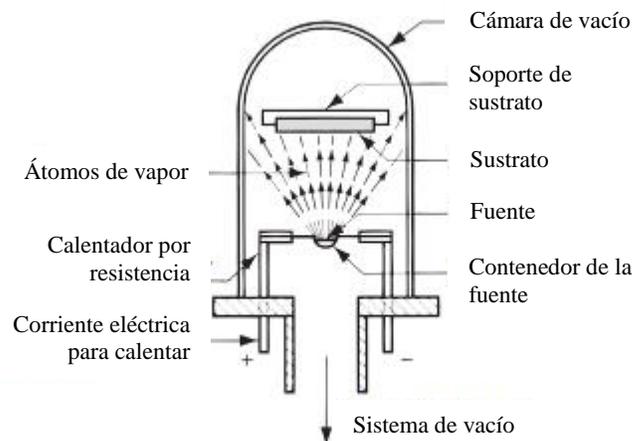
Los átomos evaporados se desprenden de la fuente y siguen trayectorias rectas hasta chocar con moléculas de gas o superficies sólidas. Gracias al vacío, los

choques con moléculas de gas se minimizan por lo que las moléculas evaporadas viajan hasta chocar en el sustrato, lo que genera el depósito.

La vaporización de la fuente puede llevarse a cabo mediante dos formas:

- Calentamiento por resistencia: es la técnica más simple. Utiliza un metal refractario para contener a la fuente. Se aplica entonces una corriente para calentar el envase, para que a su vez transmita el calor al material fuente. Este método de calentamiento es el más sencillo de los dos, pero tiene la desventaja que pueden formarse aleaciones del material refractario y la fuente, lo que contamina los depósitos formados.
- Bombardeo con haz de electrones: se dirige una corriente de electrones de alta velocidad hacia la fuente, con el objetivo de calentar y vaporizar el material. En este caso la energía que actúa para calentar el recipiente es muy poca, por lo que se reduce la contaminación del depósito.

El sistema se ilustra en la **Fig. 2.7**.



**Fig. 2.7** Sistema de depósito mediante evaporación al vacío

La evaporación al vacío es un proceso sencillo y requiere un equipo de bajo costo en comparación a otras técnicas, pero mediante esta técnica la deposición de compuestos es difícil y la adhesión de los depósitos no es tan buena como otras técnicas físicas [14].

### **2.4.3 Recubrimiento iónico**

Es una técnica que combina el bombardeo con partículas atómicas con la evaporación al vacío. El proceso funciona de acuerdo a lo siguiente:

Primero se prepara el sustrato en un cátodo en la parte superior de una cámara, se establece vacío y se inyecta un gas noble. Se aplica entonces una diferencia de potencial para ionizar el gas y generar plasma, el cual bombardea al sustrato, produciendo que la superficie del sustrato quede en una condición de limpieza atómica.

Enseguida, se calienta el material que se desea depositar lo suficiente para vaporizarlo. Las moléculas de vapor pasan a través del plasma y recubren el sustrato. La diferencia de potencial se aplica durante todo el proceso, ionizando también a los átomos de vapor del material a depositar, por lo que sustrato se bombardea no solo por plasma de gas noble usado, sino también por el material a depositar.

Los efectos de estas condiciones producen películas de espesor uniforme y una excelente adherencia al sustrato. Esta técnica se aplica a materiales que tienen geometrías irregulares [14].

### **2.4.4 Deposición química de vapor**

Esta técnica, denominada CVD por sus siglas en inglés, implica una interacción de una mezcla de gases con la superficie de un sustrato caliente, lo que ocasiona la descomposición química de partes del gas y la formación de una película sólida sobre el sustrato.

El producto de reacción forma un núcleo y crece a partir de éste para formar una película. La reacción puede requerir condiciones específicas de temperatura y presión, así mismo, pueden requerir condiciones especiales, como una fuente de luz o plasma.

La deposición química de vapor se utiliza para depósitos que requieren altas resistencias al desgaste, corrosión, erosión y choque térmico. Además se utiliza en la fabricación de circuitos integrados.

Se utiliza para depositar metales como tungsteno, molibdeno, titanio, vanadio y tantalio. También se usa para compuestos como óxido de aluminio, dióxido de silicio, nitruro de silicio, carburo de titanio y nitrato de titanio.

Las ventajas que se pueden mencionar de la deposición química de vapor son: su capacidad de depositar materiales refractarios con temperaturas inferiores a sus puntos de fusión, se puede controlar el tamaño de grano, se puede utilizar el proceso a presión atmosférica y se consigue una buena unión entre la superficie del sustrato y el material depositado.

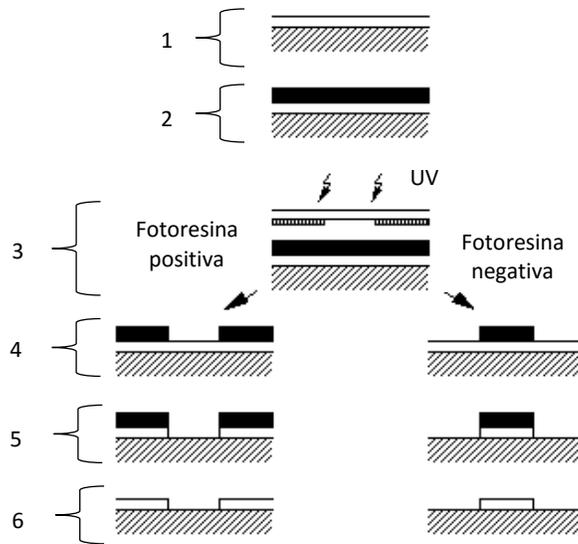
Por el contrario, sus desventajas son: la naturaleza corrosiva y/o tóxica de los reactivos requeridos, lo que requiere a su vez, de equipo especial, además, en muchos casos los reactivos son costosos [14].

#### **2.4.5 Fotolitografía**

La fotolitografía, derivada de las palabras griegas foto (luz), lito (piedra o roca) y grafía (escritura), es una variación de la técnica litográfica en la que se utiliza una haz de luz para transferir o copiar un diseño y plasmarlo en alguna superficie plana de algún material, sustrato o resina, que sean sensibles a la luz. Existen dos tipos principales:

- **Fotolitografía con máscara.** El modelo o imagen que se desea grabar se encuentra previamente diseñado en la máscara, sirviendo así de molde o plantilla de diseño.
- **Fotolitografía de escaneo o escritura directa.** El grabado se realiza directamente en la superficie o dentro del material sin emplear una máscara.

El proceso para realizar la fotolitografía en una película delgada sobre un sustrato es el siguiente (**Fig. 2.8**):



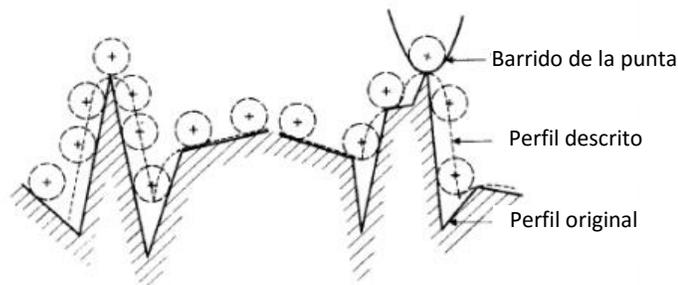
**Fig. 2.8** Esquema completo del proceso de fotolitografía. Se esquematan en 6 pasos.

1. Se recubre el sustrato con el material que se desea depositar.
2. Se deposita una película con un polímero sensible a la luz.
3. Un haz de luz es dirigido hacia la fotoresina mediante un sistema óptico, con la finalidad de activar la resina en las zonas selectivas no protegidas por una máscara. La resina activada cambia su solubilidad ante un solvente específico para la resina utilizada.
4. Utilizando el solvente específico se disuelve parte de la resina, en zonas que dependen del tipo de resina utilizada:
  - Si la fotoresina es **positiva**, esta se debilitará (aumentará su solubilidad) al incidir la luz ultravioleta, por lo que el solvente retirará la resina en zonas donde la luz incidió, generándose una imagen positiva.
  - Si la fotoresina es **negativa**, la luz ultravioleta la endurecerá (disminuirá la solubilidad), por lo que la resina en las zonas donde incidió la luz permanecerá, generándose una imagen negativa.
5. Se trata la muestra entonces con sustancias que retiran el material depositado en el paso 1, sin afectar a la resina que permaneció ni donde ésta se encuentra.

- **Grabado húmedo.** El ataque al material se realiza mediante la acción de un líquido, como ácido nítrico o fluorhídrico.
  - **Grabado seco.** La remoción del material se lleva a cabo empleando un haz de plasma, un gas o ambos.
6. Finalmente se retira la resina con solventes como acetona, que no requieren que la resina haya sido incidida para disolverla, lo que genera un sustrato final con depósitos de material en zonas específicas [15].

## 2.5 Caracterización de espesor de contactos óhmicos.

Los métodos más comunes de medición de espesor son los métodos de contacto que están basados en aguja. Los perfilómetros de aguja utilizan una punta afilada, fabricada usualmente de diamante. La punta barre la superficie y se mueve arriba o abajo dependiendo de los cambios en la altura de la muestra. Los cambios en la coordenada z de la punta se convierten a señal eléctrica mediante transductores electromecánicos, para posteriormente ser analizados mediante computadora y convertidos en imagen en tres dimensiones de la superficie de la muestra analizada. La resolución de este tipo de perfilometría está limitado por el tamaño de la punta, que suele ser entre 2 y 10  $\mu\text{m}$ . Además, si la punta barre la muestra con demasiada fuerza o se utiliza para medir muestras con poca adherencia, puede resultar en daños permanentes en las películas. Por el contrario, si se utiliza poca fuerza, puede no detectar cambios pequeños en la topografía de la muestra. La **Fig. 2.9** muestra como el tamaño de la punta puede afectar la precisión de la medida [16].



**Fig. 2.9** Pérdida de precisión debido al tamaño de la punta en perfilometría

Para solventar estos problemas se pueden utilizar técnicas de medición de no contacto, como los basados en interferometría como la interferometría por corrimiento de fase.

### **Interferometría por corrimiento de fase**

Mediante interferometría se puede analizar las características de una superficie, particularmente las variaciones de altura. Para llevar a cabo dicho análisis, los interferómetros separan el haz de luz proveniente de la fuente en dos y redirigen cada nuevo haz por caminos diferentes independientes; uno va dirigido a una superficie de referencia mientras que el otro se dirige a la muestra a analizar.

Después de esto, los haces se recombinan y se dirigen a una cámara digital que mide la intensidad del haz resultante en diferentes puntos al mismo tiempo. Debido a cambios a la topografía de la muestra existe una diferencia en el camino recorrido entre los dos haces, existe un corrimiento de fase, lo que se traduce en un cambio en la intensidad. Dicho cambio es altamente sensible, siendo posible medir diferencias de intensidades causadas por cambios en la topografía de hasta 1 nm [17].

Tomando como ejemplo el interferómetro clásico de Michelson de la **Fig. 2.10**, se tiene una intensidad en el detector igual a:

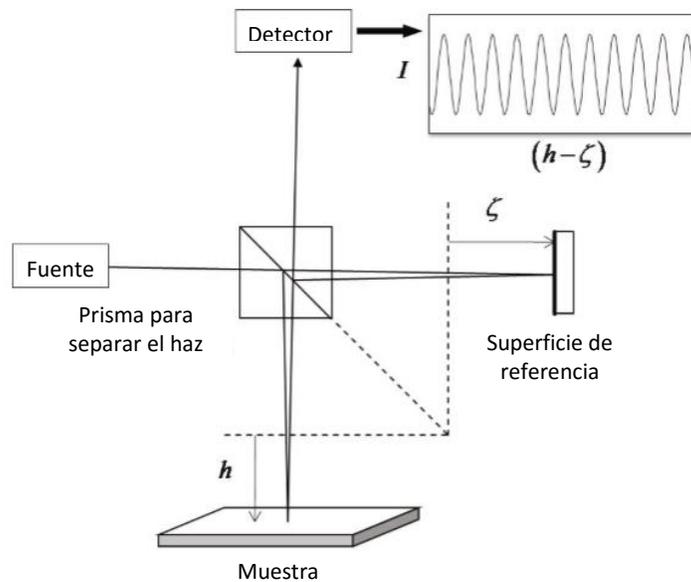
$$I(h, \zeta) = I_{DC} + I_{AC} \cos[K(h - \zeta) + \xi] \quad (2.3)$$

Donde  $I_{DC}$  y  $I_{AC}$  son coeficientes constantes,  $h$  es el cambio en altura de la muestra,  $\zeta$  es el cambio en la posición de la superficie de referencia,  $\xi$  es el cambio de fase debido a las propiedades de transmisión y reflexión de los componentes del equipo y la cantidad  $K$  es:

$$K = 4\pi/\lambda \quad (2.4)$$

Denominado frecuencia de franja, corresponde al ritmo al cual la señal de interferencia oscila de forma sinusoidal de acuerdo a cambios en los cambios de altura de la superficie de la muestra y de la posición de la superficie de referencia.

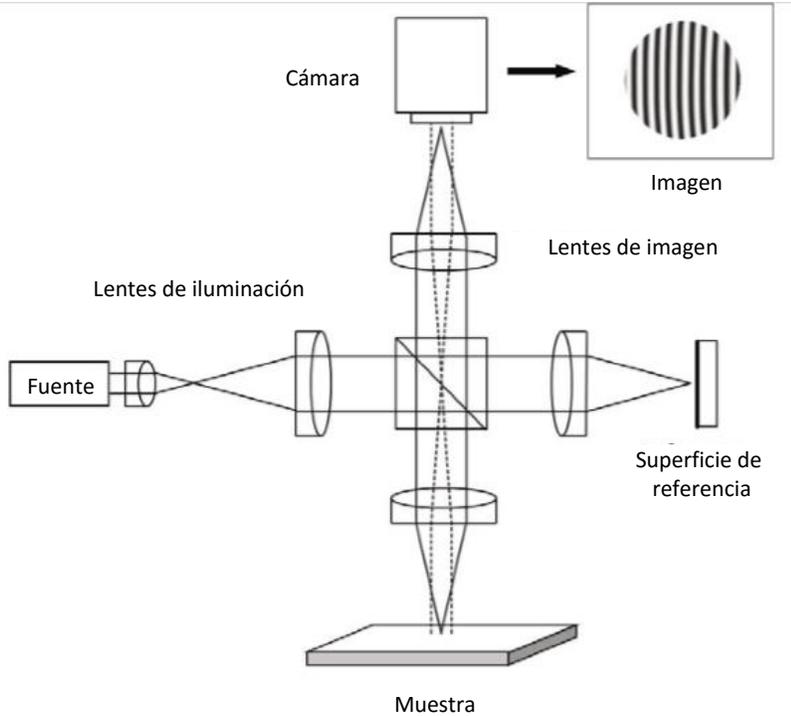
Se presenta una gráfica de la intensidad en función de la diferencia ( $h - \zeta$ ) en la **Fig. 2.10**.



**Fig. 2.10** Interferómetro de Michelson usando espejos para generar una imagen de área.

De la ecuación (2.3) se puede interpretar directamente que entre cada franja hay un cambio en el argumento del coseno de  $2\pi$ , que de acuerdo a la ecuación (2.4), correspondería a un cambio en la superficie de  $\lambda/2$ . La interpretación visual anterior es lo que da origen a la técnica y da lugar a métodos computacionales más sofisticados que permiten realizar el mapeado de una superficie en tres dimensiones.

La **Fig. 2.11** muestra un sistema de medición de perfil de una muestra en la cual varía la altura  $h$  de la muestra conforme se avanza en la dirección horizontal, lo que forma las franjas oscuras y brillantes de la interferencia **[18]**.



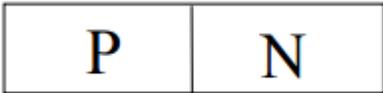
**Fig. 2.11** Interferómetro de Michelson.

**2.6 Celdas solares**

Una celda solar es un dispositivo que utiliza la energía de la radiación solar y la transforma en energía eléctrica para realizar algún trabajo. Este dispositivo funciona gracias al efecto fotovoltaico en una unión p-n de semiconductores.

