

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EVAPORADORA
TÉRMICA PARA LA FABRICACIÓN DE CAPACITORES
NANOESTRUCTURADOS**

TESIS

PARA CUBRIR LOS REQUISITOS NECESARIOS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN NANOTECNOLOGÍA

PRESENTA:

Luis Gilberto Miranda Morales

DIRECTOR:

Dr. Jorge Octavio Mata Ramírez

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EVAPORADORA
TÉRMICA PARA LA FABRICACIÓN DE CAPACITORES
NANOESTRUCTURADOS**

Tesis

Para cubrir los requisitos necesarios para obtener el título de

Ingeniero en Nanotecnología

Presenta:

Luis Gilberto Miranda Morales

Aprobada por:



Dr. Jorge Octavio Mata Ramírez
Director de tesis



Dr. Ulises Jesús Tamayo Pérez
Miembro del comité



M.I. Guillermo Amaya Parra
Miembro del comité



Dr. José de Jesús Zamarripa Topete
Miembro del comité



M. en C. Luis Arce Saldaña
Miembro del comité

Ensenada, Baja California, México. Agosto de 2019

DEDICATORIAS

A mi madre Martha que siempre me ha alentado para superarme día con día y ha sido mi soporte tanto económico como moral, sin importar las adversidades que se presentaran. A Gilberto, mi padre, por guiarme y apoyarme a lo largo de mi crecimiento personal. A Michelle, mi hermana por apoyarme y aconsejarme en las buenas y en las malas, y en general a estas 3 personas, por su apoyo incondicional durante toda mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis asesores, Luis Arce, Jorge Mata y Gerardo Soto por haberme guiado a lo largo del desarrollo y la escritura de este proyecto, además de haberme brindado las herramientas y habilidades necesarias para el desarrollo de este. De manera especial, quiero agradecer al técnico Enrique Medina por su ayuda en el maquinado de piezas dentro del taller, así como, al Dr. Eduardo Murillo, al M.C. David Domínguez y M. I. Jorge Vázquez por su apoyo en la caracterización de muestras por las técnicas de AFM y XPS respectivamente.

Para la realización de este proyecto mis asesores y yo queremos agradecer a los proyectos PAPIIT IN110018, IN112117, IA101018, IN113219, así como, al proyecto CONACYT 272894, al proyecto UABC 402/1/C/26/19: Diseño, Desarrollo y Aplicación de Nuevos Sistemas Nanoestructurados y al proyecto FORDECYT-NanoFab por los recursos brindados para el desarrollo del trabajo.

Externo un sincero agradecimiento a mi familia y amigos por su acompañamiento en mi desarrollo como futuro profesionista, puesto que han sido parte fundamental en esta etapa de mi vida. Especialmente, agradezco a Santiago quien me brindó su amistad y sostén durante mi estadía en la licenciatura.

Agradezco al Centro de Nanociencias y Nanotecnología adscrito a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de utilizar sus instalaciones para el desarrollo de este proyecto. Finalmente, quiero agradecer a la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), quién me abrió las puertas para seguir creciendo y desarrollándome en mi área de interés.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Capacitor y su símbolo eléctrico	4
Figura 2.- Prueba 1 del sistema de vacío completo sin montar en la estructura de la cámara.	18
Figura 3.- Prueba 2 del sistema de vacío completo sin montar	18
Figura 4.- Placa de aluminio 6061, base	19
Figura 5.- Orificios en placa de aluminio para la montura de aditamentos	20
Figura 6.- Imagen de los dos Pasamuros fabricados con teflón para soporte de las terminales	20
Figura 7.- Tornillos de acero para terminales montados en placa de aluminio.	21
Figura 8.- Placa de aluminio con aditamentos montada en base móvil.....	22
Figura 9.- Llaves de entrada de gas inerte a la cámara de depósito	23
Figura 10.- Primera prueba de vacío con sistema armado.....	24
Figura 11.- Flange de conector realizado para bomba turbomolecular	24
Figura 12.- Tapa superior de conector realizado para bomba turbomolecular	25
Figura 13.- Extensión de conector realizado para bomba turbomolecular	25
Figura 14.- Valor de vacío alcanzado en prueba de vacío final	26
Figura 15.- Prueba de calentamiento de filamento en vacío	27
Figura 16.- Fotografía en la que se muestra in situ el depósito de oro sobre un sustrato de silicio	29
Figura 17.- Sistema para evaporación térmica terminado, el cual es objetivo primordial de este trabajo.....	30
Figura 18.- Caracterización AFM de película de oro realizado en evaporadora térmica comercial de UNAC-CNyN.....	32
Figura 19.- Espesor de depósito de oro realizado en evaporadora térmica realizada en este trabajo.....	32
Figura 20.- Contactos de oro depositados en evaporadora térmica realizada en este trabajo.	36
Figura 21.- Plantillas para fotolitografía para depósito de metales	37
Figura 22.- Depósito de oro con plantilla hecha por fotolitografía	37

INDICE

CAPÍTULO 1	1
1.1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1.2.- TIPOS DE RECUBRIMIENTOS	6
1.2.- ANTECEDENTES	9
1.2.1.- CVD	9
1.2.2.- ALD	9
1.2.3.- SPUTTERING	10
1.2.4 .- EVAPORACIÓN TÉRMICA	11
1.3.- HIPÓTESIS	13
1.4.- OBJETIVOS GENERALES	13
1.5.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.6.- VENTAJAS DEL DISEÑO	14
CAPÍTULO 2	15
2.1.- METODOLOGÍA	15
2.1.1.- ESQUEMA DEL PROCESO	15
2.1.2.- MATERIALES CONSUMIBLES UTILIZADOS	16
2.1.3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL	17
2.1.4.- RECUBRIMIENTO	28
CAPÍTULO 3	30
3.1.- RESULTADOS	30
3.1.1.- AFM (Microscopia de Fuerza Atómica)	32
3.1.2.- XPS (Espectroscopia de Fotoelectrones emitidos por Rayos X)	33
3.2.- DISCUSIÓN	38
3.3.- CONCLUSIONES	40
REFERENCIAS	41

RESUMEN

El uso de distintas técnicas para la creación de películas delgadas y la combinación entre ellas en diferentes etapas de construcción es de gran interés en el área de los materiales, ya que sus aplicaciones son muy variadas. Un ejemplo de ello es la construcción de capacitores nanoestructurados, en los cuales se utilizan por lo menos 2 técnicas distintas para depósito de materiales en el proceso. En este trabajo se presentarán las etapas de fabricación de una evaporadora térmica, tanto el maquinado de las partes, como el ensamblaje y las pruebas necesarias para su correcto funcionamiento.

Palabras clave: Evaporación térmica, películas delgadas, recubrimiento, oro, cobalto.

ABSTRACT

The use of different techniques for the creation of thin films and the combination between them at different stages of construction is of great interest in the area of materials, since their applications are very varied. An example of this is the construction of nanostructured capacitors, in which at least 2 different techniques are used to deposit materials in the process. In this work, the manufacturing stages of a thermal evaporator will be presented, both the machining of parts and the assembly and tests necessary for its correct operation.

Key words: Thermal evaporation, thin films, coating, gold, cobalt.

JUSTIFICACIÓN

En la constante búsqueda para el desarrollo de nuevos y mejores dispositivos nanoestructurados, aplicados a diferentes áreas de vanguardia, está implícito el acoplamiento de diferentes técnicas de síntesis para la fabricación de los mismos y la implementación de ellas es muy importante, ya que por sí sola, una técnica de crecimiento y caracterización no basta. Conforme la tecnología avanza, los equipos para síntesis y fabricación de dispositivos mejoran, estos pueden llegar a tener un costo muy elevado y, por lo tanto, en ocasiones, ser inaccesibles. Por esta razón es necesario la construcción de equipos más costeables para realizar investigación que los equipos comerciales, y que estos cumplan con las características adecuadas para realizar procesos de síntesis, como tiempos, calidad, homogeneidad en las muestras, entre otras.

