

Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de Ingeniería
Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



“Fabricación y Caracterización de Películas Delgadas Metálicas para Aplicaciones en Dispositivos Micro- y Optoelectrónicos”

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en Ingeniería

Presenta

Oscar Manuel Pérez Landeros

Director

Dr. Nicola Radnev Nedev

Co-Director

Dr. Mario Alberto Curiel Alvarez

Contenido

Contenido	2
1 -Introducción	8
2 -Objetivos	10
Objetivo general:	10
Objetivos específicos:	10
3 Marco teórico.....	11
3.1 Materiales en bulto y a nanomateriales.....	12
3.2 Películas delgadas y ultra delgadas.....	13
3.3 Parámetros relevantes de las películas delgadas metálicas.....	15
3.4 Algunos usos de películas metálicas delgadas.....	16
3.5 -Técnicas de fabricación de películas delgadas	19
3.5.1 -Evaporación Térmica en vacío.....	21
3.5.2 -El vacío.....	22
3.5.3 -Trayectoria libre media	23
3.5.4 -Como se obtiene el vacío	24
3.5.5 -Como se mide el vacío	28
3.5.6 -Dependencia de las propiedades ópticas de películas delgadas metálicas en función de distintos parámetros de fabricación.	30
3.6 -Técnicas de caracterización	32
3.6.1 -Elipsometría	33
3.6.2 -AFM	35
3.6.3 -Caracterización eléctrica	38
4 -Experimentación.....	44
4.1 -Fabricación de muestras	44

4.1.1	-Preparación de muestras.....	44
4.1.2	-Preparación del equipo de evaporación TE12.....	45
4.1.3	-Condiciones del depósito	46
4.1.4	-Procedimientos general y específico de evaporación.....	46
5	Resultados y discusiones	49
5.1	Caracterización superficial y óptica.....	49
5.1.1	Películas de un solo metal	49
5.2	-Comparación de espesores y rangos de transmisión por métodos ópticos	56
5.3	Películas bicapa.....	¡Error! Marcador no definido.
5.4	Películas Compuestas	60
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	64
6.1	Conclusiones	64
6.2	Trabajo Futuro	65

Tabla 1: Prospectiva de producción mundial de electrónicos 2012-2020 (mmd). [1]	8
Tabla 2 Clasificación por espesor de las películas solidas. [9]	14
Tabla 3: Categorías del vacío según su rango de presión. [13]	22
Tabla 4: Tipos de manómetros más comunes, rangos de operación y principio de operación. [15]	28
Tabla 5: Constantes ópticas para algunos metales y Skin Depth. [4].....	30
Tabla 6: Elipsometría Espectroscópica, ventajas y desventajas. [20]	34
Tabla 7: Técnicas de caracterización eléctrica presentadas en este trabajo; método, señal medida, e información que se puede obtener. [22].....	39
Tabla 8: Tabla de resistividad de algunos elementos. [24].....	40
Tabla 9: Materiales y herramientas requeridas para la preparación de muestras	45
Tabla 10: Tabla de condiciones requeridas para inicio de deposición mediante el equipo TE12.	46
Tabla 11: Condiciones y parámetros del sistema TE12; requeridos y variables. Valores de factor Z y densidad del Oro y Aluminio ref. 21	46
Tabla 12: Valores obtenidos por Elipsometría espectroscópica.	52
Fig. 1: Clasificación de los materiales nanoestructurados, a partir de sus dimensiones manométricas en sus distintos ejes cartesianos.	13
Fig. 2: Estructura de cátodo semitransparente para de un PLED. [4]	16
Fig. 3: Espectro de transmisión óptico de un PLED con distintos cátodos; (a) combinaciones Au y Al, (b) combinaciones de Cu y Al. [4]	17
Fig. 4: Esquema de algunas estructuras metalizadas con aluminio, aplicaciones estéticas como el papel metalizado.	18
Fig. 5: Algunos de los patrones más complejos usados en antenas tipo susceptible de microondas. Las distintas formas y tamaños acoplan distintas proporciones de energía de las microondas y por lo tanto diferentes áreas de los alimentos se calientan a distintas tasas y/o temperaturas. [11].....	18
Fig. 6: Técnicas de fabricación PVD: (1a) evaporación en vacío, (1b y 1c) <i>Sputter Deposition</i> en ambiente de plasma, (1d) <i>Sputter Deposition</i> en vacío, (1e) Deposición asistida por iones en ambiente de plasma con fuente de evaporación térmica, (1f)	

Deposición asistida por iones con fuente de pulverización iónica, (1g) Deposición asistida por iones con fuente de evaporación por arco y, (1h) Deposición Asistida por haz de iones (IBAD-Ion Beam Assisted Deposition) con fuente de evaporación térmica y bombardeo de iones desde un cañón de iones. [12]	20
Fig. 7: Esquema de un sistema típico para deposición en vacío con una bomba rotatoria y otra de difusión. [12]	21
Fig. 8: Trayectoria libre media, Vacuum Deposition onto. [14]	23
Fig. 9: Algunas de las principales bombas usadas en sistemas de evacuación, y sus rangos de operación.....	25
Fig. 10: a) Etapas de bombeo de una boba de paletas rotatoria de etapa sencilla. b) Bomba de doble etapa. Imágenes de. [16]	26
Fig. 11: Esquema funcional de una bomba turbomolecular. [17]	27
Fig. 12: Diagrama básico de una cámara de depósito sistema de vacío, el vacío primario bajo/medio, y el secundario alto. [17]	27
Fig. 13: Circuito para medición con tubos Pirani. [18]	29
Fig. 14: El principio básico de la medición de manómetros de ionización con cátodo K emisor de electrones. Los electrones que golpean moléculas neutras suficientemente cerca para podrían ionizarlas. Los iones son extraídos por el colector C, los electrones finalmente llegan al ánodo A. [19]	29
Fig. 15: Dependencia de la intensidad de transmisión con el espesor de películas de Al. [4]	31
Fig. 16: Dependencia de la Intensidad de transmisión con la tasa de deposición en películas de plata. [4].....	32
Fig. 17: Principio de medición del Elipsómetro. [20]	33
Fig. 18: Caracterización de propiedades físicas por Elipsometría espectroscópica. [20]....	35
Fig. 19: Generación de la señal del sensor AFM.....	36
Fig. 20: Modo intermitente en vibración libre antes del contacto, y en vibración amortiguada después del contacto con la superficie de la muestra. [21].....	37
Fig. 21: Curvas I-V características de contactos entre materiales de circuitos integrados. (a) Contacto Óhmico ideal; (b) contacto rectificador; (c) contacto "óhmico" no lineal. [24] .	41
Fig. 22: Esquema de una configuración experimental para caracterización I-V.	42

Fig. 23: Medición de barrido de voltaje AC y DC. [28].....	43
Fig. 24: Configuración básica para probar el capacitor MOS con el Modelo 4200-CVU de Keithley. [28].....	43
Fig. 25: Forma general del enmascarado de muestras parte de la preparación inicial de un depósito.....	45
Fig. 26: Geometría del depósito. Valores obtenidos por Microbalanza de cuarzo son más confiables bajo estas condiciones.	48
Fig. 27: La imagen muestra una medición AFM tratada por Gwyddion; sin remoción de inclinación (Izquierda), y con remoción de inclinación (Derecha).	50
Fig. 28: Perfiles tomados mediante Gwyddion, muestra CGAL000. El Δz es de 26.3 nm.	50
Fig. 29: Vista 2D y 3D muestra CGAu016_B. Lado izquierdo perfiles 1 y 2 de medición de escalón.	51
Fig. 30: Medición del escalón a dos perfiles, una medición horizontal sobre el perfil 1 (izquierda) demuestra que la altura aproximada es de 41.5 nm.	51
Fig. 31: Grafica Ψ - Δ de Oro delgado. Las líneas punteadas representan el modelo B-Spline y su relación con el espectro medido (líneas en color verde y rojo) con un MSE de 3.263 (Error cuadrático medio)	52
Fig. 32: Comparación de las constantes ópticas calculadas por Modelo B-Spline, y las publicadas en Handbook of Optical Constants of Solids, de Eduard D. Palik.	52
Fig. 33: Izquierda, Transmisión de película Muy delgada de Oro evaporado. Derecha, Modelo calculado para una película de 31 nm de Oro con constantes ópticas de Eduard D. Palik.....	53
Fig. 34: Imágenes SEM de un corte transversal por FIB y protección de Platino. Izquierda; vista superior 42x42 μ m. Derecha; vista lateral de la trinchera erosionada y pulida finamente.	54
Fig. 35: Espesor obtenido por Microscopía SEM-FIB (31.45nm).	55
Fig. 36: Intensidad de Transmisión por Elipsometría sobre Corning Glas 2947	56
Fig. 37: Comparación métrica de la intensidad de transmisión por elipsometría entre tres muestras de distintos espesores.	56
Fig. 38: Intensidad de reflexión que muestra el Corning glass 2947 a distintos ángulos de incidencia (45°, 55°, 65°, 75°).....	57

Fig. 39: Comparación de las intensidades de reflexión y transmisión para Corning glass 2947	58
Fig. 40: Imagen y procesamiento por AFM Q-Scope. Los indicadores; azul, verde y rojo, en la imagen izquierda corresponden a los datos de la derecha de su mismo color. De la misma manera, la sección transversal corresponde a la diagonal trazada en la imagen, y las líneas horizontales a los punteros de su respectivo color.	58
Fig. 41: Espesor calculado por Elipsometría Espectroscópica. El modelo utilizado B-Spline se muestra en línea punteada, la medición de intensidad en rojo continuo. Un espesor de 10 nm y rugosidad de 5.27.	59
Fig. 42: Comparación de la intensidad de reflexión con la intensidad transmisión para una película bicapa Au/Al. Las líneas punteadas representan la reflexión y las líneas continuas transmisión (ambas para Au, Al y Au/Al).....	59
Fig. 43: Extracción de perfiles software, una inclinación evidente de la medición por AFM vuelve difícil determinar el espesor de una película, sin embargo con la herramienta Gwyddion esta inclinación es evitable.	60
Fig. 44: Datos de la intensidad de reflexión y modelado por Elipsometría Espectroscópica para una película co-evaporada de Oro y Aluminio, con un espesor de 56.04 nm aproximadamente.....	61
Fig. 45: Extracción de perfiles de muestra CGAL018, Aluminio delgado sobre Corning glass 2947.	61
Fig. 46: Perfiles extraídos de la Fig. 43. Se determinó escalón (Δz) mediante software Gwyddion. Las curvas negra y roja representan las líneas 1 y 2 respectivamente de la imagen izquierda Fig. 43.	62
Fig. 47: Intensidad de reflexión (líneas azules), e intensidad de transmisión (líneas rojas), las líneas punteadas corresponden a la muestra co-evaporada, y las líneas continuas; a la muestra de Aluminio.	62

1 -Introducción

La industria electrónica en el estado ha venido incrementando su actividad en los últimos años, una forma de medir este incremento es por producción en miles de millones de dólares (mmd) (Tabla 1). La variación en la actividad económica del país es un buen indicador del desarrollo industrial. Las industrias manufactureras; de la que se desprende el sector de la industria electrónica, tuvo un incremento del 5.7% en el 2014 según datos del INEGI.

El Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte 2007 (SCIAN) divide la industria electrónica en cinco grandes subsectores; computación y oficina con una contribución del 19.1%, comunicaciones con el 14.1%, audio y video con el 12.4%, equipo médico e instrumentos de precisión, medición, control y ópticos con el 24.3% y semiconductores con el 30.1%.

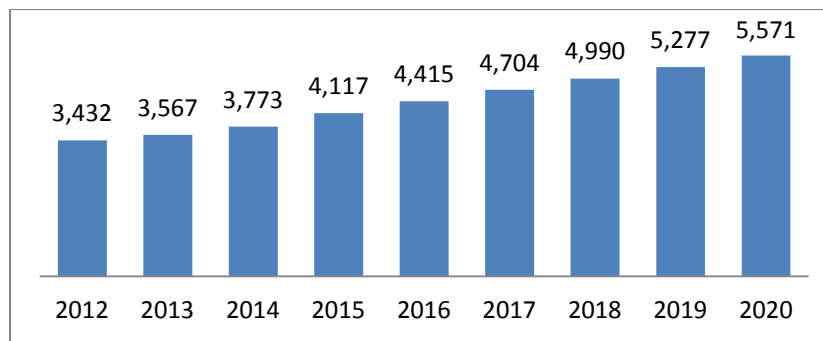


Tabla 1: Prospectiva de producción mundial de electrónicos 2012-2020 (mmd). [1]

La tasa de crecimiento estimada para el periodo 2012-2020 es del 6.2% y aunque para el subsector de semiconductores corresponde el menor crecimiento; es también el de mayor contribución. En otras palabras, la industria electrónica en el estado representa un eje principal en el desarrollo económico del país. [1]

Por su parte, el sector educativo se sirve de algunas de las necesidades industriales y encuentra ahí un nicho, esto consolida una relación de beneficio mutuo que determina la dirección de gran cantidad de proyectos, y la innovación tecnológica; como reto en común, fortalece esta relación.

Como ya se mencionó, los dos subsectores de mayor contribución en la industria electrónica son: i) Semiconductores y ii) Equipo médico e instrumentos de precisión, medición, control y ópticos. El presente proyecto; desarrollado en el LSMN (Laboratorio de Semiconductores Microelectrónica y Nanotecnología) del Instituto de Ingeniería de la UABC, está directamente relacionado con dichos subsectores, dirige sus esfuerzos en la fabricación y la caracterización de películas metálicas individuales y multicapas metálicas para aplicaciones electrónicas y optoelectrónicas. El control de las características de las películas metálicas; así como del proceso de fabricación, es un tema de cabecera en el proceso de manufactura, obtener eficiencia sin perder calidad en el depósito es un gran reto y más aún mejorar las características sin perder eficiencia.

Los procesos de fabricación basados en métodos físicos son relativamente sencillos y muy atractivos para la industria. La Evaporación Térmica; técnica en el que se basa este trabajo, es uno de las más versátiles, este proyecto contempla también la caracterización y optimización del equipo de Evaporación Térmica.

Los resultados de este proyecto son de suma importancia para la comprensión de las variables involucradas en los procesos de fabricación ya que de estas dependerán las propiedades de las películas metálicas fabricadas.

2 -Objetivos

En todo dispositivo microelectrónico y optoelectrónico; pasivos o activos, integrados o discretos, es siempre requerido como mínimo un contacto metálico; metal-semiconductor, metal-aislante, metal-metal, lo que; para el presente proyecto, origina los siguientes objetivos:

Objetivo general:

Fabricar y caracterizar películas metálicas individuales y multicapas para diferentes aplicaciones electrónicas y optoelectrónicas.

Objetivos específicos:

- Fabricar capas individuales de Al y Au [no transparentes] para contactos con silicio y SiO_2 .
- Fabricar capas individuales de Al y Au semitransparentes para uso en dispositivos optoelectrónicos y diferentes tipos de sensores ópticos.
- Establecer condiciones óptimas para deposición de contactos constituidos de dos metales para uso en dispositivos electrónicos futuros.
- Estudiar a detalle las propiedades de las capas fabricadas como grosor, rugosidad, transparencia, adherencia etc.
- Evaluar la posibilidad de utilizar las capas depositadas bajo las condiciones óptimas en sensores de radiación.

3 Marco teórico

La evolución de los dispositivos microelectrónicos es influenciada por factores como la demanda en capacidad de memoria de circuitos integrados, alta velocidad de transmisión de datos, comunicación óptica, etc. Esto requiere dispositivos electrónicos de alta velocidad de operación y tamaños más pequeños, como es el caso de los circuitos integrados de Silicio, en particular memorias dinámicas de acceso aleatorio (DRAMs). [2]

En micro y optoelectrónica, los circuitos integrados; a base de cualquier material, usan siempre metales; o aleaciones de los mismos, como contactos e interconectores, sea metal con metal, metal con semiconductor o metal con aislante. Un caso especial son los diodos Schottky la operación de los cuales se basa al contacto metal/semiconductor.

Cuando un metal hace contacto con un semiconductor, se forma una barrera entre la superficie del metal-semiconductor. Esta barrea es la responsable del control de la corriente de conducción así como de su comportamiento capacitivo. [23]

Los conductores transparentes no son ópticamente 100% transparentes ni metálicamente conductivos. Desde un punto de vista de estructuras de bandas, la combinación de estas dos propiedades en el mismo material es contradictoria: un material transparente es un aislante con una banda prohibida relativamente amplia, que posee una banda de valencia completamente llena y una banda de conducción completamente vacía; mientras que la conductividad metálica aparece cuando el nivel de Fermi se encuentra dentro de una banda con una gran densidad de estados para proporcionar una alta concentración de portadores.

Conductores transparentes eficientes encuentran su nicho en un compromiso entre una suficiente transmisión en el espectro de luz visible y una moderada pero útil conductividad eléctrica. [4]

Es bien sabido que las propiedades físicas y químicas de una capa metálica ultra delgada en un sustrato ajeno difieren de las de bulto. El establecimiento del método de preparación de una capa metálica ultra delgada con una estructura ordenada y el entendimiento de el origen de estas propiedades físicas y químicas únicas son de mucha importancia para ciencia fundamental como para aplicaciones industriales. El crecimiento epitaxial de una capa delgada bien definida de metales se ha logrado mediante deposición

de vapor, epitaxia de haces moleculares (MBE), y). Comparado con estas técnicas de deposición en vacío, los depósitos electroquímicos de metal son económicos y sencillos debido a que no es necesario equipos de vacío costosos. Desafortunadamente la calidad de los metales electrodepositados es usualmente baja. [5]

El interés en el estudio de las propiedades físicas de los materiales electrónicos de dimensiones muy pequeñas, usualmente en el rango de los nanómetros; reside en varios factores. Uno se debe a la tendencia en dispositivos de microelectrónica integrada, para los que los tamaños más pequeños implican operación a mayor frecuencia, alta funcionalidad, bajos costos de fabricación para un rendimiento dado, etc. El segundo factor, mas importante desde el punto de vista científico; está relacionado con la aparición de nuevos efectos físicos fundamentales, como; tunelaje resonante, conductancia cuántica, bloqueo de Coulomb, efecto Hall cuántico, etc. En adición, muy frecuentemente; estos descubrimientos fundamentales están relacionados a dispositivos prácticos como; láseres de pozo cuántico, transistores de un solo electrón, moduladores de Efecto Stark en confinamiento cuántico, etc.

La evolución hacia la nanoelectrónica ha sido posible gracias a avances en la deposición de películas muy delgadas para formar heteroestructuras en las cuales los electrones pueden ser confinados a un sistema mesoscópico 2D. Las técnicas de evaporación estándar y de Sputtering no producen heteroestructuras de calidad suficiente. [6]

3.1 Materiales en bulto y a nanomateriales

Nano es un prefijo que denota un factor de 10^{-9} , tiene su origen en la palabra Griega *nanos*, que significa enano. El término se asocia muchas veces al intervalo de tiempo de un nanosegundo; la billonésima parte de un segundo, y a la escala de longitud del nanómetro; la billonésima parte de un metro o 10 \AA . En sus más amplios términos, nanociencia, nanotecnología, y nanomateriales. [7]

Los materiales en bulto, son aquellos que; con una numero átomos mucho mayor en el bulto que en la superficie del mismo, muestran características bien conocidas, repetibles en experimentación, y fácilmente controlables en fabricación.