**2.6.1 Unión p-n**

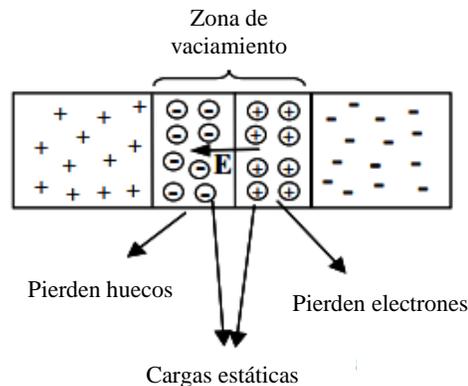
Consta de una interfaz entre un semiconductor dopado con un material donador y un semiconductor dopado con material aceptor. Es decir, una unión de un semiconductor tipo p (alta concentración de huecos) y uno tipo n (alta concentración de electrones libres).



**Fig. 2.12** Esquema de una unión p-n.

Debido al alto gradiente de concentración de portadores del mismo tipo a cada lado de la unión, estos tienden a difundir desde el lado donde se encuentran en concentración mayor a donde hay concentración menor. De otra forma, los electrones difunden de la zona tipo n a la zona tipo p, mientras que los huecos difunden de la zona tipo p a la zona tipo n.

Tras ocurrir lo anterior, una zona carga negativa se forma del lado p de la unión, debido a los electrones difundidos y, similarmente, una zona de carga positiva se forma en el lado n por los huecos difundidos. Esta zona de cargas a cada lado de la unión (denominada zona de deplexión o vaciamiento) produce un dipolo que crea a su vez un campo eléctrico, dirigido de la zona n a la zona p. El campo eléctrico formado tiende a compensar la difusión de portadores hasta alcanzar un estado de equilibrio [3].



**Fig. 2.13** Esquema de las cargas en una unión p-n.

Este campo eléctrico tiene una función específica en el funcionamiento de la celda solar, explicado en el siguiente apartado.

### 2.6.2 Principio de funcionamiento

Cuando la unión p-n se expone a la radiación UV del sol, los fotones incidentes pueden transferir su energía a los electrones de valencia del semiconductor, liberándolos hacia la banda de conducción y generando un par electrón hueco. El proceso contrario, denominado recombinación o desaparición del par electrón hueco, se puede producir cuando un electrón libre se encuentra con un hueco.



capas utilizadas en celdas de silicio monocristalino, con lo que la cantidad de materia prima se minimiza [3].

Algunos materiales para fabricar celdas solares de película delgada son:

Semiconductores binarios: arseniuro de galio (GaAs) [20], arseniuro de indio (GaIn) [20], fosfuro de indio (InP) [21], sulfuro de cadmio (CdS) [3], telurio de cadmio (CdTe) [3]. etc.

Semiconductores ternarios: arseniuro de galio-indio (GaInAs) [21], fosfuro de galio-indio (GaInP) [22], etc.

A diferencia de las celdas de silicio monocristalino, donde la misma oblea funciona como soporte, las celdas de película delgada se construyen sobre un sustrato ajeno a los materiales activos de la celda, el cual funciona como soporte mecánico y generalmente es vidrio. Las celdas de segunda generación también funcionan gracias a una unión p-n, compuesta en este caso, por dos materiales diferentes [19].

#### **2.6.4 Celdas fotovoltaicas CdTe/CdS/ITO.**

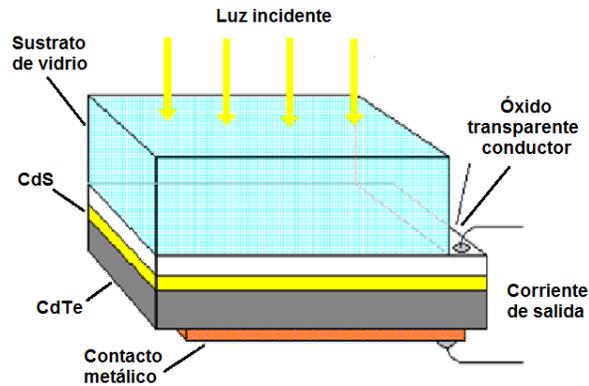
De entre las celdas de segunda generación, las de telurio de cadmio son de las celdas que mejores resultados han mostrado en cuanto a eficiencia y a su potencial para llevar los procesos de fabricación del laboratorio a la industria. Dependiendo del proceso de fabricación, estas celdas han presentado eficiencias de entre 14 y 21% [23].

La celda solar CdS/CdTe está basada en la heterounión formada entre el CdS tipo n y el CdTe tipo p [19]. La composición básica de la celda se describe a continuación:

- *Vidrio o polímero transparente*: Esta parte de la celda sirve como base para su construcción, y se trata de un soporte ordinario. Su importancia radica en su transparencia, resistencia y costo. El grosor suele ser de milímetros y protege de las condiciones ambientales al resto de las capas. Comúnmente

la cara expuesta del vidrio tiene un recubrimiento anti-reflectivo para mejorar sus propiedades ópticas.

- *Oxido conductor transparente:* Normalmente se utiliza oxido de estaño u oxido de indio y estaño (ITO), este actúa como el contacto frontal de la celda. Esta parte es necesaria ya que ayuda a reducir la resistencia en serie del dispositivo, que de lo contrario resultaría del espesor de la capa de CdS.
- *Sulfuro de cadmio:* Es una capa policristalina dopada tipo n, y conforma la mitad de la unión p-n. Su band gap es de  $\sim 2,4$  eV a 300K por lo que es transparente a longitudes de onda de 515nm o menores.
- *Teluro de cadmio:* Esta capa también es policristalina pero dopada tipo p. Su band gap es directa de 1.47eV, valor ideal para el espectro solar, y tiene alto coeficiente de absorción de energía sobre este valor. Este material es un absorbente eficaz y conforma la parte p de la unión. Su grosor suele ser mayor que el CdS y al ser menos dopado que el CdS, la región de agotamiento se encuentra en su mayoría dentro de la capa de CdTe. Por lo tanto, esta es la región activa de la celda, donde la generación y recolección de portadores ocurre.[24]
- *Contacto metálico:* Generalmente se utiliza oro o aluminio, sin embargo existen estudios recientes en diversos materiales. Este contacto provee una conexión de baja resistencia eléctrica al CdTe. El CdTe tipo p es un material muy difícil sobre el cual producir un contacto óhmico, por lo que mostrara algunas características de diodo Schottky. Debido a la alta conductividad el grosor de esta capa suele ser pequeño, del orden de los nanómetros. [25]



**Fig. 2.15** Composición básica de la celda CdTe/ CdS/ITO.

Algunas de las principales desventajas de los sistemas fotovoltaicos de CdS/CdTe son la toxicidad e impacto ambiental de los componentes, principalmente el cadmio, así como su poca abundancia en comparación con el silicio [26].

Además, se presentan algunos problemas tecnológicos, como la facilidad de las películas a presentar perforaciones que conectan el contacto metálico con la capa conductora transparente, lo que provoca un corto circuito en la celda. También se presentan una dificultad a la hora de encontrar un metal que funcione como un buen contacto debido a cuestiones que se explican en los siguientes apartados [19].

### 2.6.5 Contactos óhmicos para celdas de CdS/CdTe

En general la resistencia eléctrica asociada a los contactos óhmicos está determinada por cuatro factores principales:

1. Las propiedades fisicoquímicas del semiconductor (función de trabajo y grado de impurificación) y las características de la superficie del semiconductor (densidad de estados superficiales).
2. La selección del metal o aleación metálica para formar el contacto metal-semiconductor.
3. Los procesos usados en la preparación de la superficie del semiconductor, previo a la formación del contacto óhmico. Aquí se incluyen las etapas de preparación de la superficie, como son los decapados mecano-químicos o los procesos de pasivación de las superficies.

4. Los procesos térmicos necesarios para proporcionar estabilidad eléctrica y mecánica al contacto óhmico. [27]

De esta manera, para seleccionar el material que se usará para un contacto óhmico, deben tomarse en cuenta las características de los materiales de la celda y del metal que formará el contacto. En el caso de las celdas CdTe/ CdS/ITO los metales que pueden permitir la formación de un contacto óhmico son solo aquellos con una función de trabajo muy grande. [28]

Uno de los problemas tecnológicos de las celdas de CdTe es la formación de un contacto trasero con baja resistencia y estable a la vez. Esto es debido a dos problemas principales.

En varias investigaciones se han analizado contactos de Au/CdTe en diferentes dispositivos (celdas, diodos). [24][25][29] [30] Las características del oro lo hacen una buena opción para formar un buen contacto con el CdTe, sus átomos tienen un diámetro pequeño por lo que es más fácil que se forme un buen contacto con el CdTe. La baja resistencia específica del oro  $2.214\mu\Omega\text{cm}$  y su función de trabajo grande  $5.1\text{eV}$  han hecho que sea de los metales más utilizados en estas celdas, ya sea puro o en aleaciones con otros materiales como el Cu y el Mo, obteniendo resistencias de contacto menores a  $10^{-5}\Omega\cdot\text{cm}^2$  [27]

En el caso del Mo también se han hecho estudios sobre su uso como contacto óhmico en celdas solares y dispositivos con CdTe, en forma de  $\text{MoO}_x$ , en algunas aleaciones [28] o puro [31]. Además la función de trabajo del Mo es grande, similar a la del Au,  $4.95\text{eV}$  los resultados obtenidos han sido favorables

De acuerdo a la ecuación (2.1) la altura de la barrera entre los dos materiales aumenta conforme aumenta la diferencia entre las funciones de trabajo de los mismos. Por lo tanto, el alto valor de la función de trabajo del CdTe ( $5.47\text{eV}$  [32]) en comparación a los metales más comunes con que se suelen fabricar contactos de baja resistencia, como el oro (Au, función de trabajo de  $5.1\text{eV}$  [33]), provoca que se formen barreras de potencial grandes, aumentando a su vez la resistencia y

perdiendo el carácter óhmico. Por lo que se provocan pérdidas y bajas en la eficiencia.

El otro problema se encuentra en que la fabricación de contactos óhmicos de buena calidad para CdTe muchas veces requiere el uso de cobre (Cu), ya sea en aleación o en estado puro. A pesar de la buena calidad de los contactos con Cu, se tiene el problema de que, si se encuentra en gran cantidad, este difunde muy fácilmente en el CdTe a temperatura ambiente, efecto que se ve aumentado drásticamente por el aumento de temperatura debido al ambiente de trabajo de las celdas solares.

El Cu puede incluso difundir hasta la unión p-n, y se cree que puede formar centros de recombinación, lo que disminuye el rendimiento de la celda.

Por lo tanto se tienen problemas tanto de eficiencia como de estabilidad en los contactos para CdTe. Para solventar esto se ha propuesto utilizar capas intermedias de un material diferente entre la película de CdTe y el contacto metálico, que funcione como puente entre la película de CdTe y el contacto metálico a la vez que reduce la difusión, controlando la cantidad de Cu que se agrega [34].

Por ejemplo, películas hechas de pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ) han mostrado mejorar en buena medida la linealidad de la curva corriente vs voltaje de un contacto de Au [32]. Por otro lado, se ha realizado también investigación con  $Cu_2Te$ , el cual se utiliza como dopante tipo p, controlando la cantidad de Cu que se agrega al sistema con el espesor de la película de  $Cu_2Te$  [34].

Debido a todo lo anterior, es de suma importancia realizar investigaciones enfocadas en mejorar la eficiencia, el tiempo de vida y la calidad de los contactos, para disminuir el impacto ambiental, así como para resolver los problemas tecnológicos que actualmente se presentan.

### **CAPITULO III. JUSTIFICACIÓN**

Desde finales del siglo XX se ha tenido conciencia de los problemas ambientales, económicos y de sustentabilidad que implican basar el consumo energético mundial en la explotación de combustibles fósiles. Los problemas causados por el uso de combustibles fósiles son muy diversos; entre estos problemas se encuentra principalmente el calentamiento global, contaminación de aguas, suelos y aire, disminución de especies de flora y fauna, inversión térmica, entre otros. Estos problemas afectan indudablemente a la población de todo el mundo disminuyendo su calidad de vida, afectando la economía y el sano desarrollo.

Ante esta problemática se han desarrollado distintos métodos y técnicas que nos permiten aprovechar energías renovables para nuestro consumo, como son Eólica, Geotérmica, Hidráulica, Solar y Biomasa. Sin embargo, la base de la economía sigue siendo energía proveniente de fuentes no renovables y las nuevas tecnologías solo cubren un pequeño porcentaje de nuestras necesidades energéticas. **[35]**

Una de estas energías es la energía solar, aprovechable mediante celdas fotovoltaicas. Las celdas fotovoltaicas se fabrican con materiales semiconductores, los cuales actúan como aislantes a bajas temperaturas, pero también pueden ser conductores cuando son expuestos al calor o a la energía lumínica, es decir, tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Este fenómeno se denomina efecto fotoeléctrico.

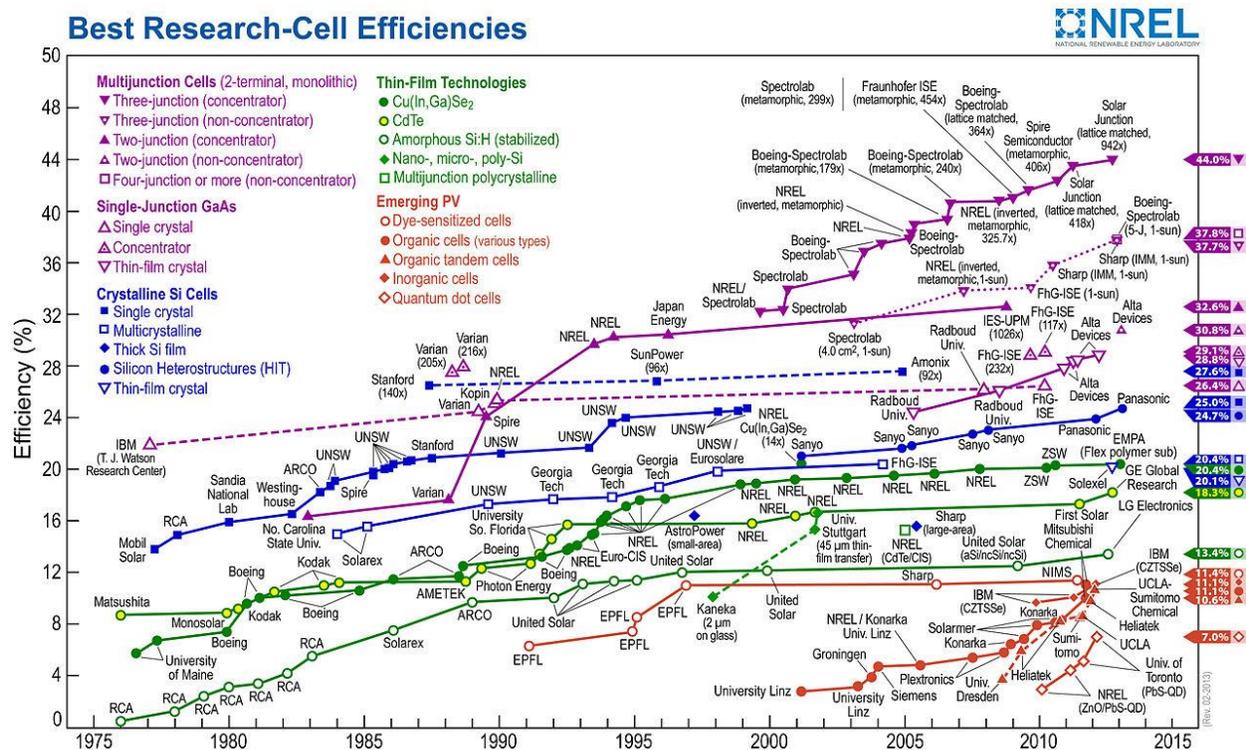
Una celda fotovoltaica es un dispositivo formado por una lámina pequeña de material semiconductor compuesta por una capa de material tipo n y otra capa tipo p que al estar unidas se genera un campo eléctrico en la unión p-n. Cuando la luz incide sobre la célula en el material tipo n los fotones rompen el par electrón-hueco. El campo eléctrico de la unión los separa para evitar que se recombinen, llevando los electrones a la zona n y los huecos a la zona p. mediante un conductor externo, se conecta la capa negativa a la positiva, generando un flujo de electrones. **[36][19]**