CAPÍTULO 1

1.1.- INTRODUCCIÓN

La nanotecnología trata de la manipulación y estudio de las diferentes estructuras de la materia con dimensiones del orden de una milmillonésima parte de un metro, es decir, a escala atómica, molecular y supramolecular. Desde el inicio del universo y de todos los planetas, se han creado estructuras moleculares a escala nanométrica. En la tierra todas las estructuras funcionales y dispositivos de dimensiones nanométricas han existido en la materia orgánica e inorgánica desde el origen de la vida. [1]

Básicamente la nanotecnología es la manipulación de las moléculas. Cuando un material cuenta con una o más dimensión a nanoescala, y es de un tamaño menor a los cien nanómetros, se le considera como nanomaterial. Los materiales a esta escala tienen propiedades que son significativamente diferentes a los materiales en bulto. [2-3]

El uso de los Nanomateriales no es nuevo, por ejemplo, los artesanos que diseñaban los vitrales en la Edad Media descubrieron que al darle ciertos tratamientos al vidrio podían obtener una variedad de colores, los cuales, hoy en día sabemos, se deben a la formación de nanopartículas embebidas en el vidrio. [2] El avance de la ciencia y la tecnología han dado los conocimientos y la habilidad

para generar dispositivos para la medición, manipulación y organización de la materia a escalas manométricas. Esto es posible principalmente porque ya se cuenta con la tecnología y algunos aparatos altamente especializados. [2]

Sabemos que los materiales nanoestructurados son versátiles y pueden ser utilizados para hacer recubrimientos de diferentes tipos de materiales y presentar propiedades hidrofóbicas y mostrar diversos colores estructurales, además las propiedades electrónicas de los materiales a nanoescala son especialmente intrigantes, en ellas se fundamenta la electrónica de vanguardia y consiste en la formación de capas a escala nanométrica. [3]

El objetivo fundamental de la fabricación de capas ultradelgadas es la modificación de las propiedades de superficie de un material, dirigido a obtener una mejora en las propiedades del conjunto capa-sustrato o, en otros casos, para realizar una función específica (recubrimientos funcionales). Se obtiene así un compuesto en el que el material de base o sustrato aporta unas características básicas, bien sea como simple soporte mecánico, o bien con unas propiedades específicas (resistencia mecánica, polarización magnética, etc., según el caso), mientras que la capa delgada o recubrimiento ofrece propiedades distintas, y a menudo muy superiores, a las del propio sustrato sobre el que está depositada. [4]

La implementación de películas delgadas ha sido de vital importancia tanto en la industria de semiconductores como en el ámbito científico. [5] Quizás uno de los mayores logros de la tecnología de capas delgadas ha sido su contribución al desarrollo de los dispositivos y circuitos integrados de microelectrónica y óptica. De

hecho, prácticamente todos los dispositivos de estado sólido están formados hoy en día por un apilamiento de capas de diversos materiales sobre un sustrato, generalmente de tipo semiconductor. Al mismo tiempo, las exigencias en los dispositivos electrónicos, cada vez más estrictas en lo que se refiere a sus características de funcionamiento (velocidad de respuesta, sensibilidad, tamaño, estabilidad, etc.), han obligado a la consecución de capas delgadas con mejores prestaciones en cuanto a sus propiedades físico-químicas. [4]

El conocimiento y la comprensión de los problemas asociados a la tecnología de capas delgadas para microelectrónica se han ido trasladando posteriormente a otros sectores importantes de la producción. La industria del automóvil, metal-mecánica, construcción, electromecánica, juguetería, saneamiento, alimentación, etc. son algunos de los sectores que se han visto enormemente beneficiados de los progresos alcanzados con anterioridad en los dispositivos de estado sólido. [4]

Los capacitores son capaces de almacenar energía cuando un voltaje está presente a través del elemento. La energía realmente se almacena en un campo eléctrico no diferente del que se produce al deslizarse a lo largo del asiento de un carro en un seco día de invierno. [6]

Un capacitor es un elemento de circuito que consiste en dos superficies conductoras separadas por un material no conductor, o dieléctrico. Un capacitor simplificado y su símbolo se muestran en la Figura 1. [6]

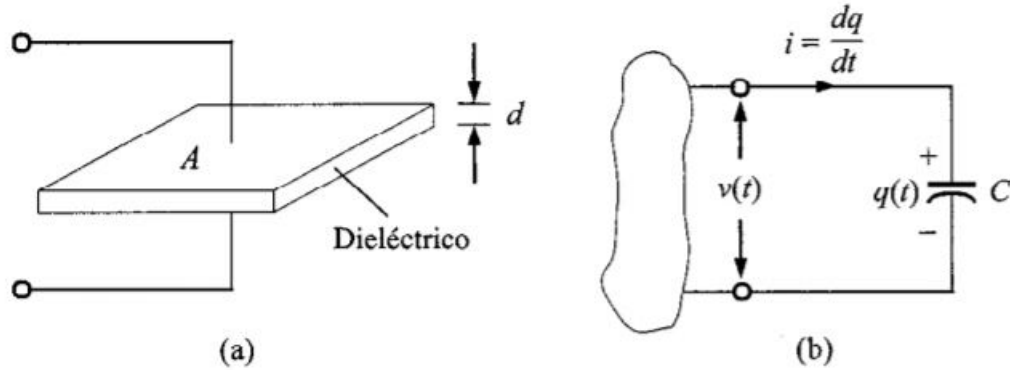


Figura 1.- Capacitor y su símbolo eléctrico.

Hay muchas formas diferentes de capacitores y pueden clasificarse por el tipo de material dieléctrico que se usa entre las placas conductoras. Aunque cualquier buen aislador puede servir como dieléctrico, cada tipo tiene características que lo hacen más apropiado en aplicaciones particulares. [7]

Las propiedades de la interfaz de los contactos metal-semiconductor (MS) tiene una influencia dominante en la confiabilidad, estabilidad y operación del dispositivo. [11] En general, existen dos tipos de estructuras usadas para la construcción de películas. Una de ellas es la estructura metal/aislante/metal denominada capacitor **MIM**. La cuestión interesante en tal caso suele ser la asimetría que puede apreciarse en el comportamiento cuando los electrodos son distintos. Diferentes metales generalmente se asocian con diferentes funciones trabajo y, por lo tanto, redundan en barreras de potencial distintas para cada interfaz con el aislante. [5]

El segundo tipo de muestra que describimos se compone de metal/aislante/semiconductor, denominado capacitor **MIS**. La estructura MIS es inherentemente asimétrica y se debe ser cuidadoso al considerar la caída de

potencial en cada material. [5] Es interesante señalar que, independientemente de las aplicaciones, a veces en sectores muy distantes, tanto en las técnicas de deposición utilizados, como los materiales depositados, son a menudo próximos entre sí. [8]

El abanico de materiales en capa delgada utilizados para cubrir esas necesidades es también muy variado, y va desde los elementos simples, como silicio, carbono, aluminio, etc., hasta compuestos binarios y ternarios de diferente naturaleza, tales como los óxidos, nitruros, carburos, siliciuros, niobatos, titanatos, etc. cada uno de ellos con su particular estructura y propiedades. En todos ellos, las propiedades particulares dependen enormemente del proceso y las condiciones empleadas en la deposición. [4] La **Tabla 1** presenta ejemplos de materiales que pueden ser depositados en capa delgada, agrupados según las aplicaciones.

