

Relación entre propiedades morfológicas y de transporte eléctrico en películas ultradelgadas de cromo

Javiera Martínez Rojas

Proyecto para optar al grado de
Licenciada en Física

Profesor guía:

Ricardo Henríquez

Miembros del comité:

Ricardo Henríquez, Valeria del Campo, Patricio Häberle

Enero 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Relación entre propiedades morfológicas y de transporte eléctrico en películas ultradelgadas de cromo

Nombre del candidato(a): Javiera Alejandra Martínez Rojas

Carrera / Grado: Licenciatura en física

Campus: Casa central Valparaíso

Departamento: Física

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Ricardo Henríquez, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 27/03/26 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 27/03/26 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

Los circuitos y componentes utilizados en la fabricación de dispositivos electrónicos actuales, han disminuido su tamaño hasta hacer relevantes los fenómenos y propiedades físicas presentes en la escala nanométrica. Uno de los materiales que permite conducir corriente eléctrica en muy bajos espesores es el cromo. Este metal a diferencia de otros utilizados como el cobre, presenta un modo de crecimiento 2D y mixto, a diferencia del 3D que muestran los metales nobles. Así, la resistencia eléctrica de una línea de 1 nm de espesor, presenta una resistencia al menos 6 órdenes de magnitud menor que aquella medida en una línea de este mismo espesor fabricada de algún metal noble [1]. Sin embargo, aún existen preguntas relacionadas con los mecanismos responsables de la resistencia en estas dimensiones tan bajas. Este trabajo se centra en estudiar la relación entre propiedades morfológicas y de transporte eléctrico en películas ultradelgadas de cromo.

Cromo (99,99 % de pureza) fue termalmente evaporado en condiciones de alto vacío. Los espesores alcanzados estuvieron entre 1 y 5 nm. La resistencia eléctrica fue medida durante la fabricación de las muestras. Además, se implementó un sistema de dos cámaras que permitió la evaporación de las muestras y su posterior estudio mediante microscopía de efecto túnel (STM), evitando su paso por condiciones ambiente. Para la caracterización morfológica, se obtuvieron imágenes topográficas para cada espesor, las cuales fueron analizadas con los programas WSxM e ImageJ, determinando el diámetro de los granos que la constituyen y su rugosidad superficial.

Gracias a las caracterizaciones eléctrica y morfológica, se empleó el modelo de Mayadas y Shatzkes, el cual permitió calcular la resistividad total considerando tres mecanismos principales de dispersión electrónica: la dispersión isotrópica de fondo, la dispersión en los límites de grano y la dispersión en las superficies externas. El mejor ajuste obtenido corresponde a $R=0,45$ y $P=0,15$, lo que indica que la probabilidad de reflexión en los bordes de grano es considerablemente mayor que la fracción de electrones que se dispersan en la superficie.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que formaron parte de este proceso académico y personal. En primer lugar, agradezco profundamente a mi familia, Greta Martínez, Rodrigo Rojas y Claudia Rojas, por su apoyo incondicional, su preocupación constante y por acompañarme en cada etapa de este camino. Agradezco especialmente a Andrés Ortega por su compañía, confianza y apoyo permanente, tanto en los momentos de alegría como en los más difíciles.

Asimismo, expreso mi gratitud a mi profesor guía, Ricardo Henríquez, por la oportunidad de trabajar junto a él, por su disposición, exigencia y dedicación en mi formación científica. Agradezco también a mis compañeros del laboratorio por su constante apoyo en el desarrollo de esta investigación y por compartir generosamente su conocimiento y experiencia. Finalmente, agradezco a mis amigos por el apoyo, la compañía y los aprendizajes compartidos a lo largo de este proceso, así como al Proyecto Fondecyt 1231849 y al Proyecto Ciencia e Innovación 2030, cuyo financiamiento hizo posible la realización de este trabajo.

Índice general

Resumen	I
Agradecimientos	II
1. Motivación	2
2. Antecedentes	4
2.1. Modos de crecimiento	4
2.2. Fabricación de películas delgadas	5
2.2.1. Sputtering	5
2.2.2. Deposición física en fase de vapor por calentamiento resistivo	6
2.3. Microscopía de efecto túnel	6
2.4. Transporte eléctrico en películas delgadas	8
2.4.1. Modelo de Drude	8
2.4.2. Modelo de Mayadas y Shatzkes	9
3. Metodología	12
3.1. Equipo	12
3.2. Fabricación de la película	13
3.3. Fabricación de puntas	15
3.4. Análisis de imágenes	16
3.4.1. Conteo de granos	16
3.4.2. Rugosidad WSxM	19
4. Trabajo previo	21
5. Resultados y Análisis	23
5.1. Caracterización morfológica	23
5.2. Relación entre diámetro medio de grano y espesor	24

5.3. Relación entre rugosidad superficial y espesor	26
5.4. Caracterización eléctrica y análisis del transporte eléctrico mediante el modelo de Mayadas Shatzkes	26
6. Innovación	29
7. Conclusiones	31