Los materiales en bulto difieren de los nanomateriales; primero, en su clasificación, los nanomateriales; por definición, no pueden ir más allá de 100 nm en al menos una de sus dimensiones, y basado en ello se les categoriza. Pero más que una clasificación de escalas por su tamaño, lo es por sus propiedades.

La Fig.1 muestra un esquema de la clasificación de los materiales según su escala, los materiales en bulto; en la categoría 3D, son aquellos que miden más de 100 nm en todas sus dimensiones (x,y,z), los materiales 2D; donde encontramos a las películas delgadas, son aquellos que cuentan con 100 nm o menos en una de sus dimensiones, los materiales 1D; categoría para los nanotubos, las nanovarillas, con dos dimensiones dentro del rango de los 100 nm, y la categoría 0D; para los nanopuntos, nanoislas, fulerenos, entre otros, con sus tres dimensiones dentro del mismo rango.

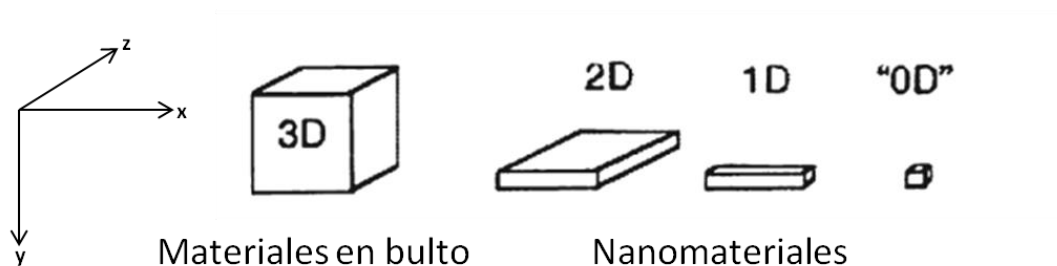


Fig. 1: Clasificación de los materiales nanoestructurados, a partir de sus dimensiones manométricas en sus distintos ejes cartesianos.

Los materiales nanoestructurados muestran contradictorias características, es decir; metales, aislantes y semiconductores, presentan propiedades muy distintas de las de su mismo tipo en bulto (metal, aislante, semiconductor), o incluso de sus propiedades como elemento.

3.2 Películas delgadas y ultra delgadas

Los inicios de ‘La ciencia de películas delgadas’ probablemente se pueden trazar desde las observaciones de Grove; quien notó que se formaban películas a partir de la erosión de cátodos con iones positivos de alta energía. Desde entonces se ha trascendido un largo camino y ya no es más un tema de interés académico casual, pero se ha convertido en una disciplina completa. El incremento fenomenal en la investigación de películas delgadas es

debido; sin duda, a sus extensas aplicaciones en diversos campos de la electrónica, óptica, ciencias del espacio, aeroespacial, defensa y otras industrias. Estas investigaciones han dejado numerosas invenciones en la forma de dispositivos activos y componentes pasivos, dispositivos piezoeléctricos, microminiaturización de fuentes de poder, rectificación y amplificación, elementos sensores, almacenamiento de energía solar y su conversión en otras formas, memorias magnéticas, películas superconductoras, filtros de interferencia, coberturas reflectivas y antireflectivas y muchas otras. [8]

Una estructura con dimensiones nanométricas es por definición una nanoestructura, siendo el caso de las películas delgadas y ultra delgadas, con una de sus dimensiones en el orden de los nanómetros. Las capas sólidas de cualquier material se pueden catalogar en tres grupos; películas ultra delgadas, delgadas (o muy delgadas) y las más gruesas, siendo para las primeras el rango de 5 a 10 nm, para delgadas de 10 a 100 nm y arriba de 100 nm las más gruesas; sin embargo, estos rangos pueden ser modificados según las necesidades o las propiedades investigadas [9]

Películas solidas Categoría según su espesor	Espesor en Nanometros
Películas Ultra Delgadas	5-10 nm
Películas Delgadas ó Muy Delgadas	10-100 nm
Comparativamente más gruesas	Normalmente mayor de 100 nm

Tabla 2 Clasificación por espesor de las películas solidas. [9]

Cualquiera que sea el límite de espesor de las películas delgadas, una película ideal se puede definir matemáticamente como un material; homogéneo, sólido, contenido entre dos planos paralelos y que se extienden infinitamente a lo largo de dos eje; digamos x, y, pero restringido a lo largo de la tercera dirección (z), la cual es perpendicular a el plano x-y. La dimensión de del eje z es conocida como el espesor de la capa (*d* o *t*).

3.3 Parámetros relevantes de las películas delgadas metálicas

Como se ha visto, las películas delgadas y más gruesas se clasifican según su espesor, lo que podría parecer obvio. Sin embargo, existen gran variedad de parámetros importantes a tomar en cuenta para cualquier categoría del espesor de una película.

Para poder medir algún parámetro de interés en cualquier estructura, es necesario identificar su tipo, si es físico, por ejemplo; rugosidad, adherencia, continuidad etc., si es óptico, como ejemplo; despolarización, transparencia, reflexión, entre otros, y si es químico, digamos; tipo de enlace, oxidación, reactividad. Esto para poder escoger la técnica de caracterización adecuada.

Hablando de películas delgadas metálicas, parámetros de común interés suelen ser; algunos de rugosidad, espesor, adherencia, fenómenos de transporte y almacenamiento de carga, conductividad y resistividad eléctrica, transparencia, reflectividad. Todo depende del uso final que se le dará a la película en algún dispositivo discreto o integrado.

3.4 Algunos usos de películas metálicas delgadas

Las películas delgadas tienen una amplia variedad de usos, individualmente, una capa metálica puede ser usada como contacto eléctrico, pero si reducimos su espesor hasta el punto de su transparencia este contacto muestra propiedades muy útiles, por ejemplo, en dispositivos optoelectrónicos, que pueden ser excitados a través del contacto con un haz de luz, e incluso este contacto semitransparente, puede funcionar como un filtro selectivo de longitud de onda; con solo variar las condiciones de fabricación del mismo, o adicionándole otro metal para formar así una multicapa (Ver Fig. 3).

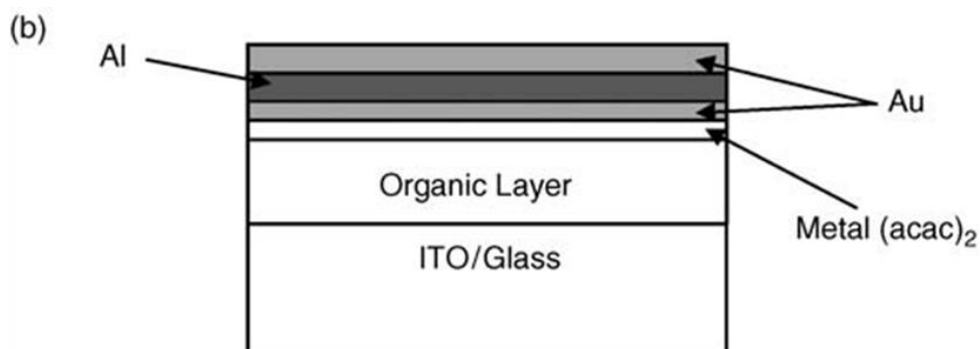


Fig. 2: Estructura de cátodo semitransparente para de un PLED. [4]

Los dispositivos que se pueden llegar a fabricar mediante el aprovechamiento de las propiedades que muestran las películas delgadas y ultra delgadas, van desde un diodos orgánicos emisores de luz (PLED, Polymer Light-Emitting Diode) de cátodo transparente (Fig. 2), hasta Celdas Solares de Polímero (PSC-Polymer Solar Cell) con ánodos fabricados en óxidos metálicos.

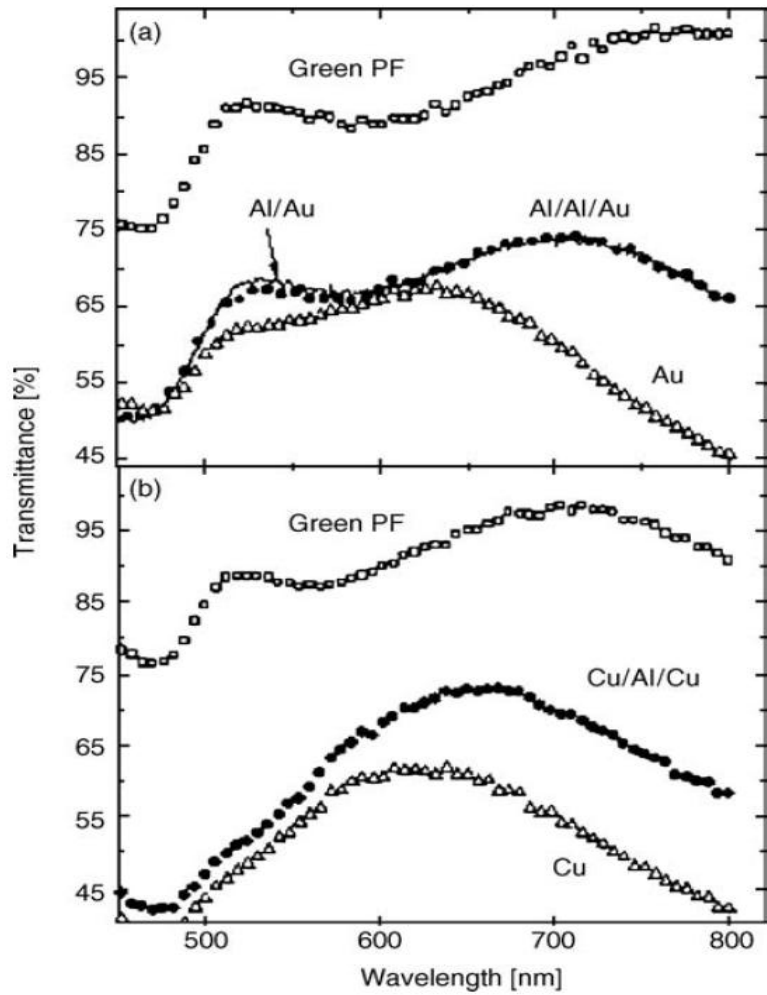


Fig. 3: Espectro de transmisión óptica de un PLED con distintos cátodos; (a) combinaciones Au y Al, (b) combinaciones de Cu y Al. [4]

Otros usos de las películas delgadas recaen en aplicaciones de empaquetado. Ya que cubre varios aspectos, la capa metálica puede ser muy brillante y provee más impacto publicitario que las tintas metálicas más opacas.

Muchas veces la cualidad más importante es que provee una barrera contra el oxígeno, la humedad, y la luz. La calidad de la barrera de una película delgada metálica depende del espesor y la limpieza del recubrimiento. Sin embargo muchas aplicaciones son puramente estéticas (Fig. 4).

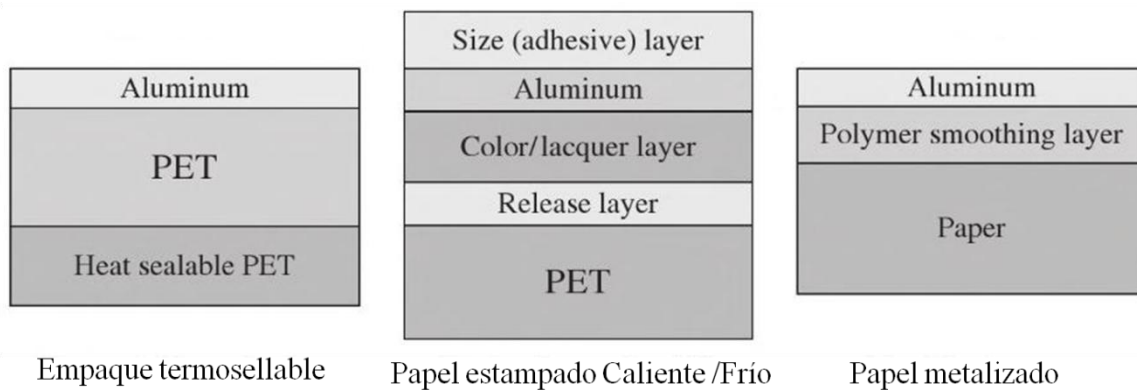


Fig. 4: Esquema de algunas estructuras metalizadas con aluminio, aplicaciones estéticas como el papel metalizado.

Circuitos eléctricos simples como antenas han sido fabricados también usando una combinación de patrones y metalizados (Fig. 5). [10]

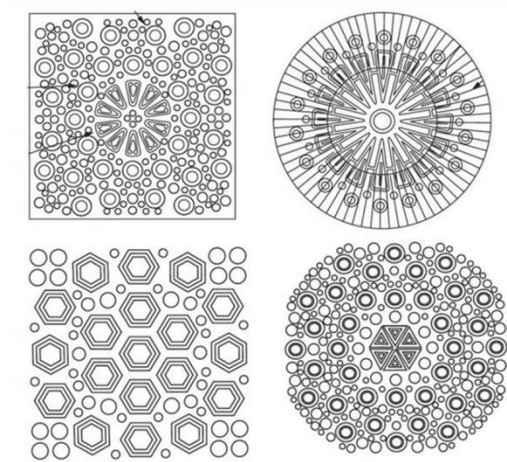


Fig. 5: Algunos de los patrones más complejos usados en antenas tipo susceptible de microondas. Las distintas formas y tamaños acoplan distintas proporciones de energía de las microondas y por lo tanto diferentes áreas de los alimentos se calientan a distintas tasas y/o temperaturas. [11]

3.5 -Técnicas de fabricación de películas delgadas

Metales pesados como la Plata y el oro son por excelencia muy buenos conductores ampliamente utilizados en la industria microelectrónica y optoelectrónica. Las propiedades de estos metales difieren en muchas formas; sin embargo, para el sector industrial la diferencia en el costo como materia prima muchas veces es más importante que sus características físicas. Actualmente el oro es aproximadamente 60 veces más costoso que la plata, esto es relevante ya que en un proceso de manufactura el costo de producción es de suma importancia.

Las películas delgadas pueden ser fabricadas en una variedad de materiales; como lo son, metales, semiconductores, aislantes o dieléctricos. Para este propósito, muchas técnicas de preparación se han desarrollado. Incluso nuevos métodos han evolucionado para mejorar la calidad de los depósitos con una máxima reproducibilidad en propiedades y una mínima variación en sus composiciones. Las técnicas involucradas en general son: (a) Deposición Térmica en vacío por calentamiento resistivo, (b) Pulverización de materiales cátodo en presencia de gases inertes o activos a bajas o medias presiones, (c) Deposición de vapor químico (CVD), (d) Deposición Química. [9]

Estos métodos de deposición de películas delgadas se dividen en técnicas físicas y técnicas químicas. Las técnicas de deposición física o PVD (Physical Vapor Deposition, por sus siglas en inglés), son por lo general costosas. Los requerimientos de potencia y baja presión exigen instrumentación adecuada, un arreglo básico debe incluir; al menos, cámara de vacío, bombas de vacío, fuente de evaporación, etapa de control y potencia.

Los procesos PVD se caracterizan por el uso de corrientes elevadas y transferencia de ímpetu para la evaporación del material a depositar, este material se encuentra limitado por las características del equipo y el tipo de técnica de evaporación; sin embargo, los blancos pueden ser metálicos, semiconductores o aislantes. Las técnicas físicas son variadas pero se pueden catalogar en 3 principales grupos; Depósito o evaporación en vacío, Pulverización catódica (*Sputter Deposition*), y Deposición asistida por iones (*ion plating* o *Ion Assisted Deposition-IAD*). [12] Otras técnicas derivadas usan los mismos principios pero con algunas modificaciones y el manejo de distintos gases, de tal forma que deben su

popularidad a mejoras en las características del depósito, velocidad del proceso y versatilidad (Ver Fig. 6).

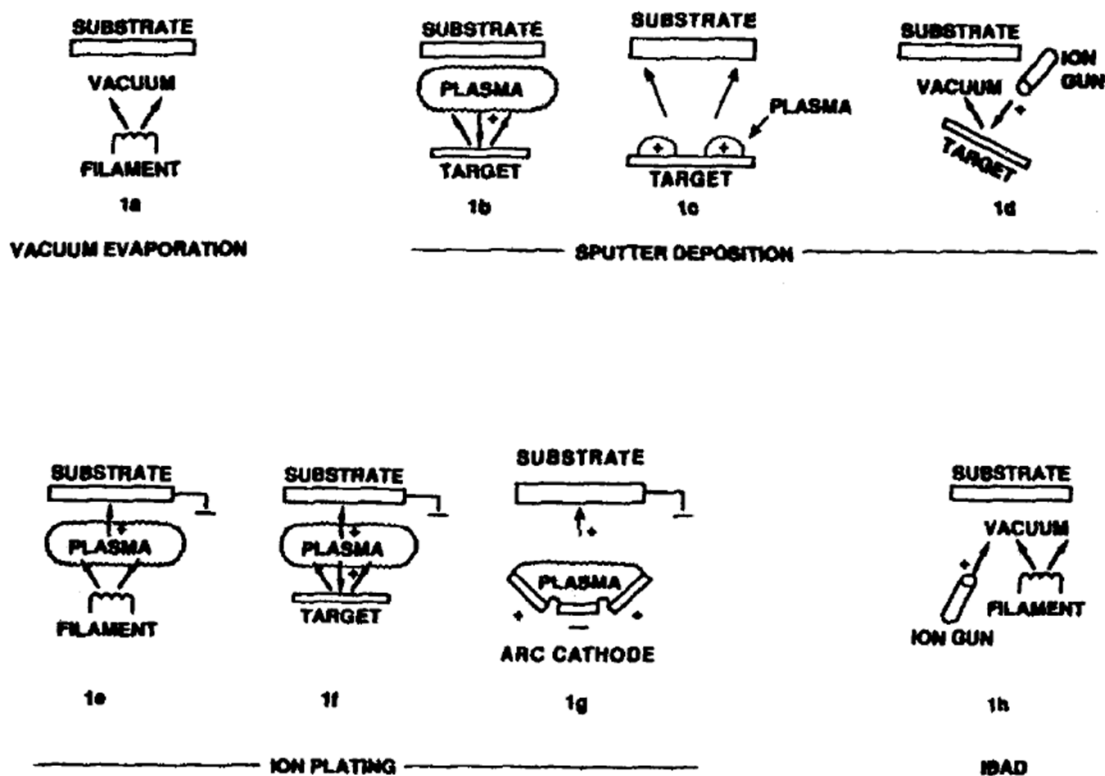


Fig. 6: Técnicas de fabricación PVD: (1a) evaporación en vacío, (1b y 1c) *Sputter Deposition* en ambiente de plasma, (1d) *Sputter Deposition* en vacío, (1e) Deposición asistida por iones en ambiente de plasma con fuente de evaporación térmica, (1f) Deposición asistida por iones con fuente de pulverización iónica, (1g) Deposición asistida por iones con fuente de evaporación por arco y, (1h) Deposición Asistida por haz de iones (IBAD-Ion Beam Assisted Deposition) con fuente de evaporación térmica y bombardeo de iones desde un cañón de iones. [12]

Adicionalmente, otras técnicas como; evaporación por haz de electrones, tienen la ventaja de hacerse a baja temperatura y no se incorporan contaminantes del bote, además se realiza en alto vacío.