Algunos de ellos, como el silicio, aluminio, titanio, tántalo, etc., así como los óxidos y nitruros de estos elementos, aparecen en la mayoría de las aplicaciones y por ello se consideran materiales de enorme interés estratégico e industrial. No es de extrañar que sus propiedades hayan sido ampliamente investigadas en laboratorios de todo el mundo, existiendo una amplia documentación sobre los métodos y técnicas más adecuadas para su producción. [4]

1.1.2.- TIPOS DE RECUBRIMIENTOS

Tabla 1.- Tipos de recubrimientos y su utilidad en la industria. [4]

Automoción	Recubrimientos embellecedores en componentes del automóvil. Recubrimientos duros de piezas móviles del motor, etc.
Mecánico	Recubrimientos duros para herramientas de corte (brocas, fresas, etc.) Útiles de modelado y conformación de piezas, acuñación de moneda, etc. Recubrimientos tribológicos para piezas móviles (bombas y compresores, maquinaria textil, etc.).
Saneamiento y útiles domésticos	Metalización de grifos, tuberías, pomos y tiradores de puertas, etc.
Construcción	Recubrimientos térmicos y ópticos para grandes paneles de vidrio utilizados en la construcción de edificios acristalados.
Microelectrónica, fotónica y óptica	Capas activas, pasivas y de protección en componentes. Recubrimientos antirreflectantes, anti-humedad, etc. para lentes, visores, espejos, ventanas, etc.
Dispositivos magnéticos	Capas magnéticas para discos duros, etiquetas magnéticas, etc.
Juguetería y bisutería	Recubrimientos protectores y decorativos
Alimentaria	Recubrimientos para empaquetamiento de alimentos y botellas de líquidos (para evitar la difusión de humedad, acción de la luz, etc.).

Tabla 2.- Ejemplos de materiales que pueden ser depositados en capa delgada, agrupados según las aplicaciones. [4]

Aplicaciones		Materiales
Mecánicas (Tribológicas)	Resistencia al desgaste: Reducción fricción:	C (diamante), BN, SiC, TiN, WC, Al ₂ O ₃ , SiO ₂ ,... C (grafito), MoS ₂ , Ag, Pt,...
Químicas	Reducción corrosión: Pasivación, Membranas, etc.:	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , Cr ₂ O ₃ , SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , TiO ₂ , etc.
Eléctricas y magnéticas	Capas conductoras y superconductoras: Capas semiconductoras: Capas aislantes: Capas ferroeléctricas: Capas magnéticas:	Si (poli), Al, Cu, In ₂ O ₃ , TiSi ₂ , YBaCuO,... Si, GaAs, ... SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , SiO _x N _y , Ta ₂ O ₅ ,... Titanatos, Niobatos,... Fe, Fe/Co, Fe ₂ O ₃ ,...
Ópticas y Optoelectrónicas	Capas selectivas: Guías de ondas de luz: Detectores y emisores: Dispositivos electro- ópticos:	CdS, BaF ₂ /ZnS,... SiO ₂ , Si ₃ N ₄ , TiO ₂ ,... GaAs, InGaAs, InSb, HgCdTe LiNbO ₃ , BaTiO ₃ , KTiO-PO ₄ ,...
Otras	Sensores: Capas decorativas: Protección térmica:	SiO ₂ , SnO ₂ , ZrO ₂ ,... Al, Cr, TiN, Au,... ZrO ₂ , MgO, MgAl ₂ O ₄ , Ca ₂ Si ₄ ...

Tabla 3.- Ejemplos de tipos de recubrimientos y sus características necesarias. [4]

Aplicación	Requerimiento
Superficies reflectante, p.e. para espejos de láseres	Baja rugosidad
Barreras térmicas para la hélices de turbina	Estabilidad química a T altas, Baja conductividad térmica
Recubrimientos de válvulas y otro componentes en plantas de gasificación del carbón	Resistencia a la corrosión, Estabilidad química a T altas, Resistencia mecánica
Capas duras para herramientas de corte (aumento tiempo de vida y eliminación de fluidos de refrigeración)	Estabilidad química a T altas, Resistencia mecánica, Dureza, Resistencia al desgaste
‘Pared primera’ en vasijas de reactores nucleares	Estabilidad química a T altas
Materiales superconductores en capa delgada	Estructura cristalográfica, Composición química
Modificación de membranas para separación de gases	Tamaño poro nanométrico, Estabilidad química a T altas, Resistencia mecánica
Reactores catalíticos	Tamaño poro nanométrico, Superficie específica alta, Actividad química
Dispositivos fotovoltaicos en capa delgada	Crecimiento epitaxial, Propiedades semiconductoras
Recubrimientos transparentes y foto-térmicos para paneles de vidrio arquitectónicos	Espesor nanométrico, Absorción y reflexión óptica
Implantes biomédicos, órganos artificiales, válvulas cardíacas, etc.	Bio-compatibilidad, Resistencia corrosión y desgaste
Conservación de materiales del patrimonio artístico	Estabilidad química, Resistencia erosión
Dispositivos electrónicos submicrónicos	Espesor nanométrico

1.2.- ANTECEDENTES

Entre los materiales utilizados para la creación de dispositivos nanoestructurados se encuentran semiconductores como silicio (Si), germanio (Ge), arseniuro de galio (GaAs); dieléctricos como óxido de silicio (SiO), dióxido de silicio (SiO₂), dióxido de zirconio (ZrO₂) [5]; metales como oro (Au), aluminio (Al) [11], entre otros.

Existen distintos métodos para el depósito de materiales, tales como Depósito Químico en Fase Vapor (CVD), Depósito por Capa Atómica (ALD), Pulverización Catódica (Sputtering), Evaporación Térmica, entre otros.

A continuación se describe brevemente de que trata cada uno de ellos:

1.2.1.- CVD

Consiste en la descomposición de uno o varios compuestos volátiles, en el interior de una cámara de vacío (reactor), en o cerca de la superficie de un sólido para dar lugar a la formación de un material en forma de capa delgada o de nanopartículas. [10]

1.2.2.- ALD

Es una técnica de CVD en la que las reacciones en fase gaseosa convencionales se eliminan mediante semiciclos temporales o espacialmente separados. En su lugar, dentro de la ventana de crecimiento de ALD, el depósito de

películas se produce solamente a través de reacciones de superficie de intercambio de ligandos autolimitados. El carácter exclusivo en ALD del crecimiento auto limitado por la química de la superficie permite el control preciso del grosor a escala atómica, el depósito conformal y la uniformidad en un área grande. Además el método permite el crecimiento a baja temperatura de materiales dieléctricos, metálicos y semiconductores a nanoescala, por lo cual es muy importante para la ingeniería de dispositivos. [7]

1.2.3.- SPUTTERING

Este método es de los más usados dentro de los procesos físicos de deposición en fase vapor. Se trata del depósito sobre un sustrato de partículas vaporizadas previamente desde una superficie por un proceso físico de “sputtering” o pulverización catódica. [9]

Es un proceso de deposición física el cual se lleva a cabo mediante plasma luminiscente mantenido a baja presión. Mediante la aplicación de un campo eléctrico, los iones del plasma se aceleran contra el material a depositar, denominado blanco. La energía transmitida a los átomos del blanco a través de la interacción mecánica del choque, hace que algunos de ellos se desprendan, y finalmente se depositen sobre un sustrato. Esta técnica permite depositar todo tipo de materiales, simples o compuestos, conductores o dieléctricos. Además, todo sustrato, tanto dieléctrico como conductor, que pueda ser puesto en vacío y calentado ligeramente (60 o 70°C) es compatible con este proceso. [8]

Se puede conseguir sputtering empleando diodos *c.d.* (corriente continua) y *r.f* (radio frecuencia) pero el método más usado es el sputtering magnetrón, además es el que ha tenido más avances en los últimos años. [9]

1.2.4.- EVAPORACIÓN TÉRMICA

La evaporación térmica es un proceso físico de deposición en fase vapor (PVD), normalmente en alto vacío (100microtorr o valores de vacío superiores), en el cual átomos o moléculas alcanzan un substrato desde una fuente térmica de vaporización sin colisiones en la cámara de depósito. Este proceso es uno de los más simples y más antiguos en lo que respecta a la deposición de películas delgadas. [9]

Consiste en el calentamiento hasta la evaporación del material que se pretende depositar. Se lleva a cabo en una cámara de vacío en la que se condensa el vapor sobre una lámina requiriendo en todo momento un control preciso de las condiciones de crecimiento para no producir una modificación de la morfología de la capa depositada. [10]

Este método incluye sublimación cuando el sólido pasa directo a fase vapor y vaporización cuando se pasa de líquido a vapor. [9]

Un material se evapora libremente desde una superficie cuando el material en fase vapor deja la superficie sin colisionar con átomos de la misma. [9]

Tabla 4.- Ventajas y desventajas de la técnica de evaporación térmica. [9]

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Se pueden utilizar fuentes de grandes áreas.	Pobre uniformidad si el área de depósito es muy grande.
Altas velocidades de deposición.	Dificultad para depositar muchas aleaciones y compuestos.
Controlar la velocidad de depósito es relativamente fácil.	Altas cargas de radiación de calor durante el proceso.
Las fuentes pueden ser de distintas formas.	Pobre utilización del material vaporizado.
Los materiales de alta pureza para las fuentes de vaporización no son caros.	Películas con propiedades no siempre óptimas.
Pueden depositarse películas de alta pureza fácilmente de materiales de alta pureza sin contaminación alguna.	Pocas variables disponibles para el control de propiedades en la película delgada.
Es mucho más barato que otras técnicas PVD.	