Índice de figuras

2.1. Modos de crecimientos en películas delgadas: a) Frank-van der Merwe, b) Volmer-Weber, c) Stranski-Krastanov	4
2.2. Representación gráfica de la técnica de sputtering	5
2.3. Representación gráfica de la técnica de PVD	6
2.4. Diagrama de función de onda de electrones al experimentar efecto túnel . .	7
3.1. Equipo utilizado para la fabricación y caracterización de las películas de cromo. En 1. encontramos la bomba de vacío turbo molecular, 2. canastillo de Tungsteno, 3. porta muestras y micro balanza de cuarzo, 4. brazo retráctil y 5. bomba de vacío iónica.	12
3.2. Fotografías del interior de la cámara de UHV)	14
3.3. Portamuestras utilizado para la evaporación de películas de cromo y su posterior caracterización mediante STM, diseñado para asegurar un buen contacto eléctrico y permitir la realización de las mediciones sin romper las condiciones de vacío.	14
3.4. Fotografías de la punta Platino Iridio utilizada para la microscopía de efecto túnel	15
3.5. Imagen STM del cromo 2 nm con delineado y sin delineado de granos	17
3.6. Imagen STM del cromo con los perfiles de altura correspondientes a las secciones 1 y 2 indicadas en la imagen central.	17
3.7. Imagen STM del cromo 2 nm con delineado y sin delineado de granos	18
3.8. Distribución del diámetro de grano determinado mediante diferentes técnicas	19
4.1. Resistencia vs Espesor para cromo (gris) y cobre (rojo). Se puede apreciar que en el cromo la caída de la resistencia es mucho más abrupta, pero que sobre cierto espesor la resistencia del cobre es menor.	21
5.1. Imágenes STM de distintas muestras de cromo con espesores 1, 1,5 y 2 nm. .	23
5.2. Imágenes STM de distintas muestras de cromo con espesores 2,5, 3 y 4,1 nm.	24

5.3. Diámetro en función del espesor	25
5.4. Rugosidad superficial en función del espesor	26
5.5. Grafica de Rt en función del espesor más el ajuste realizado con el modelo MS. Se presentan los tres ajustes con menor error cuadrático, la curva azul 2,34, la curva verde 5,43 y la curva magenta 3,06	27
5.6. Rt en función del espesor más el ajuste con menor error cuadrático realizado con el modelo MS, $R = 0,45$ y $P = 0,15$	27

1. Motivación

Por más de 50 años, la Ley de Moore ha sido el principio fundamental del progreso tecnológico. Ésta predecía que cada dos años se lograría insertar el doble de transistores en un chip, lo que produjo que los dispositivos electrónicos fueran cada vez más rápidos y eficientes. Sin embargo, como señala John Shalf en “The Future of Computing Beyond Moore’s Law”, este paradigma ha comenzado a enfrentar sus límites físicos. Ya no es posible seguir reduciendo indefinidamente las dimensiones de los componentes electrónicos sin comprometer el funcionamiento de los dispositivos, esto, debido a que en escalas nanométricas aparecen nuevos comportamientos, no observados en escalas mayores. Esto es lo que se conoce habitualmente como ‘efectos de tamaño’.

Ante esta problemática, surge el interés por estudiar materiales que, incluso a bajos espesores, conserven una adecuada conductividad eléctrica y presenten una resistencia mínima. Uno de los más destacados es el cromo, un metal que combina de forma excepcional propiedades como alta resistencia a la corrosión, gran dureza, estabilidad térmica y buena conductividad, características que lo han convertido en un material fundamental para diversas aplicaciones industriales. Su papel más importante es ser un elemento de aleación en los aceros inoxidables. En otras aplicaciones como la electrónica, destaca en resistencias de nicromo, capas de adhesión máscara y aleaciones Co Cr para medios magnéticos. Frente a alternativas como el níquel o el zinc, el cromo ofrece un equilibrio óptimo entre desempeño, durabilidad y costo.

El cromo, además, a diferencia de otros metales utilizados como el cobre, presenta un modo de crecimiento 2D y mixto, a diferencia del 3D que muestran los metales nobles. Gracias a esto, la resistencia eléctrica de una línea de 1 nm de espesor presenta una resistencia al menos 6 órdenes de magnitud menor que aquella medida en una línea de este mismo espesor fabricada de algún metal noble [1].

Por las razones expuestas anteriormente, lograr avances en la comprensión de los efectos

de tamaño en películas ultradelgadas de cromo se presenta como una oportunidad no sólo de lograr una primera aproximación a la investigación, sino, además, como un desafío de obtener resultados científicamente relevantes en este ámbito. Este trabajo se centra en estudiar la relación entre propiedades morfológicas y de transporte eléctrico en películas ultradelgadas de cromo.

2. Antecedentes

2.1. Modos de crecimiento

Entendemos el crecimiento de películas delgadas como el proceso donde por distintos mecanismos tanto físicos como químicos, es posible depositar un material sobre una superficie sólida hasta formar capas con espesores extremadamente pequeños. En general se acepta que existen tres modos posibles de crecimiento [2], los cuales se ilustran esquemáticamente en la Figura 2.1.

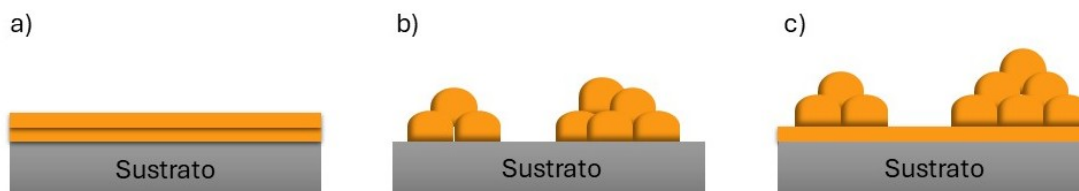


Figura 2.1: Modos de crecimientos en películas delgadas: a) Frank-van der Merwe, b) Volmer-Weber, c) Stranski-Krastanov

El crecimiento por modo de islas, o modo Volmer–Weber (Fig 2.1.b), se caracteriza porque los átomos del material se adhieren a la superficie del sustrato y luego crecen formando islas o estructuras granulares. Esto ocurre cuando los átomos (o moléculas) del depósito están más fuertemente unidos entre sí que al sustrato. Este tipo de crecimiento se observa en numerosos sistemas metálicos depositados sobre materiales aislantes, entre ellos metales en haluros alcalinos, grafito y diversos compuestos laminares como la mica.

El modo de capas, o modo Frank–van der Merwe (Fig 2.1.a), muestra características opuestas al modo anterior, ya que en este caso los átomos se unen más fuertemente al sustrato que entre sí, lo que da lugar a una estructura bidimensional en forma de capas. Este

tipo de crecimiento se observa en ciertos sistemas metal-metal y en el crecimiento epitaxial de semiconductores.