3.5.1 -Evaporación Térmica en vacío

La Evaporación Térmica; como se mencionó, es una técnica PVD para deposición de capas delgadas y gruesas de distintos materiales; metales, aislantes, semiconductores, elementales y compuestos. La evaporación en vacío se puede llevar a cabo; en altos medios y bajos vacíos (Ver Tabla 3). Sin embargo, deben considerarse significativos parámetros físicos y químicos que se pueden ver afectados, por lo que el proceso debe ser monitoreado.

La figura 7 muestra un esquema sencillo de un sistema de evaporación térmica en vacío. Es importante remarcar que actualmente, estos sistemas se han vuelto muy versátiles y existen gran variedad de configuraciones de los mismos, con aditamentos especiales y distintas capacidades.

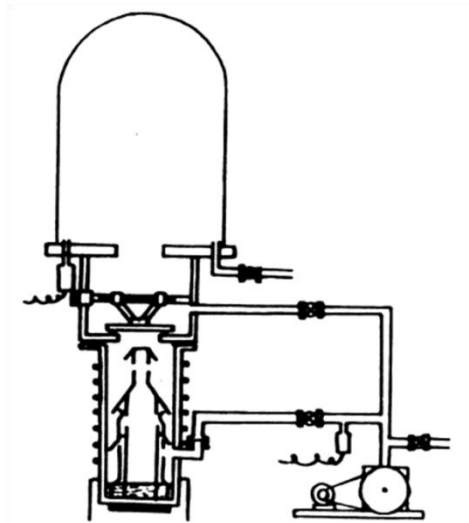


Fig. 7: Esquema de un sistema típico para deposición en vacío con una bomba rotatoria y otra de difusión. [12]

Los parámetros que normalmente se miden y controlan directamente durante un proceso de Evaporación Térmica son: corriente, voltaje, y presión, otros parámetros como: tasa de deposición y espesor de la película, se controlan indirectamente; regulando los primeros. Propiedades adicionales pueden ser observadas por medio de técnicas de monitoreo *'in situ'*, estas, son aquellas que miden el cambio de propiedades de la película o estructura fabricada durante todo el proceso, como por ejemplo; elipsometría espectroscópica.

3.5.2 -El vacío

El vacío se puede definir como; donde en un volumen cerrado hay menos gas por unidad de volumen que en el que se encuentra en un volumen similar en la atmosfera que lo rodea.[13]

En los procesos PVD, el vacío es generado por una bomba; o serie de ellas, que extraen las partículas dentro de la cámara de depósito.

La importancia del vacío en un proceso de fabricación de películas delgadas, tiene dos razones; primera: la contaminación del depósito y/o el sustrato, ya que estas estructuras se fabrican alrededor de los cientos de nanómetros o menos, y las impurezas modifican notoriamente las características de la película, y segunda: la trayectoria libre media de las partículas evaporadas. La trayectoria libre media (*mean free path*) de una partícula es la distancia media que recorre una partícula antes de chocar con otra, lo que significa que entre más amplia sea esta distancia; más probable es que el vapor alcance la superficie del sustrato.

La contaminación de un proceso de fabricación se da principalmente por el oxígeno del aire, muchos materiales suelen oxidarse rápidamente al incrementar su temperatura, un depósito de Aluminio podría volverse depósito de Oxido de Aluminio fácilmente. Pero esto no es lo más grave, propiedades como; rugosidad, adherencia, transparencia, conductividad etc., se ven drásticamente afectadas, por lo que se recomienda; según los requerimientos de pureza y las propiedades buscadas, el proceso se lleve a cabo a no menos de 1×10^{-3} Torr.

El vacío se puede categorizar en cuatro rangos principales:

Bajo/Low	Suave	Pobre	Burdo	Vacío = .750 – 750 torr
Medio/Medium	Moderad			Vacío = 10^{-3} – .750 torr
Alto/High	Fuerte	Bueno		Vacío = 10^{-7} – 10^{-3} torr
Ultra alto/Ultrahigh				Vacío = Menor – 10^{-7} torr

Tabla 3: Categorías del vacío según su rango de presión. [13]

Es importante recordar que un Alto vacío es igualmente una baja presión, hay que estar consciente de la terminología para no cometer errores al ajustar la presión.

3.5.3 -Trayectoria libre media

Como se menciona, la trayectoria libre media (mfp – mean free path) de una partícula es aquella distancia media que recorre sin colisionar, la importancia que tiene al momento de realizar un depósito y su relación con el vacío es la siguiente:

Un Alto vacío como ya se dijo es una baja presión, y una baja presión es un determinado número de moléculas, para más bajas presiones este número se reduce, y la trayectoria libre media incrementa.

Para calcular el mfp, es necesario conocer el diámetro de la molécula de la partícula gas, la densidad de las moléculas, y su velocidad promedio. Una forma más conveniente de hacerlo es tomando uno de los valores publicados y escalarlo acorde con la presión (Fig. 8).

[14] Así que:

$$\text{mfp} = \frac{6.4 \times 10^{-3}}{P} \text{ cm} \quad \text{donde } P = \text{presión en mbar}$$

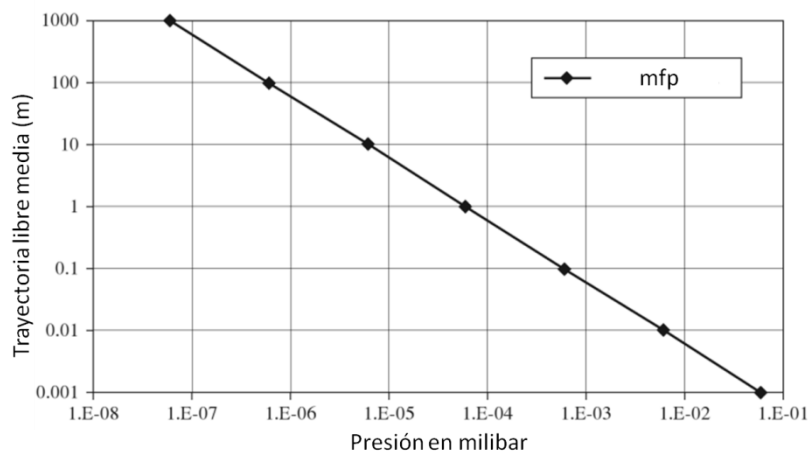


Fig. 8: Trayectoria libre media, Vacuum Deposition onto. [14]

Por lo tanto, a:

$$\begin{aligned} 1.3 \times 10^{-6} \text{ mbar} (1 \times 10^{-6} \text{ torr}) &= 49.23 \text{ m} \\ 1.3 \times 10^{-3} \text{ mbar} (1 \text{ mT}) &= 4.92 \text{ cm} \end{aligned}$$

Los valores de mfp anteriores corresponden al rango de Alto vacío, en el cual hay entre 10^{13} y 10^{10} moléculas/cm³. Incluso, en Ultra alto vacío existen alrededor de 10^4 moléculas/cm³. [12]

Esto es importante cuando se depositan capas delgadas pues así puedes inferir si la trayectoria de tu depósito será en línea recta, o si abra colisiones y tendrás un patrón distinto de crecimiento. Normalmente, en un proceso de evaporación antes de iniciar el proceso la presión es del orden de 10^{-5} torr y; como vimos, el mfp es de algunos metros, sin embargo, al iniciar el depósito la presión incrementa al rango de 10^{-4} torr y con esto el mfp cae hasta 0.5 m, lo que para la mayoría de los sistemas significa que no habrá colisiones, ya que el camino libre medio es mayor que las dimensiones del contenedor. Pero siempre es bueno recordar la posibilidad estadística de colisión, y que si la presión incremente por encima de ese rango, solo unos cuantos centímetros de trayectoria libre media restarían rápidamente. [13]

3.5.4 -Como se obtiene el vacío

La primera etapa antes de un depósito, es la evacuación de la cámara. Como se mencionó en el capítulo 3.5.2, es fundamental en la técnica de evaporación térmica. Se entiende por evacuación de la cámara, a la acción de sacar tantas moléculas como sea posible y no dejarlas regresar.

Esta labor se lleva a cabo por medio de bombas de vacío. No existe boba de vacío capaz de evacuar el sistema desde la presión atmosférica hasta la presión última requerida, siempre que esta sea menor a 10^{-3} torr. Por ello, la evacuación se realiza en varias etapas, cada una de ellas requiriendo un tipo distinto de bomba. [15]

Por su modo de funcionamiento, las bombas se clasifican en 2 grupos:

- i. Bombas de desplazamiento positivo. Aquellas que transfieren energía cinética a las moléculas del gas, mediante la interacción de algún mecanismo (membrana, paletas, pistones, etc.)
- ii. Bombas de captura. Aquellas que por medio de la reacción química con una superficie activa eliminan las moléculas.

La selección de una bomba o serie de ellas, depende de los requerimientos de pureza del depósito, y estos dependen de la presión. La siguiente figura muestra una grafica de cierta variedad de bombas y sus capacidades.

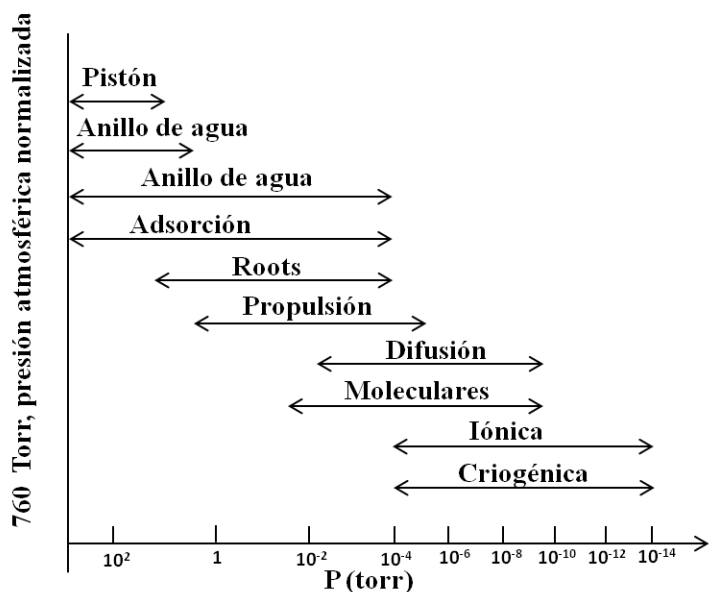


Fig. 9: Algunas de las principales bombas usadas en sistemas de evacuación, y sus rangos de operación.

Las bobas más utilizadas son aquellas con un rango de operación que comienza en los 760 torr (presión atmosférica) y que alcanzan presiones del orden de 10^{-3} ya que asisten a las bombas de alto y ultra alto vacío.

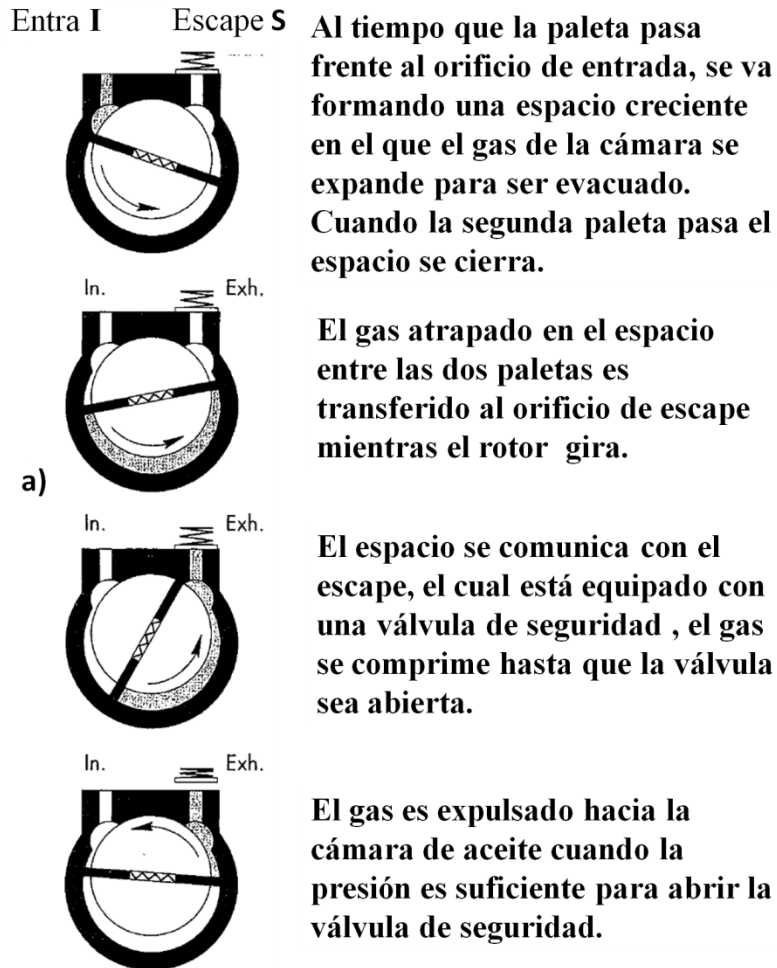
En el sistema de evacuación del TE12 para depósitos al alto vacío (Capítulo 4) se manejan 2 bombas del tipo i) Desplazamiento positivo, para dos etapas, vacío robusto; con una bomba de paletas rotatorias con rango de operación de 760 torr hasta 10^{-4} torr, y la segunda etapa de alto vacío; con una bomba turbomolecular con rango de operación de 10^{-3} hasta 10^{-6} torr.

Aquí, una breve descripción de estas dos bombas.

- Bomba de paletas rotatorias:

Las hay de sencilla y doble etapa, están compuestas por un estator cilíndrico hueco con válvulas de entrada y salida, un rotor montado excéntricamente dentro del estator para el bombeo, y dos paletas corredizas en el rotor, empujadas contra el estator por fuerza centrífuga y resortes. [16]

La Fig. 10 a) muestra y describe las etapas del funcionamiento en una bomba de una etapa sencilla.

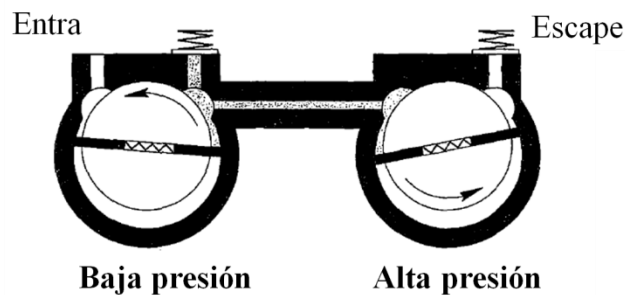


Al tiempo que la paleta pasa frente al orificio de entrada, se va formando un espacio creciente en el que el gas de la cámara se expande para ser evacuado. Cuando la segunda paleta pasa el espacio se cierra.

El gas atrapado en el espacio entre las dos paletas es transferido al orificio de escape mientras el rotor gira.

El espacio se comunica con el escape, el cual está equipado con una válvula de seguridad, el gas se comprime hasta que la válvula sea abierta.

El gas es expulsado hacia la cámara de aceite cuando la presión es suficiente para abrir la válvula de seguridad.



Baja presión

Alta presión

b)

Fig. 10: a) Etapas de bombeo de una boba de paletas rotatoria de etapa sencilla. b) Bomba de doble etapa. Imágenes de. [16]

- Bomba Turbomolecular:

En operación molecular, el gas del sistema de vacío llega al tubo de admisión. Allí son atrapadas entre el disco giratorio del rotor y el disco estacionario del estator y llevadas al escape de la bomba(Ver Fig 11). [17]

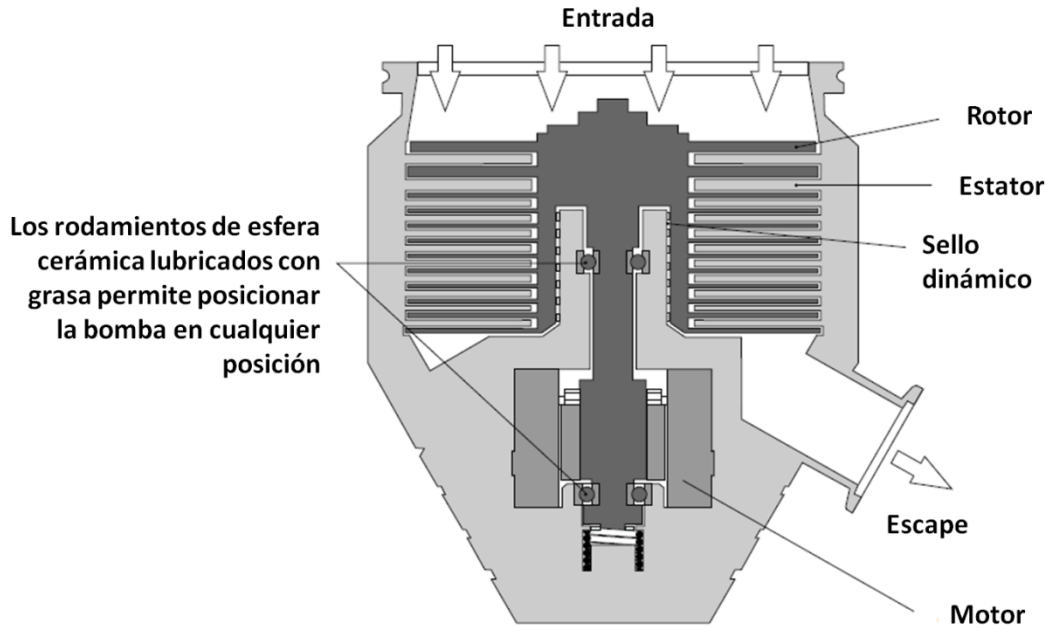


Fig. 11: Esquema funcional de una bomba turbomolecular. [17]

El siguiente, es un esquema general del ciclo de evacuación de un sistema de depósito, donde el vacío primario es hecho por la bomba de paletas rotatorias, y el vacío secundario por la bomba turbomolecular.

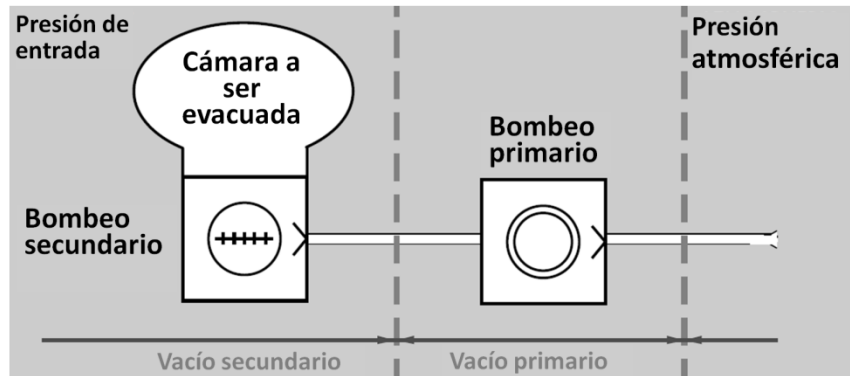


Fig. 12: Diagrama básico de una cámara de depósito sistema de vacío, el vacío primario bajo/medio, y el secundario alto. [17]

La resistencia de un filamento calentado cambia a razón de las moléculas y/o átomos que le roban energía al tocarlo, este cambio de resistencia es comparado con una resistencia fija, lo que se traduce a un cambio de la presión.