En virtud de todo esto, en este trabajo se trabajará tanto en el diseño como en la fabricación de un equipo para evaporación térmica de distintos metales, buscando la mejora significativa de los tiempos de depósitos y minorizando algunas de las desventajas presentes en algunas de las evaporadoras térmicas comerciales. Cabe señalar que el costo de la fabricación del equipo es muy inferior al comercial y la mayoría de las partes con las que se construirá, son de marcas reconocidas y su implementación y eficiencia será parte del trabajo a desarrollar para buscar la fabricación óptima de películas delgadas de alta pureza y sin contaminación alguna.

1.3.- HIPÓTESIS

- Mejorando el diseño de una cámara de depósito térmica para la fabricación de películas delgadas, nos permitirá optimizar la calidad y los tiempos de depósito de la evaporación, obteniendo muestras con las mismas características que una evaporadora comercial pero a más bajo costo.

1.4.- OBJETIVOS GENERALES

- Diseño y construcción de una evaporadora térmica
- Maquinado y construcción de piezas metal mecánica e incorporación de ellas en la evaporadora fabricada
- Calibración y funcionamiento óptimo de la cámara.
- Evaporación de metales

1.5.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Encontrar las condiciones óptimas: tiempo óptimo de depósito para cada película delgada a través del diseño de la evaporadora construida
- Evaporación de diferentes metales: oro, aluminio y plata
- Depósito de capas delgadas de oro, aluminio y plata sobre sustratos de silicio.
- Caracterizar y controlar el crecimiento de las películas
- Creación de electrodos sobre sustratos de silicio para mediciones eléctricas
- Mejorar la adhesión del oro a los sustratos

1.6.- VENTAJAS DEL DISEÑO

- Menor tiempo de proceso para llegar a las condiciones óptimas de depósito.
- Mayor movilidad del equipo.
- Mayor aprovechamiento de espacio

CAPÍTULO 2

2.1.- METODOLOGÍA

Para desarrollar los objetivos de este proyecto, comenzamos por revisar y seguir con las técnicas tradicionales de crecimiento de capas delgadas, las cuales están basadas fundamentalmente en la deposición ya sea física o química de películas delgadas a partir de la fase vapor (*'physical vapour deposition'* o PVD y *'chemical vapour deposition'* o CVD). [10]

En ambos casos, ambas técnicas están basadas en la formación de un vapor del material a depositar, con objeto de que el vapor se condense sobre la superficie del sustrato formando una capa delgada. Generalmente el proceso, ha de realizarse en vacío o en atmósfera controlada con objeto de evitar la interacción del vapor con la atmósfera del aire y provocar una oxidación.

2.1.1.- ESQUEMA DEL PROCESO

Los pasos siguientes ejemplifican la construcción de nuestra evaporadora y consisten en lo siguiente:

- **Diseño:** Diseñar la evaporadora térmica, mediante programas de cómputo, fabricación, monitoreo y verificación de la calidad de las partes.
- **Implementación de la estructura:** Posteriormente se realizará la incorporación de la Base de aluminio sobre una estructura, para montar en la parte superior la campana, y en la inferior la bomba de vacío y en la parte intermedia los accesorios de la misma.

- **Incorporación de partes:** Instalación de un Pasa muros de acero inoxidable 304, para colocar los postes que portan el filamento, las cuales consisten en:
- **Incorporación de una válvula de presurización**
- **Revisión e incorporación de Bomba mecánica para vacío primario**
- **Revisión e incorporación de Bomba turbomolecular para vacío medio**
- **Adaptación en la cámara ya fabricada de:** fuente de corriente, Porta filamento, Filamento de tungsteno, Campana de *pyrex*, Sensor de vacío bajo, Sensor de vacío medio (*ion gauge*), Medidor de vacío
- **Revisión e incorporación del Controlador de bomba turbomolecular y funcionamiento óptimo de la evaporadora**
- **Fabricación y Caracterización de las películas ultradelgadas mediante diferentes técnicas.**

El procedimiento que se siguió para la fabricación y realización del equipo es a partir de cero, y es el mostrado en la sección de “Desarrollo Experimental”. En él se encuentran todas las acciones tomadas para su implementación y verificación de su correcto funcionamiento.

2.1.2.- MATERIALES CONSUMIBLES UTILIZADOS

- Alambre de metal para depositar (del material deseado)
- Gas Nitrógeno (N_2)
- Filamento de tungsteno

2.1.3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para asegurar que los equipos con los que se realizará vacío en el sistema funcionan adecuadamente, se llevaron a cabo pruebas por separado en un inicio tanto de la bomba mecánica y posteriormente en conjunto con la bomba turbomolecular, utilizando y validando los sensores respectivos para cada prueba.

Para probar el funcionamiento de la bomba mecánica, primero se conectó el medidor de vacío medio-bajo directo a la entrada de la bomba con centradores y abrazaderas, llegando a una presión de *27 miliTorr* estando en funcionamiento, lo cual consideramos adecuada, de acuerdo a lo consultado en la literatura.

Después se conectó una manguera flexible a la entrada de la bomba mecánica y el sensor de vacío medio-bajo en el otro extremo de la manguera, para probar que se lograba alcanzar una presión igual a *27 miliTorr*, ya que la manguera es la que comunicará las dos bombas del sistema.

Para la prueba del sistema de vacío completo, antes de ser montado en la base, se conectó la manguera flexible de la entrada de la bomba mecánica hacia el *flange* en donde va montada la bomba turbomolecular con tornillos de acero y un “*o-ring*” de cobre para garantizar una mayor seguridad al momento de hacer vacío. El sensor de vacío medio-bajo primero se montó cerca de la entrada de la bomba mecánica (**Figura 2**) y después cerca de la bomba turbomolecular (**Figura 3**) para observar el comportamiento de la presión en esas dos zonas.



Figura 2.- Prueba 1 del sistema de vacío completo sin montar en la estructura de la cámara.



Figura 3.- Prueba 2 del sistema de vacío completo sin montar

Posteriormente con ayuda de una fresadora, se maquinó la placa de aluminio 6061 la cual será la base sobre en donde va montada la campana de vidrio *pyrex* por la parte superior y las demás partes del sistema y aditamentos en la parte inferior.

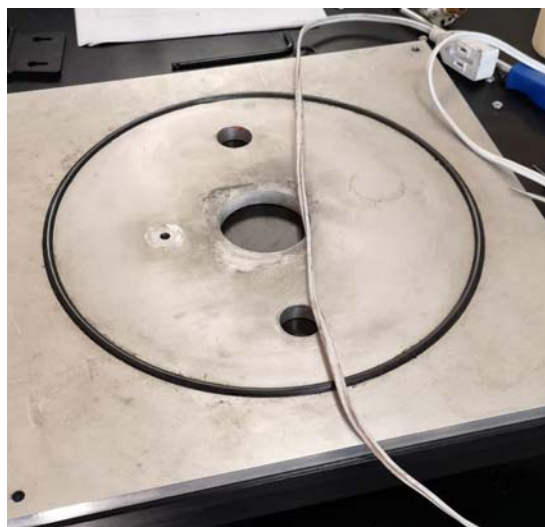


Figura 4.- Placa de aluminio 6061, base

Como primer paso se procedió a rectificar las superficies de la placa, para contar con uniformidad durante el maquinado y las perforaciones necesarias. La configuración de la placa de aluminio consta de dos orificios por los cuales pasan las dos terminales en las que se inducirá la corriente requerida para llevar a cabo el depósito, un orificio central el cual será el conducto que conecta el sistema de vacío con la cámara cerrada formada entre la campana y la placa de aluminio, un orificio para colocar el sensor de vacío medio-alto (*ion gauge*) y un orificio por el cual se alimentará el sistema con un gas inerte (nitrógeno) para la presurización del sistema después de cada depósito.