El uso de celdas fotovoltaicas como fuente de energía alternativa es un campo muy prometedor ya que la fuente de energía es prácticamente inagotable, y se puede

utilizar en casi todo el país debido a que la radiación solar es alta en la mayor parte del territorio. Además, la tecnología fotovoltaica permite construir sistemas de generación eléctrica distribuidos en zonas alejadas de la red eléctrica, lo que lo convierte en una muy buena alternativa energética. [20] Entre las ventajas más destacadas en el uso de esta tecnología se pueden resaltar las siguientes:

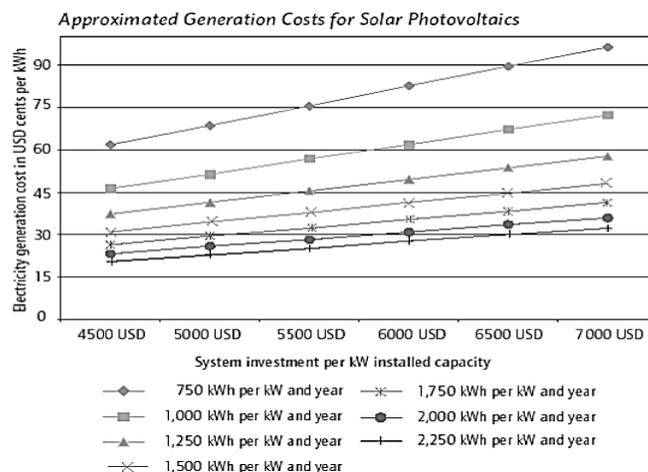
- No tienen partes móviles que se desgasten.
- No contienen fluidos o gases que puedan derramarse o fugarse.
- No consumen combustible para operar.
- Tienen una respuesta rápida, alcanzando plena producción eléctrica instantáneamente.
- No producen contaminación al generar electricidad.
- Requieren poco mantenimiento si están correctamente fabricados e instalados.
- El 85% de las celdas fotovoltaicas se fabrican de silicio, el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre.
- Son modulares, por lo que permiten un amplio rango de aplicaciones solar-eléctricas.
- Tienen una eficiencia de conversión de luz solar a electricidad relativamente alta.
- Se pueden instalar en zonas descentralizadas.

Los materiales que se utilizan son muy variados y la combinación de ellos muestra una mejor eficiencia, por lo que en los últimos años se investigan nuevas configuraciones; la **Fig. 3.1** muestra el incremento en la eficiencia de algunas celdas en los últimos años. Se puede ver claramente como este sector ha incrementado en gran medida su influencia en los últimos años.



**Fig. 3.1** Eficiencia en celdas durante los últimos años en diferentes centros con diferentes materiales. [20]

Los costos de generación mediante sistemas fotovoltaicos son muy variables y dependientes del sitio donde se instalan. Dos sistemas similares instalados en sitios con niveles de irradiación diferentes producirán cantidades diferentes de energía eléctrica. La explicación es muy sencilla: para dos sistemas similares su inversión inicial es la misma, sin embargo la cantidad de energía que producirán a lo largo de su vida útil diferirá de manera casi proporcional a como difieren los niveles de radiación en ambos lugares. La temperatura ambiente y el porcentaje de radiación difusa son también factores que afectan la producción de energía y por ende los costos de generación de la misma. [22] En la **Fig. 3.2** se muestran los costos de generación aproximados por kWh.



**Fig. 3.2** Costos en USD por kWh a diferentes radiaciones.

México es un país que tiene mucha ventaja respecto a otros, ya que por su ubicación geográfica gran parte de su territorio recibe altos índices de radiación cada día, lo que hace que la instalación de energía fotovoltaica sea una opción viable. El estado de Querétaro es uno de los estados que recibe mayor radiación solar, 6-7 kWh en la mayor parte de su superficie [21]. Si a esto le sumamos el hecho de que su extensión geográfica también es grande, la aplicación de esta tecnología es una excelente alternativa.

Sin embargo la fabricación y optimización de dispositivos fotovoltaicos presenta aún muchos retos para los investigadores y los gobiernos, como es:

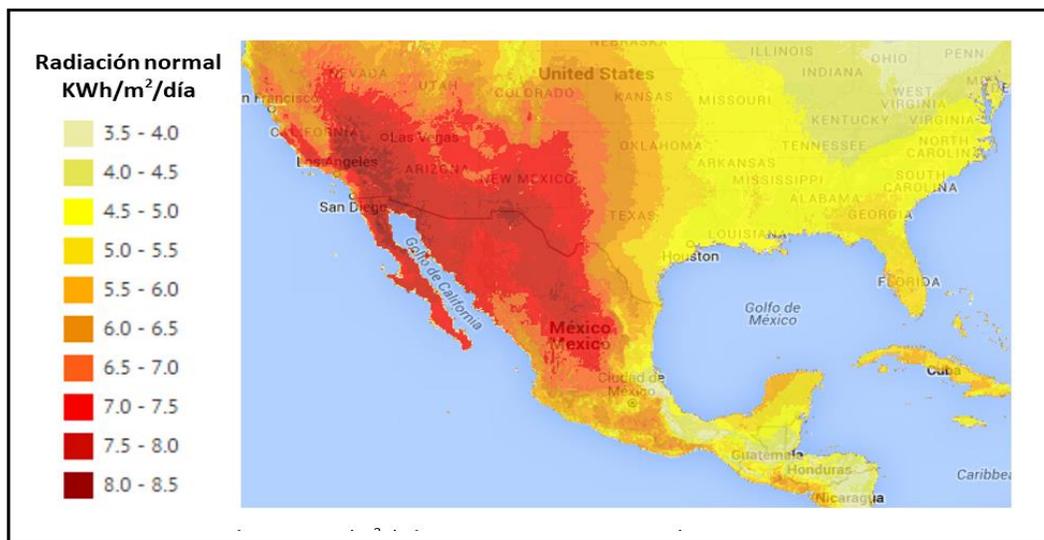
- No son económicamente competitivos para la mayoría de las aplicaciones, especialmente en aplicaciones de escala intermedia y grande.
- En la manufactura se requiere el manejo de sustancias nocivas para el ambiente en caso de descargas accidentales.
- Las tecnologías de producción están controladas por los países industrializados.
- Los contactos en los dispositivos presentan resistencia de contacto y afectan disminuyendo el rendimiento de las celdas.

Por esto es importante innovar e implementar sistemas con esta tecnología, mejorarlos y rediseñarlos para aumentar su eficiencia.

Debido a que los contactos óptimos utilizados en las celdas deben tener bajas resistencias y un comportamiento lineal o casi lineal en sus características de corriente-voltaje, representan uno de los retos actuales en este sector. Estos contactos se denominan contactos óhmicos.

Los contactos óhmicos deben tener bajas resistencias eléctricas ya que al ser elevadas producen calentamiento por efecto joule dando origen a migración de defectos cristalinos hacia la región activa del dispositivo, degradando su desempeño y disminuyendo su tiempo de vida. Los materiales que se utilizan para su fabricación también son muy importantes ya que de sus propiedades dependerán las propiedades del contacto y del dispositivo en que se emplean. [2]

Por todo lo anterior, la implementación de un laboratorio de depósitos metálicos en la Universidad Autónoma de Querétaro es de gran importancia, ya que actualmente no se encuentra ningún laboratorio que realice esto en la universidad. Y esto ayudaría al desarrollo científico y tecnológico de la misma.



**Fig. 3.3** Radiación en kWh/m<sup>2</sup> /Día, promedio anual en México, NREL. [20]

## **CAPITULO IV. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **4.1 Objetivos**

#### **4.1.1 General**

Encontrar las condiciones óptimas para el depósito de oro en un equipo de sputtering para la implementación de un laboratorio especializado en el estudio de contactos óhmicos en la Universidad Autónoma de Querétaro.

#### **4.1.2 Particulares**

Implementar un laboratorio de depósitos metálicos en la Universidad Autónoma de Querétaro campus Aeropuerto.

Determinar las condiciones óptimas de funcionamiento del equipo.

Determinar el espesor del depósito en función del tiempo utilizando la interferometría óptica.

Determinar el espesor del depósito en función de la distancia utilizando la interferometría óptica.

Determinar el espesor del depósito en función de la ubicación de la muestra en el portamuestras del equipo utilizando la interferometría óptica.

Realizar depósitos de oro sobre celdas de CdTe/CdS/ITO y medir su comportamiento y la resistencia de contacto.

## **4.2 Hipótesis**

Estandarizar las condiciones de depósito de contactos óhmicos sobre estructuras de materiales semiconductores para su uso en celdas solares hará más eficiente el uso de recursos y materiales en el proceso.

## CAPITULO V. METODOLOGÍA

### 5.1. Diseño del laboratorio

Se realizó la búsqueda del equipo adecuado, materiales, y reactivos necesarios que se ajustaran al presupuesto disponible en el proyecto.

#### 5.1.1 Equipo.

Se realizó la búsqueda de equipos de depósito con el método de sputtering en eBay y con varios proveedores de equipos. Se encontraron dos equipos que se acercaron al presupuesto del proyecto, se muestran en la **Tabla 5.1**

**Tabla 5.1** Comparación de equipos de sputtering cotizados.

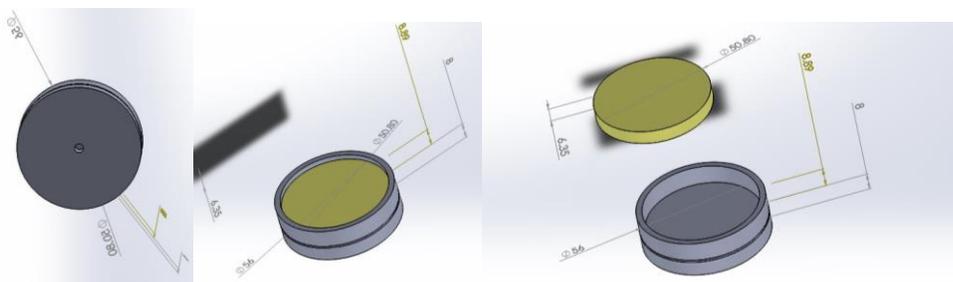
Equipo	Tipo de sputtering	Costo USD
HVMSS-SPC-2F	Magnetron	12 000
MNT-JS1600.	DC	10 000

De acuerdo al presupuesto se adquirió el equipo MNT-JS1600 a pesar de la superioridad tecnológica del equipo HVMSS-SPC-2F debido a que el segundo superó el presupuesto del proyecto. El equipo se adquirió con el proveedor AR instrumentación y sistemas.

#### 5.1.2 Reactivos y Materiales de depósito

Se realizaron cotizaciones de los blancos de Cu, MoO<sub>3</sub>, Al, Cu<sub>2</sub>Te, materiales comunes para fabricar contactos óhmicos en celdas de CdTe. Se realizó la compra de MoO<sub>3</sub>, el cual se espera recibir en las semanas siguientes al término de este trabajo y sea utilizado para futuros proyectos.

También se diseñaron y mandaron fabricar en acero inoxidable, portablancos apropiados a las características del equipo adquirido. La **Fig. 5.1** muestra el diseño de dicho portablancos.



**Fig. 5.1** Diseño de portablanco realizado con Solid Works. Las dimensiones se encuentran en milímetros.

Así mismo se realizaron cotizaciones de materiales de uso general. La **Tabla 5.2** muestra la lista de materiales adquiridos.

**Tabla 5.2** Lista de materiales

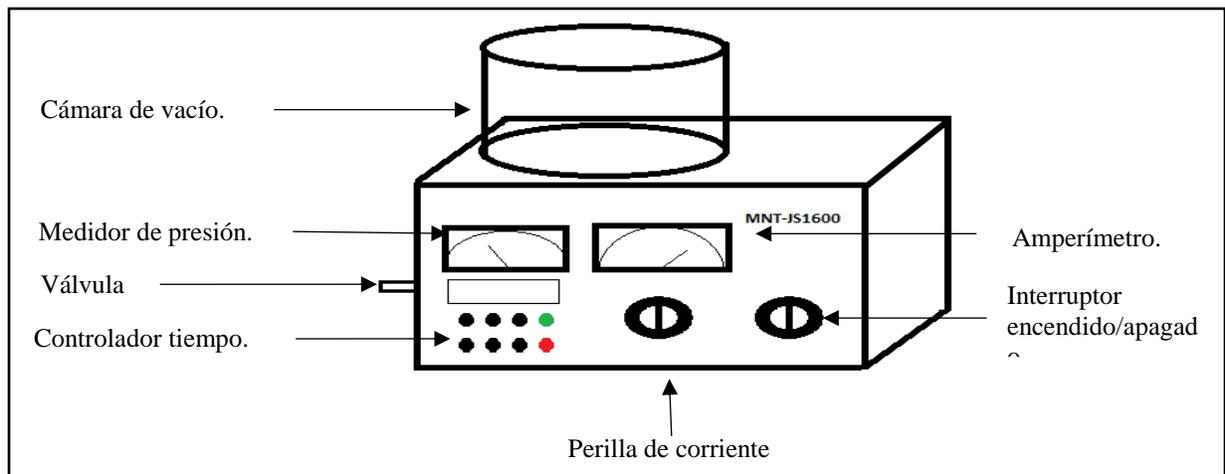
Alcohol etílico	Dicromato de potasio.
Acetona	Paños libres de pelusa.
Vidrio Corning portamuestras.	Guantes de nitrilo libres de polvo
Acetona botella de 3.5L	Ácido sulfúrico botella 3.5 L
Piceta propileno 500mL.	Ácido sulfúrico 96-98%. 3.5L.
Etanol botella de 3.5L	Ácido clorhídrico. 3.5L.
Pinzas de disección sin dientes.	Ácido fluorhídrico 48-52%,
Vaso de precipitado.	Vidrios con recubrimiento de ITO
Probeta graduada de vidrio borosilicato	Termómetro de -10°C a 260°C.

Además, fue necesario adquirir el cilindro de gas Argón por separado ya que el equipo no lo incluía. Para esto se realizaron cotizaciones tanto del gas como del cilindro y se realizó la compra. También se cotizaron e instalaron las conexiones y mangueras necesarias para el sistema de gas.

## 5.2. Implementación del equipo

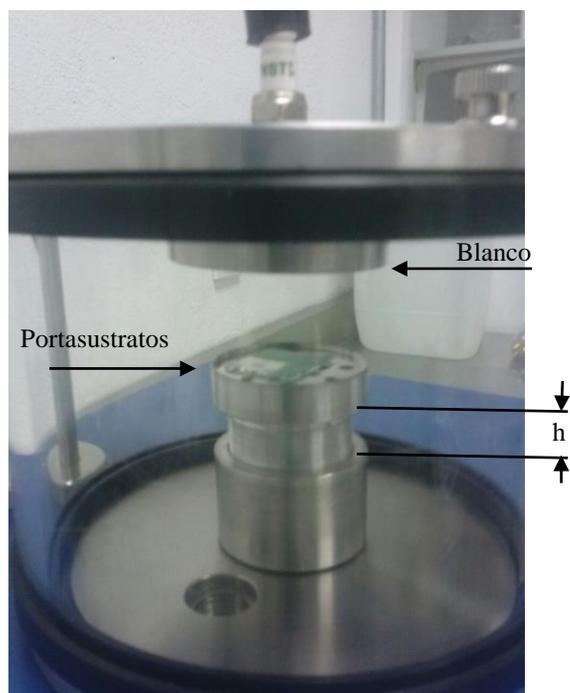
La **Fig. 5.2** esquematiza los la unidad principal del equipo y posteriormente se describe su manejo. En la unidad principal se controla el plasma y el depósito.