El modo de crecimiento mixto, o modo Stranski-Krastanov (Fig 2.1.c), es una combinación de ambos modos de crecimiento descritos anteriormente. Inicialmente se forman capas del material, hasta que el crecimiento en capas deja de ser favorable y comienza entonces a crecer en forma de islas. Se conocen muchos ejemplos como en sistemas metal-metal o metal-semiconductor.

2.2. Fabricación de películas delgadas

2.2.1. Sputtering

La técnica de pulverización catódica (sputtering) es uno de los métodos más utilizados para la deposición de películas delgadas. El sistema se compone de una cámara de vacío, un blanco o “target” del material que se desea depositar, y un portamuestras donde se sitúa el sustrato.

La técnica consiste en el bombardeo del target mediante iones de argón (Ar^+), generados en un plasma de gas inerte, como se muestra en la Figura 2.2. Estos iones, acelerados por una diferencia de potencial aplicada entre el cátodo (target) y el ánodo (la cámara o el porta-sustrato), impactan sobre la superficie del target, provocando la eyección de átomos o moléculas neutras del material. Dichas especies son transportadas a través del vacío y se depositan sobre el sustrato, formando una película delgada. Este método presenta ventajas como una excelente adherencia, control del espesor y la posibilidad de depositar materiales metálicos, cerámicos o compuestos [3].

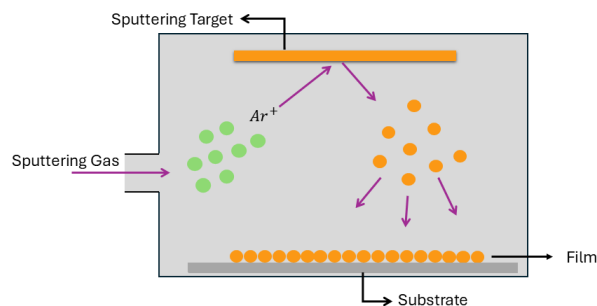


Figura 2.2: Representación gráfica de la técnica de sputtering

2.2.2. Deposición física en fase de vapor por calentamiento resistivo

La deposición física en fase de vapor (Physical Vapor Deposition PVD) por calentamiento resistivo es otra técnica ampliamente utilizada para la fabricación de películas delgadas en el ámbito de la nanotecnología y la ciencia de materiales. El sistema suele estar compuesto por una cámara de alto vacío o ultra alto vacío (por sus siglas en inglés HV o UHV), dentro de la cual se encuentra un filamento resistivo, generalmente de tungsteno u otro material con alta resistividad y elevado punto de fusión, junto con el portamuestras que sostiene el sustrato.

El proceso consiste en calentar el filamento por efecto Joule hasta alcanzar temperaturas lo suficientemente altas como para evaporar el material que se necesite, que se coloca en forma de pequeñas pepitas o filamentos sobre el tungsteno. Al evaporarse, los átomos del material viajan en fase de vapor a través del vacío hasta alcanzar la superficie del sustrato, donde se condensan y se acomodan formando una película delgada. La calidad y morfología de la película dependen de múltiples factores, como la presión base del sistema, la temperatura del sustrato, la tasa de deposición y la pureza del material evaporado [3]. A continuación, en la Figura 2.3 encontramos una representación gráfica del proceso.

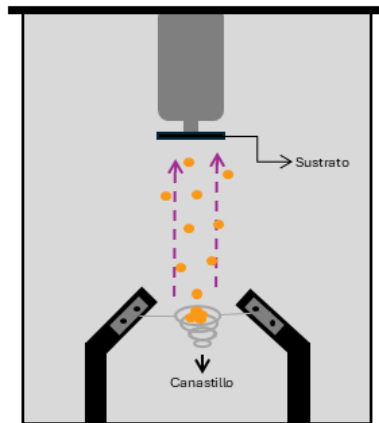


Figura 2.3: Representación gráfica de la técnica de PVD

2.3. Microscopía de efecto túnel

La microscopía de efecto túnel (STM) es una técnica utilizada en nanotecnología para visualizar y manipular superficies hasta una escala atómica basándose del fenómeno mecánico cuántico llamado efecto túnel.

El efecto túnel describe la capacidad de una partícula para atravesar una barrera de potencial a pesar de que su energía total E sea inferior a la energía potencial máxima de la barrera, U_0 . Desde una perspectiva cuántica, existe una probabilidad no nula de que la partícula “tunelice” a través de la región clásicamente prohibida y emerja al otro lado [4]. Este comportamiento contrasta de manera radical con las predicciones de la mecánica clásica, donde la probabilidad de transmisión en estas condiciones es estrictamente cero; una partícula clásica que se encuentra con una barrera energética que no puede superar simplemente rebotará, sin posibilidad alguna de atravesarla.

En el STM, este principio se aprovecha mediante una punta extremadamente afilada de material conductor (usualmente tungsteno o platino-iridio), que se aproxima a unos pocos nanómetros de la superficie de la muestra (conductora o semiconductor). Este fenómeno se ilustra en la Figura 2.4

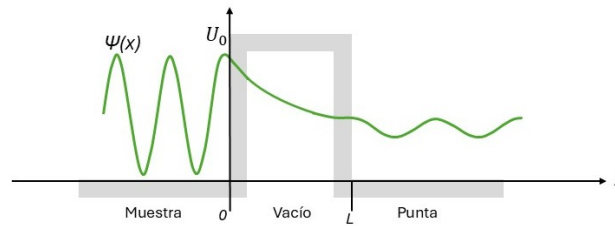


Figura 2.4: Diagrama de función de onda de electrones al experimentar efecto túnel

Para generar una imagen topográfica, partimos del supuesto de que la densidad de estados superficial es bastante homogénea, de forma que el movimiento de la punta para mantener una corriente constante se logra siguiendo la topografía del material. En este proceso, la punta se desplaza con altísima precisión gracias a piezoeléctricos, los cuales convierten las señales eléctricas en movimientos controlados. El sistema cuenta con un circuito de retroalimentación (feedback) que regula continuamente la distancia entre la punta y la muestra para mantener constante la corriente de túnel. Este control se realiza mediante un software especializado, en este caso, SPM Software versión 1.3 de Omicron, que permite ajustar la posición de la punta, definir el tamaño de la imagen y analizar los datos obtenidos.