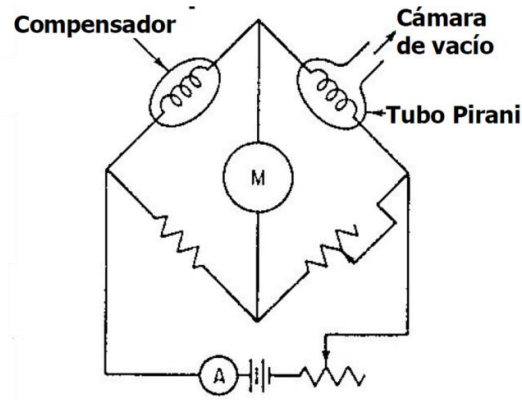


Fig. 13: Circuito para medición con tubos Pirani. [18]

- Cátodo Frío, Manómetro de ionización

En el régimen de ultra alto vacío (UHV- Ultra High Vacuum) no es posible medir la presión como la fuerza de una cierta área como la definición de presión lo indica. Por eso, el único indicador de presión en UHV práctico y económicamente razonable es el de tasa de ionización producida por electrones que golpean los átomos neutros del gas en la cámara. [19]

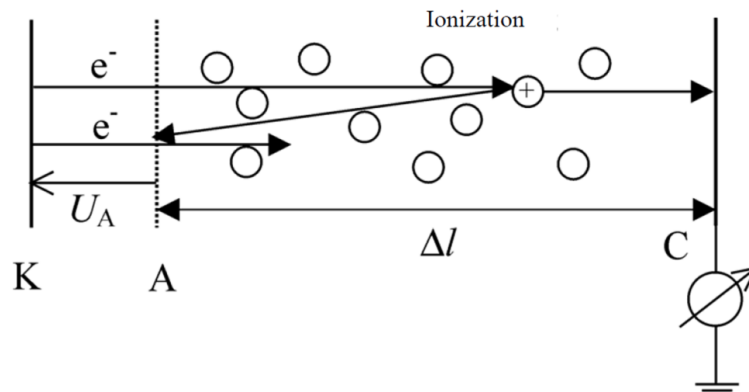


Fig. 14: El principio básico de la medición de manómetros de ionización con cátodo K emisor de electrones. Los electrones que golpean moléculas neutras suficientemente cerca para podrían ionizarlas. Los iones son extraídos por el colector C, los electrones finalmente llegan al ánodo A. [19]

3.5.6 -Dependencia de las propiedades ópticas de películas delgadas metálicas en función de distintos parámetros de fabricación.

Se sabe que muchos factores (skin depth, espesor y el proceso de evaporación) influyen de forma obvia en las propiedades ópticas de las películas delgadas. Convencionalmente, cuando la radiación brilla sobre la superficie de un metal, parte significativa de la luz viaja una corta distancia dentro del material antes de ser reflejada. Esta distancia se conoce como skin depth (δ) o profundidad de piel en español, es la distancia donde la luz transmitida reduce su amplitud hasta un 36.8%. La tabla 5 muestra algunos valores de δ para varios metales. Estos valores fueron obtenidos de materiales en bulto y pueden variar de los de películas delgadas y por el método de depósito. [4]

Metal	eV	Wavelength, λ (nm)	Refraction index, n	Extinction coefficient, k	Skin depth, δ (nm) = $\lambda/4\pi k$
Al	2.2	563.1818182	1.018	6.846	6.549710303
Au	2.2	563.1818182	0.24	2.54	17.6532743
Ag	2.26	548.2300885	0.06	3.586	12.172028
Cu	2.2	563.1818182	0.83	2.6	17.24589105
Ca	2.2	563.1818182	0.6	2.1	21.35205559
Ni	2.2	563.1818182	1.8	3.33	13.46526028
Rh	2.2	563.1818182	2	5.11	8.774817365
Zr(polycrystal)	2.2	563.1818182	1.87	0.97	46.22609973

Tabla 5: Constantes ópticas para algunos metales y Skin Depth. [4]

Cuando el espesor de la película es menor que δ ; al menos un 63.2% de la luz puede penetrarla. Es interesante encontrar que la transparencia de un película delgada no disminuye con el incremento de el espesor en todos los casos, especialmente se observa con plata y oro, se atribuye a la formación de islas durante el depósito. A espesores muy delgados el metal no ha formado aún una capa continua y está compuesta por islas, estas islas actúan como nanopartículas que dispersan y absorben la luz. En comparación con la plata; el oro tiene una tensión superficial más alta, y el efecto es menos evidente. Existe también el caso donde el incremento del espesor; disminuye la transmisión. Como se muestra en la Figura 15, existe una evidente dependencia de la intensidad de transmisión, al incremento del espesor; en este caso películas de Aluminio, de forma muy directa. [4]

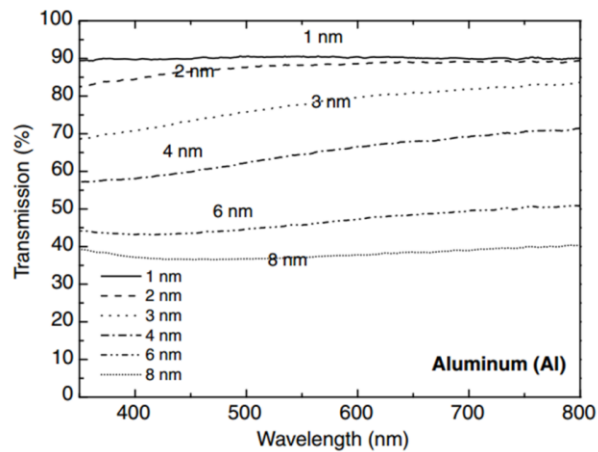


Fig. 15: Dependencia de la intensidad de transmisión con el espesor de películas de Al. [4]

Otro parámetro que modifica drásticamente la intensidad de transmisión, es la tasa de deposición, y como podemos ver en la Figura 16, la dependencia no es directa, el pico máximo de transmisión se mantiene constante entre 70% y 75%; esto nos indica que es la intensidad de transmisión correspondiente a 8 nm de Ag para una longitud de onda de 300 nm, y que la tasa de deposición provoca grandes variaciones de la transmisión en el rango de 400 a 800 nm de λ . [4]

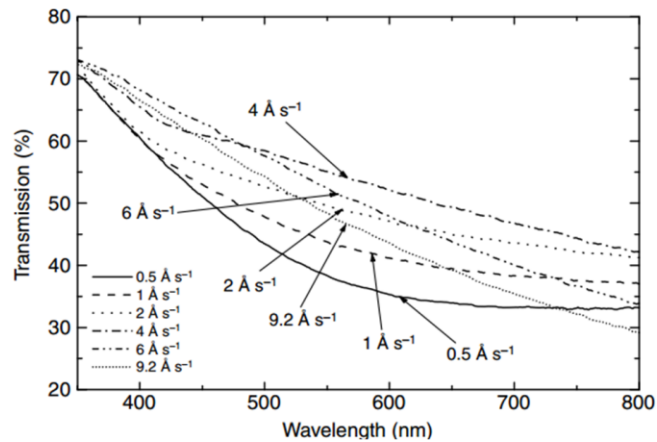


Fig. 16: Dependencia de la Intensidad de transmisión con la tasa de deposición en películas de plata. [4]

Las propiedades eléctricas de los metales son bien conocidas, pero es la suma de sus propiedades ópticas y efectos cuánticos; que aparecen a unos nanómetros de espesor, lo que extiende las posibilidades en aplicaciones microelectrónicas y optoelectrónicas,

3.6 -Técnicas de caracterización

La caracterización se puede definir como la determinación de algunas características o propiedades de un material de una manera definida y reproducible.

Los objetivos de la caracterización de una película/recubrimiento durante el desarrollo y la producción [12] son:

- Determinar el efecto de las variables del procesamiento en las propiedades del material.
- Establecer criterio de rendimiento satisfactorio y límites para obtener rendimiento satisfactorio.
- Establecer una referencia de rendimiento satisfactorio.

- Monitorear la reproducibilidad del material y el proceso.
- Asistir en análisis de fallas.
- Determinar la estabilidad de la funcionalidad de la película.

3.6.1 -Elipsometría

Debido a los avances en las tecnologías de computación, las técnicas de elipsometría espectroscópica se han desarrollado rápidamente, y debido a esto; las áreas de aplicación se han expandido en gran medida.

Elipsometría es una técnica que caracteriza la transmisión o reflexión de las muestras. El Elipsómetro mide el cambio en la polarización de la luz una vez que la luz es reflejada en la muestra o transmitida por la misma. El nombre ‘Elipsómetro’ resulta del hecho de que la luz polarizada muchas veces se vuelve ‘elíptica’ una vez reflejada. Esta técnica mide dos valores (Ψ , Δ). Estas representan la proporción de amplitud Ψ y la diferencia de fase Δ ; entre ondas de luz polarizadas ‘s’ y ‘p’ (Ver Fig. 17). Estos valores (Ψ , Δ), son medidos cambiando la longitud de onda de la luz, desde la región del ultravioleta/visible hasta el infrarrojo. [20]

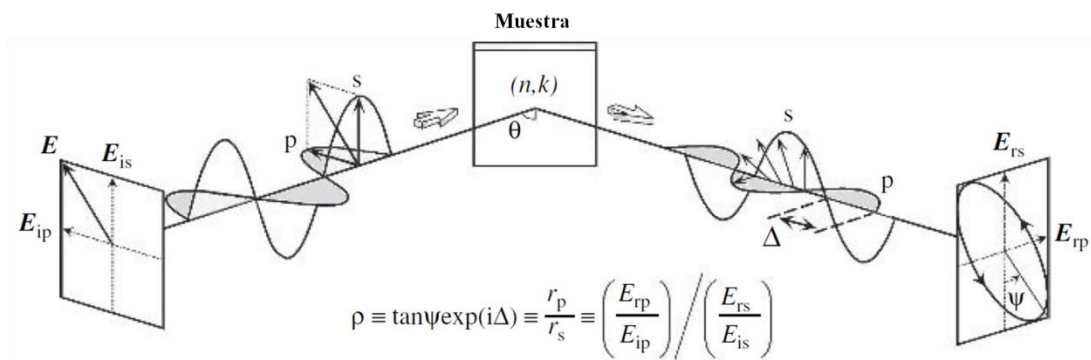


Fig. 17: Principio de medición del Elipsómetro. [20]

La técnica tiene 2 restricciones; número (1) la rugosidad de las muestras debe ser preferiblemente pequeña, y (2) la medición debe hacerse a incidencia oblicua. Cuando la luz esparcida por la rugosidad de la superficie reduce la intensidad de la luz reflejada severamente, la medición se vuelve difícil ya que el estado de polarización se determina a partir de su intensidad de luz.

En elipsometría, un ángulo de incidencia se escoge para maximizar la sensibilidad de la medición. Sin embargo, la selección del ángulo varía de acuerdo con las constantes ópticas de las muestras. Para la caracterización de semiconductores, los ángulos típicos son 70-80°. [20]

Ventajas	Alta precisión (sensibilidad de espesor $\sim 0.1\text{\AA}$) Medición no destructiva y rápida Amplio campo de aplicación Varias caracterizaciones, incluidas constantes ópticas y espesor de películas Monitoreo en tiempo real
Desventajas	Modelo óptico necesario para análisis de datos (caracterización indirecta) El análisis de datos tiende a ser complicado Baja resolución espacial (spot size: varios mm) Dificultad en la caracterización de coeficientes de baja absorción ($\alpha < 100^{-1}$)

Tabla 6: Elipsometría Espectroscópica, ventajas y desventajas. [20]

3.6.1.1 -Aplicaciones

La elipsometría espectroscópica ha sido aplicada en la evaluación de constantes ópticas y espesores en muestras de películas delgadas. Sin embargo, su aplicación ha sido expandida recientemente, esto permite diagnósticos de procesos en escala atómica y en observación en tiempo real. Como se muestra en la Fig. 18, varias propiedades físicas pueden ser determinadas por elipsometría espectroscópica. En particular, esta figura resume la caracterización por mediciones *ex situ*. Aquí, mediciones *ex situ* quiere decir que la medición fue hecha después de la fabricación de la muestra. [20]

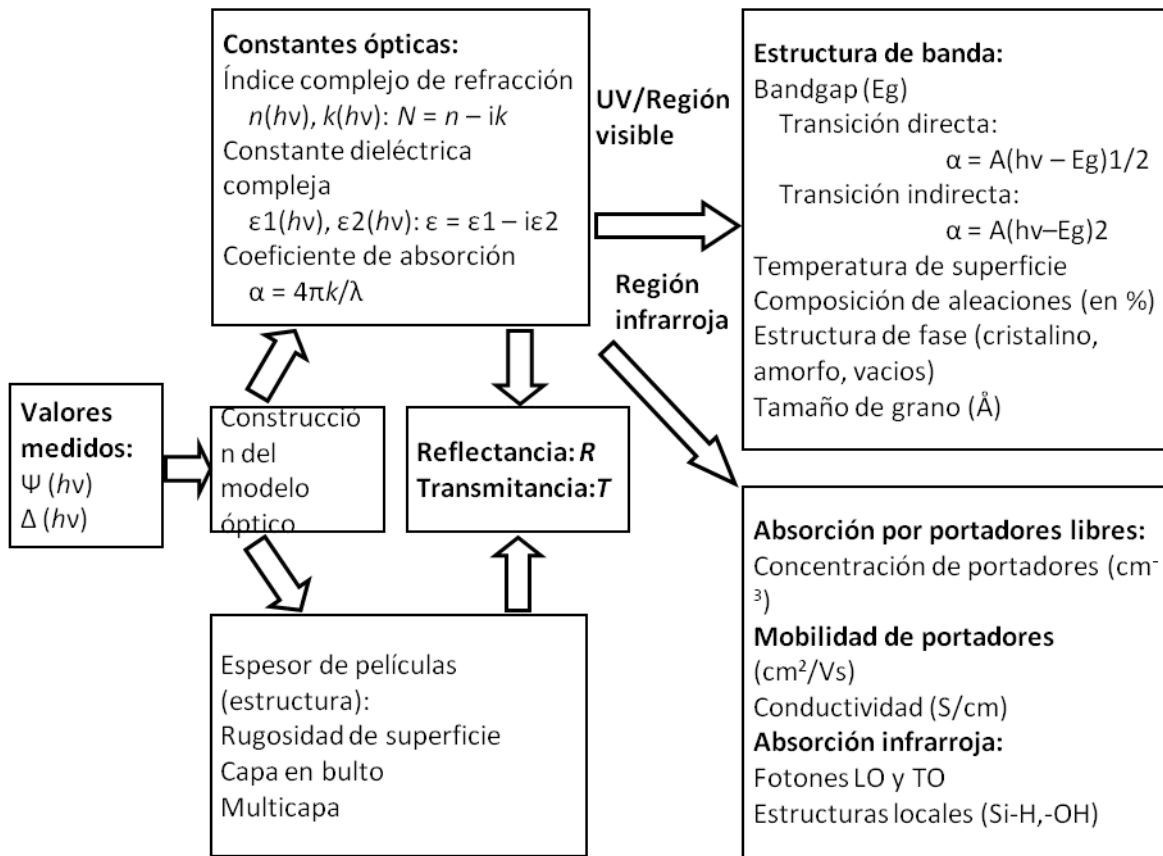


Fig. 18: Caracterización de propiedades físicas por Elipsometría espectroscópica. [20]

3.6.2 -AFM

El microscopio de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés), forma parte de una extensa familia de técnicas llamada ‘Scanning probe microscopy’ (SPM), para medición de superficies. De forma muy general, estas técnicas arrojan información de la superficie de los materiales a través del escaneo de la muestra con una punta muy pequeña.

En 1980, se fabricó el primero de la moderna microscopía de sonda de barrido. Su desarrollo concluyó en un premio Nobel de física para sus inventores.

La técnica de AFM usa un cantiléver microfabricado con una punta muy aguda que sobresale por debajo. Se basa en la medición de la posición de la punta a través de la deflexión un rayo laser reflejado desde la parte trasera del cantiléver. Al tiempo que se escanea la superficie, el cantiléver sube o baja, así el rayo laser cambia su posición, produciendo una corriente fotogenerada; superior T , e inferior B en un diodo fotodetector

dividido (T-B Split-diode) Fig. 19. La diferencia entre dichas corrientes, indican cuanto se flexiona el cantiléver. [21]

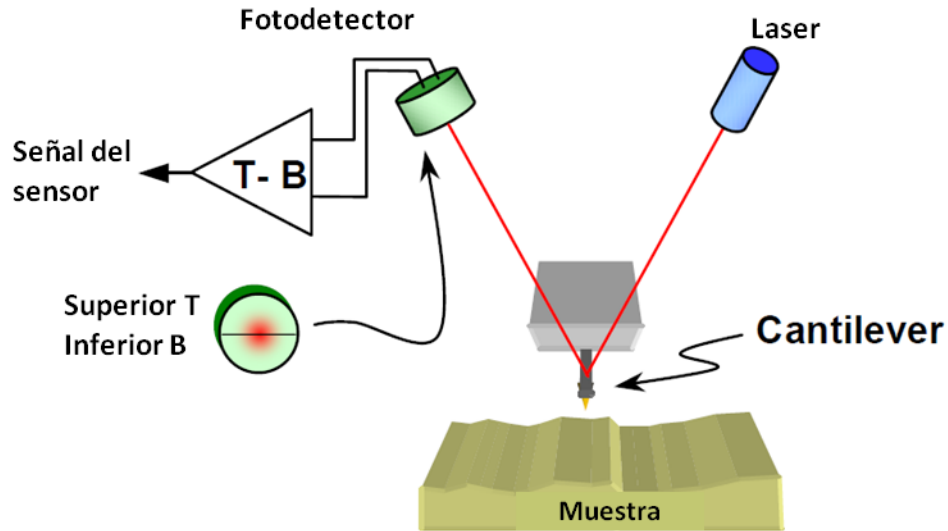


Fig. 19: Generación de la señal del sensor AFM.

3.6.2.1 -Modos de funcionamiento

Las señales T-B obtenidas, se manejan en dos formas; Modo de Contacto Constante y Modo de Contacto Intermitente, aquí un breve descripción de cada uno:

- **Contacto constante**

La punta de la sonda toca la superficie de la muestra en todo momento. La señal T-B se usa directamente para medir la posición de la sonda con respecto a la superficie a través de la deflexión; arriba o abajo, del cantiléver.[21]

- **Contacto intermitente**

El cantiléver se hace vibrar en su frecuencia de resonancia con un piezoeléctrico. La frecuencia de resonancia es normalmente de orden de 100 kHz, de manera que se obtiene una amplitud del orden de 100 nm en la parte final de la punta. Al tiempo que el cantiléver vibra, la señal T-B rastrea el movimiento, oscilando a la misma frecuencia. Debido a esto la amplitud de la señal T-B arroja una medida directa de la amplitud de vibración del

cantiléver. Cuando el cantiléver se acerca lo suficiente a la muestra; intermitentemente toca la superficie, esto amortigua la vibración (Fig. 20), y es este efecto el usado para medir la posición con respecto a la superficie.[21]

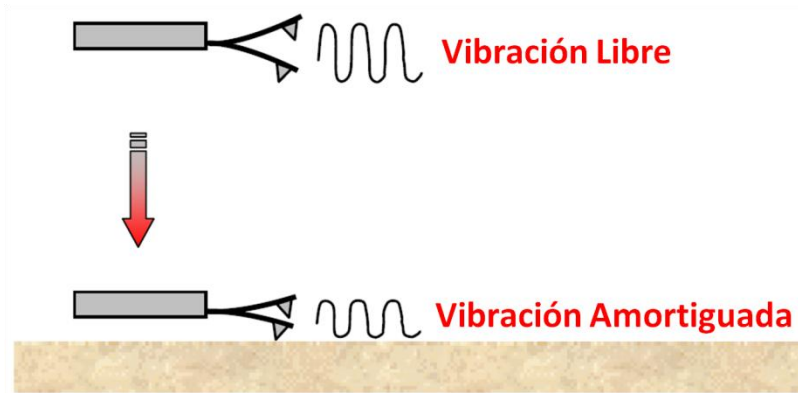


Fig. 20: Modo intermitente en vibración libre antes del contacto, y en vibración amortiguada después del contacto con la superficie de la muestra. [21]

3.6.2.2 -Resolución de imagen SPM

Un factor determinante en la resolución de las imágenes; por cualquiera de los métodos de obtención, es que tan fina es la punta.