- La válvula sirve para llenar y controlar el gas de trabajo dentro de la cámara de vacío y ajustar la corriente del sputtering.
- El medidor de presión indica el nivel de vacío que se encuentra en la cámara.
- El amperímetro indica la corriente de operación del sputtering en mA.
- En el controlador de tiempo se indica el tiempo deseado de depósito.
- La perilla de corriente permite controlar la corriente.
- El interruptor de encendido apagado permite controlar el encendido y apagado del equipo y de la bomba de vacío, ya que la fuente de energía de la bomba viene directamente de la unidad principal del equipo.



**Fig. 5.2** Esquema de la unidad general del equipo de sputtering MNT-JS1600

El blanco se encuentra en la tapa superior de la cámara de vacío, mientras que el portasustratos se encuentra en la parte inferior. El diseño del equipo permite cambiar la altura del portasustratos para acercarlo o alejarlo del blanco. La **Fig. 5.3** muestra una foto de la cámara de vacío y donde se muestra que valor de altura es posible variar.



**Fig. 5.3** Cámara de vacío.

### 5.2.1 Instalación

Se instaló una entrada de voltaje adecuada para el equipo adquirido en el laboratorio. Para la puesta en marcha inicial del equipo se realizó el proceso indicado para la conexión de la bomba.

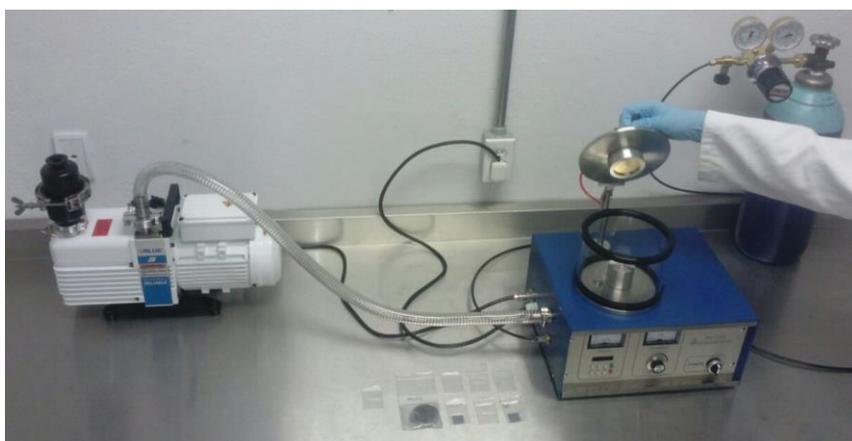
1. Se retiraron las protecciones de plástico de las conexiones del equipo y de la bomba.
2. Se conectó el tubo de vacío a la bomba y al equipo y se aseguró con anillos de abrazadera.
3. Se llenó la bomba con aceite para vacío hasta la posición indicada entre 1/2 y 2/3 en el medidor.
4. Se instaló el filtro de la bomba de vacío y se aseguró con un anillo de abrazadera.

Para la instalación del blanco de oro se siguió el siguiente proceso.

1. Se colocó el tornillo del cátodo en la bujía en la tapa de la cámara de vacío.
2. Se colocó el soporte del blanco en el tornillo de la bujía.
3. Se colocó la cubierta del cátodo dejando un espacio entre esta y el portablanco de 2 milímetros.

Finalmente se instaló el sistema de gas en la válvula del equipo.

Todo lo anterior se llevó a cabo de acuerdo a los manuales de operación, videos tutoriales del proveedor y la asesoría de un técnico del CINVESTAV Unidad Querétaro.



**Fig. 5.4** Instalación del equipo. Conexión de los componentes.

### 5.2.2 Pruebas de funcionamiento

Las pruebas de depósito se realizaron sobre vidrio Corning. Para el uso de los vidrios primero se realizó una limpieza y posteriormente se cortaron.

- Limpieza
  - Los vidrios se lavan con un jabón especial que no deja residuos y una esponja suave que no raye el vidrio.
  - Los vidrios se colocan 24 hr en mezcla crómica ( $K_2Cr_2O_7 + H_2SO_4$ ).
  - Se enjuagaron con agua desionizada.
  - Se colocaron durante dos hr en Ácido Nítrico 3:1 a 200°C.
  - Se enjuagaron con Etanol.

- Finalmente se guardan en Etanol para su posterior uso.
- Corte de vidrios.
  - Los vidrios se cortaron en dimensiones de 1x1 pulgadas con un cortador de vidrios del laboratorio de Materiales y Dispositivos para Medio Ambiente y Energía del CINVESTAV Unidad Querétaro.

Se siguieron los pasos de manejo de acuerdo al manual. Se tuvieron algunas complicaciones debido a que algunos detalles no eran claramente descritos por el manual. Mediante diferentes pruebas y modificando parámetros se resolvieron estas complicaciones hasta lograr el funcionamiento del equipo. Se reporta en este trabajo una guía de funcionamiento del equipo.

### **5.3. Estandarización del equipo**

Para la caracterización del equipo se realizaron distintos depósitos de oro sobre vidrio Corning de 1X1 pulgadas para evaluar la razón de crecimiento en función de la altura del portasustratos, la posición en el portasustratos y el tiempo de depósito. Para medir la razón de depósito se utilizó cinta capton resistente a altas temperaturas. Se colocó cinta sobre una parte del vidrio y se realizó el depósito, posteriormente se retiró la cinta y quedó formado un escalón de oro.

Todos los depósitos se realizaron utilizando una corriente de 10 mA y una presión de  $10^{-1}$  mbar.

#### **5.3.1 Altura**

Se realizaron depósitos variando la altura  $h$  del portasustratos. Los depósitos se hicieron por 3 minutos con valores de altura  $h = 0$  (altura mínima), a  $h = 10.97$  mm y  $h = 21.95$  mm (altura máxima).

#### **5.3.2 Ubicación**

Se realizaron depósitos variando la ubicación de la muestra en el portasustratos del equipo.

### **5.3.3 Tiempo**

Se realizaron depósitos variando tiempos  $t$  de crecimiento. Se hicieron depósitos de 2, 3, 4, 5 y 6 minutos.

## **5.4 Depósito oro con mascarilla**

Se realizaron depósitos de contactos sobre vidrio utilizando una máscara de acero inoxidable de espesor 0.8mm con patrones circulares de 1.8 mm de diámetro aproximadamente.

### **5.4.1 Diseño de la máscara**

Se utilizó una máscara proporcionada por el laboratorio de Materiales y Dispositivos para Medio Ambiente y Energía del CINVESTAV Unidad Querétaro. Sin embargo esta era muy frágil por lo que la máscara no hacía contacto uniforme en todo el sustrato, por lo que no definía bien el contacto y los depósitos quedaron difusos dificultando mucho su medición.

Por lo anterior se buscó el diseño de una máscara lo suficientemente firme para que hiciera contacto con el vidrio y los depósitos no quedaran difusos, teniendo como resultado final una mascarilla de acero templado.

### **5.4.2 Metodología de depósito**

El depósito de los contactos se realizó utilizando los mismos parámetros que en las pruebas del equipo. Sin embargo, para comprobar que la razón de depósito permanecía constante se realizaron variaron algunos parámetros. Los depósitos se realizaron utilizando la altura máxima de portasustratos.

#### **5.4.2.1 Tiempo**

Se realizaron depósitos variando tiempos de crecimiento, utilizando 2, 4 y 6 minutos.

#### **5.4.2.2 Ubicación**

Se realizaron depósitos variando la ubicación de la muestra en el portamuestras del equipo.

### **5.5 Caracterización de espesor mediante perfilometría.**

Las pruebas de perfilometría se realizaron inicialmente con un perfilometro mecánico de aguja. Sin embargo, al ser una caracterización de contacto y al haber poca adherencia entre el oro y el vidrio, dañaba la muestra y los datos obtenidos no eran confiables. Por lo anterior se buscó medir las muestras en un interferómetro. Todas las muestras realizadas se caracterizaron mediante interferometría de corrimiento de fase, utilizando el equipo Contour GT en el laboratorio de microscopia de fuerza atómica del CINVESTAV Unidad Querétaro.

Los datos obtenidos se trataron con el programa Gwyddion para obtener los perfiles de las muestras, vistas en tres dimensiones y observar la uniformidad del depósito.

## CAPITULO VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1 Guía de usuario

De acuerdo a las indicaciones del manual y de las primeras pruebas se determinó el procedimiento para realizar los depósitos en el equipo Sputtering. Queda registro del proceso para futuros trabajos que se realicen con el equipo.

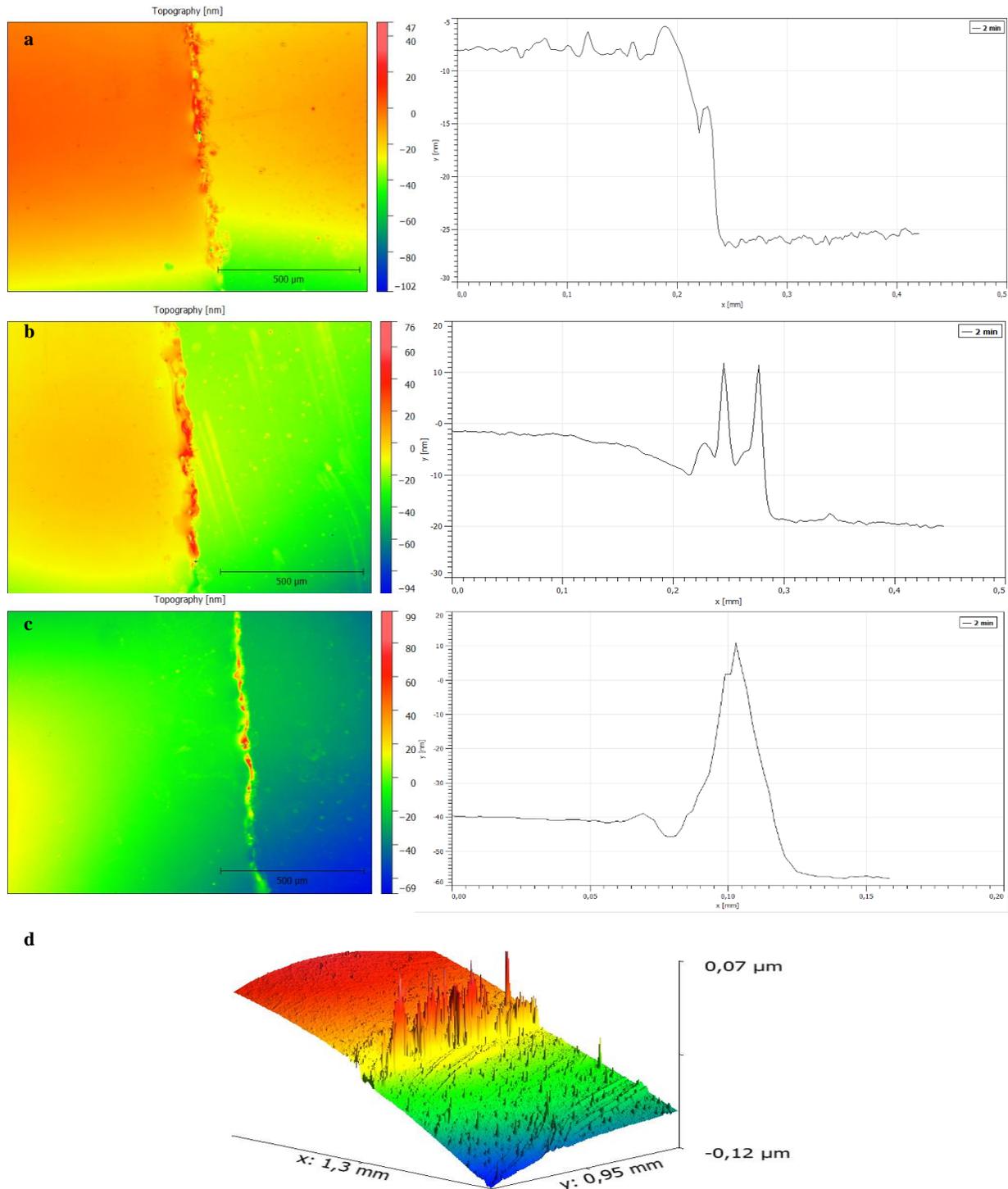
El procedimiento es el siguiente

1. Conectar el equipo a la toma de corriente.
2. Girar el interruptor encendido apagado en sentido de las manecillas del reloj.
3. Colocar la muestra en la cámara.
4. Cerrar la válvula de aguja para evitar fugas.
5. Encender la bomba de vacío.
6. Esperar hasta que la aguja indique  $8 \times 10^{-2}$  mbar.
7. Las válvulas del tanque de argón.
8. Abrir la válvula de aguja del equipo para permitir la entrada de argón a la cámara de vacío.
9. Controlar la válvula para que la presión se mantenga en  $10^{-1}$  mbar.
10. Ingresar el tiempo de depósito, presionar el botón rojo S/H y girar la perilla de corriente al máximo.
11. Controlar que la corriente no sobrepase los 10 mA y que la presión no baje de  $10^{-1}$  mbar.
12. Cuando termine el depósito, girar la perilla de corriente a 0 mA.
13. Apagar la bomba de vacío.
14. Cerrar las válvulas del tanque de argón y abrir la válvula de aguja del equipo.
15. Abrir la cámara de vacío y retirar la muestra.
16. Apagar el equipo y desconectarlo del tomacorriente.

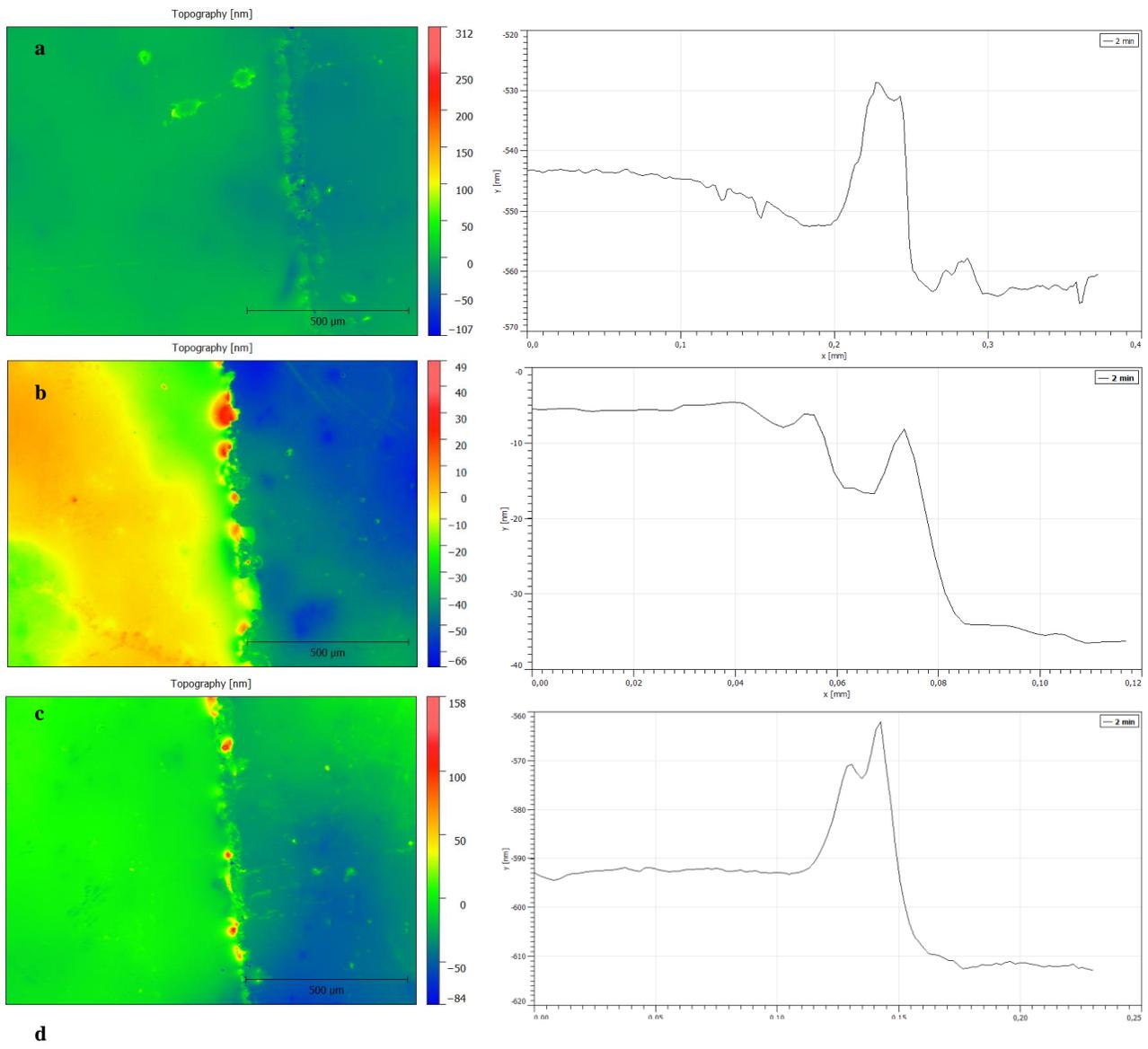
### 6.2 Estandarización del equipo.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las perfilometrías de las muestras realizadas. Se muestran las topografías y una gráfica para cada muestra. Al final se resumen los espesores en la **Tabla 6.1** obtenidos en cada muestra y se promedian los resultados para obtener un valor representativo.