2.4. Transporte eléctrico en películas delgadas

2.4.1. Modelo de Drude

En 1900, Paul Drude comprendió que la teoría cinética de los gases de Boltzmann podía aplicarse al estudio del movimiento de los electrones en los metales. Su propuesta resultó muy exitosa, dando las bases para entender la conducción metálica [5].

Drude partió considerando que tenemos un electrón con momento P y estos electrones tienen un tiempo de dispersión τ , donde la probabilidad de que se dispersen dentro de un intervalo dt es dt/τ . Luego de la dispersión, suponemos que el electrón regresa con momento 0. Finalmente, entre los eventos de dispersión, los electrones, que son partículas con carga $-e$, responden al campo eléctrico externo E y al campo magnético B .

Con estos supuestos nos preguntamos ¿Qué momento tendrá en el instante $t + dt$?, la respuesta a esta pregunta se divide en dos. Primero tenemos la probabilidad de colisionar dt/τ donde su momento es 0. Segundo la probabilidad de que siga su dinámica normal con $1 - dt/\tau$

$$P(t + dt) = (1 - \frac{dt}{\tau})(P(t) + Fdt) + 0 \frac{dt}{\tau} \quad (2.1)$$

Reordenando y considerando el límite cuando dt tiende a 0, encontramos una ecuación diferencial continua que describe cómo el momento promedio de los electrones varía en el tiempo bajo la acción de una fuerza externa, considerando además las pérdidas asociadas a los procesos de colisión, caracterizadas por el tiempo de relajación τ .

$$\frac{dP}{dt} = F - \frac{P}{\tau} \quad (2.2)$$

Conviene introducir aquí el concepto de camino libre medio (mean free path), que corresponde a la distancia promedio entre colisiones sucesivas de los electrones y viene dada por la siguiente expresión:

$$\lambda = v_0 \tau \quad (2.3)$$

donde λ corresponde al camino libre medio de los electrones, v_0 es la velocidad de Fermi y τ representa el tiempo medio entre colisiones electrónicas.

2.4.2. Modelo de Mayadas y Shatzkes

Las consideraciones para generar el modelo de transporte eléctrico en películas delgadas basado en Mayadas y Shatzkes (MS) son las siguientes:

Primero, se asume que los bordes de grano actúan como barreras rectangulares de potencial, las cuales se modelan mediante una delta de Dirac. Los electrones, al chocar con estas barreras, tienen una probabilidad R de ser reflejados, donde $R > 0$ hay reflexión y si $R = 0$ no choca con el borde de grano.

En segundo lugar, se considera que lo propuesto por el modelo de Drude sigue siendo válido, por lo tanto, los electrones experimentan choques aleatorios con impurezas o fonones, lo que da lugar a un tiempo de relajación τ , definido como el tiempo promedio entre colisiones. Por último, también se sigue aplicando la teoría de Lucas [6], por lo que se considera que los electrones pueden reflejarse de forma especular o difusa en las superficie de la película.

Con la suposición de que la dispersión por otras fuentes (defectos puntuales y fonones) puede describirse por un tiempo de relajación τ , la ecuación de Boltzmann queda de la siguiente manera:

$$eEv_z \frac{\partial f_0(\vec{k})}{\partial \varepsilon} = \int P(\vec{k}, \vec{k}') [\Phi(\vec{k}) - \Phi(\vec{k}')] d\vec{k} + \frac{\Phi(\vec{k})}{\tau} \quad (2.4)$$

Para encontrar la solución a la ecuación, como mencionamos anteriormente, el borde de grano se puede modelar como:

$$V(x) = \sum_i S \delta(x - x_i) \quad (2.5)$$

Donde x_i representa la posición de los bordes de grano, y S corresponde a la “fuerza” del potencial asociado a cada barrera. Se asume que las posiciones de los bordes de grano están distribuidas de forma gaussiana, con una distancia promedio de separación d y una desviación estándar s . Este potencial se trata como una perturbación al hamiltoniano de electrones libres. De esto encontramos uno de los parámetros importantes, que es:

$$\alpha = \frac{mS^2}{\hbar^3 k_F d} 2\tau = \frac{l_0}{d} \frac{R}{1 - R} \quad (2.6)$$

Donde l_0 es el camino libre medio, R es la probabilidad de reflexión en los bordes de grano, y d es el diámetro de grano.

Ahora bien, para la solución de la ecuación de Boltzmann solo considerando los bordes de grano y la dispersión por otras fuentes, nos da:

$$\frac{\sigma_g}{\sigma_0} \equiv \frac{\rho_0}{\rho_g} = 3 \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{2}\alpha + \alpha^2 - \alpha^3 \ln \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \right] \quad (2.7)$$

Si queremos conocer la resistividad completa de la película considerando la superficie, los bordes de grano y la dispersión por otras fuentes, partimos de la siguiente ecuación:

$$v_z \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + eE_x \left(\frac{\partial f_0}{\partial \varepsilon} \right) = \frac{\Phi}{\tau^*} \quad (2.8)$$

Donde, para resolverla, consideramos las condiciones de frontera en las superficies de la película, que son:

$$\Phi^+(v_z, 0) = p\Phi^-(v_z, 0) \quad (2.9)$$

$$\Phi^-(v_z, a) = p\Phi^+(v_z, a) \quad (2.10)$$

Donde p es la fracción de electrones que se dispersan especularmente en las superficies externas. La conductividad total de la película σ_f se calcula como:

$$J(x) = - \left(\frac{e}{4\pi^3} \frac{m^3}{\hbar^3} \right) \int \Phi(\vec{v}) \vec{v}_x d\vec{v}$$