Idealmente, la sonda tiene la forma cónica de ángulo muy estrecho, con una punta formada de apenas un pequeño grupo de átomos. El pequeño cumulo de átomos en el vértice le da a la sonda suficiente resolución lateral para crear una imagen de la red atómica de una estructura cristalina. La fineza del cono permitirá a la sonda alcanzar el fondo de desgajamientos y grietas en las superficies, y escanear muy cerca de la vertical de las paredes de estructuras escalonadas.

En la realidad, la punta no es tan afilada, y el ángulo no es tan estrecho, estos factores comprometen la calidad de las imágenes obtenidas. Las condiciones de la punta son de vital importancia para la obtención de imágenes en todas las técnicas de la familia SPM. [21]

3.6.2.3 -Tipos de barrido

Los diferentes tipos de datos que se pueden medir durante el barrido ‘*Scan Type*,’ se enlistan abajo, y se da una breve descripción de los utilizados para el desarrollo de este proyecto.

Tipos de escaneo disponibles *Z-Height, Broadband, Lateral Force, BiLateral Force, Wavemode, BB Wave mode, Phase, BiPhase, ME Camp/Cphase/Tamp/Tphase, CAFM, STM Log, STM Lin*

Z-Height: Este es un escáner de topología del modo contacto, basado en mantener una fuerza constante entre la punta de la sonda y la superficie de la muestra. El lazo de retroalimentación Z hace al piezo-tubo contraerse y expandirse tanto como sea necesario para mantener la deflexión del cantiléver constante. Las imágenes son formadas a partir del voltaje de control Z del circuito PID. Los voltajes de control Z son convertidos en una distancia vertical con el factor de corrección Z.

Wavemode: Este produce una vista topológica de la superficie de la muestra. El cantiléver se hace vibrar a una amplitud del orden de 100 nm. Después la sonda es llevada abajo hacia la superficie; donde hace contacto intermitentemente, amortiguando la amplitud de oscilación.

Phase: Durante un escaneo *Wavemode* de la superficie, no solo la amplitud del cantiléver se amortigua; sino que, también la fase del movimiento se recorre. Hacer contacto con distintos materiales en la superficie puede causar que la fase se recorra o difiera. Por ejemplo, una superficie dura hará que la fase se adelante, mientras que un material suave o pegajoso hará que la fase se retrase. En circunstancias favorables este modo puede utilizarse para extraer información de diferentes materiales encontrados en la superficie. [21]

3.6.3 -Caracterización eléctrica

La revolucionaria introducción de semiconductores en aplicaciones industriales y científicas, ha conducido a un desarrollo a gran escala de las técnicas de caracterización eléctrica. El progreso tecnológico de los métodos de crecimiento, con la síntesis de semiconductores compuestos, hizo necesario la aplicación de las técnicas de investigación

para caracterizar con un alto nivel de confianza el comportamiento *eléctrico* y *óptico* de los nuevos materiales.

La investigación de muestras donde la superficie o efectos relacionados con la interfaz son de gran consideración en el comportamiento eléctrico y óptico representa un interesante reto para la física experimental. [22] En las últimas décadas, han sido desarrollados modelos muy diferentes para la descripción del transporte de carga en nanoestructuras de semiconductores. [21]

La caracterización Corriente-Voltaje y Capacitancia-Voltaje nos permite investigar los mecanismos de transporte y distribución de carga y tomar información general del material (Tabla 7). [22]

Método	Señal	Información
I-V Corriente-voltaje	I(V)	Modelo de transporte de corriente, resistividad (régimen óhmico), modelo de transporte, altura de barrera, factor de idealidad
C-V Capacitancia-Voltaje	C(V)	Alto de barrera, densidad de niveles superficiales y perfiles; densidad de niveles profundos

Tabla 7: Técnicas de caracterización eléctrica presentadas en este trabajo; método, señal medida, e información que se puede obtener. [22]

3.6.3.1 -Interconexiones metálicas

Actualmente, los circuitos integrados cuentan con tres distintos materiales que pueden fácilmente interconectarse y aislarse entre sí; Aluminio, Polisilicio, y regiones dopadas, pueden ser aislados fácilmente con un una capa de Oxido de Silicio. Pero para ser útil como *conector*, los materiales deben proveer tan baja resistencia laminar como sea posible; con el objetivo de minimizar las caídas de voltaje a lo largo de las líneas de interconexión, y también así, para minimizar el retardo causado por la resistencia y capacitancia de la línea. Finalmente, se deben fabricar contactos “óhmicos” de baja resistencia entre los materiales, y las líneas de interconexión deben de ser confiables durante un largo plazo de operación.

Los requerimientos de bajas resistividades nos llevan inmediatamente a pensar en metales como conectores (Ver tabla 8). Históricamente, Aluminio y Oro han sido utilizados

como contactos e interconectores en circuitos integrados. El oro puede ser algo impráctico y requiere de multicapas para ser usado ya que es un difusor muy rápido que genera centros de recombinación en niveles profundos en el Silicio, y adicionalmente, forma muchos compuestos intermetálicos problemáticos.

El Aluminio es actualmente el material más común en el procesamiento de CI de Silicio. Tiene una buena adherencia al Oxido de Silicio. Sin embargo, se debe tener cuidado para evitar una cantidad de problemas asociados con un buen contacto Aluminio Silicio. [24]

Resistividad de algunos metales en bulto ($\mu\Omega\text{-cm}$)	
Ag: Plata	1.6
Al: Aluminio	2.65
Au: Oro	2.2
Co: Cobalto	6
Cu: Cobre	1.7
Mo: Molibdeno	5
Ni: Níquel	7
Pd: paladio	10
Pt: Platino	10.6
Ti: Titanio	50
W: Tungsteno	5

Tabla 8: Tabla de resistividad de algunos elementos. [24]

3.6.3.2 -Contacto Óhmico

Como se mencionó, los contactos entre metal y semiconductor deben ser del tipo óhmico. Un verdadero contacto óhmico exhibe una línea recta; característica de su curva I - V , con un valor bajo de resistencia (Ver Fig. 6 (a)), opuesto curva I - V característica del contacto rectificador mostrado en la Fig. 6 (b). La figura 6(c) muestra una curva I - V característica más representativa de un contacto óhmico sobre Silicio. Aunque no lineal cerca del origen, se desarrolla una pequeña tensión a través del contacto a niveles normales de corriente.

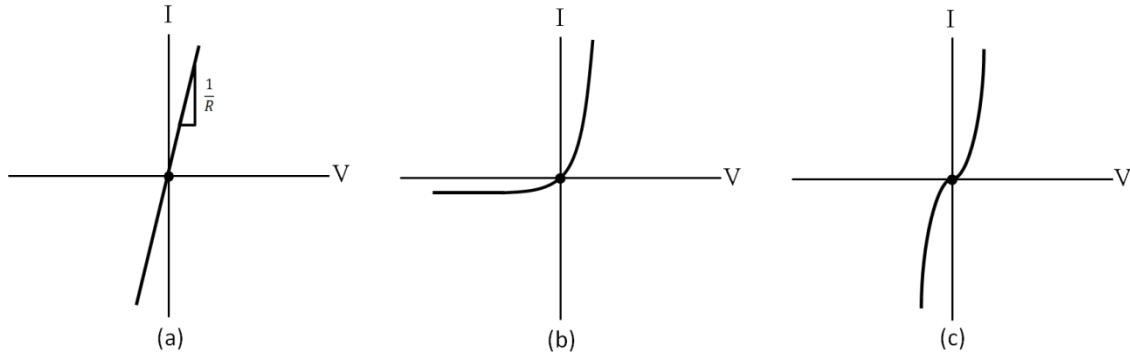


Fig. 21: Curvas I-V características de contactos entre materiales de circuitos integrados. (a) Contacto Óhmico ideal; (b) contacto rectificador; (c) contacto "óhmico" no lineal. [24]

3.6.3.3 -Curva Corriente-Voltaje (I-V) característica

Los semiconductores comúnmente se clasifican basado en su conductividad σ (o su resistividad ρ), ubicándolos desde un semi-aislante hasta un cuasi metal. Es por eso que, el primer paso para la caracterización eléctrica de los materiales es la investigación de su conductividad para determinar los mecanismos principales que controlan el transporte de corriente e identificándolos al mismo tiempo.

La curva corriente-voltaje característica ofrece el conocimiento de parámetros fundamentales en dispositivos. En la industria microelectrónica, los dispositivos manufacturados se someten a pruebas de este tipo para monitorear el control de calidad de los dispositivos semiconductores. [25]

La señal eléctrica del semiconductor se colecta vía contactos óhmicos o Schottky, dependiendo de los parámetros a evaluar [26]

Estrategias de procesamiento son en efecto importantes para tener un buen rendimiento de los contactos eléctricos: generalmente hablando, el análisis de 'conducción óhmica' es útil para determinar el modelo del transporte de portadores de carga y en algunos casos para observar el papel de los niveles superficiales. [27] El comportamiento de los portadores inyectados al semiconductor a través del contacto óhmico es afectado por las propiedades físicas de la material en el cual fluyen los portadores.

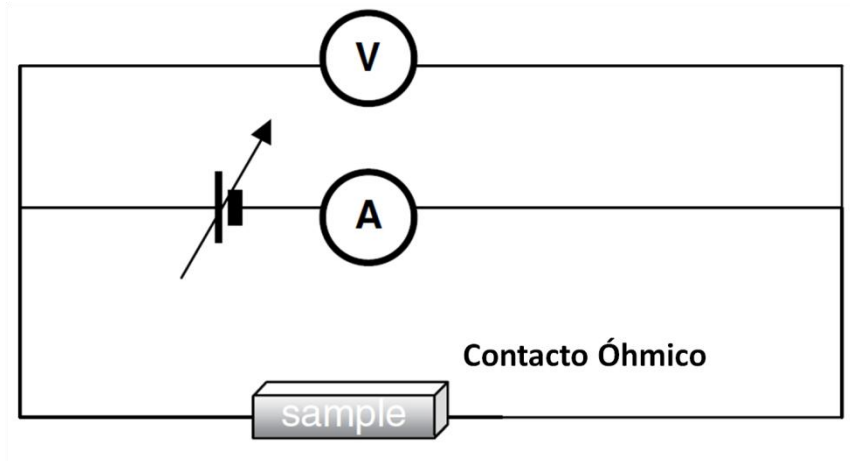


Fig. 22: Esquema de una configuración experimental para caracterización I - V .

En presencia de defectos donadores y aceptores, así como centros de carga debido a impurezas y defectos capturando una fracción de los portadores inyectados, la conductividad se modifica dramáticamente. Por esta razón, la curva I - V característica es fuertemente dependiente de la concentración y la distribución energética de centros de carga dentro del espécimen.

3.6.3.4 -Curva Capacitancia-Voltaje (C-V) característica

La caracterización Capacitancia-Voltaje (C-V) es un método estándar para la determinación de la concentración de dopaje neta N_{eff} de los semiconductores.[22]

Esta medición se practica en un dispositivo de dos terminales llamado Capacitor MOS. Los resultados de la prueba C-V ofrecen una variedad de información del dispositivo, incluyendo cargas en el bulto y la interfaz. Muchos otros parámetros del dispositivo MOS pueden ser obtenidos por medio de los datos C-V, como espesor del oxido, voltaje de bandas planas, voltaje de umbral, etc.

Por definición, la capacitancia es el cambio de carga (Q) que ocurre en un dispositivo cuando hay un cambio en el voltaje (V):

$$C \equiv \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

Una forma práctica y general de implementar esto, es aplicando una pequeña señal de AC (en el rango de los milivolts) sobre el dispositivo bajo prueba, y después midiendo la corriente resultante. Integrar la corriente sobre el tiempo para derivar Q y después calcular C de Q y V. [28]

Las mediciones C-V en dispositivos semiconductores se hacen usando dos voltajes simultáneamente; una señal de voltaje AC aplicado (dV_{ac}), y un barrido de voltaje DC (V_{dc}), como se ve en la figura 23.

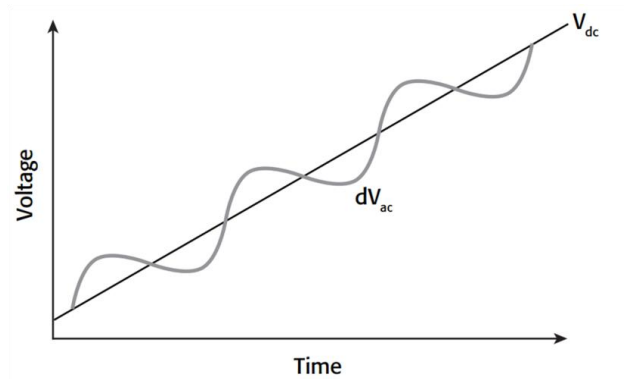


Fig. 23: Medición de barrido de voltaje AC y DC. [28]

La magnitud y la frecuencia de la señal AC se ajusta; la magnitud de la señal DC se barre en un periodo de tiempo. El propósito del voltaje DC es permitir muestreo del material a distintas profundidades en el dispositivo. El voltaje AC provee una pequeña polarización de manera que la medición de capacitancia puede hacerse a una profundidad dada en el dispositivo. [28]

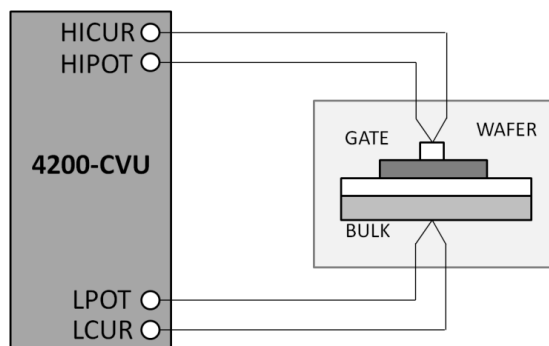


Fig. 24: Configuración básica para probar el capacitor MOS con el Modelo 4200-CVU de Keithley. [28]

4 -Experimentación

Con el objetivo de conocer el equipo de evaporación térmica al alto vacío; TE12, se hicieron depósitos preliminares de Aluminio a diferentes espesores sobre portaobjetos (Corning glass 2947),

Una vez familiarizados con la técnica y el manejo del equipo, se trabajó de la forma siguiente: Preparación de muestras y equipos, fabricación películas, caracterización

Así pues, se depositaron muestras de; Al, Au, Au/Al (Oro sobre aluminio), y Au + Al (co-evaporación de Oro y Aluminio), totalizando con 27 muestras fabricadas.

La caracterización fue realizada por: AFM para determinar los espesores de las capas depositadas y evaluar las condiciones iniciales del equipo, se realizaron mediciones eléctricas para evaluar su comportamiento en dispositivos micro- y optoelectrónicos, y se caracterizaron ópticamente por Elipsometría Espectroscópica. Adicionalmente, se corroboraron los espesores de algunas películas por medio de Dual Beam SEM-FIB Microscope.

Para proteger al usuario y guardar la integridad del equipo, se escribió un manual de operación que se puede consultar en el apéndice de tablas.

4.1 -Fabricación de muestras

Las películas fueron fabricadas; en la medida de lo posible, bajo las mismas condiciones, salvo algunos parámetros modificables para controlar las propiedades del depósito y variar las características de las muestras.

4.1.1 -Preparación de muestras

Para iniciar un depósito, es requerido el uso de equipo adecuado y su limpieza. Los siguientes; son materiales y herramientas que fueron usadas para la preparación de muestras en cada proceso evaporación.

Materiales y Herramientas	Uso/Usos	Limpieza
Porta objetos.	Sustrato y/o porta sustratos.	Acetona alcohol
Obleas Si-n / Si-p/ otros	Sustrato	Presión de Argón
Filamento oro/aluminio 0.5 mm/99.995%	Blancos	Presión de Argón
Pinzas acero inoxidable / antiácidos / antimagnéticas.	Manejo de muestras	Presión de Argón
Papel aluminio común.	Mascara robusta	Acetona alcohol
Rejillas de cobre	Mascara fina	Presión de Argón
Toallas de fibra virgen para uso delicado	Limpieza	N/A
Guantes de Nitrilo	Limpieza / Protección	N/A

Tabla 9: Materiales y herramientas requeridas para la preparación de muestras

El procedimiento de preparación de las muestras se describe a continuación:

1. Limpieza del sustrato. Esta se realizó para cada sustrato; según su tipo y condiciones, con acetona y alcohol, o Argón a presión.
2. Enmascarado. Este se hizo en la mayoría de los casos con Papel aluminio, rejillas de cobre, y/o cinta adhesiva. Con él, se protegieron áreas específicas de interés (Ver Fig. 25).

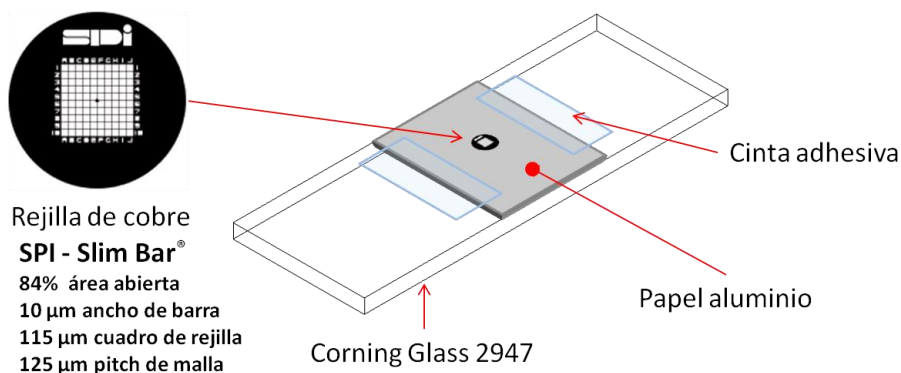


Fig. 25: Forma general del enmascarado de muestras parte de la preparación inicial de un depósito

4.1.2 -Preparación del equipo de evaporación TE12

Antes de comenzar cualquier depósito; es necesario comprobar el estado actual del equipo, para esto es útil la “Bitácora de Seguimiento” del equipo; en ella se llevó registro de las

condiciones del equipo durante el proceso de fabricación de toda película y cualquier ajuste realizado.