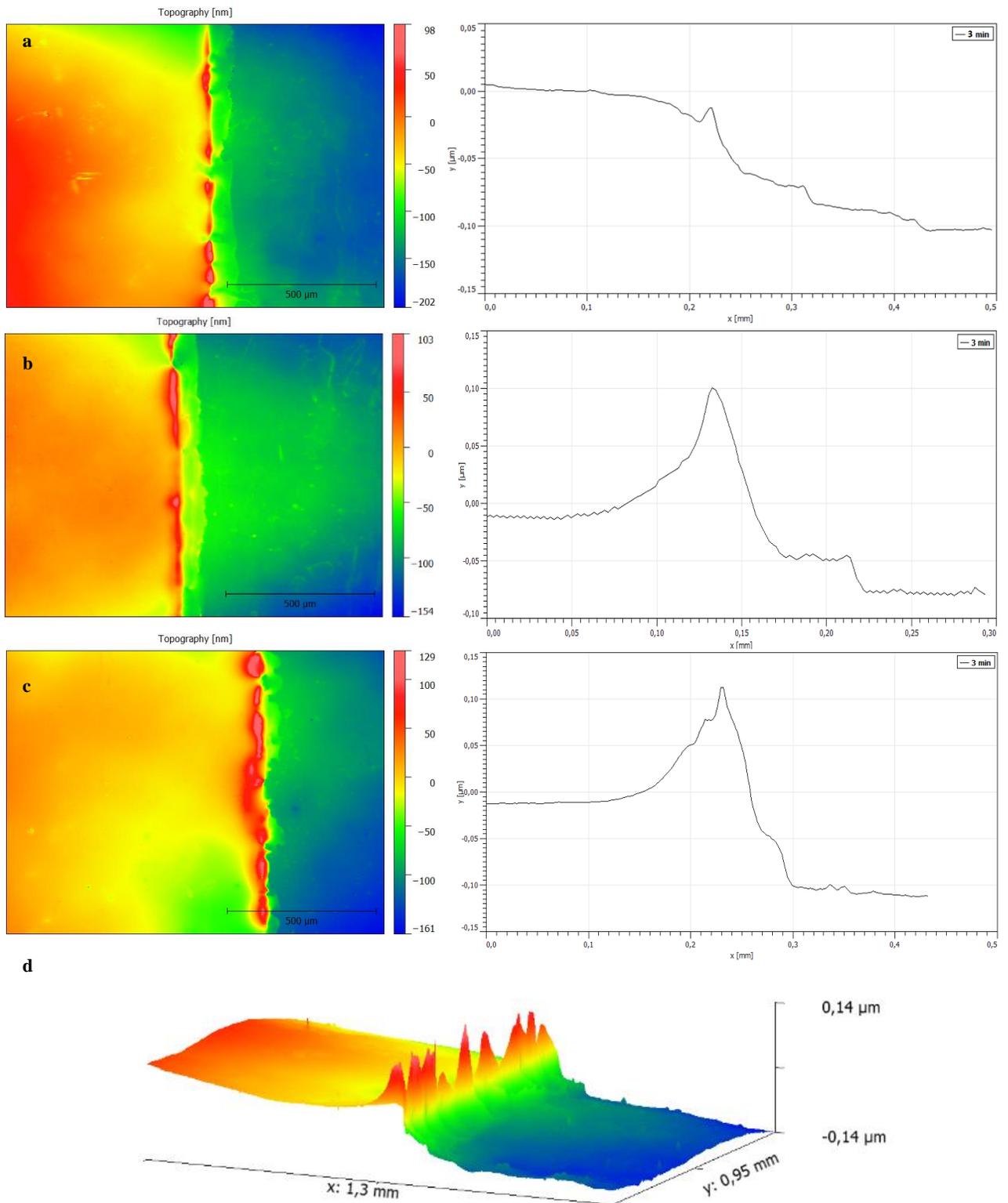
Es importante resaltar que no fue posible medir las muestras con la altura de portasustratos mínima debido a que el espesor fue demasiado pequeño, haciendo que el equipo no pudiera distinguir entre el vidrio y el oro. Además, las muestras más delgadas son más susceptibles a dañarse, sobre todo por la poca adherencia que se presenta entre el oro y el vidrio.



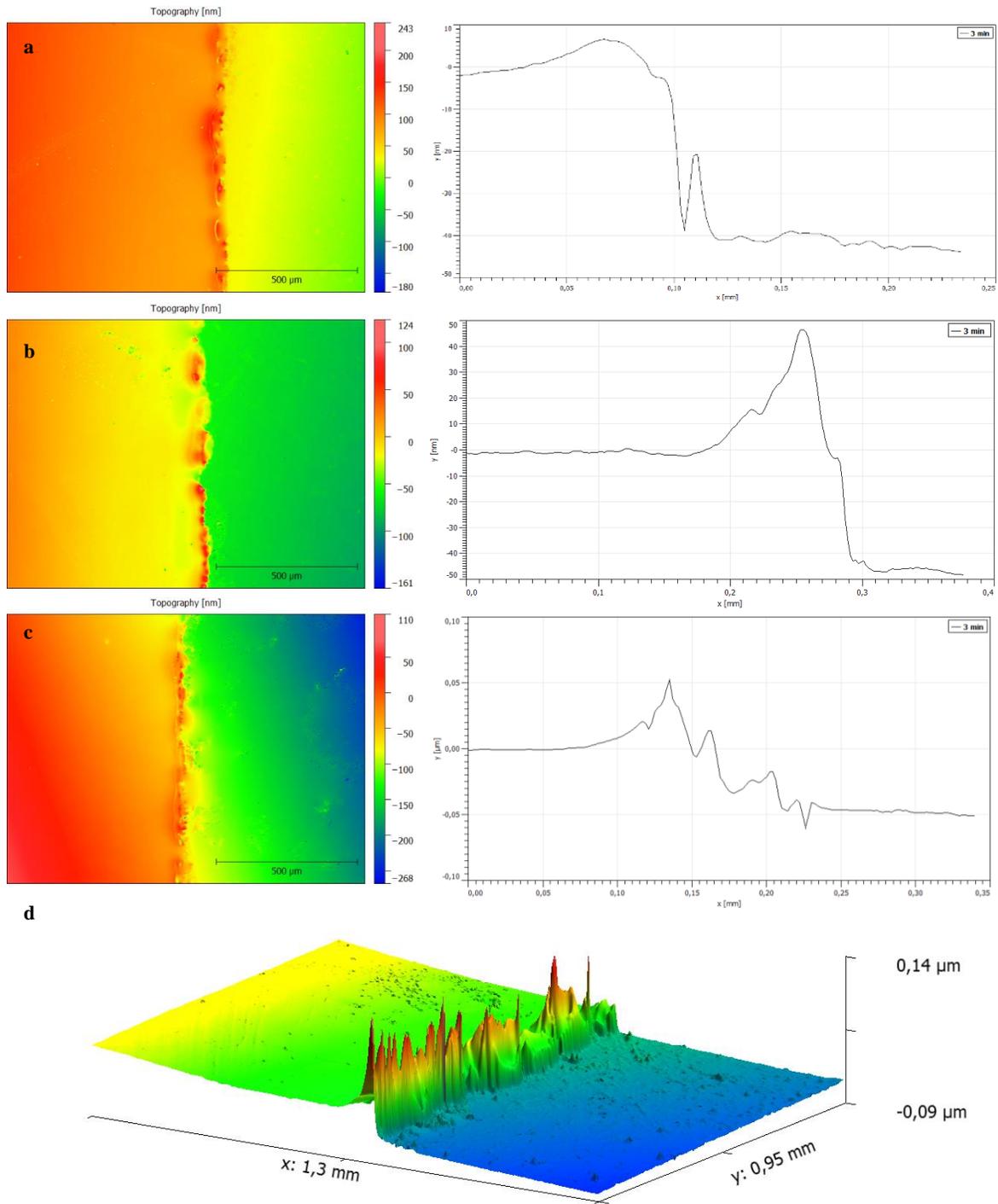
**Fig. 6.1** Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con dos minutos de depósito a una altura media en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra.



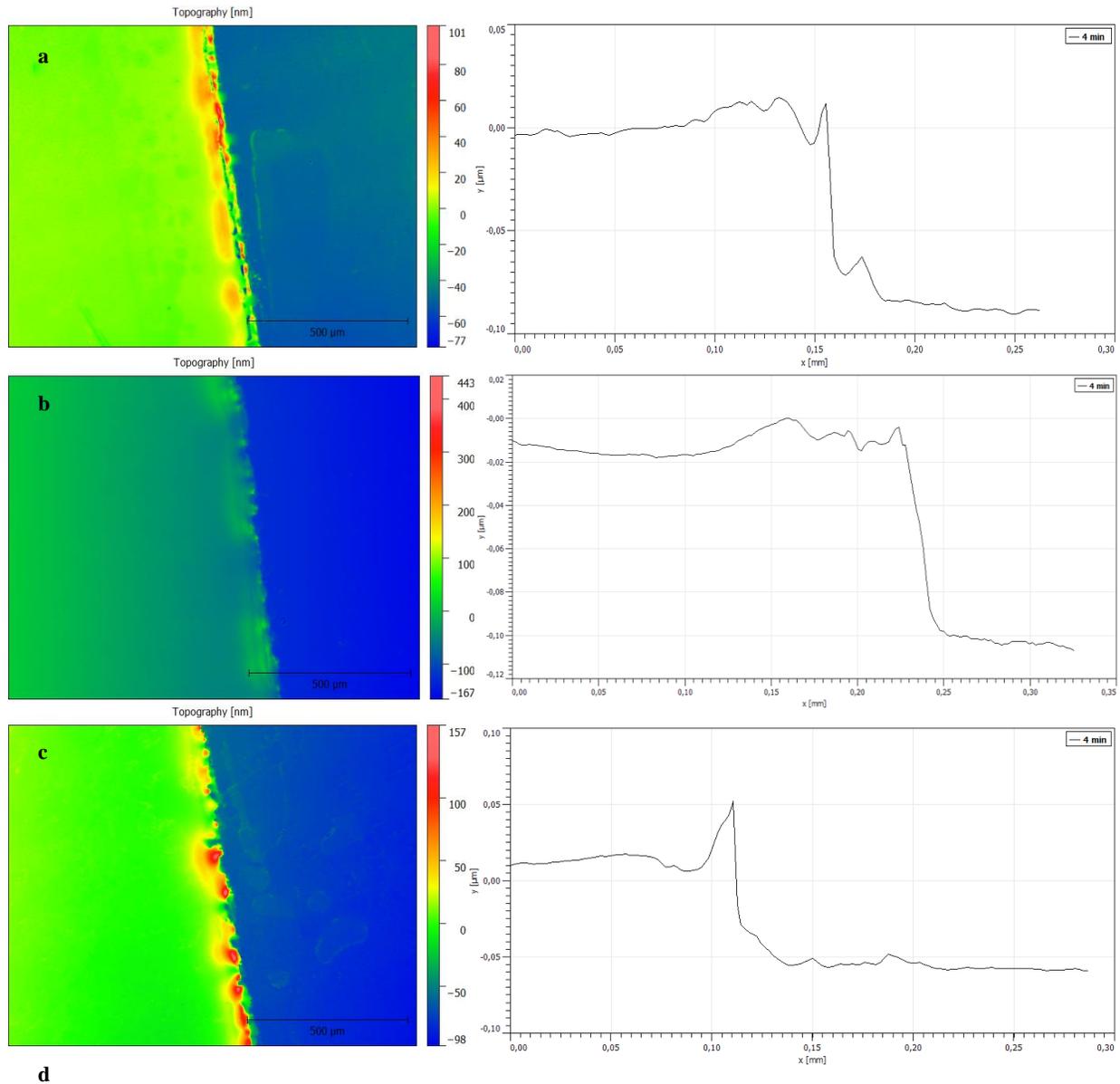
**Fig. 6.2** Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con dos minutos de depósito a una altura máxima en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra.



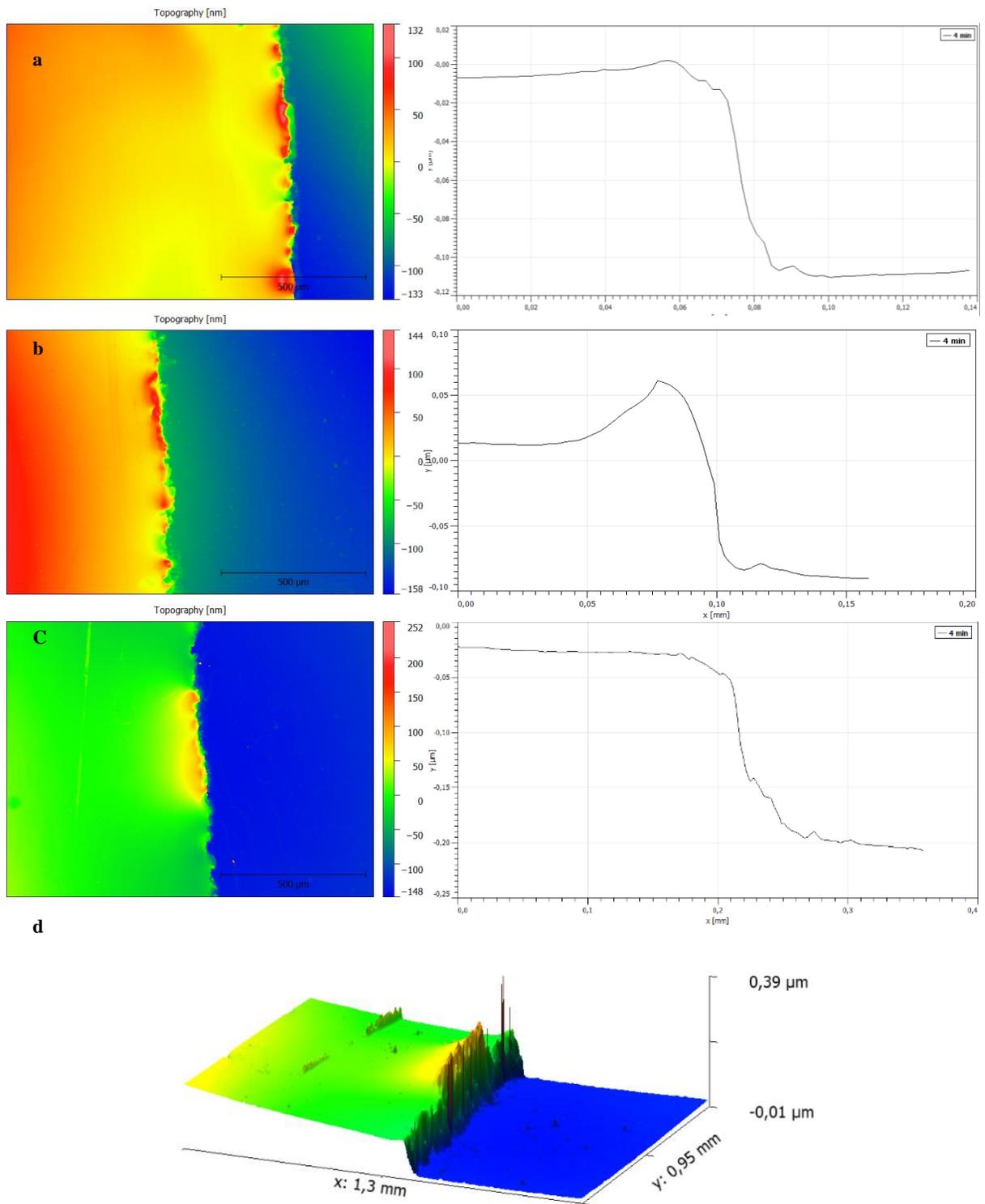
**Fig. 6.3** Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con tres minutos de depósito a una altura media en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra.