Así obtenemos la resistividad:

$$\rho_f = \left[\frac{1}{\rho_g} - \frac{6}{\pi \kappa_0 \rho_0} (1-p) \int_0^{\pi/2} d\phi \int_1^\infty dt \frac{\cos^2 \phi}{H^2(t, \phi)} \left(\frac{1}{t^3} - \frac{1}{t^5} \right) \left(\frac{1 - e^{-\kappa_0 t H(t, \phi)}}{1 - p e^{-\kappa_0 t H(t, \phi)}} \right) \right]^{-1} \quad (2.11)$$

donde:

$$H(t, \phi) = 1 + \frac{\alpha}{\cos \phi \sqrt{1 - \frac{1}{t^2}}}, \quad \kappa_0 = \frac{a}{l_0} \quad (2.12)$$

Podemos notar que cuando $\alpha = 0$, se recupera la expresión de Fuchs-Sondheimer, lo que equivale a no considerar los bordes de grano. Esto ocurre cuando $R = 0$, es decir, los electrones se transmiten completamente a través del límite de grano sin ser reflejados.

En cambio, cuando $a \gg l_0$ o $\kappa_0 \gg 1$, significa que el espesor de la película es mucho mayor que el camino libre medio de los electrones. En ese caso, los electrones ya se dispersan antes

de alcanzar las superficies externas, por lo que su efecto sobre la resistividad es prácticamente nulo. En resumen, el sistema se comporta como un material volumétrico (bulk) [7].

3. Metodología

Para investigar la relación entre las propiedades morfológicas y el transporte eléctrico en películas ultradelgadas de cromo, se prepararon seis muestras con distintos espesores, las cuales fueron caracterizadas mediante STM sin ser expuestas a condiciones ambientales, con el fin de preservar su estado superficial.

Con este objetivo, se diseñó una metodología experimental orientada a la fabricación y caracterización controlada de dichas películas, que permite correlacionar la evolución morfológica de las muestras con sus propiedades de transporte eléctrico. A continuación, se describe el montaje experimental utilizado, así como los procedimientos empleados en cada etapa.

3.1. Equipo

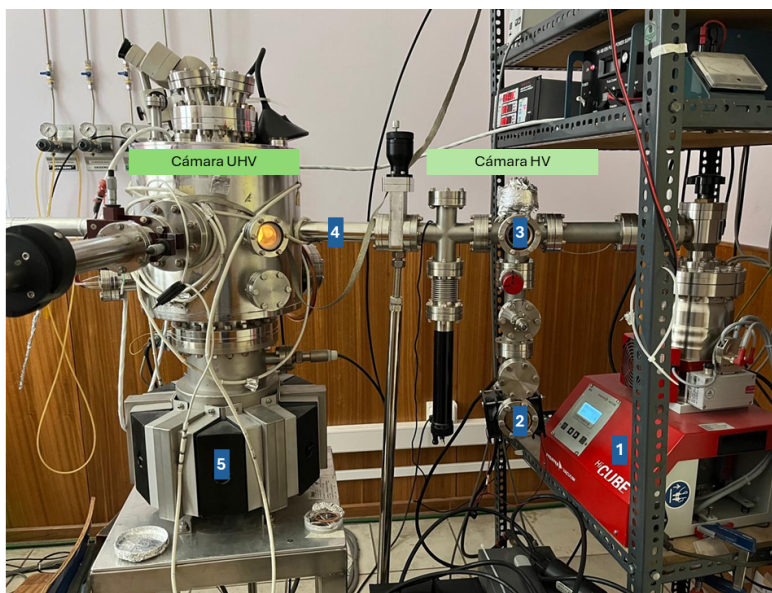


Figura 3.1: Equipo utilizado para la fabricación y caracterización de las películas de cromo. En 1. encontramos la bomba de vacío turbo molecular, 2. canastillo de Tungsteno, 3. porta muestras y micro balanza de cuarzo, 4. brazo retráctil y 5. bomba de vacío iónica.

El equipo cuenta con dos secciones: una cámara de alto vacío (HV), donde se realiza la evaporación de las películas, y la cámara de ultra alto vacío (UHV), en la que se encuentra el STM, como se ilustra en la Figura 3.1.

La cámara de evaporación (cámara de HV) está conectada a una bomba turbo molecular respaldada por una bomba mecánica, lo que permite alcanzar presiones de 10^{-5} Pa. Estas condiciones son esenciales para evitar la oxidación del cromo y garantizar la pureza de las películas durante el proceso de deposición. Si la presión fuera mayor (es decir, si el vacío fuera menor), las partículas de cromo en fase de vapor tendrían una mayor probabilidad de colisionar con moléculas residuales del ambiente, alterando su composición y reduciendo la adherencia de la película al sustrato.

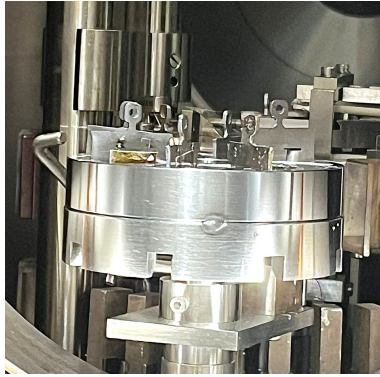
En el interior de esta cámara se ubica un canastillo de tungsteno, sobre el cual se colocan pequeñas pepitas de cromo que son posteriormente evaporadas por calentamiento resistivo. Por encima del filamento se encuentra el portamuestras, donde se dispone el sustrato, junto con una microbalanza de cuarzo, que permite monitorear en tiempo real la tasa de deposición y controlar con precisión el espesor de las películas obtenidas.