Lista de revisión (Checklist)

Importante revisión	Condición requerida
Bitácora de Seguimiento	Ultimo estado de uso del TE12
Válvula de escape; Bomba mecánica	Cerrada
Válvula de venteo; Cámara de depósito	Cerrada
Válvula de paso; Bomba turbomolecular	Cerrada
Filamento	Limpieza e integridad

Tabla 10: Tabla de condiciones requeridas para inicio de deposición mediante el equipo TE12.

4.1.3 -Condiciones del depósito

La siguiente tabla muestra las condiciones necesarias para comenzar una deposición y parámetros variables del sistema.

Equipo	Condiciones y parámetros	Valor	Requerido/ Variable
TE12	Presión residual en cámara	10^{-5} Torr	Requerido
TE12	Presión de deposición	10^{-3} Torr	
SQM-160	Densidad del Oro	19.3	Requerido
SQM-160	Densidad del Aluminio	2.7	Requerido
SQM-160	Factor Z del Oro	.381	Requerido
SQM-160	Factor Z del Aluminio	1.08	Requerido
TDK Lambda	Corriente de filamento para Oro	~18A	Variable
TDK Lambda	Corriente de filamento para Aluminio	~15A	Variable

Tabla 11: Condiciones y parámetros del sistema TE12; requeridos y variables. Valores de factor Z y densidad del Oro y Aluminio ref. 21

4.1.4 -Procedimientos general y específico de evaporación

Apegándose al manual de operación realizado para el manejo del equipo TE12, se fabricaron 27 muestras distintas de películas delgadas y más gruesas metálicas; en Aluminio, Oro, Oro/Aluminio, y Aluminio + Oro.

De forma general las ‘Condiciones Requeridas’ de la tabla anterior (Tabla 11), fueron siempre respetadas, y los parámetros; espesor y tasa de deposición, se controlaron

siempre por corriente. Todos los valores y parámetros de fabricación control y monitoreo de los quipos fueron consultados en su manual de usuario específico.

El procedimiento completo de evaporación y manejo del equipo es presentado en los cuatro apartados del Apéndice A. Los valores de monitoreo de Aluminio y Oro son presentados en el Apéndice B.

- **Detalles específicos**

Como se mencionó, se fabricaron muestras en; Al, Au, Au/Al, y Au + Al. Los sustratos manejados fueron Oxido de Ytrio, Oxido de Zirconio, Silicio tipo 'n' y tipo 'p', Oxido de Silicio Térmico y Corning glass. Películas y sus sustratos respectivos pueden ser consultados en el Apéndice C al final de este documento.

El único método de control para la obtención de películas con propiedades controladas, es la variación de voltaje y/o corriente (Ver punto 5, Apartado 2 de Apéndice A), y el tiempo de exposición. Solo se monitoreó el espesor y la tasa de deposición por medio del sistema de microbalanza de cuarzo.

La tasa de deposición es un parámetro importante, asociado a la rugosidad de la película y muchas propiedades ópticas. Si bien, no es un parámetro controlable, se puede regular por medio de la corriente (o voltaje).

Los depósitos de Aluminio, generalmente se obtuvieron a una tasa de depósito alrededor de 4-5 Å/s correspondiente a una corriente de 15-16 A. Los depósitos de Oro se fabricaron a corrientes mayores, de 18-19 A, con tasas de depósito alrededor de 1-2 Å/s.

Los espesores alcanzados; desde las decenas, hasta las centenas de nanómetros, fueron solo controlados por el tiempo de exposición, el cual no fue nunca mayor a 1-2 minutos en corriente máxima.

Los sustratos fueron colocados a distintas distancias del punto de evaporación, el objetivo inicial fue caracterizar los resultados obtenidos por microbalanza, el punto optimo; para efectos de medición del espesor y la tasa de deposición, es mantener una distancia de; sustrato a punto de evaporación, y punto de evaporación a Microbalanza de Cuarzo, igual, esto para evitar correcciones de 'Tooling', mismas que se hicieron durante la primera etapa de este trabajo, como parte de la caracterización y conocimiento del equipo. Las distancias

mencionadas no tienen relación con los distintos materiales usados, pero si con las propiedades obtenidas.

La imagen siguiente muestra un ejemplo de la geometría básica utilizada para los depósitos de las distintas películas (Fig.26).

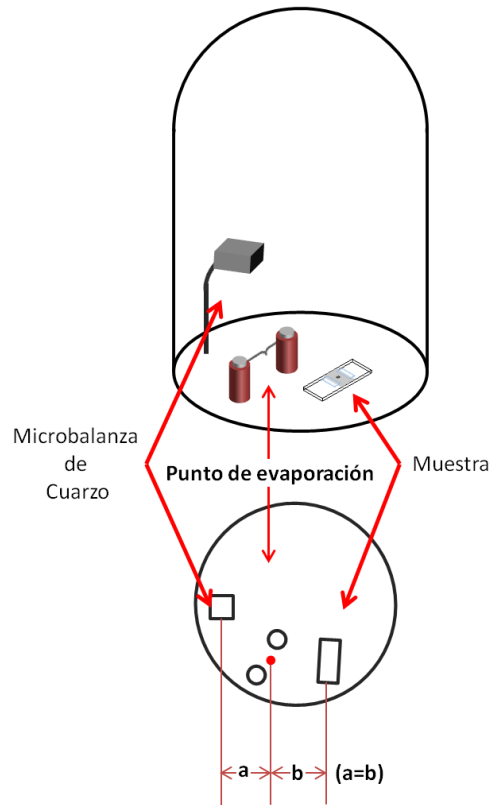


Fig. 26: Geometría del depósito. Valores obtenidos por Microbalanza de cuarzo son más confiables bajo estas condiciones.

5 Resultados y discusiones

En este capítulo se abordaran los puntos clave de la caracterización de las muestras. Los resultados aquí mostrados fueron obtenidos por las técnicas detalladas en el marco teórico de este documento.

Se extienden las discusiones especialmente con las películas más delgadas y se atiende con mayor detalle sus resultados.

5.1 Caracterización superficial y óptica

En este apartado se detallará la caracterización superficial; por medio de AFM, y óptica; por elipsometría, realizada en películas de un solo metal (Al y Au), películas bicapa (Al sobre Au) y películas co-evaporadas (Al más Au).

5.1.1 Películas de un solo metal

Las siguientes imágenes forman parte de la caracterización superficial de la primera muestra fabricada; nombre dado CGAl000, sustrato de vidrio 2947, metal Aluminio.

El primer problema enfrentado fue el tratamiento de la imagen obtenida por AFM, todas las mediciones mostraron una inclinación evidente que dificultó la obtención fidedigna del espesor y la rugosidad de las películas. Las imágenes fueron tratadas mediante el software propio del microscopio y con Gwyddion; software de tratamiento de imágenes SPM (Fig. 27).

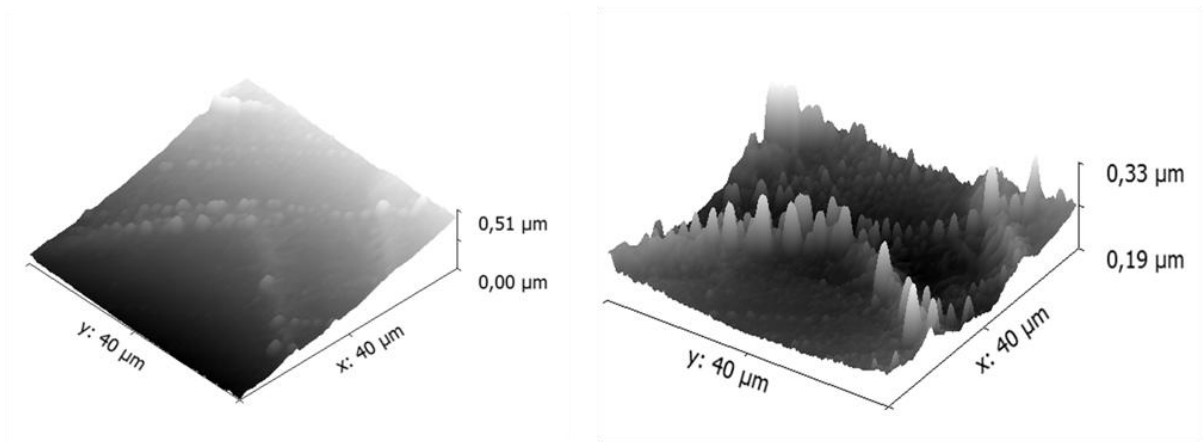


Fig. 27: La imagen muestra una medición AFM tratada por Gwyddion; sin remoción de inclinación (Izquierda), y con remoción de inclinación (Derecha).

El espesor estimado por este medio fue de $\sim 25\text{-}30$ nm. La imagen siguiente muestra mediciones por perfil del escalón formado entre Aluminio y vidrio. El objetivo de que estas mediciones sean paralelas entre sí, es encontrar la inclinación propia de la medición sin modificar por software los resultados.

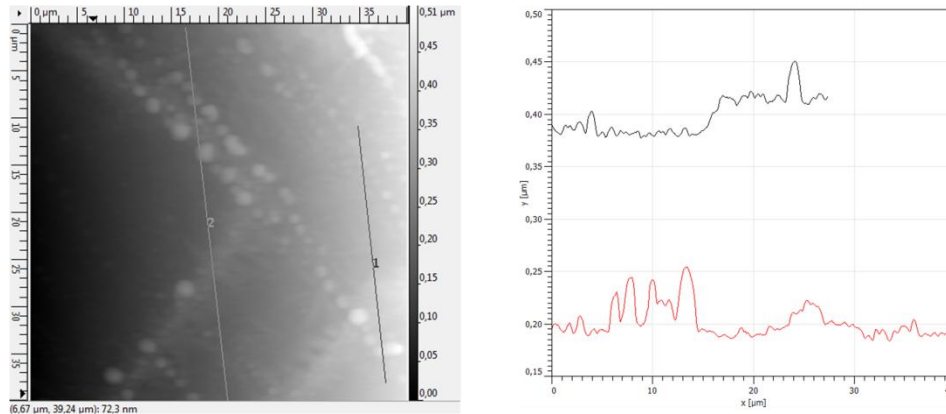


Fig. 28: Perfiles tomados mediante Gwyddion, muestra CGAL000. El Δz es de 26.3 nm.

Similar a la muestra anterior, se obtuvieron mediciones de altura de escalón para la muestra CGAU016_B; depósitos de oro sobre vidrio.

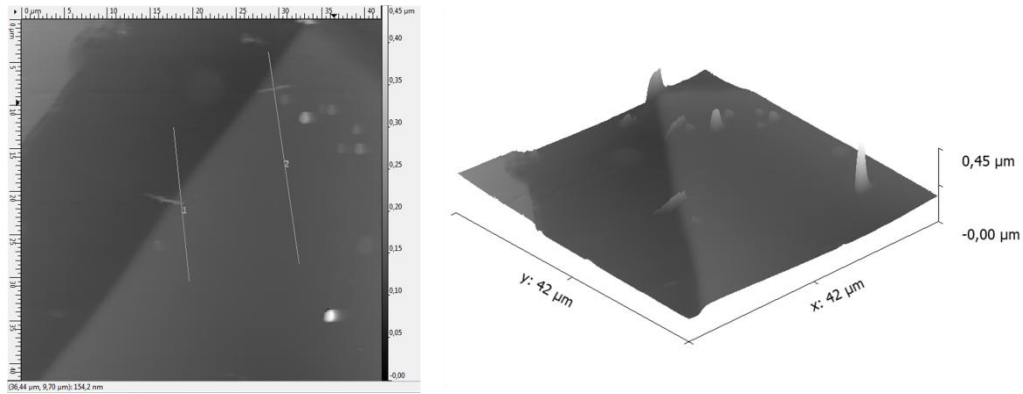


Fig. 29: Vista 2D y 3D muestra CGAu016_B. Lado izquierdo perfiles 1 y 2 de medición de escalón.

El valor de espesor resultante se muestra en la imagen siguiente, aproximadamente 41.5 nm en ambos perfiles. Estas muestras se trataron con precaución extra, pues demostraron tener baja adherencia.

Este valor fue corroborado por Elipsometría espectroscópica, la Tabla 12 muestra el espesor calculado por esta técnica mediante distintos modelos elipsométricos.

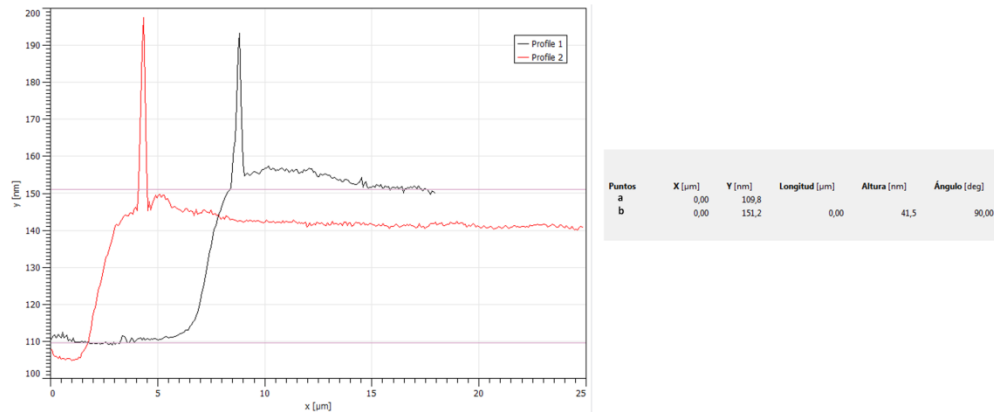


Fig. 30: Medición del escalón a dos perfiles, una medición horizontal sobre el perfil 1 (izquierda) demuestra que la altura aproximada es de 41.5 nm.

Las siguientes curvas corresponden a la grafica Ψ - Δ de la muestra anterior; CGAu016_B, sus valores se modelaron por B-Spline, y Au calculado.

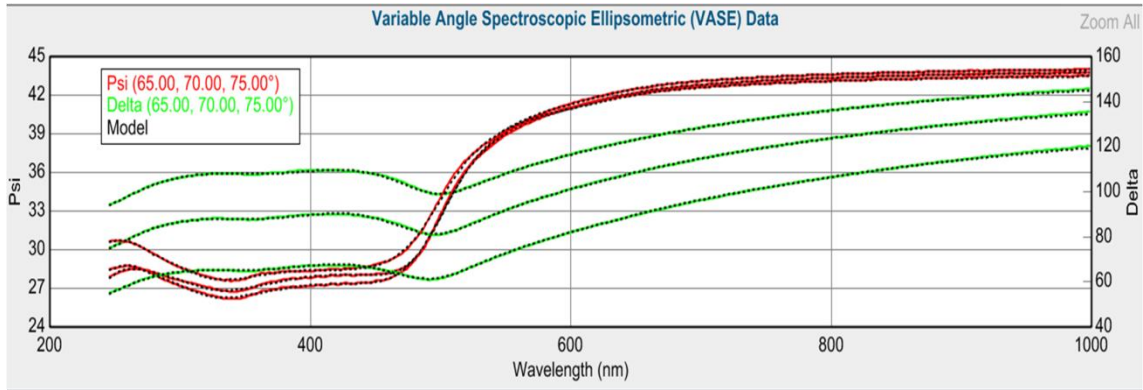


Fig. 31: Grafica Ψ - Δ de Oro delgado. Las líneas punteadas representan el modelo B-Spline y su relación con el espectro medido (líneas en color verde y rojo) con un MSE de 3.263 (Error cuadrático medio)

El modelo B-Spline trata de ajustar los valores obtenidos a los valores estimados, mientras que Au calculado; trata de ajusta los valores estimados a las constantes ópticas n-k del oro referenciadas.

Modelo B-Spline	Modelo Au Calculado
MSE = 3.263	MSE = 24.704
Roughness = 1.60 ± 0.275 nm	Roughness = 1.35 ± 0.042 nm
Thickness # 1 = 41.45 ± 1.077 nm	Thickness # 1 = 50.58 ± 0.476 nm
n of B-Spline @ 632.8 nm = 0.09323	n of Au @ 632.8 nm = 0.19494
k of B-Spline @ 632.8 nm = 3.61044	k of Au @ 632.8 nm = 3.09128

Tabla 12: Valores obtenidos por Elipsometría espectroscópica.

Una forma de valorar los resultados del modelo B-Spline fue comparando sus constantes ópticas n-k, con las ya publicadas del Oro.

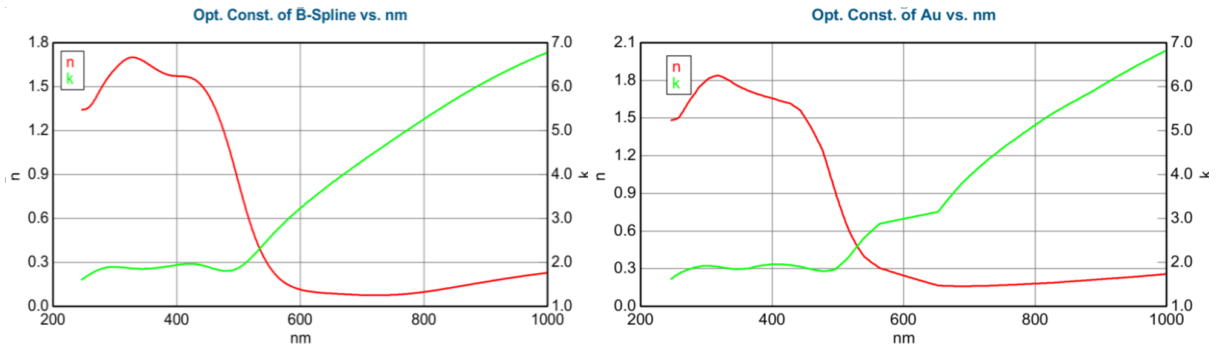


Fig. 32: Comparación de las constantes ópticas calculadas por Modelo B-Spline, y las publicadas en Handbook of Optical Constants of Solids, de Eduard D. Palik.

Después de esta comparación, pudimos observar que el coeficiente de extinción k es prácticamente igual en ambas mediciones; sin embargo, el índice de refracción n es un poco menor en el Modelo B-Spline, esto puede deberse a que las constantes ópticas $n-k$ del Oro publicadas por Palik corresponden a espesores entre los 207 y 1823 nm, oro de bulto por definición cuando la película depositada es de apenas 40 nm, no es de extrañar que el error mostrado en la tabla 12 para Au calculado, sea mucho mayor que el obtenido por el Modelo B-Spline, y que el espesor no sea el mismo en ambos casos.

A pesar de esto, el parecido es bastante aceptable a estos espesores, caso contrario que veremos con capas más delgadas.

Veamos ahora otro modo de medición propio del Elipsómetro, el modo de transmisión, cuyas características se hablaron en el marco teórico. Aquí el análisis es un poco más sencillo, aunque puede ser engañoso, la medición de transmisión toma menos datos que la espectroscópica.

La curva de la grafica de la izquierda; Fig. 33, representa la transmisión de una capa de Oro muy delgado que fue medida por Transmisión, con un $MSE = 0.00065462$ y una rugosidad de -18.17 nm, y un espesor de 38.47 nm. Estos valores se trataron de forma especial, un error aceptable es alrededor de 10 MSE, este error fue mucho más bajo; sin embargo, no es aceptable. La rugosidad resultó negativa, y como se vio en mediciones pasadas, la rugosidad de películas similares de Au es solo de un par de nanómetros positivos.