Figura 5.- Orificios en placa de aluminio para la montura de aditamentos

Las dos terminales se fabricaron con piezas de teflón las cuales fueron maquinadas en un principio en un torno y posteriormente son atravesadas por tornillos de acero inoxidable torneado y soldados, cada uno con un orificio roscado centrado en la parte que va por el exterior de la placa para colocar los cables que salen de la fuente variable de voltaje (**Figura 6**).



Figura 6.- Imagen de los dos Pasamuros fabricados con teflón para soporte de las terminales



Figura 7.- Tornillos de acero para terminales montados en placa de aluminio.

A continuación, se procedió a realizar lo que conformaría el soporte de la placa de aluminio 6061, que consta de 4 cilindros de plástico duro maquinados en torno, que separan la placa de la base en donde irán todos los otros componentes del sistema.

En la base se realizó un orificio por el cual pasará la conexión entre la bomba turbo molecular y la placa de aluminio, en la cual la unión con la placa de aluminio lleva además un “o-ring” de *viton*. También se le colocó una barra delgada de aluminio a la base entre las 2 paredes a una altura de 17 pulgadas del fondo, que nos servirá como apoyo para la fuente de voltaje variable y un entrepaño de lámina rígida para los demás controladores electrónicos que conforman el equipo (medidor de vacío y electrónica de bomba turbomolecular).

Teniendo listo las partes necesarias del equipo, se montó todo en una base con llantas, de forma en que el espacio para las conexiones eléctricas y de vacío no excedieran las dimensiones laterales de la misma base. La placa se montó sobre la parte superior de la base con el espacio suficiente para colocar el ion gauge y las líneas para el gas inerte como puede observarse en las siguientes figuras; **Figura 8** que muestra la placa de aluminio ya con los aditamentos y montada en la base móvil y en la **Figura 9** que muestra las llaves que servirán de entrada del gas inerte a la cámara de depósito.



Figura 8.- Placa de aluminio con aditamentos montada en base móvil

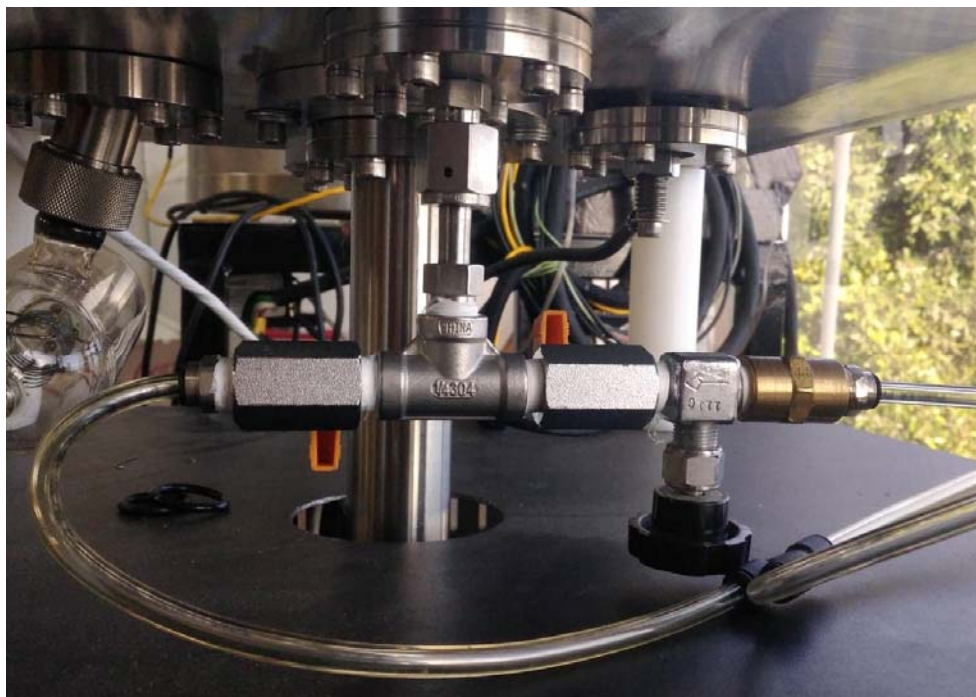


Figura 9.- Llaves de entrada de gas inerte a la cámara de depósito

Al tener todo el equipo montado, se hizo primero una prueba de vacío sin la campana, tapando la parte superior con una pieza de aluminio y un “o-ring”, para verificar que no hubiera ninguna fuga en alguna unión del sistema.

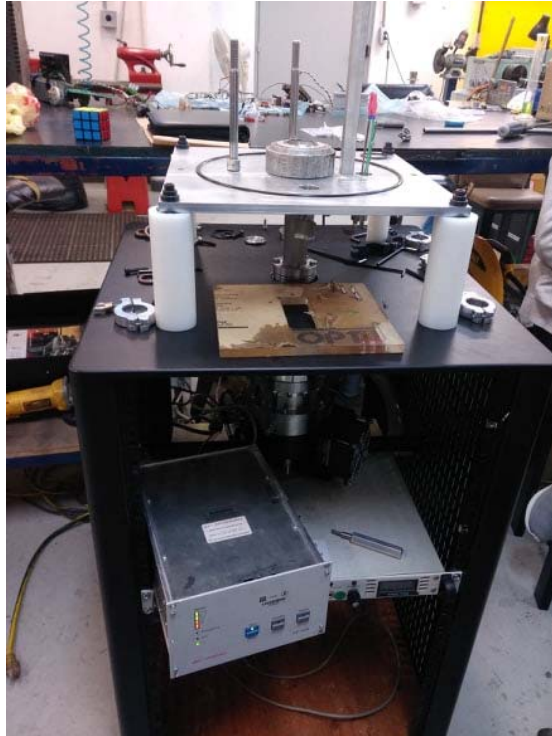


Figura 10.- Primera prueba de vacío con sistema armado

Observando el comportamiento del sistema de vacío, se optó por realizar una nueva pieza de *acero 316* que uniera la bomba turbomolecular con la placa de aluminio, ya que no se logró llegar al vacío deseado y se descartó la opción de que fuera alguna unión utilizada, la causante del problema.

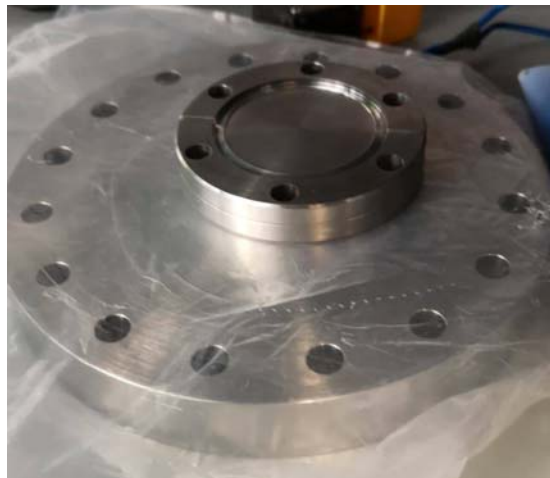


Figura 11.-Flange de conector realizado para bomba turbomolecular



Figura 12.- Tapa superior de conector realizado para bomba turbomolecular



Figura 13.- Extensión de conector realizado para bomba turbomolecular

La pieza nueva fue maquinada por partes en el torno, y fue hecha de tal manera que su extensión nos permitiera colocar los equipos electrónicos debajo de la bomba turbomolecular. Una vez terminada la nueva pieza, se montó la bomba turbomolecular con tornillos y tuercas de acero y un “o-ring” de cobre debajo de la placa que sostiene la campana, se colocó en la placa de aluminio y se hicieron de

nueva cuenta pruebas de vacío, verificando de esta manera que se llegó a los valores óptimos para llevar a cabo la evaporación de los metales deseados.