Entre ambas cámaras se encuentra una guillotina, la cual permite mantener el vacío en la cámara UHV. La cámara de evaporación está expuesta al ambiente con mayor frecuencia, por lo que la guillotina actúa como una válvula de aislamiento que evita la pérdida de vacío en la cámara UHV. En el mismo eje, se encuentra el brazo retráctil que permite mover las muestras entre cámaras sin someterlas a condiciones ambiente.

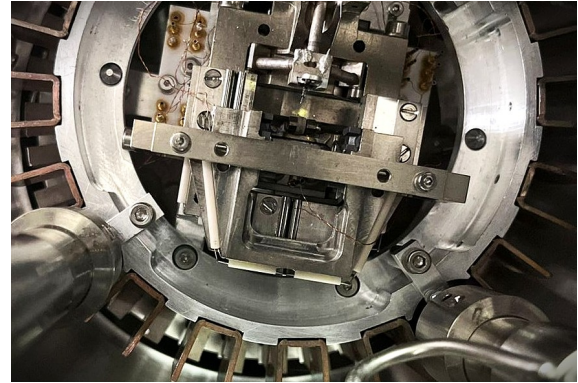
La cámara principal (cámara de UHV) alcanza presiones del orden de 10^{-9} Pa gracias a una bomba iónica, encargada de mantener el vacío. En esta cámara encontramos dos sistemas de brazos uno donde se transporta la muestra del evaporador hacia dentro de la cámara principal y otro que se encarga de tomar la muestra y colocarla en el carrusel (Fig 3.2a) donde se guardan puntas y muestras. Asimismo, la cámara alberga el STM, montado sobre un soporte suspendido mediante varios resortes (Fig 3.2b) que actúan como sistema de aislamiento mecánico, reduciendo las vibraciones externas que podrían afectar las mediciones.

3.2. Fabricación de la película

Para realizar microscopía de efecto túnel es necesario que exista contacto eléctrico entre la muestra y el porta muestras. Un problema muy recurrente durante la evaporación es que



(a) Fotografía del carrusel del STM



(b) Microscopio de efecto tunel

Figura 3.2: Fotografías del interior de la cámara de UHV)

las estructuras que afirman la mica al porta muestras pueden generar sombras que impiden el contacto eléctrico adecuado entre ambos. Para evitar este tipo de inconvenientes, se siguió el siguiente procedimiento de preparación.

Se utilizó un porta muestras con cuatro tornillos, sobre el cual se colocó una lámina de mica clepada. Luego se evaporó con el método de sputtering una película de 50nm de oro, para garantizar la conductividad eléctrica entre la película de cromo y el porta muestras. Finalmente, los tornillos se ajustaron junto a láminas metálicas, como podemos ver en la Figura 3.3.



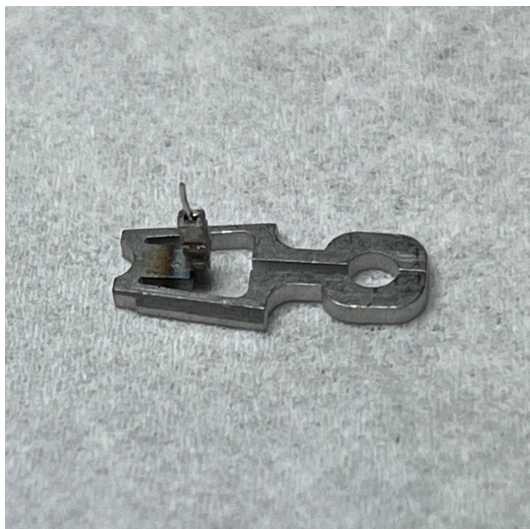
Figura 3.3: Portamuestras utilizado para la evaporación de películas de cromo y su posterior caracterización mediante STM, diseñado para asegurar un buen contacto eléctrico y permitir la realización de las mediciones sin romper las condiciones de vacío.

Luego se colocó el porta muestras en la cámara de alto vacío. A través del método de depósito físico de vapor por calentamiento resistivo, se procedió a fabricar la muestra. Para

controlar el espesor de las muestras, se utilizó una micro balanza de cuarzo, la cual mide los cambios de masa detectando la variación en la frecuencia de resonancia de un cristal piezoeléctrico, debido a la deposición de material en su superficie. El proceso de fabricación requiere un tiempo mínimo de 3 a 5 horas, ya que durante la evaporación la presión aumentaba, lo que obligaba a esperar a que ésta disminuyera para continuar con el proceso

3.3. Fabricación de puntas

Como se mencionó anteriormente, en la microscopía de efecto túnel se utiliza una punta metálica para realizar las mediciones. En este trabajo se utilizó un alambre compuesto de 80 % platino y 20 % iridio, el cual se cortó en un ángulo de 45 grados y se montó sobre una estructura metálica, como se ilustra en la Figura 3.4. Luego, el alambre se sumergió en isopropanol y se introdujo en una máquina de ultrasonido con el objetivo de limpiarlo a fondo. Posteriormente, se colocó en el porta muestras para introducirlo primero en la cámara de alto vacío y, más tarde, en la cámara de ultra alto vacío donde se encuentra el microscopio.