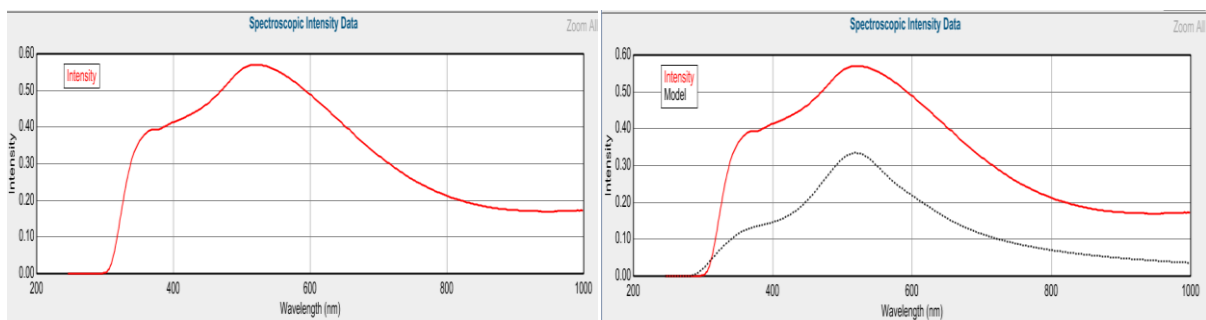


Fig. 33: Izquierda, Transmisión de película Muy delgada de Oro evaporado. Derecha, Modelo calculado para una película de 31 nm de Oro con constantes ópticas de Eduard D. Palik. la línea punteada representa el modelo calculado.

Como se mencionó, el Modelo B-Spline trata de ajustar los valores dados al modelo, así que; para ajustar lo mejor posible, compensa espesor con rugosidad negativa.

Esta película fue una de las pocas caracterizadas por Microscopia SEM, y se encontraron datos muy interesantes, que ayudaron a avaluar estos resultados elipsométricos.

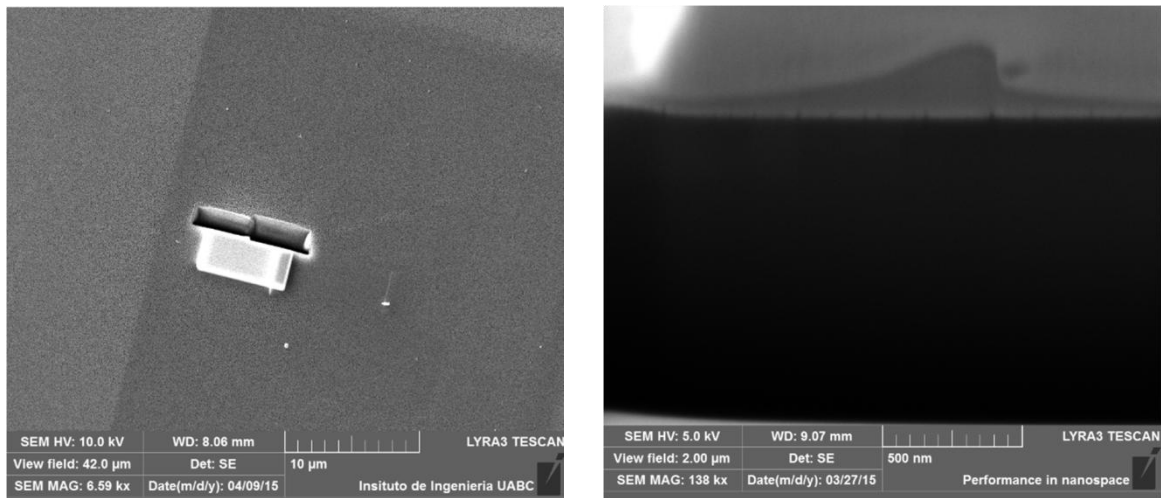


Fig. 34: Imágenes SEM de un corte transversal por FIB y protección de Platino. Izquierda; vista superior 42x42 μm . Derecha; vista lateral de la trinchera erosionada y pulida finamente.

La Fig. 34, muestra el resultado de un proceso laborioso, primeramente se depositó una fina capa de platino por medio del haz electrónico de SEM, seguido, un deposito más grueso (300nm) fue depositado sobre el anterior, posteriormente se realizó un ‘Trench Milling’ (Fresado de trinchera), que nos permitió ver las estructura multicapa nanoestructurada, y así determinar el espesor de la película de Oro de la muestra CGAu017_Silicio (fabricada en un mismo proceso de evaporación junto a CGAu017), el resultado, 31.45 nm de espesor (Ver Fig.9).

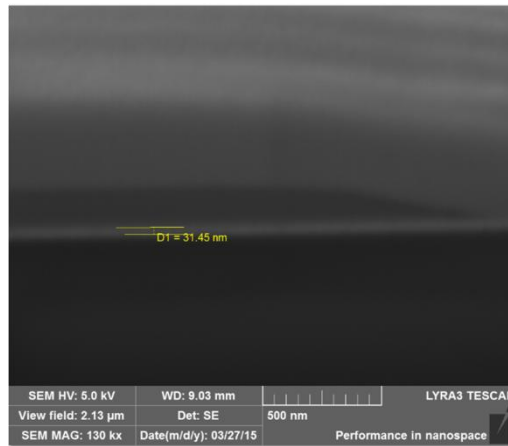


Fig. 35: Espesor obtenido por Microscopía SEM-FIB (31.45nm).

Si comparamos el espesor obtenido por Elipsometría, con la imagen arriba mostrada, se notará que la diferencia no es mucha (7.02nm).

¿Por qué incrementar el espesor y reducir hasta negativos la rugosidad? La teoría fue que la película no era del todo continua, esto se atribuyó a la baja tensión superficial del Oro. Se corroboró por SEM (Ver imagen derecha Fig.34) la no uniformidad de la película, esto permitía el paso de la luz por la ausencia de metal a lo largo de toda la capa, el incremento de la transmisión obligaba al modelo a justificar dicho aumento.

Si se observa la imagen derecha de la Fig.33, se notará que para películas de oro con el espesor especificado (31.45 nm), la transmisión esperada es menor que la obtenida durante la medición, esto ayuda a entender que es lo que ocurre durante el procesamiento de los datos.

Las mediciones de transmisión son muy útiles para determinar de forma cualitativa el espesor de las capas y su espectro de transmisión selectivo (si lo tiene), y hacer una rápida comparación entre distintas muestras como se hizo para el punto siguiente.

5.2 -Comparación de espesores y rangos de transmisión por métodos ópticos

Por Elipsometría Espectroscópica, se realizaron mediciones comparaciones de espesor de las muestras CGA1003, CGA1006, y CGA1007 (películas muy delgadas de Aluminio).

La Figura siguiente muestra una medición de transmisión realizada como parte de la caracterización de los sustratos (Corning Glass). Se obtuvo una intensidad de transmisión de casi 90% de la luz emitida, y como se esperaba, una absorción total en el UV.

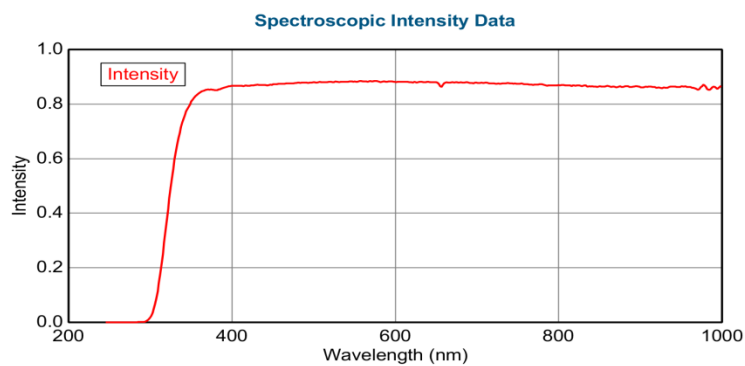


Fig. 36: Intensidad de Transmisión por Elipsometría sobre Corning Glas 2947

Aun sin saber los espesores de las películas mencionadas al inicio de este tema, fue posible identificar cual tenía un mayor espesor. Como se ve en la Figura siguiente; Vidrio (sustrato), y tres muestras son comparadas por transmisión, dándonos una buena idea de sus respectivos espesores y de sus rangos selectivos de transmisión.

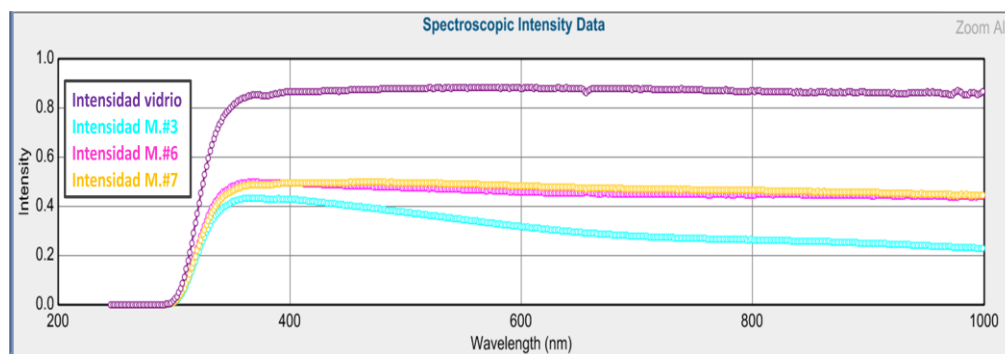


Fig. 37: Comparación métrica de la intensidad de transmisión por elipsometría entre tres muestras de distintos espesores.

5.3 Películas bicapa

Adicionalmente a la caracterización de películas de Aluminio, y Oro, se realizaron mediciones superficiales y ópticas en películas bicapa estructuradas de Oro sobre Aluminio. Los resultados obtenidos mostraron gran concordancia de las propiedades ópticas en relación con las propiedades estructurales.

La siguiente grafica (Fig. 38) muestra una medición de intensidad reflexión sobre Corning glass 2947 a cuatro distintos grados de incidencia (45°, 55°, 65°, 75°), se puede considerar la contraparte de la medición de transmisión, ya que; a partir de ambas puede calcularse o inferirse de forma cualitativa la energía absorbida por un medio.

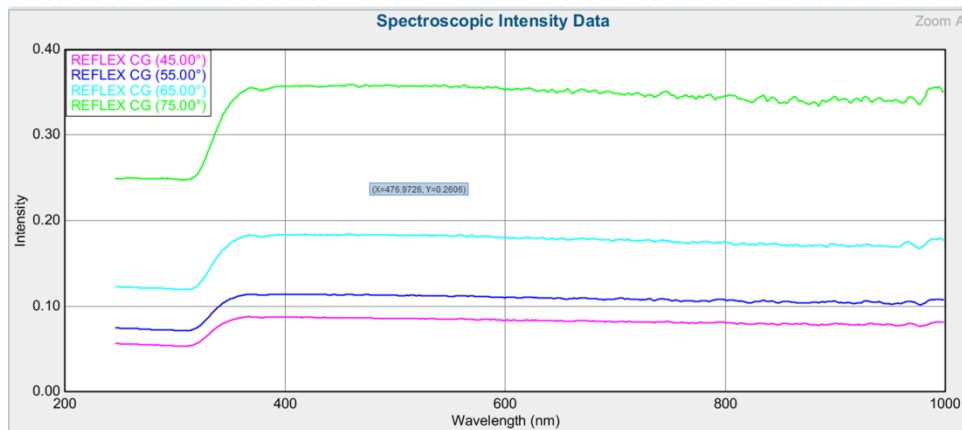


Fig. 38: Intensidad de reflexión que muestra el Corning glass 2947 a distintos ángulos de incidencia (45°, 55°, 65°, 75°)

La limitante de esta técnica es el ángulo en el que el equipo puede incidir y receptor el haz de luz generado y reflejado, para el equipo de J.A. Woollam ESM-300, este límite es de 45° a 85° de inclinación para reflexión, de allí que no podemos hacer una comparación directa con la medición por transmisión; que se hace a 90°.

En la grafica anterior se puede notar que el ángulo más adecuado para relacionar la reflexión medida con la transmisión medida es 45°, por lo que así se hizo arbitrariamente para $\lambda = 400$ nm (Fig. 39), obteniéndose un valor aproximado de absorción de 0.0426 utilizando la eq. (1).

$$\text{Reflexión} + \text{Transmisión} - \text{Absorción} = 1 \quad (1)$$

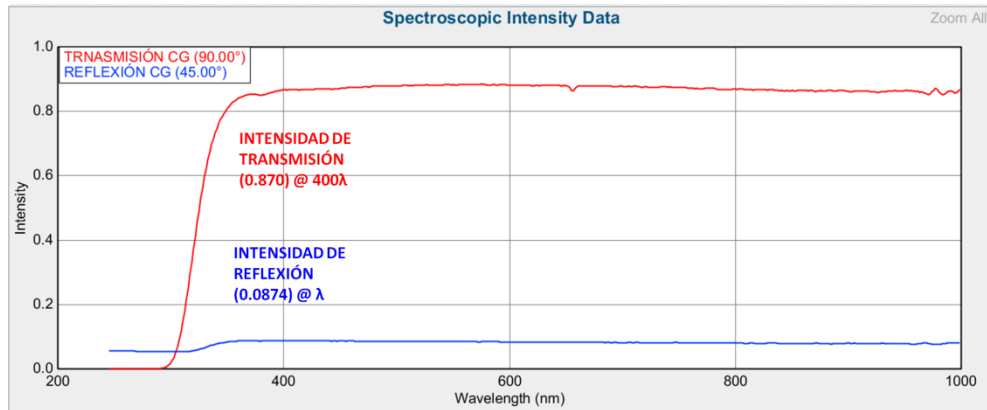


Fig. 39: Comparación de las intensidades de reflexión y transmisión para Corning glas 2947

De esta misma manera se realizaron comparaciones de Reflexión y transmisión para la muestra 021; Oro sobre Aluminio, de la cual resultados de espesor de sus películas por se muestran a continuación.

Los espesores a las películas de Au y Al; por separado son de 12nm y 10 nm respectivamente, correspondientes al espesor total de la bicapa 021. Mediciones por AFM y Elipsometría se muestran a continuación en las figuras 40 y 41.

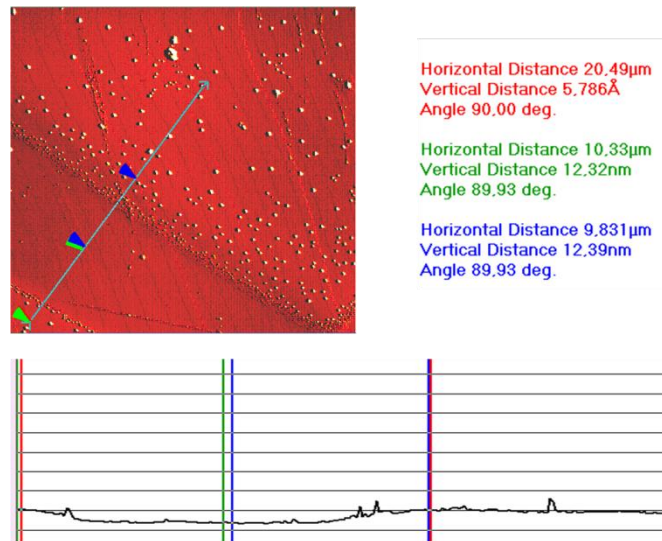


Fig. 40: Imagen y procesamiento por AFM Q-Scope. Los indicadores; azul, verde y rojo, en la imagen izquierda corresponden a los datos de la derecha de su mismo color. De la misma manera, la sección transversal corresponde a la diagonal trazada en la imagen, y las líneas horizontales a los punteros de su respectivo color.

La imagen anterior corresponde a las orillas de dos contactos fabricados en oro sobre vidrio, la película completa forma parte de la bicapa 021.

La grafica de la figura 41 muestra el espesor; por Elipsometría, de la película de Aluminio sobre vidrio. Este depósito forma parte de la bicapa 021.

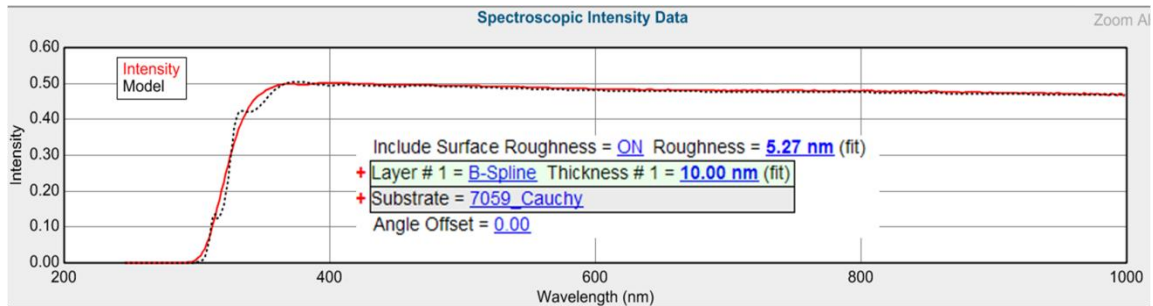


Fig. 41: Espesor calculado por Elipsometría Espectroscópica. El modelo utilizado B-Spline se muestra en línea punteada, la medición de intensidad en rojo continuo. Un espesor de 10 nm y rugosidad de 5.27.

La grafica siguiente es una comparación de Intensidad de transmisión y Reflexión, de la película bicapa Au sobre Al, cuyos espesores fueron demostrados en las figuras anteriores.

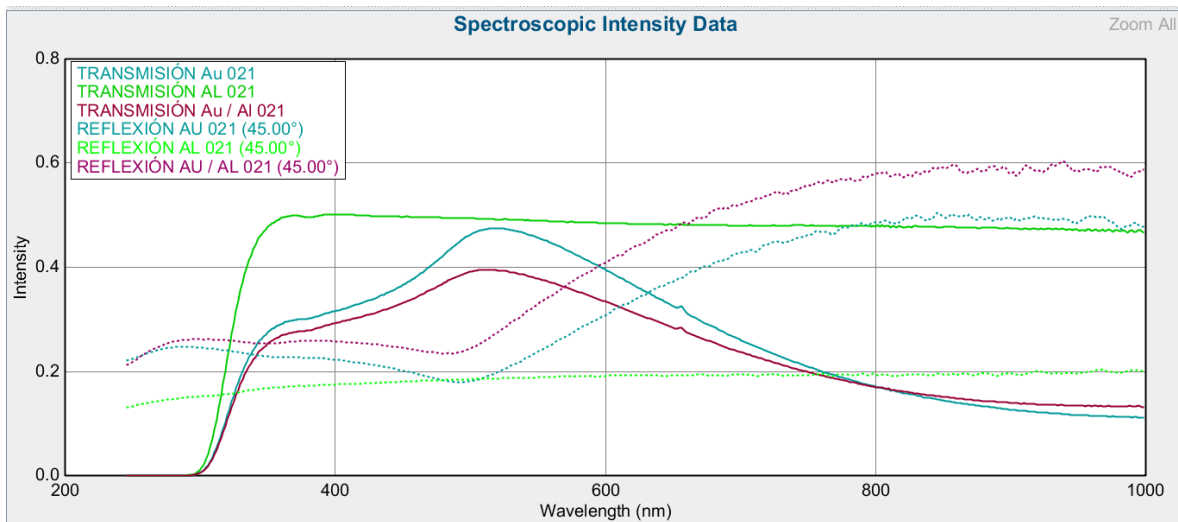


Fig. 42: Comparación de la intensidad de reflexión con la intensidad transmisión para una película bicapa Au/Al. Las líneas punteadas representan la reflexión y las líneas continuas transmisión (ambas para Au, Al y Au/Al)

La pelicular se fabricó de manera que se obtuvo una bicapa de Oro sobre Aluminio y dos películas por separado de Al y Au como referencia de el espesor total de la bicapa, y así

poder evaluar el cambio en las propiedades de ambos elementos al ser estructurados como bicapa.