Figura 14.- Valor de vacío alcanzado en prueba de vacío final

En la **Figura 14** se puede observar en el monitor el valor de vacío alcanzado (2.6 microTorr), esta fue la última prueba de vacío realizada antes de llevar a cabo alguna evaporación de metal, y considerando que existían la menor cantidad de objetos dentro de la cámara de depósito. Una vez asegurando que el equipo construido llega a una cantidad adecuada de vacío, se realizó una prueba de la fuente de corriente variable montando un filamento de tungsteno de 0.65 mm de diámetro entre las dos terminales que se conectan a dicha fuente, se encendió a 12 amperes y se pudo observar como el filamento se calentó y se puso al rojo vivo, logrando teóricamente tener las condiciones de evaporación requeridas.



Figura 15.- Prueba de calentamiento de filamento en vacío

Finalmente, se realizaron depósitos de distintos metales (oro, cobalto, aluminio) sobre distintos sustratos, con 2 grosores distintos de filamento de tungsteno y amperajes diferentes para los materiales y filamentos utilizados. Los filamentos fueron cortados de rollos de tungsteno, por lo que, a pesar de que se trató hacer lo más parecido posible, no hubo uniformidad entre cada uno de ellos, teniendo distintas distancias entre filamento y sustrato, y variando un poco la extensión del filamento, lo cual no fue significativo para la obtención de nuestras películas delgadas.

2.1.4.- RECUBRIMIENTO

Utilizando una fuente de voltaje variable, se administra corriente a un filamento de tungsteno en el cual se encuentra el metal a evaporar para realizar el depósito. Por debajo del filamento se monta una placa en la cual se acomodan los sustratos sobre los cuales se deposita el metal deseado.

Para realizar los diferentes depósitos se comienza por encender el sensor de vacío bajo y hacer un vacío primario al sistema utilizando la bomba mecánica, una vez llegando a una presión menor a 100 *miliTorr* se enciende la bomba turbomolecular para iniciar con el vacío medio. Una vez que la presión salga del rango del sensor de vacío bajo, se enciende el *ion gauge* para continuar monitoreando la presión del sistema. Al llegar a 30 *microTorr* se enciende la fuente de corriente variable con una corriente inicial de 0, aumentándola poco a poco, para que el filamento comience a calentarse junto con el metal a depositar. Una vez alcanzada la temperatura necesaria para la evaporación y para realizar el recubrimiento del metal, se mantiene la fuente en un valor constante de corriente hasta ver que el material a depositar se ha consumido en su totalidad.

Al finalizar el recubrimiento la fuente de corriente se apaga junto con el *ion gauge*. Después se apaga la bomba turbomolecular y se comienza a presurizar el interior de la campana con un flujo de nitrógeno, esto último, para hacer que la bomba turbomolecular se desacelere en un lapso de tiempo más corto que si lo hiciera sin ayuda de un flujo de gas.



Figura 16.- Fotografía en la que se muestra in situ el depósito de oro sobre un sustrato de silicio

CAPÍTULO 3

3.1.- RESULTADOS

El sistema completo de nuestra evaporadora se puede observar en la **Figura 17**, a excepción de la bomba mecánica, la cual es esencial y se encuentra en la parte inferior trasera de la base. La evaporadora es totalmente funcional, capaz de evaporar diferentes metales: oro, aluminio y cobalto.



Figura 17.- Sistema para evaporación térmica terminado, el cual es objetivo primordial de este trabajo.

Se optó por llevar a cabo los depósitos a una presión de 30 microTorr ya que a esta presión hay una cantidad razonable de moléculas por metro cúbico en el ambiente dentro del sistema, y el tiempo para esperar este vacío es de 30 min aproximadamente, dependiendo de las condiciones en las que se vaya a realizar el depósito.

A continuación, se muestran resultados de caracterizaciones realizadas a diversos depósitos llevados a cabo en el equipo armado en este trabajo para verificar que nuestro sistema trabaja adecuadamente.

Los resultados obtenidos del equipo de caracterización AFM fueron procesados con el programa *Gwyddion* para la obtención de imágenes 3D de la película delgada analizada. Es un programa modular para la visualización y análisis de datos SPM (microscopía de sonda de escaneo). Principalmente está destinado al análisis de campos de altura obtenidos mediante técnicas de microscopías de barrido (AFM, MFM, STM, SNOM / NSOM) y es compatible con muchos formatos de datos SPM. Sin embargo, se puede usar para el procesamiento de imágenes de campo de altura general, por ejemplo para el análisis de datos de profilometría o mapas de espesores de espectrofotometría de imágenes.

3.1.1.- AFM (Microscopia de Fuerza Atómica)

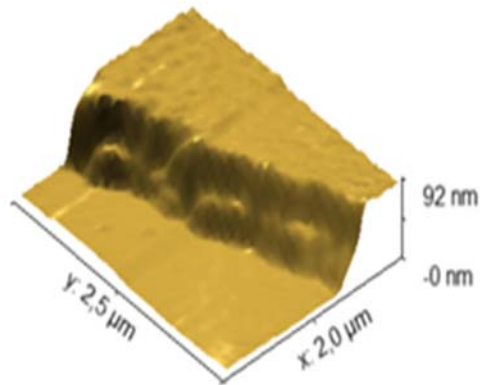


Figura 18.- Caracterización AFM de película de oro realizado en evaporadora térmica comercial de UNAC-CNyN

En la **Figura 18** tenemos una imagen obtenida con la técnica de caracterización AFM, de un depósito de oro llevado a cabo en una evaporadora comercial que se encuentra en la Unidad de Nanocaracterización del Centro de Nanociencias y Nanotecnología de UNAM (UNAC-CNyN). La separación entre el filamento en donde se encontraba el oro y el sustrato fue de 7 cm para este depósito. En los 3 ejes se logran observar las dimensiones de la zona tomada para realizar la medición, de ello obtenemos que el espesor se encuentra alrededor de los 92 nanómetros.

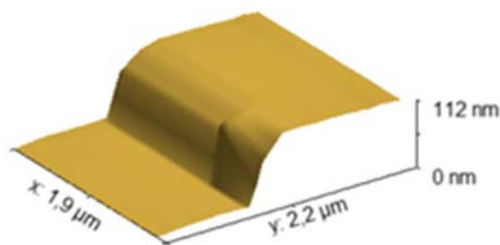
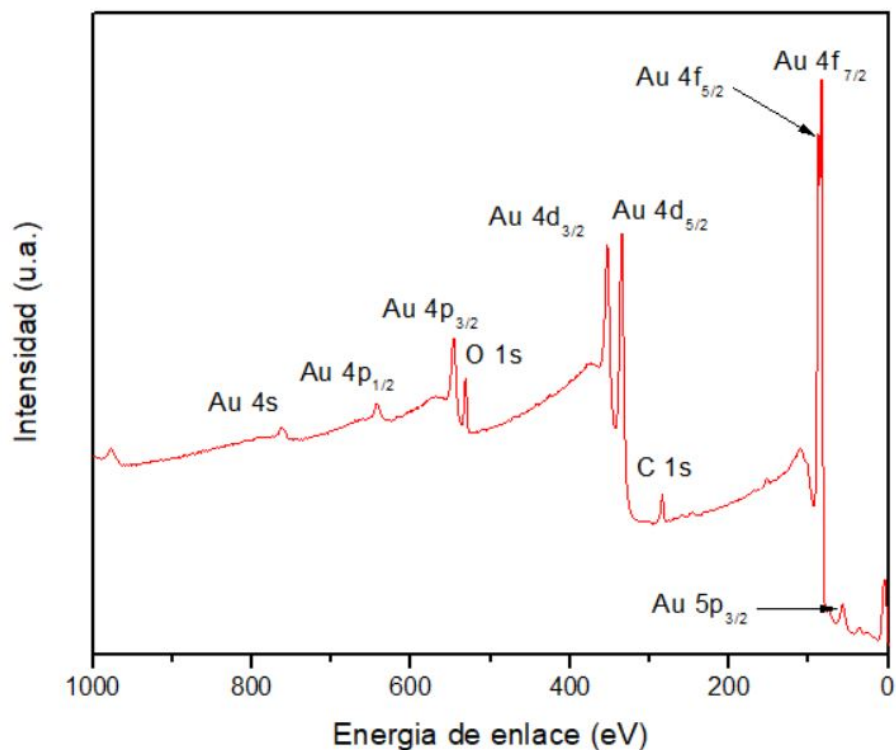


Figura 19.- Espesor de depósito de oro realizado en evaporadora térmica realizada en este trabajo.