(a) Punta



(b) Punta más su porta puntas

Figura 3.4: Fotografías de la punta Platino Iridio utilizada para la microscopía de efecto túnel

3.4. Análisis de imágenes

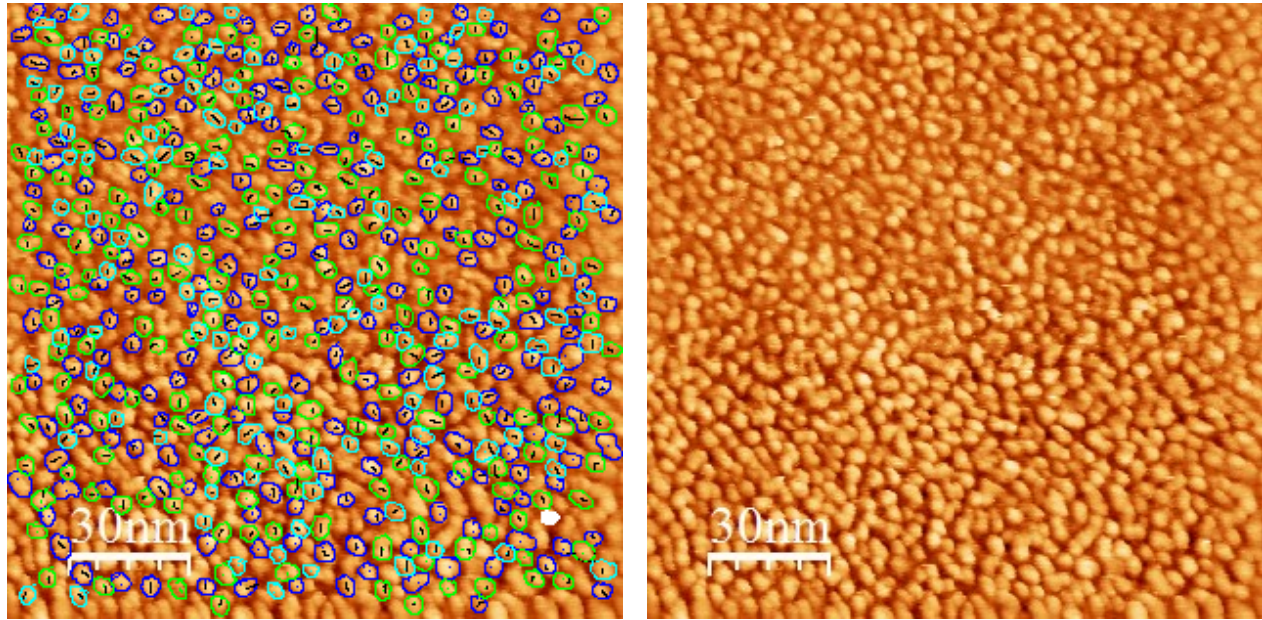
3.4.1. Conteo de granos

Las imágenes obtenidas de la caracterización mediante microscopía de efecto túnel fueron tratadas con el programa WSxM y exportadas. Posteriormente, mediante ImageJ, se realizó el conteo de más de 500 granos por muestra. Para alcanzar este número, se analizaron entre tres y cinco imágenes por cada espesor, de manera que el conjunto total de granos contabilizados alcanzara las 500 unidades requeridas. Este número de granos asegura una cantidad representativa para el análisis estadístico de cada muestra [8].

Ahora bien, para contabilizar los granos se establecieron ciertos criterios de selección que permitieron definir qué estructuras debían considerarse.

1. Se considero borde de grano aquel mínimo local de altura presente en una zona de mayor relieve. No obstante, no todo mínimo de altura en una zona elevada corresponde a un borde de grano.
2. Solo se contabilizan los granos que tengan todos sus bordes dentro de la imagen.
3. Los granos que no puedan ser delimitados o identificados con claridad bajo estas condiciones se excluyen del análisis.

Teniendo en cuenta estas reglas, el conteo de granos consistió en delinear manualmente cada grano individual, como se muestra en la Figura 3.5. A partir del área delimitada, se aproximó cada grano a una forma circular y se calculó su diámetro.



(a) Delineado de los granos realizado en ImageJ

(b) Imagen original sin delineado

Figura 3.5: Imagen STM del cromo 2 nm con delineado y sin delineado de granos

Como podemos notar este procedimiento puede volverse dificultoso para identificar algunos granos por lo que también se utilizó el software WSxM para generar perfiles de altura de altura que ayudaron a determinar si se considera o no un grano (Fig 3.6). En general las diferencias de alturas más pequeñas son de 0,3 nm ya que para alturas más pequeñas el ruido no dejaba determinar si era o no un grano.

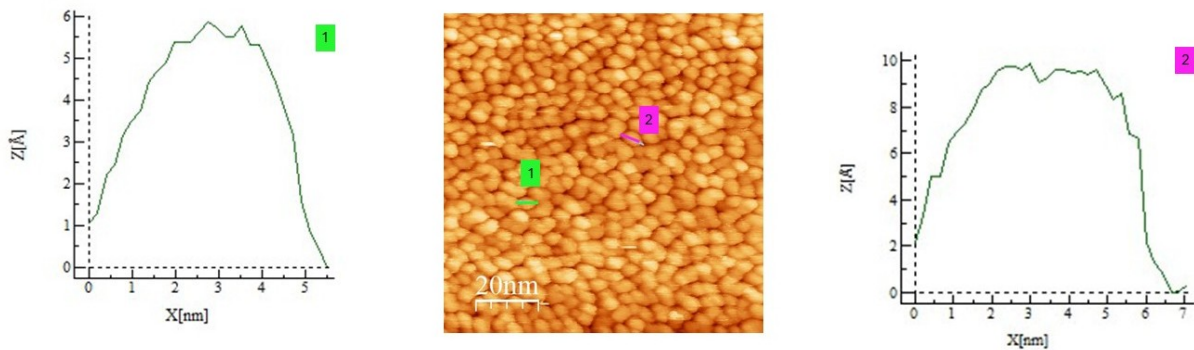


Figura 3.6: Imagen STM del cromo con los perfiles de altura correspondientes a las secciones 1 y 2 indicadas en la imagen central.

El procedimiento descrito anteriormente no es la única forma reportada para cuantificar los granos. También existen otros métodos, como el uso del programa Gwyddion, que dis-

pone de herramientas especializadas para este tipo de análisis. Por ello, se probó también este método con el fin de comparar ambos procedimientos y determinar cuál ofrece mejores resultados.