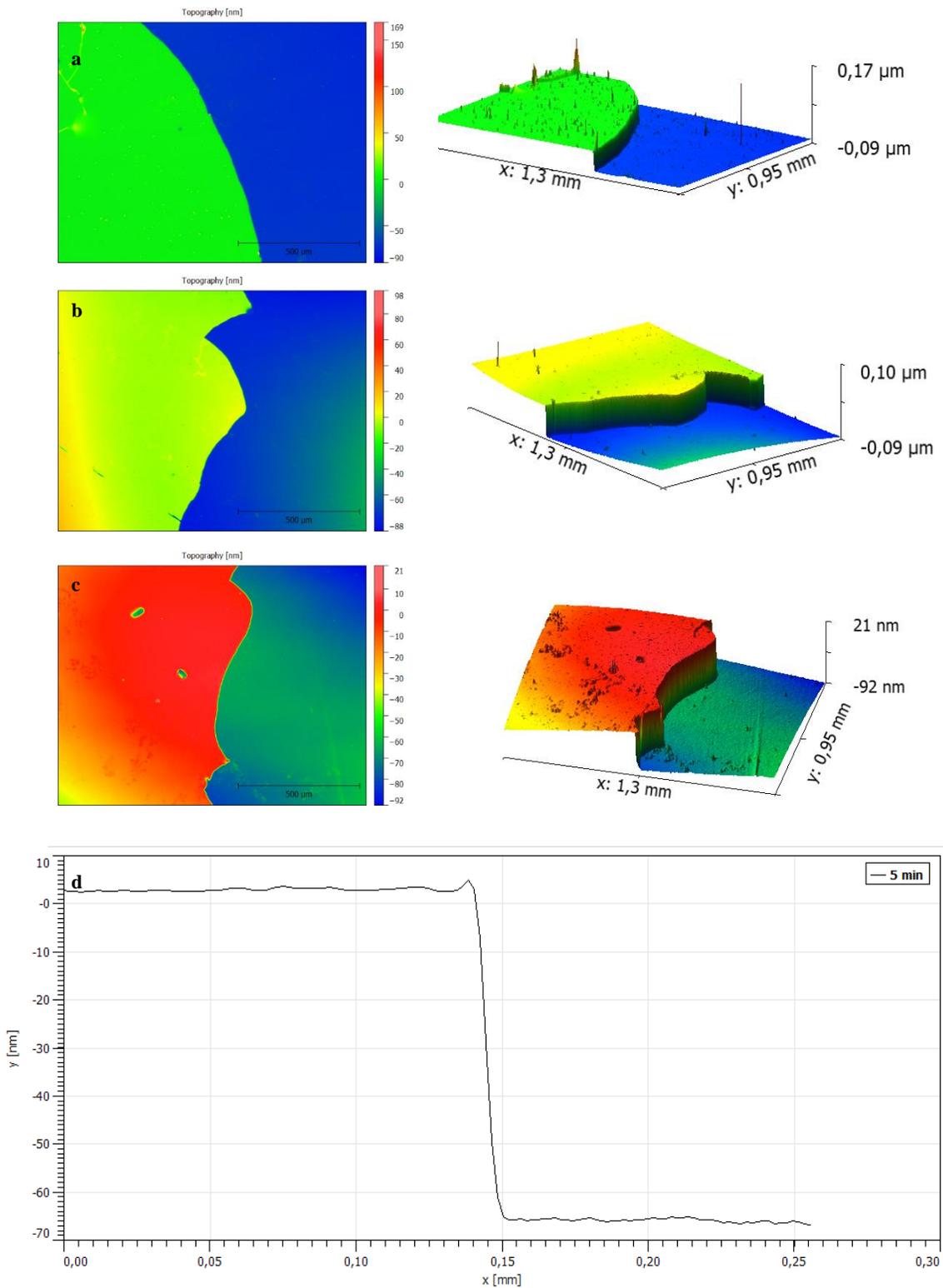
**Fig. 6.4** Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con tres minutos de depósito a altura máxima a en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra.



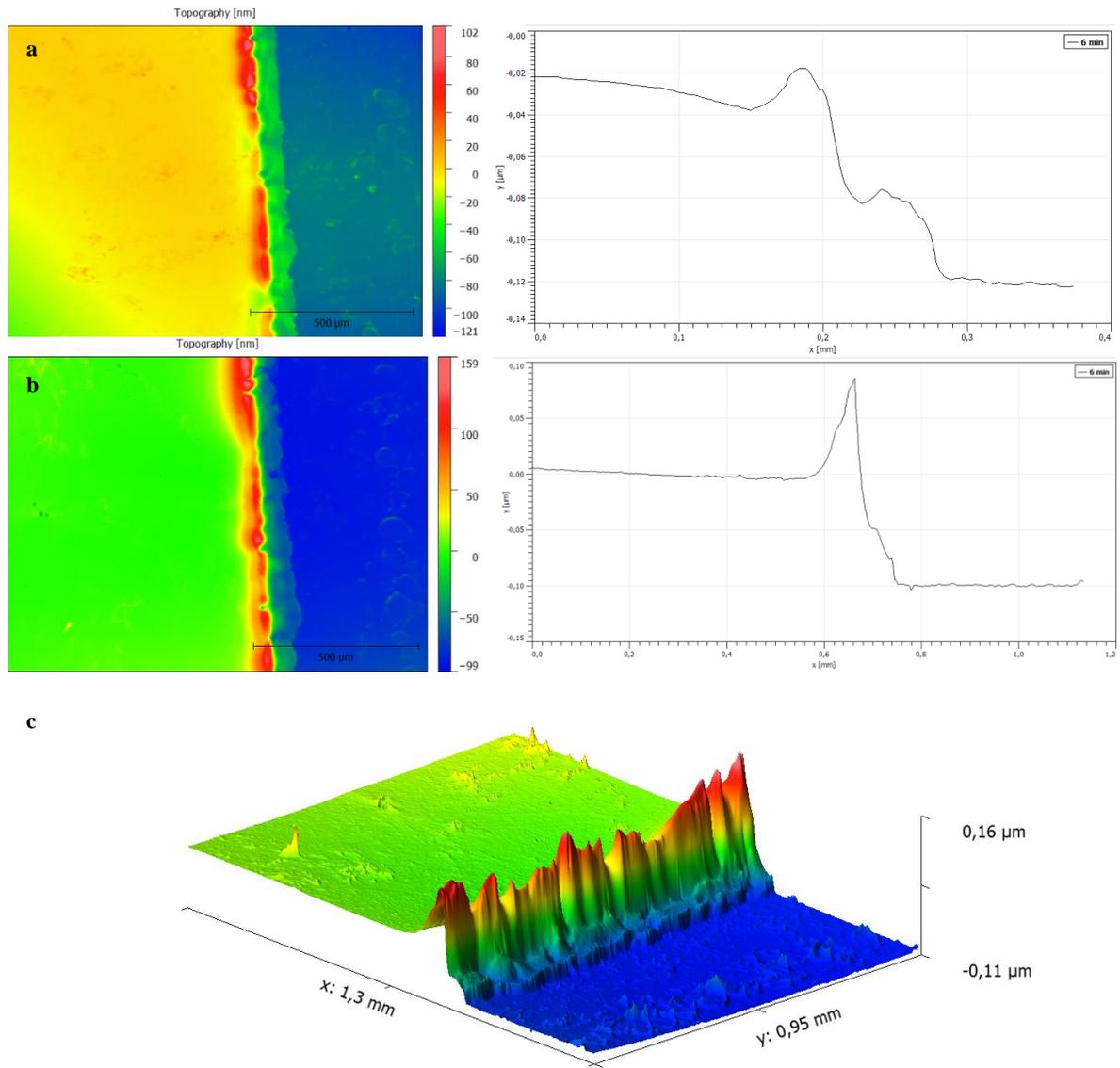
**Fig. 6.5** Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con cuatro minutos de depósito a una altura media en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra.



**Fig. 6.6** Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con cuatro minutos de depósito a una altura máxima en: a) El centro de la muestra, b) un extremo de la muestra, c) el extremo opuesto, y d) una vista en 3d de la muestra.



**Fig. 6.7** Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con cinco minutos de depósito a una altura máxima en centro de la muestra en diferentes zonas a), b), c) y las vistas en 3d de cada zona. Y d) Muestra una gráfica de perfilometría de la muestra.



**Fig. 6.8** Se muestran las perfilometrías realizadas a la muestra con seis minutos de depósito a una altura máxima en el centro de la muestra a) y b) y c) una vista en 3d de la muestra.

### 6.2.1 Análisis cualitativo

En las topografías se pueden observar los escalones depositados para la estandarización del equipo. Mediante la escala se puede observar que justo en el borde de cada escalón el espesor es mayor que en el resto del depósito. Esto también se observa en las gráficas del perfil, donde justo antes del escalón se ven picos e irregularidades.

Lo anterior puede tener varias causas. La primera es que el método de depósito del escalón lo provoque. Ya que al retirar la cinta después del depósito se pueden dañar los bordes. O que el depósito se realice de manera irregular por la presencia de la cinta, la cual es aproximadamente 1000 veces más gruesa que las películas de oro. Otro motivo de observar este efecto es que al ser un método de caracterización óptica puede haber problemas de dispersión de luz que hace que pequeños defectos se vean incrementados más de lo que estos pudieran ser.

En la mayoría de los depósitos se observa que la calidad de los bordes es mejor en el centro del escalón que en los bordes de las muestras, esto se observa tanto en las topografías como en las gráficas de los perfiles de la **Fig. 6.4** En los perfiles realizados en el centro de la muestra se ve más uniforme el borde con el resto de la muestra, es decir, los bordes presentan menos irregularidades respecto al resto de la superficie del depósito y se ve menos abrupto el corte del escalón. En cambio, en los perfiles realizados en los extremos de la muestra se observa más irregular la superficie del depósito, el borde del escalón y el corte del mismo. **Fig. 6.5.**

Lo anterior también se presenta en los perfiles, donde en los bordes se presentan más picos abruptos que en el resto del perfil. Esto es también apreciable en las vistas 3d, donde es aún más notable las irregularidades en los bordes.

Realizando una comparación de las topografías y los perfiles de dos muestras con tiempo de depósito al igual que entre ellas pero diferente altura se puede observar que si existen diferencias notables. Tomando como ejemplo dos muestras a 3 minutos de depósito, ambas en el centro del portamuestras y modificando solamente la altura: **Fig. 6.3a** y **Fig. 6.4a.** es notable que el borde de la muestra con

altura mayor es más uniforme, y aunque presenta irregularidades en el borde, en el perfil se observa que el corte en el borde es más abrupto. En la muestra de la **Fig. 6.4a** se observa un corte del escalón menos recto.

Lo anterior se presenta en la mayoría de las muestras al ser comparadas, aunque hay algunas excepciones. Estas excepciones se pueden deber a error humano al preparar la muestra o al retirar la cinta, ya que al hacerlo sin el suficiente cuidado se puede dañar el depósito, causando resultados erróneos.

Finalmente se pueden comparar las características de los depósitos a tiempos pequeños **Fig. 6.2** con los que se realizaron a tiempos más grandes **Fig. 6.7**

En general se puede decir que el depósito es más uniforme en las muestras con más tiempo de depósito, el escalón se forma mejor, no hay tantas irregularidades en los bordes y en general se ve mucho más definido y abrupto. Sin embargo el tiempo, energía y material empleados si es mucho mayor, por lo que dependiendo de la aplicación que se le dará es necesario considerar las condiciones que sean más adecuadas y eficientes para la aplicación requerida.

Por todo lo anterior se puede decir que para lograr mejores depósitos y hacer más eficiente el proceso, se debe realizar el depósito al centro del portamuestras, en la altura máxima y con tiempos iguales o mayores a 3 minutos.

### **6.2.2 Análisis cuantitativo.**

A continuación se presentan los resultados obtenidos en los perfiles de cada muestra resumido en las **tablas 6.1 a 6.5**. Se hace un promedio del espesor de cada una, para finalmente obtener una razón de crecimiento en nanómetros por minuto (nm/min) en cada crecimiento.

Las tablas resumen según tiempos de depósito, altura empleada y posición de la muestra. Cabe resaltar que no se presentan resultados para la altura mínima, ya que no fue posible medirlas, debido a su escaso espesor y poca definición de depósito.

**Tabla 6.1** Valores de espesores obtenidos a diferentes alturas con 2 minutos de depósito.

<i>Altura</i>	<b>Media</b>			<b>Máxima</b>		
<i>Zona</i>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>	<b>Extremo</b>
	16.12	19.89	17.41	37.56	24.6	26.67
	16.67	18.9	13.915	28.59	32.8	23.22
	15.93	26.7	13	24.8	33.3	19.78
	17.11	19.11	14.15	36.44	20	
	16.59	21.1	14.61	38.89		
<i>Promedio</i>	16.484	21.14	14.617	33.261	30.23	23.223
<i>Razón nm/min</i>	<b>8.242</b>	<b>10.57</b>	<b>7.31</b>	<b>16.63</b>	<b>15.11</b>	<b>11.611</b>

**Tabla 6.2** Valores de espesores obtenidos a diferentes alturas con 2 minutos de depósito.

<i>Distancia</i>	<b>Media</b>			<b>Máxima</b>		
<i>Zona</i>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>
	16.12	19.89	17.41	24.6	37.56	26.67
	16.67	18.9	13.915	32.8	28.59	23.22
	15.93	26.7	13	33.3	24.8	19.78
	17.11	19.11	14.15	37	36.44	
	16.59	21.1	14.61	20	38.89	
<i>Promedio</i>	16.484	21.14	14.617	31.925	33.261	23.223
<i>Razón nm/min</i>	<b>8.242</b>	<b>10.57</b>	<b>7.3085</b>	<b>15.963</b>	<b>16.63</b>	<b>11.611</b>

**Tabla 6.3** Valores de espesor obtenidos a diferentes alturas con 3 minutos de depósito.

<i>Distancia</i>	<b>Media</b>			<b>Máxima</b>		
<i>Zona</i>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>
	67.4	77.8	74.4	54.1	92	40.3
	72.6	87.8	70	53.3	90.6	42.2
	71.1	87.2	87.8	53.6	97.8	46.67
	77.8	92.2	68.9	54.2		52.8
	73.3	93.3	87.8	51.59		51.1
	79.3		81.5	48.9		48.5
			73.3	53.7		46.7
<i>Promedio</i>	73.59	87.66	76.85	52.77	93.46	47.89
<i>Razón nm/min</i>	<b>24.53</b>	<b>29.22</b>	<b>25.61</b>	<b>17.59</b>	<b>31.15</b>	<b>15.96</b>

**Tabla 6.4** Valores de espesor obtenidos a diferentes alturas con 4 minutos de depósito.

<i>Altura</i>	<b>Media</b>			<b>Máxima</b>		
<i>Zona</i>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>
	52.6	83.9	62.2	90	119.4	66.7
	53	84.8	62.2	94.4	111.7	61.5
	51.6	80.4	66.7	96.1	104.4	64.4
	53.3	82.4	67.8	95	105	68.9
	51.9	72.2	67.4	87.8	117	65.2
	54.8		61.1			
	51.9		68.5			
<i>Promedio</i>	52.73	80.74	65.13	92.66	111.5	65.34
<i>Razón nm/min</i>	<b>13.2</b>	<b>20.2</b>	<b>16.3</b>	<b>23.17</b>	<b>27.9</b>	<b>16.34</b>