Al igual que la **Figura 18**, la **Figura 19** fue obtenida por el método de AFM. Esta muestra de película delgada de oro fue realizada en la evaporadora térmica desarrollada en este trabajo. La separación entre el filamento en donde se encontraba el oro y el sustrato fue de 7.8 cm para este depósito. Como se puede observar, la película tiene un espesor de alrededor de 112 nm, lo cual acerca nuestros resultados, con los valores de otros depósitos de otras cámaras.

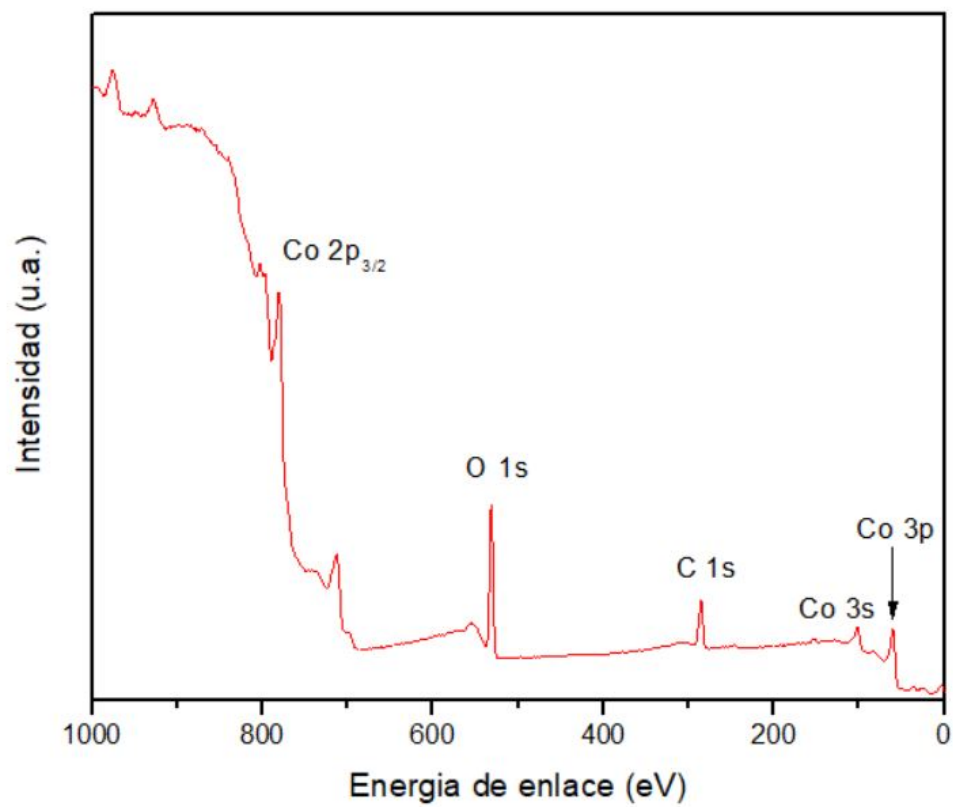
3.1.2.- XPS (Espectroscopia de Fotoelectrones emitidos por Rayos X)

La **Gráfica 1** es un espectro obtenido por la técnica de XPS de una película delgada de oro depositada en el equipo de evaporación térmica desarrollado en este trabajo. En esta gráfica podemos observar los picos característicos del oro, y las señales de carbono y oxígeno., lo cual nos muestra un resultado característico para este tipo de películas.



Gráfica 1.- Espectro XPS de una película de oro sobre silicio

La gráfica 2 fue obtenida con la misma técnica de caracterización que la gráfica 1. Ahora el material analizado es una película de cobalto sobre un sustrato de silicio. El análisis realizado fue sólo superficial. Los picos que podemos observar son de oxígeno, carbono y cobalto. El pico que se encuentra en 781 eV pertenece al Co(OH)_2 (Hidróxido de Cobalto (II)). Y su aparición es típica en estos depósitos.



Gráfica 2.- Espectro XPS de una película de cobalto sobre silicio

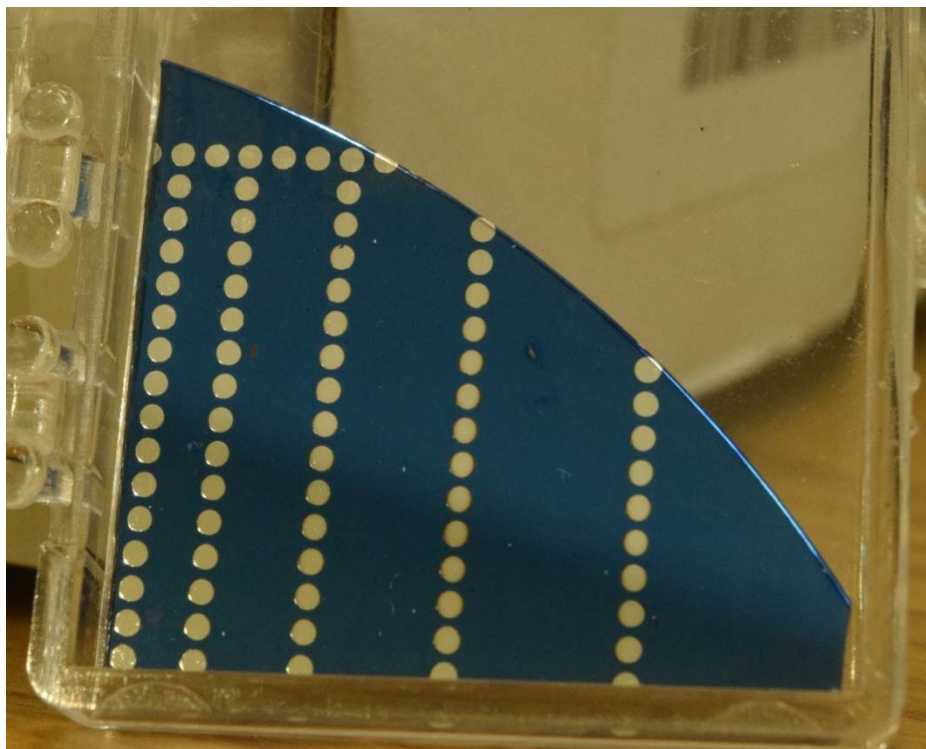


Figura 20.- Contactos de oro depositados en evaporadora térmica realizada en este trabajo.

Los contactos que se observan en la **Figura 20** fueron también elaborados en esta evaporadora térmica, con el fin de realizar pruebas eléctricas a un material depositado previamente sobre un sustrato de silicio. Las dimensiones del depósito están del orden las habituales, y sus medidas eléctricas se reportan como esperadas.



Figura 21.- Plantillas para fotolitografía para depósito de metales



Figura 22.- Depósito de oro con plantilla hecha por fotolitografía

En la **Figura 22** se puede observar un depósito de oro que se llevó a cabo con una plantilla (**Figura 21**) creada por fotolitografía, como prueba, para más adelante poder crear distintos patrones de forma muy precisa a través de la combinación de estas técnicas.