Aquí (Fig.42), se evidencia una dependencia de la intensidad de transmisión fuertemente relacionada a la película de Au. Se pudo observar; que donde existe una mayor transmisión, disminuye la reflexión para todos los casos (un solo metal; Au ó Al, y bicapa Au/Al), y en el caso de la bicapa en particular un corrimiento del pico máximo de intensidad de transmisión; respecto a la película de Au, desde $\lambda = 510$ nm hasta $\lambda = 520$ nm respectivamente, con una energía absorbida de aproximadamente 0.344 para la transmisión máxima ($\lambda = 510$ nm).

5.4 Películas Compuestas

Lo siguiente, es un trabajo adicional resultado de la fabricación de muestras compuestas por dos metales co-evaporados (Au y Al). Se encontraron características interesantes analizadas por AFM y Elipsometría Espectroscópica.

Lo siguiente es el proceso de comparación entre una película co-evaporada y una película de Aluminio con espesores comparables alrededor de los 60 nm, ambas películas son lo bastante gruesas como para hacer imposible su caracterización por transmisión. Así pues, la comparación se realizó mediante Intensidad de reflexión y AFM.

La figura 41 muestra una extracción de perfiles de la muestra CGAL+AU012 (Oro y Aluminio co-evaporados) con un espesor aproximado de 60 nm.

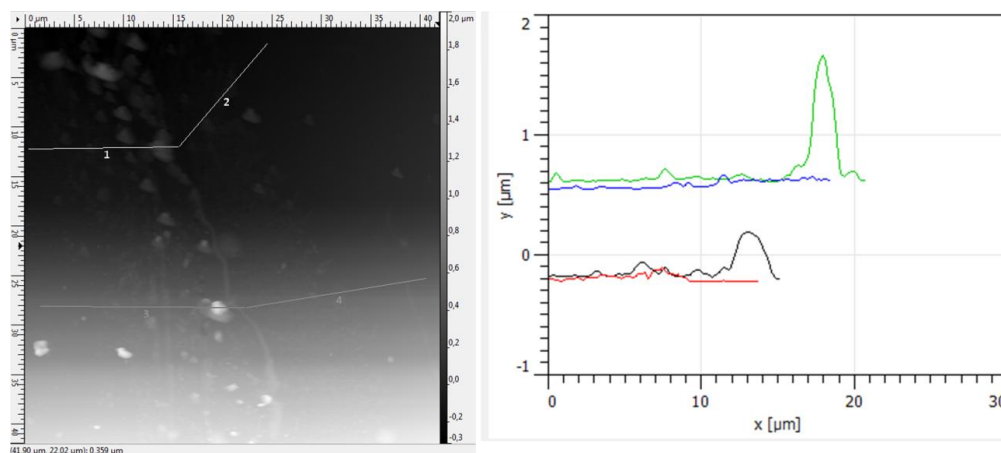


Fig. 43: Extracción de perfiles software, una inclinación evidente de la medición por AFM vuelve difícil determinar el espesor de una película, sin embargo con la herramienta Gwyddion esta inclinación es evitable.

Esta muestra se evaluó también con el modelo B-Spline, resultando un valor de espesor de 56.04 nm (Fig. 42). Esto corroboró los datos obtenidos mediante el procesamiento de imagen de Gwyddion en el que se determinó un valor de espesor de 59 nm.

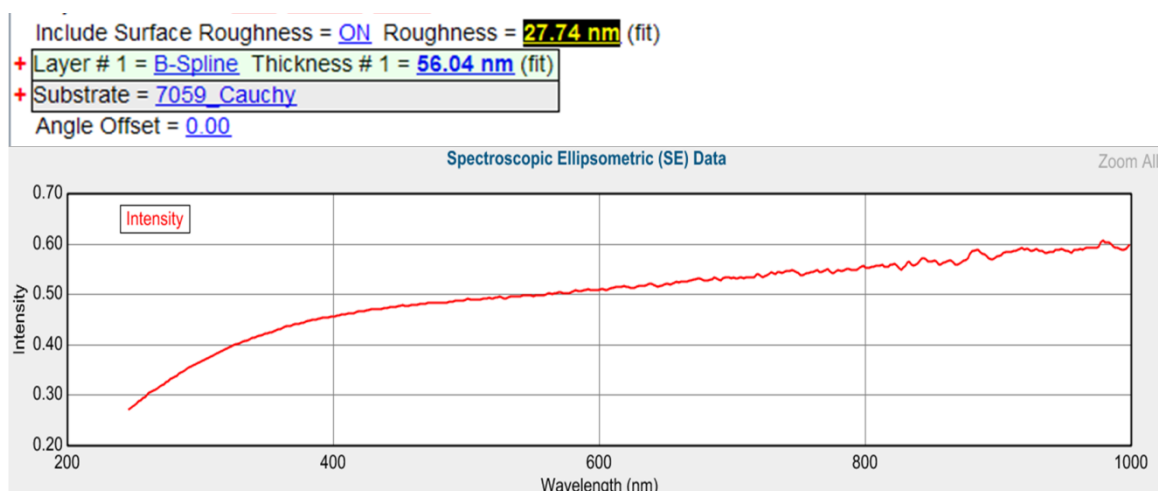


Fig. 44: Datos de la intensidad de reflexión y modelado por Elipsometría Espectroscópica para una película co-evaporada de Oro y Aluminio, con un espesor de 56.04 nm aproximadamente.

Como se mencionó, los datos anteriores sobre la película co-evaporada son como referencia para la comparación con una; similar en espesor, fabricada en Aluminio.

La siguiente imagen muestra la extracción de perfiles de la película 018 de Aluminio con un espesor medido de 58-59 nm en dos puntos.

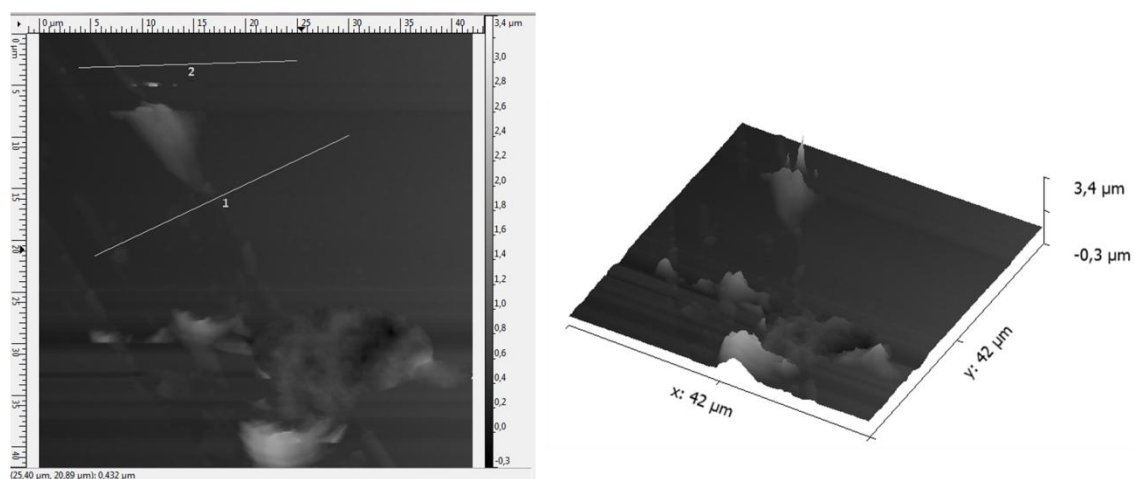


Fig. 45: Extracción de perfiles de muestra CGAL018, Aluminio delgado sobre Corning glass 2947.

Los valores obtenidos y los perfiles se muestran en la imagen siguiente. Las extracciones diagonales (curva 1 y 2) en distintos puntos y a distintos ángulos se hicieron con la intención de evitar los errores de medición de AFM. Los

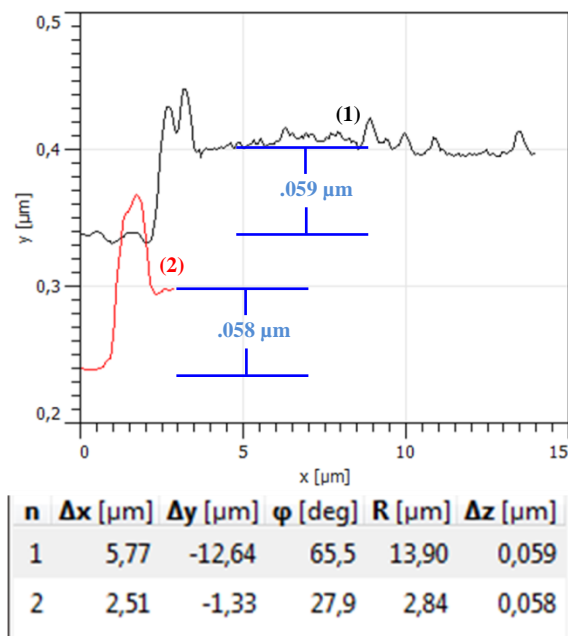


Fig. 46: Perfiles extraídos de la Fig. 43. Se determinó escalón (Δz) mediante software Gwyddion. Las curvas negra y roja representan las líneas 1 y 2 respectivamente de la imagen izquierda Fig. 43.

Así, ya determinados los escalones de las muestras CGAL018 (película de Aluminio) y CGAU+AL012 (co-evaporada), se procedió a realizar una comparación de sus propiedades ópticas usando el modo de Reflexión y transmisión de la técnica de Elipsometría Espectroscópica.

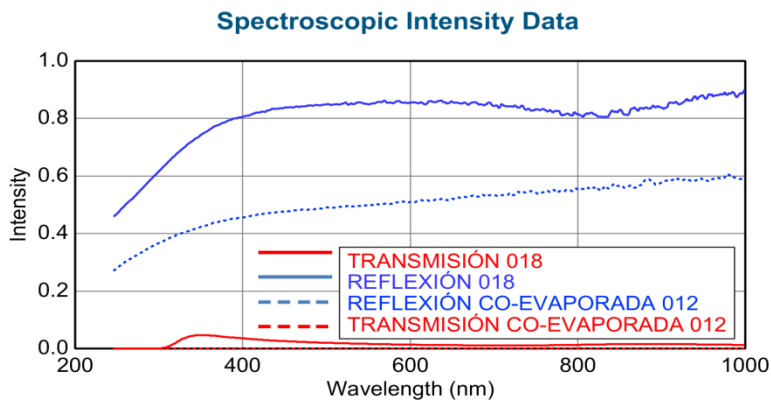


Fig. 47: Intensidad de reflexión (líneas azules), e intensidad de transmisión (líneas rojas), las líneas punteadas corresponden a la muestra co-evaporada, y las líneas continuas; a la muestra de Aluminio.

La imagen anterior muestra 4 curvas correspondientes a dichas muestras, cada par de curvas representan; para cada muestra, intensidad de transmisión y de reflexión.

Al fondo de la grafica, la línea punteada en rojo es casi imperceptible, esto se debió a la poca transmisión que demostró la muestra co-evaporada 012. De igual manera, la curva roja continua (Aluminio 018) es apenas notoria, pues dijimos, ambas muestras son lo bastante gruesas para hacer imposible una buena medición por transmisión.

Lo desconcertante en este caso fue, que como vimos en el caso de las películas bicapa, una alta transmisión venia acompañada de una baja reflexión.

Tomando en cuenta que la película de Aluminio muestra algo de transmisión, podríamos inferir una baja en la reflexión, sin embargo, la reflexión se mantuvo como en todas las películas de Aluminio analizadas, con valores de intensidad de entre 0.8 y 0.9 en gran parte del espectro electromagnético.

La película co-evaporada por su parte, demostró una baja intensidad en ambos espectros, por ser de las películas más gruesas depositadas, una baja en la transmisión fue de esperarse. Por otra parte, la reflexión sorprendentemente disminuye por debajo de 0.6 en intensidad y muestra un descenso en todo el espectro de medición pero con una notoria disminución de la pendiente en el rango UV si lo comparamos con la pendiente mostrada por la película de Aluminio (en el rango de 240-300 nm aprox), donde la absorción se debe al Corning glass.

6 Conclusiones y trabajo futuro

En base a los muchos meses de trabajo; la fabricación de distintas muestras, la caracterización por diferentes técnicas, y el análisis de los resultados obtenidos, se abordan las siguientes conclusiones en relación a los objetivos propuestos para esta investigación, y la oportunidad en el desarrollo de investigaciones futuras en relación con los resultados obtenidos.

6.1 Conclusiones

En cuanto a los periodos que se contemplaron para la fabricación de películas de Aluminio y Oro; individuales y bicapas, los resultados fueron favorables. Se realizaron 27 depósitos de los distintos elementos, 13 de Aluminio, 12 muestras de Oro. Adicionalmente, 2 muestras co-evaporaciones de Aluminio y Oro que no se tenían contempladas al inicio de este proyecto fueron fabricadas y caracterizadas, obteniéndose resultados prometedores para futuras investigaciones.

Las películas fueron depositadas en distintos sustratos, principalmente Corning glass y SiO_2 , adicionalmente, se hicieron depósitos sobre otros materiales como; Si-p, Si-n, ZrO_2 , y Y_2O_3 .

De los mismos elementos (Au y Al) y para los distintos sustratos, películas semitransparentes también fueron fabricadas en Aluminio y Oro elemental, y en películas bicapa. Estas películas fueron utilizadas como contactos traseros en dispositivos MOS, y como electrodos semitransparentes en dispositivos ópticos, todo como parte de la caracterización de los dispositivos, y a su vez, de las películas metálicas, culminando con una publicación donde distintos proyectos de investigación y laboratorios se vieron involucrados.

Lo anterior se realizó bajo una serie de condiciones bien documentadas, estas condiciones fueron evaluadas y adecuadas a las características del equipo, optimizando así; para películas metálicas elementales, bicapa y películas compuestas, el proceso de fabricación por evaporación térmica al alto vacío. Aunado a esto, se redactó un manual de operación de equipo, incluyéndose; operación de: microbalanza de cuarzo, fuentes de

poder, equipos de medición del vacío, y control del vacío, así como procedimiento de deposición de películas metálicas, y cierre de equipos (después de la deposición).

Al tiempo que se fabricaban las películas metálicas, y se buscaban las condiciones óptimas para el depósito, distintas técnicas de caracterización eran evaluadas y utilizadas en la determinación de las propiedades de las capas depositadas. De forma recurrente, técnicas como; Microscopía de fuerza atómica (AFM), y Elipsometría Espectroscópica fueron utilizadas, adicionalmente, técnicas como Microscopía electrónica de barrido (SEM) y Erosión por haz de iones focalizado (FIB) fueron usadas para corroborar algunas propiedades.

Con base en los resultados; las variadas características de las diferentes películas depositadas, las distintas propiedades de los elementos utilizados, y el control logrado en el proceso de fabricación, es seguro decir que las películas metálicas de Al y Au son aptas para su uso como elementos y dispositivos sensores de radiación.

6.2 Trabajo Futuro

Debido a los resultados obtenidos de la caracterización de las películas co-evaporadas de Aluminio y Oro, se propone continuar con su fabricación bajo diferentes condiciones de evaporación y distintas proporciones de composición.

Además de su caracterización por las técnicas presentadas en este trabajo, se propone también la caracterización composicional de las películas co-evaporadas, por medio de Espectroscopia de Dispersión de Energía (EDS, Energy Dispersive Spectroscopy).

Se espera continuar con la fabricación de las ya estudiadas multicapas; Aluminio y Oro, e incluir otros metales como Plata y Cobre, con base en documentación consultada, donde se encontró información importante en relación con la variación de las constantes ópticas de dichos metales.

Con base en lo anterior, se espera por lo tanto, continuar con la investigación de las propiedades obtenidas por Evaporación Térmica en películas constituidas de un solo metal, así como películas bicapa, y películas compuestas de dos o más metales co-evaporados.

Referencias Bibliográficas

- [1] Industria Electrónica 2013; Secretaría de Economía.
- [2] Nanotechnology for Microelectronics and Optoelectronics. J.M. Martínez- Duart.
- [3] Physics of Semiconductor Devices Third Edition S. M. Sze & Kwok K. Ng.
- [4] Transparent electronics: From Synthesis to Applications, Antonio Facchetti, Tobin Marks, John Wiley & Sons.
- [5] Thin Films: Preparation, Characterization, Applications, Springer Science & Business Media.
- [6] Nanotechnology for Microelectronics and Optoelectronics, Jose Martinez- Duart, Raul J. Martin-Palmer, Fernando Agullo-Rueda, Elsevier.
- [7] Nanochemistry: A Chemical Approach to Nanomaterials, Geoffrey A. Ozin, André C. Arsenault, Ludovico Cademartiri
- [8] Thin films fundamentals, A. Goswami
- [9] Mechanics of web transport systems for vacuum coaters, Taylor KA, Pan CHT.
- [10] Wrinklin of thin webs, Roisum D.
- [11] Handbook of PVD Process, Donald M. Mattox.
- [12] Vacuum Deposition onto Webs, Films and Foils, Charles Bishop.
- [13] Láminas delgadas y recubrimientos: preparación, propiedades y aplicaciones, José María Albella Martín
- [14] Rotary vane pumps user's manual, ADIXEN
- [15] Turbomolecular User's Manual, ADIXEN.
- [16] Principios y aplicaciones del vacío, 1^{er} Simposio Internacional en Nanociencias y Nanomateriales, Doctor Jesús L. Heiras.
- [17] Ultrahigh vacuum gauges, K. Jousten Physikalisch-Technische.
- [18] Spectroscopic ellisometry, Fujiwara H.
- [19] Manual de AFM, QScope
- [20] Electrical characterization of nanostructures bookfi characterization of semiconductor Chapter 3 Ana Cavalini and Laura Polenta.
- [21] Characterization of Semiconductor Heterostructures and Nanostructures, Carlo Lamberti.

- [22] Introduction To Microfabrication', Segunda edición, Richard C. Jaeger.
- [23] Physics of Semiconductors Devices, S.M. Sze.
- [24]] Metal-Semiconductor Contacts, E.H. Rhoderick and R.H. Williams, Oxford Science Publications Clarendon Press.
- [25] Current Injection in Solids, M.A. Lampert and P. Mark.
- [26] C-V Characterization of MOS Capacitors Using the Model 4200-SCS Semiconductor Characterization System, Keithley Application Notes Series.
- [27] Handbook of Ellipsometry, Harland G. Tompkins, Eugene A. Irene.
- [28] Handbook of Optical Constants of Solids, Edward D. Palik.