**Tabla 6.5** Valores de espesor obtenidos a diferentes tiempos, con la altura máxima de depósito.

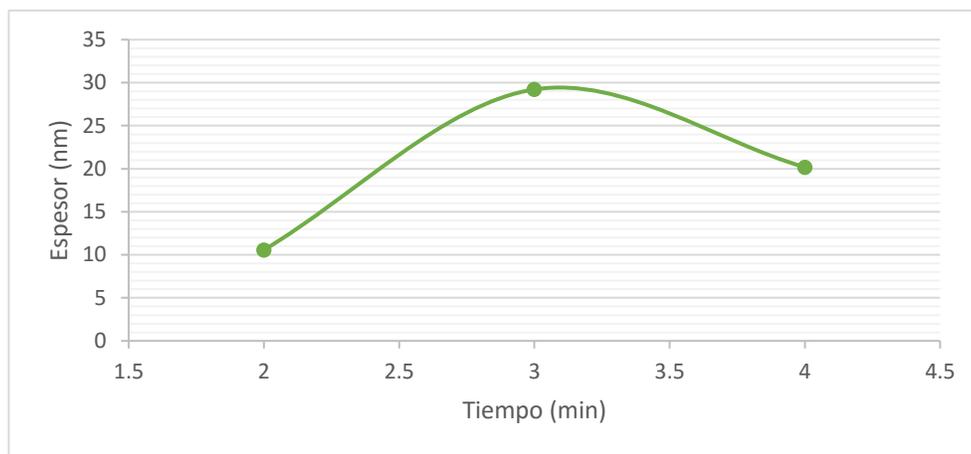
<i>Tiempo</i>	5min			6min	
	<i>Zona</i> Extremo	Centro	Extremo	Extremo	Centro
	70.8	70.7	71.1	93.3	91.1
	69.3	74.7	70.5	88.1	94.4
	70.1	76	71.7	81.5	97.8
	68.9		70.5	72.6	91.1
	67		71.2	88.9	87.8
	67			94.8	86.7
					68.9
<i>Promedio</i>	68.85	73.8	71.1	86.53	88.26
<i>Razón nm/min</i>	<b>13.77</b>	<b>14.76</b>	<b>14.22</b>	<b>14.422</b>	<b>14.71</b>

En las tablas se puede observar claramente como el crecimiento del depósito es mayor en el centro del portamuestras. Siendo relativamente pequeña en la mayoría de los casos. Desde menos de un nanómetro hasta casi el doble de crecimiento. Se observa que la diferencia es mayor cuando más cerca está la muestra del blanco. Esto es, cuando la altura es mayor, más grande se hace la diferencia de crecimiento entre las zonas centrales de la muestra y sus extremos.

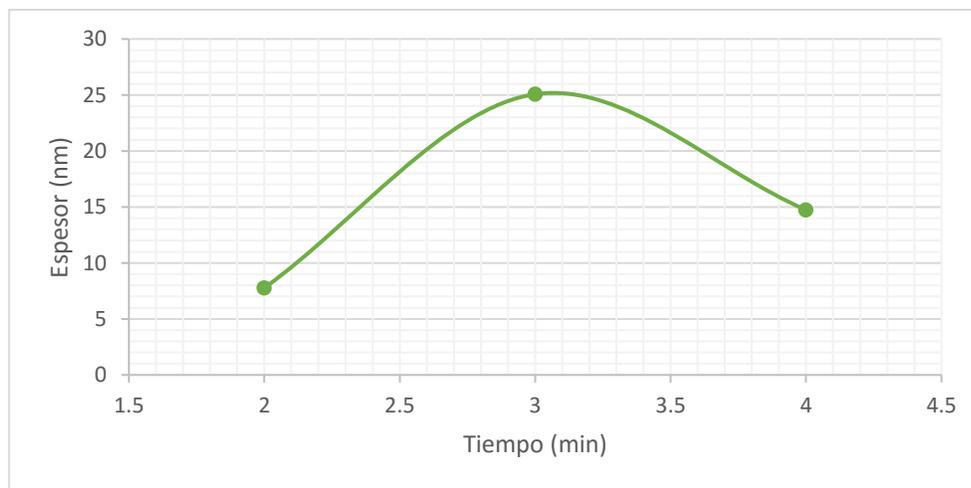
Esto se puede deber a que al estar la muestra muy cerca, para que el depósito se realice en los extremos, el oro debe viajar en un ángulo más cerrado, lo que es difícil que suceda. Contrario a esto, cuando la muestra se encuentra lejos del blanco, el oro se deposita a un ángulo más abierto, y es más fácil que suceda esto. Por lo que el depósito será más uniforme a lo largo de la superficie de la muestra cuando hay cierta distancia entre la muestra y el blanco. En este caso se probó con la altura mínima, media y máxima. Y se determinó que la altura mínima no es factible porque se deposita muy poco y se desperdicia material. Así que la altura óptima para

depositar de manera uniforme no debe ser muy pequeña y para poder determinarla se necesita realizar más pruebas de depósitos a diferentes alturas.

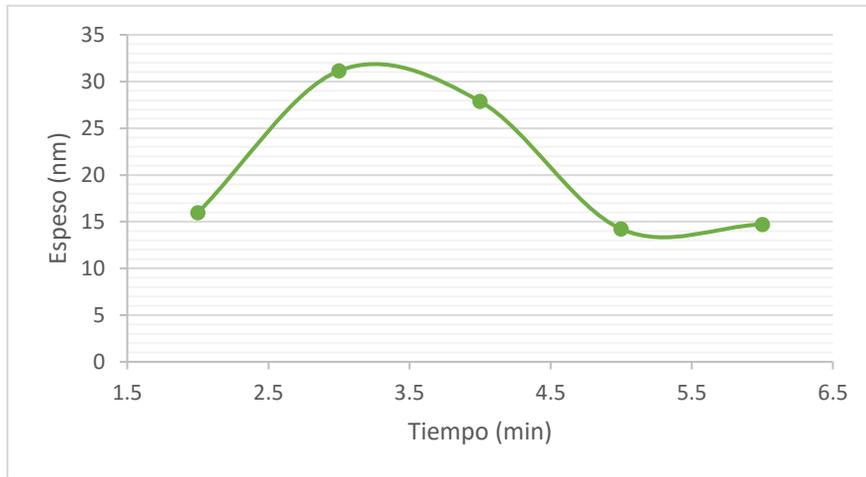
Al observar las tablas fue evidente que el crecimiento no tenía un comportamiento lineal. Por lo que se graficaron los datos obtenidos en cada uno de los experimentos.



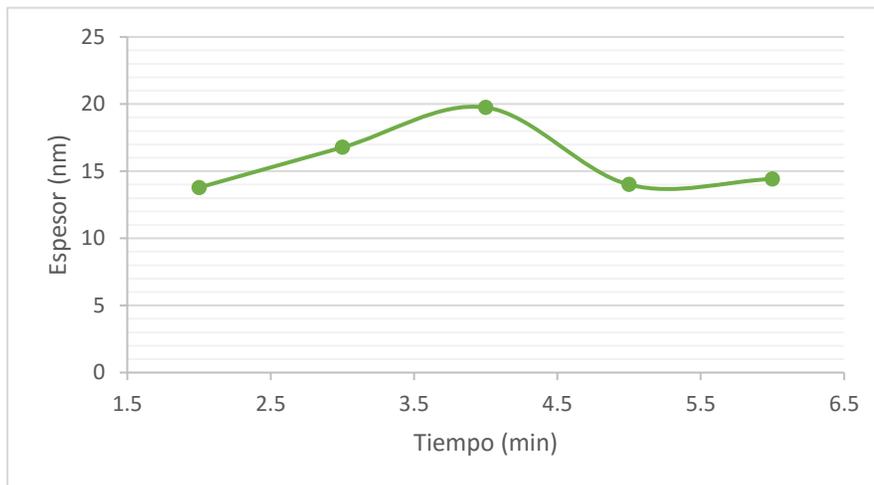
**Fig. 6.9** Grafica del crecimiento del depósito a altura media en el centro del portamuestras



**Fig. 6.10** Grafica del crecimiento del depósito a altura media en los extremos del portamuestras



**Fig. 6.11** Grafica del crecimiento del depósito a altura máxima en el centro del portamuestras



**Fig. 6.12** Grafica del crecimiento del depósito a altura máxima en los extremos del portamuestras

De esta manera se determinó que la tasa de crecimiento del depósito no tiene un comportamiento lineal. Y que para tiempos pequeños el crecimiento tiene valores cercanos a 10 nm/min, que es lo que indicaba el manual del equipo. Aunque se encontró que para tiempos mayores el crecimiento aumentaba considerablemente, lo suficiente para duplicar la tasa de crecimiento. Considerando que a tiempos pequeños el crecimiento es pequeño, a tiempos grandes debe ser muy grande para que al final el promedio del crecimiento sea tan grande.

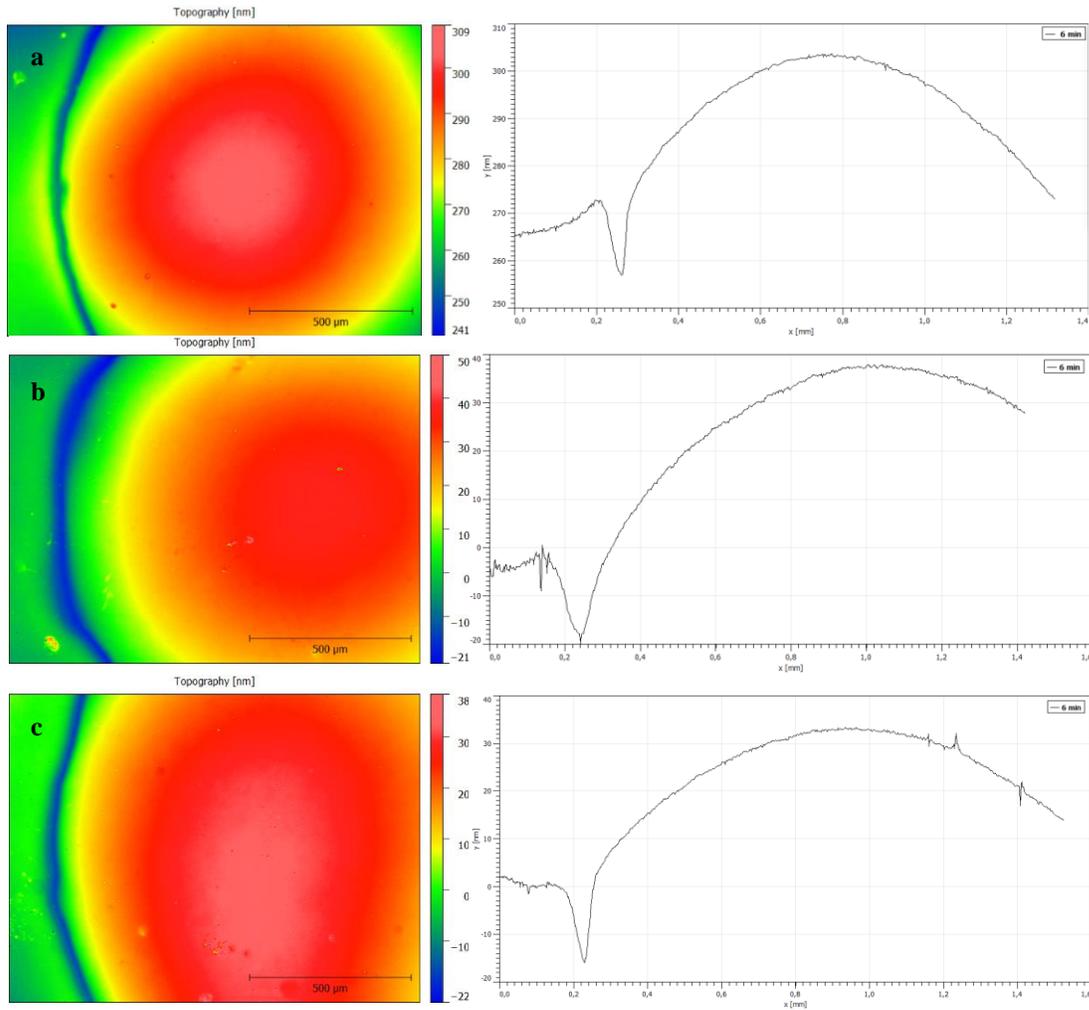
Otro efecto que se notó es que después de ese aumento en el crecimiento del depósito, cuando el tiempo se prolonga aún más, esta tasa de crecimiento decrece nuevamente, llegando a igualar la tasa inicial de crecimiento.

Esto puede deberse a diferentes factores. Primero, puede haber habido un error humano al controlar la presión de gas y la corriente, lo cual se considera poco probable ya que los depósitos se realizaron con sumo cuidado de mantener las condiciones constantes durante todo el proceso. Otra explicación podría ser que debido al bombardeo de oro y de electrones, el sustrato va calentándose, al punto de que a crecimientos de tiempos medios, la temperatura beneficia la adherencia de crecimiento, pero cuando se prolonga el bombardeo, el sustrato podría alcanzar una temperatura a la cual se pudiera propiciar que el mismo bombardeo de partículas de oro, expulse a otras que ya se encuentran en el sustrato.

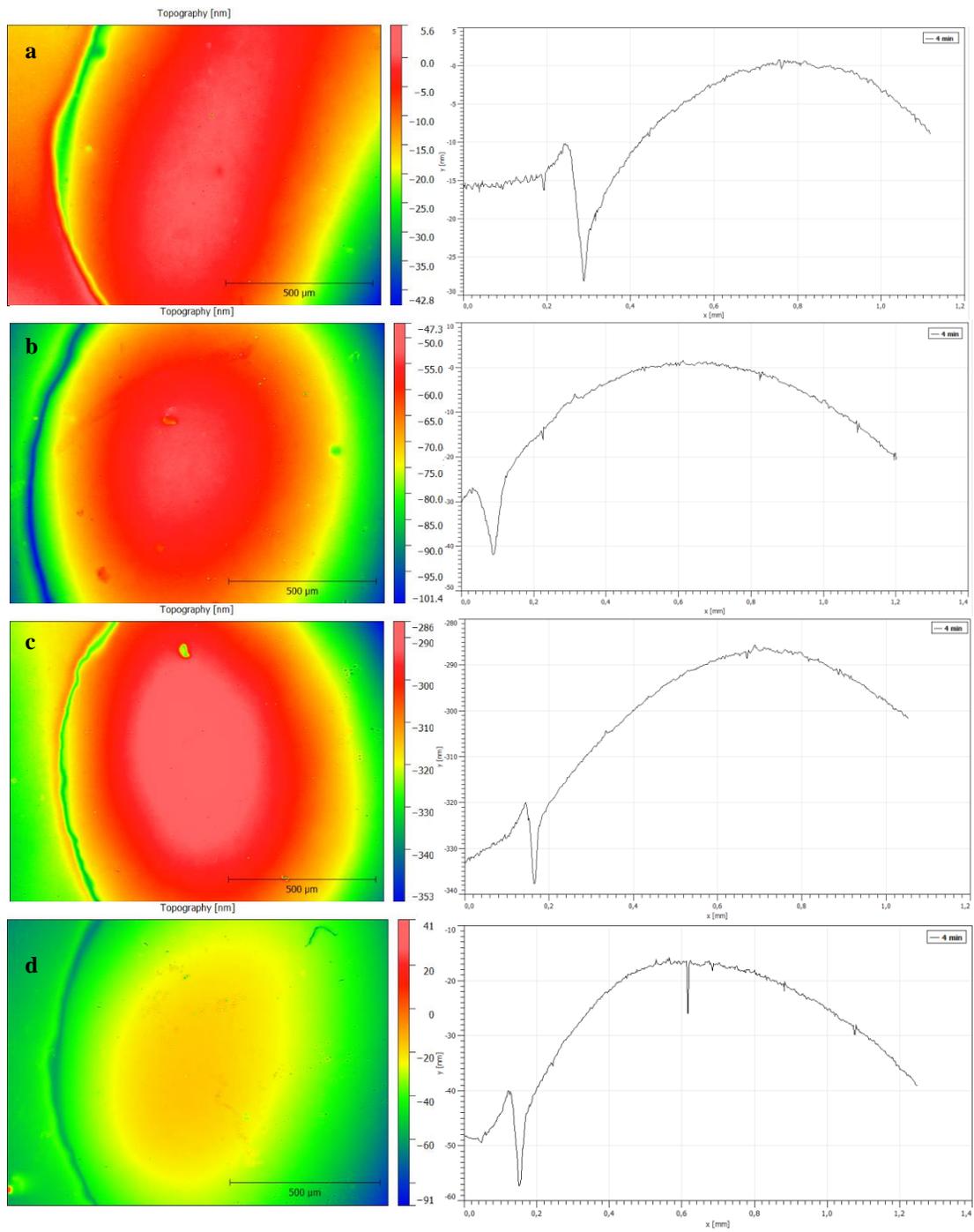
Para confirmar esto, experimentos futuros tiene que ser realizados preferentemente con otros materiales, utilizando más muestras y a más tiempos de depósito. Esto no se hizo en este proyecto debido al costo del oro y a la cantidad con que se cuenta. Lo anterior nos permite determinar que, después de cierto tiempo, el crecimiento no aumenta considerablemente, por lo que es innecesario gastar energía si el resultado no cambiara mucho al prolongar el tiempo de depósito. Por lo que se determina que el tiempo de depósito máximo debiera ser 4 min aproximadamente. Ya que prolongarlo no tiene sentido, aunque tiempos menores pueden ser usados si se busca un depósito menor.