3.2.- DISCUSIÓN

Ya que los filamentos utilizados no tenían las mismas dimensiones y la forma exacta entre ellos, no se ha podido aun llegar a estandarizar la forma de depósito, sólo a obtener aproximaciones de las condiciones (amperaje, voltaje, distancia sustrato-filamento) para los distintos metales utilizados, manteniendo fija la presión a la que se llevan a cabo (30 microTorr).

Comparando los resultados de las imágenes 17 y 18 podemos observar que no hay una gran diferencia en cuanto al espesor del oro depositado en los 2 equipos utilizados.

En la gráfica 1 y 2 podemos observar picos pertenecientes a las señales de Carbono y Oxígeno, que se encuentran en 285 eV y 531 eV respectivamente, según el Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy. Estas señales suelen ser de dichos materiales adsorbidos en la superficie cuando son expuestos al medio ambiente, ya que la técnica es muy sensible y no aún son se realiza alguna medida de erosión para llevar a cabo un análisis del bulto del material.

La señal obtenida en la gráfica 2 en los 781 eV, pertenece a la especie Co(OH)_2 según el Handbook of X-Ray Photoelectron Spectroscopy. Esta señal puede deberse a grupos OH adsorbidos en la superficie, por el tipo de análisis

realizado, sin embargo, aún no se puede asegurar esto sin realizar un análisis al material después de erosionar la película *in situ*.

En la imagen 19 podemos observar contactos de oro que a simple vista se ven definidos y uniformes, tanto por su tamaño y forma como por su color.

3.3.- CONCLUSIONES

Se logró disminuir el tiempo total de depósito con respecto al experimentado en la evaporadora térmica comercial a la que se tiene acceso.

Se evaporo oro, aluminio y cobalto exitosamente, en forma de películas delgadas para la realización de recubrimientos y contactos metálicos para llevar a cabo mediciones eléctricas.

Como resultado obtuvimos un equipo totalmente funcional en el que se pueden realizar recubrimientos metálicos de oro, aluminio y cobalto, con espesores y purezas comparables con la de un equipo comercial.

Aún estamos en espera de nuevas medidas y el equipo está en vías de perfeccionarse incorporando nuevos aditamentos.

El costo del equipo es notablemente inferior al comercial y con resultados muy satisfactorios.

REFERENCIAS

- [1] C. Poole y F. Owens. “Introducción a la Nanotecnología”, Barcelona: Reverté, 2007, pag. 1.
- [2] S. Águila, J. Antúnez, L. Cota, et al. “Preguntas y respuestas sobre el mundo NANO”, ISBN: 9786070281440. Ciudad de México: Terracota, S.A. de C.V., 2016.
- [3] J. Fairfield. “Nanoelectronics”, Gran Bretaña: Institute of Physics, 2018, pag. 1.
- [4] J. Albella. “Laminas delgadas y recubrimientos: Preparación, propiedades y aplicaciones”. ISBN: 978-84-00-08166-9. Colección de la Biblioteca de ciencias, Número: 11. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 2003, pag. 704.
- [5] C. Quinteros. “Óxidos delgados para micro y nanoelectrónica: degradación, ruptura y aplicaciones tecnológicas.”, Buenos Aires: Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 2016, pag. 6.
- [6] J. Irwin. “Análisis básico de circuitos en ingeniería, quinta edición”, ISBN: 968-880-816-4. México: Pearson Education, 1977, pags. 252,253.
- [7] N. Biyiki y A. Haider. “Atomic layer deposition: an enabling technology for the growth of functional nanoscale semiconductors”, United Kingdom: IOP, 2017, pag. 2.

- [8] C. Prados. "Sistemas Magnéticos Artificiales obtenidos mediante Pulverización Catódica: Películas Delgadas Amorfes de TbFe y Multicapas de Ni/Co", Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 1995, pag. 14.
- [9] L. López. "Síntesis y caracterización de nanopartículas y películas delgadas por métodos físicos a partir de aleaciones con efecto de memoria de forma", Ciudad de México: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2011, pag. 20.
- [10] R. Zenalla. "Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño", Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2012, pag. 70.
- [11] P. Sekhar, V. Janardhanam, I. Jyothi, H. Chang, et. al. "Microstructural and electrical properties of Al/n-type Si Schottky diodes with Au-CuPc nanocomposite films as interlayer", Republic of Korea: Elsevier, 2017.
- [12] M. Yu, X. Feng. "Thin-Film Electrode-Based Supercapacitors". Joule, Volume 3, Issue 2, 2019, pags. 338-360.
- [13] F. Mwema, O. Oladijo, S. Akinlabi, E. Akinlabi. "Properties of physically deposited thin aluminium film coatings: A review". Journal of Alloys and Compounds, Volume 747, 2018, pags. 306-323.
- [14] C. Granqvist. "Electrochromics for smart windows: Oxide-based thin films and devices". Thin Solid Films, Volume 564, 2014, pags. 1-38.

- [15] A. Elsheikh, S. Sharshir, M. Ahmed, J. Shaibo, Z. Haiou. "Thin film technology for solar steam generation: A new dawn Solar Energy". Volume 177, 1. 2019, pags. 561-575.
- [16] K. Wasa. "13 - Thin film technologies for manufacturing piezoelectric materials". ISBN: 9781845695347. Advanced Piezoelectric Materials. Japon: Woodhead Publishing, 2010, pags 441-492.
- [17] S. Wang. et. al. "Fabrication of efficient metal halide perovskite solar cells by vacuum thermal evaporation: A progress review". Current Opinion in Electrochemistry, vol: 11. 2018, pags. 130-140.
- [18] J. Moulder. et. al. "Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy". ISBN: 0962702625. Minnesota: Physical Electronics Division, Perkin-Elmer Corp. 1992, pag. 259.
- [19] M. Benelmekki, A. Erbe. "Chapter 1 - Nanostructured thin films—background, preparation and relation to the technological revolution of the 21st century". ISBN: 9780081025727. Frontiers of Nanoscience, Volume 14. United Kingdom: Elsevier, 2019, pags. 1-34.
- [20] D. Mattox. "Chapter 5 - Thermal Evaporation and Deposition in Vacuum". ISBN: 9780128130841. The Foundations of Vacuum Coating Technology (Second Edition). Albuquerque: William Andrew Publishing, 2018, pags. 151-184.
- [21] C. Krishnamoorthy, R. Chidambaram. "Chapter 17 - Nanostructured thin films and nanocoatings". ISBN 9780323512541. In Micro and Nano Technologies,

Emerging Applications of Nanoparticles and Architecture Nanostructures.
Vellore: Elsevier, 2018, pags. 533-552.

- [22] M. Ohring, "Chapter 3 - Thin-Film Evaporation Processes". ISBN: 9780125249751. Materials Science of Thin Films (Second Edition). New Jersey: Academic Press, 2002, pags. 95-144.
- [23] K. Sree. "Chapter 2 - Evaporation". ISBN: 9780080446998. Principles of Vapor Deposition of Thin Films. California: Elsevier, 2006, pags. 11-143.
- [24] D. Mattox. "Chapter 6 - Vacuum Evaporation and Vacuum Deposition". ISBN: 9780815520375. Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing (Second Edition). Oxford: William Andrew Publishing, 2010, pags. 195-235.
- [25] D. Baer, S. Thevuthasan. "Chapter 16 - Characterization of Thin Films and Coatings". ISBN: 9780815520313. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition). William Andrew Publishing, 2010, pags. 749-864.
- [26] S. Kodigala. "4 - The Role of Characterization Techniques in the Thin Film Analysis". ISBN: 9780123944290. Thin Film Solar Cells From Earth Abundant Materials. California: Elsevier, 2014, pags. 67-140.
- [27] S. Shah, G. Jaffari, E. Yassitepe, B. Ali. "Chapter 4 - Evaporation: Processes, Bulk Microstructures, and Mechanical Properties". ISBN: 9780815520313. Handbook of Deposition Technologies for Films and Coatings (Third Edition). Delaware: William Andrew Publishing, 2010, pags. 135-252.

[28] S. Mader. 2.1 - Evaporation of Thin Films. ISBN: 9780124809017. In Materials Science and Technology, Epitaxial Growth. New York: Academic Press, 1975, pags. 29-36.