### 6.3 Depósitos de oro con mascarilla

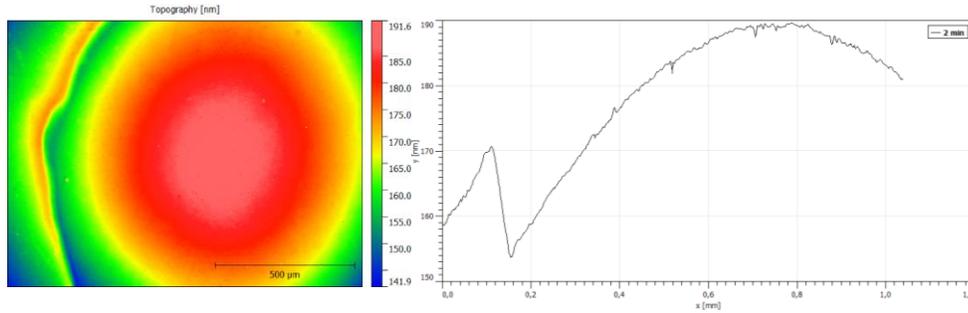
Los resultados de interferometría de las muestras depositadas utilizando mascarilla se muestran en las siguientes figuras.



**Fig. 6.13** Depósitos de oro utilizando mascarilla. 6 minutos de depósito a la altura máxima de depósito, perfiles realizados en a) el centro de la muestra, b) y c) en dos extremos opuestos de la muestra.



**Fig. 6.14** Depósitos de oro utilizando mascar. 4 minutos de depósito a la altura máxima de depósito, perfiles realizados en el centro de la muestra.



**Fig. 6.15** Depósitos de oro utilizando mascarara. 2 minutos de depósito a la altura máxima, perfil realizado en el centro de la muestra.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la estandarización del equipo se realizaron depósitos de oro utilizando una mascarilla de acero con patrones circulares.

De la **Fig. 6.13** a la **Fig. 6.15** se muestran las topografías de los depósitos realizados con mascarilla.

Se siguen viendo efectos de borde inherente a la técnica de caracterización.

Se puede observar que los depósitos no son uniformes, sino que son más gruesos en el centro y más delgados en los extremos, lo cual se explica por el uso de la mascarilla, que con sus 0.8mm de espesor, mide casi 20 000 veces más que el depósito.

Se ve tanto en la topografía como en el perfil realizado que el crecimiento se da en una forma circular dando un crecimiento en anillos de diferente espesor, donde la parte central es la de mayor espesor. Este tipo de crecimiento es propia del método usado para los depósitos. Ya que al usar mascarilla esta actúa como barrera en los bordes, haciendo que solo el material que viaja en línea recta pueda entrar al hueco sin problema alguno. En cambio el material que viaja más cerca de la orilla del hueco y que no viaja en línea recta puede chocar con esta mientras viaja y hace que el crecimiento sea menor en las orillas del hueco.

Debido a este efecto la medición de los perfiles en este tipo de muestras fue más compleja. Por lo que no fue posible obtener resultados de muestras depositados a alturas media y mínima. E incluso los depósitos a la altura máxima fueron complicados de medir, más aun los de menor tiempo de depósito.

La muestra de 2 minutos de depósito **Fig. 6.15** no fue posible determinar su espesor, debido a que el crecimiento en los extremos del depósito es muy irregular y difuso. En la **tabla 6.6** se muestra un resumen de los perfiles realizados a las muestras de depósitos con mascara.

**Tabla 6.6** Espesores a diferentes tiempos con mascara circulares

<b>Tiempo</b>	<b>6 min</b>			<b>4min</b>	<b>2min</b>
<b>Zona</b>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Extremo</b>	<b>Centro</b>	<b>Centro</b>
	37.4	42.16	31.79	29.54	-
	30.59	38.63	31.78	45.72	-
	38.89	38.37	31.79	31	-
	36.56		29.78		-
	36.04		34.44		-
			31.11		-
			29.11		-
<b>Promedio</b>	35.896	39.72	31.4	35.42	-
<b>Razón nm/min</b>	<b>5.98</b>	<b>6.62</b>	<b>5.23</b>	<b>8.85</b>	-

Al observar los datos obtenidos es evidente que la razón de depósito disminuyó considerablemente. Sin embargo se mantuvo el patrón de crecimiento en función del tiempo y de la ubicación de la muestra. Aunque las muestras obtenidas son pocas para dar un resultado concreto.

La disminución de crecimiento puede muy seguramente deberse a la máscara. Ya que actúa como barrera, como anteriormente se describió, y disminuye el oro que puede llegar al sustrato.

Se puede ver que a ambos tiempos de depósito la tasa de crecimiento se mantuvo relativamente constante, a diferencia de las muestras analizadas en la sección 6.2. Esto puede ser seguramente a que el efecto de la temperatura sea menos importantes para los átomos que inciden con ángulos cercanos a 90° con respecto al sustrato, y, debido a la mascarilla, es muy posible que este tipo de átomos sean los dominantes en estos depósitos.

## **CAPITULO VII. CONCLUSIONES**

Se adquirió el equipo de pulverización catódica MNT-JS1600 y se instaló en un laboratorio del Campus Aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro. Además, se adquirieron materiales y reactivos básicos para poner en marcha el laboratorio de depósitos de contactos óhmicos.

Utilizando manuales y experimentación se determinaron las condiciones óptimas de funcionamiento del equipo MNT-JS1600 y se redactó la guía de uso del equipo para futuros trabajos de investigación con el mismo.

Se realizaron los primeros depósitos de películas de oro sobre vidrio para determinar el espesor en función de diferentes variables controlables en el equipo sputtering adquirido. Tales variables fueron tiempo de depósito, distancia entre la muestra y el objetivo y la ubicación en el portasustratos.

El espesor del depósito en función de la ubicación de la muestra en el portamuestras del equipo se determinó utilizando la interferometría de corrimiento de fase mediante un microscopio interferométrico Bruker ContourGT.

Se encontraron las tasas de crecimiento para ambos tipos de muestras, con y sin mascarilla. En los depósitos sin mascarilla se encontró un comportamiento no lineal, en el cual a tiempos medios la tasa de crecimiento es muy alta, mientras que a tiempos bajos y altos la misma toma valores pequeños en comparación. En el caso de los depósitos con mascarilla se encuentra que este efecto no está presente. Se cree que esto sea debido a efectos de calentamiento para átomos incidentes con ángulos considerablemente menores a  $90^\circ$ .

Dicho comportamiento se encontró en todos los depósitos, por lo que es poco probable que se deba a un factor humano, pero no se descarta la posibilidad. También, al ser pocas pruebas, la explicación dada puede estar errónea y el error

sea causa por otros factores, los cuales son difíciles de notar al tener pocas referencias. Para encontrar la explicación, pruebas futuras tienen que hacerse, pero se recomienda que sea con otro tipo de blancos, ya que el oro es sumamente caro y es poco recomendable desperdiciarlo.

No fue posible realizar la caracterización eléctrica debido a que los blancos  $\text{Cu}_2\text{Te}$ ,  $\text{Cu}$  y  $\text{MoO}_3$  no han sido entregados por el proveedor. Y al realizar las pruebas solo con depósitos de oro no se obtendrían resultados favorables, ya que es necesaria la capa buffer de estos materiales.

La realización de este trabajo abre las puertas a muchos otros proyectos de investigación, como el hacer más eficiente el proceso modificando componentes, acercar más el portasustratos al blanco por ejemplo o implementar un sistema de magnetrón. Así mismo, una vez que se tengan los blancos solicitados se podrá realizar investigación en celdas solares y aumentar su eficiencia.

Por lo anterior, se concluye que los objetivos se cumplieron parcialmente, pero otros trabajos pueden surgir para completar las actividades faltantes.

Finalmente se puede decir que la hipótesis es verdadera, ya que los resultados obtenidos permiten planificar el tipo de depósito deseado eficientemente.

## **CAPITULO VIII. BIBLIOGRAFIA**

- [1] Jutglar, Lluís (2004). Energía solar. Barcelona: CEAC.
- [2] Velasco, J. G. (2009). Energías renovables. Barcelona: Reverté.
- [3] Böer, K. W. (2013) Handbook of the Physics of Thin-Film Solar Cells. Naples: Springer.
- [4] Sze, S., & Lee, M. (2010). Semiconductor Devices: Physics and Technology. Unites States of America: John Wiley & Sons, INC.
- [5] Agredano Díaz, J. (2008). Tendencias tecnológicas. Cd de México: Boletín IIE.
- [6] Schroder, Dieter K (2006) Semiconductor material and device characterization. Hoboken: IEEE.
- [7] Galván Arellano, M. (2005). Desarrollo de contactos óhmicos para semiconductores III-V con barreras de difusión (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional. Cd de México, México.
- [8] Grundmann, M. (2010).The physics of semiconductors. Leipzig: Springer P
- [9] Obregon Sánchez, C. R. (2013). Análisis, diseño y caracterización de sensores piezoeléctricos ultrasónicos libres de plomo, en película delgada (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México:
- [10] Zoerb, K. A. (2007). Differential sputtering yields of refractory metals by ion bombardment at normal and oblique incidences (Tesis de maestría). Universidad del Estado de Colorado, Colorado, E.U.A.
- [11] Estrada Martinez, J. E. (2008). Caracterización estructural y morfológica de películas delgadas de TiO<sub>2</sub> depositadas por RF-Sputtering sobre acero inoxidable 304 (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional. Altamira, México.
- [12] Gennardo, D. J. (2010) Design, construction, and optimization of a magnetron sputtering system for urania deposition (Tesis de maestría). Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Urbana, E.U.A.
- [13] Cabrera-Aguilar, R (2007). Obtención y caracterización de recubrimientos de sialon mediante RF SPUTTERING (Tesis de pregrado). Universidad Autónoma del estado de Hidalgo. Pachuca, México
- [14] Groover, M. P. (2007). Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas. Cd de México: McGraw-Hill Interamericana.

- [15] Hernández Roa, D. (2010). Fotolitografía lineal a escalas sub-micrométricas (Tesis de pregrado). Cd de México, México
- [16] Jaturunruangsri, S. (2014). Evaluation of Material Surface Profiling Methods: Contact versus Non-contact (Tesis de maestría). Universidad de Brunel Londres. Londres, Reino Unido.
- [17] Johnson Garzon Reyes (2005). Metrología óptica en microscopia convencional, interferométrica y confocal cromática (Tesis doctoral). Universidad industrial de Santander. Bucaramanga, Colonia
- [18] De Groot, P. (2011). Phase Shifting Interferometry. In: R. Leach, ed., *Optical Measurement of Surface Topography*. Springer.
- [19] Plotnikov, V. (2009). Fabrication of ultra thin CdS/CdTe solar cells by magnetron sputtering (Tesis doctoral). University of Toledo. Toledo. E.U.A.
- [20] Benahmed, A; Aissat, A. (2016). Modeling and simulation of InAs/GaAs quantum dots for solar cell applications. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 127 (7), 3531-3534.
- [21] Dobrich, A. (2015). Interface analysis on MOVPE grown InP–GaInAs–InP double heterostructures for application in infrared solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 148, 25-29.
- [22] Meng, J; Feng, J. (2015). Degradation model of the orbiting current for GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells used on satellite. *Solar Energy*, 122, 464-471.
- [23] Green, M. A; Emery, K; Hishikawa, Y; Warta, W; Dunlop, E. D. (2015). Solar cell efficiency tables (version 47). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 24 (1), 3-11.
- [24] Sadik Dahlan, A., Tataroglu, A., & Al-Ghamdi, A. (2015). Photodiode and photocapacitor properties of Au/CdTe/p-Si/Al device. *Journal of Alloys and Compounds*, 646, 1151-1156.
- [25] Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V., & Podest, A. (2004). Recent progress on CdTe/CdS thin film solar cells. *Solar Energy*, 77 (6), 795-801.
- [26] Manahan, S. E. (2007) *Introducción a la química ambiental*. Cd de México: Reverté.

- [27] Galván-Arellano, M., Kudriavtsev, Romero-Paredes, G., & Peña-Sierra, R. (2005). Estudio de las películas de paladio como barreras de difusión para contactos ohmicos en semiconductores III-V. *Superficies y Vacío*, 18 (3), 13-16.
- [28] Peña, L., Arés, O., Rejón, V., Rios-Flores, A., Camacho, J., Romeo, N., & Bosio, A. (2011). A detailed study of the series resistance effect on CdS/CdTe solar cells with Cu/Mo. *Thin Solid Films*, 520 (2), 680-683.
- [29] An, C., Tews, H., & COHEN-SOLAL, G. (1982). Ohmic contacts to p-type cdte by pulsed laser heating. *Journal of Crystal Growth*, 59 (1-2), 289-292.
- [30] Al-Shibani, K. (2002). Effect of isothermal annealing on CdTe and the study of electrical properties of Au–CdTe Schottky barriers. *Physica B: Condensed Matter*, 322 (3-4), 390-396.
- [31] Pantoja Enriquez, J., Mathewa, X., & G.P, H. (2004). CdTe/CdS Solar cells on flexible molybdenum substrates. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82 (1-2), 307-314.
- [32] Shen, K; Yang, R; Wang, D; Jeng, M; Chaudhary; Ho, K; Wang, D. (2015). Stable CdTe solar cell with  $V_2O_5$  as a back contact buffer layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 144, 500-508.
- [33] Troviano, M. (2011). Caracterización optoelectrónica y modelado de celdas solares de Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.
- [34] Park, Y; Lee, S; Yi, J; Choi, B. D; Kim, D; Lee, J. (2013). Sputtered CdTe thin film solar cells with Cu<sub>2</sub>Te/Au back contact. *Thin Solid Films*, 546, 337-341.
- [35] López-Fernández, F (1993). Espectrometría de masas de iones secundarios: aportaciones a la técnica y caracterización de capas finas de a-C:H y de a-Si:H (Tesis doctoral). Universidad de Barcelona. Barcelona, España.
- [36] Oran, U. (2005). Surface Chemical Characterization of Plasma-Chemically Deposited Polymer Films by Time of Flight Static Secondary Ion Mass Spectrometry (Tesis doctoral). Freie Universität Berlin. Berlin, Alemania.