El procedimiento consiste en aplicar un método de segmentación por umbral, que distingue las regiones correspondientes a cada grano según su altura relativa en la imagen. Primero, se filtra y nivela la imagen para eliminar ruido de fondo. Luego, mediante la herramienta “Grain, Mark grains by threshold”, se define un valor de umbral que separa las zonas altas y bajas de la superficie. El programa identifica automáticamente las áreas cerradas delimitadas por ese umbral y las marca como granos individuales.

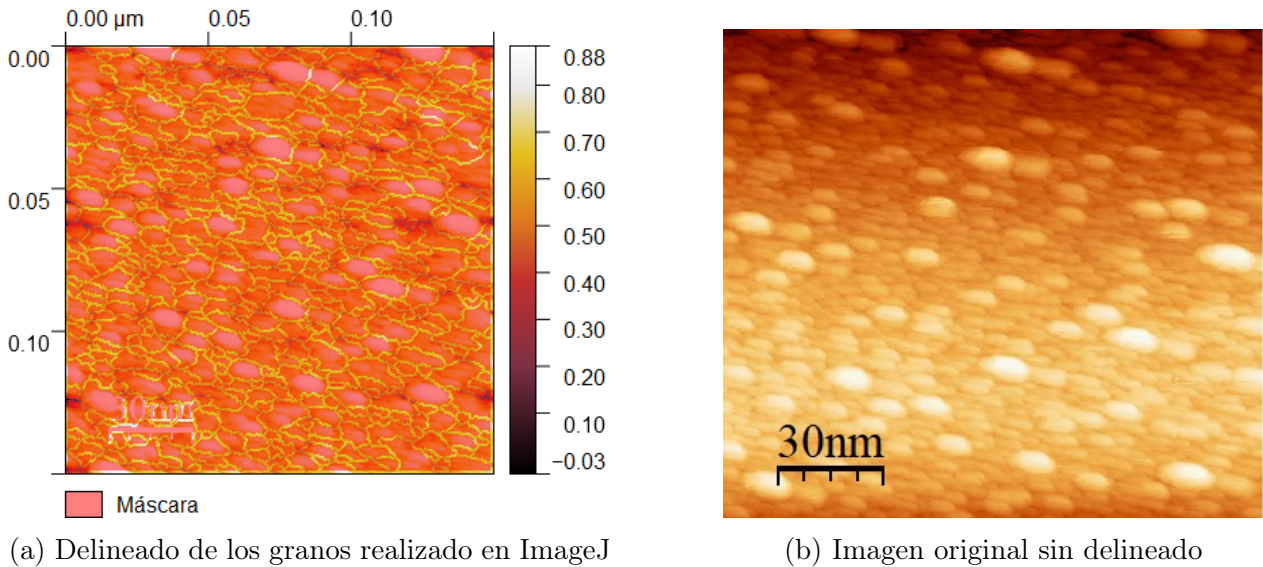
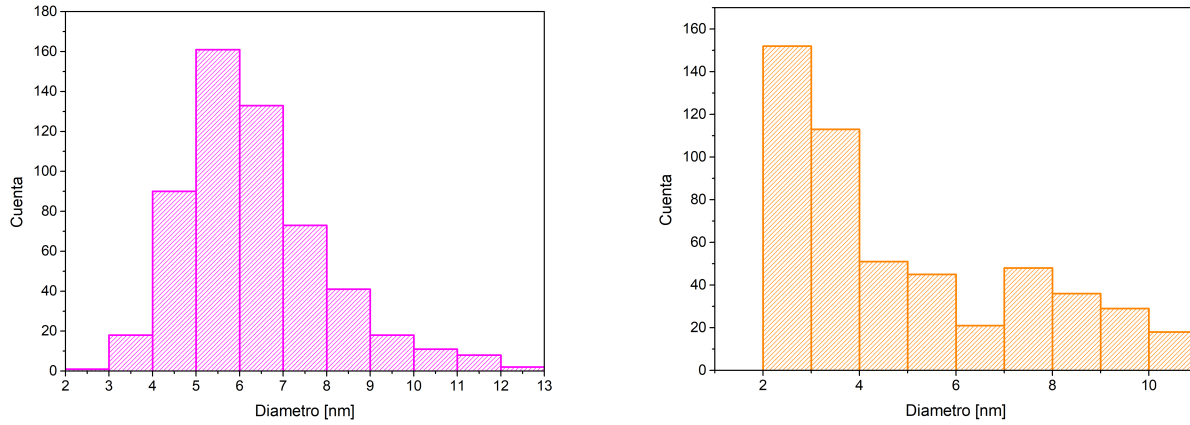


Figura 3.7: Imagen STM del cromo 2 nm con delineado y sin delineado de granos

A partir de esta segmentación, se genera una máscara como se muestra en la Figura 3.7 (mostrada en color rosado) que cubre las áreas reconocidas como granos, mientras que los bordes amarillos representan los límites detectados entre ellos. Una vez establecida la máscara, se aplican las funciones de análisis de Gwyddion que calculan parámetros geométricos de cada grano, como el diámetro (asumiendo una forma circular).

Los estudios sobre el crecimiento de sistemas granulares han demostrado que la distribución del tamaño de grano suele ajustarse a una función lognormal [8]. En consecuencia, se compararon los resultados obtenidos por ambos métodos para evaluar cuál proporciona una representación más adecuada del comportamiento observado.



(a) Procesamiento por ImageJ, con 556 datos (b) Procesamiento por Gwyddion, con 531 datos

Figura 3.8: Distribución del diámetro de grano determinado mediante diferentes técnicas

Como se observa en la Figura 3.8a, el análisis realizado con ImageJ presenta una distribución más cercana a una lognormal en comparación con los resultados obtenidos mediante Gwyddion. En este último caso, se aprecia una acumulación de diámetros extremadamente pequeños. Esto se evidencia en la Figura 3.7a, donde la máscara generada por el software delimita erróneamente sectores correspondientes al fondo o a intersecciones entre granos, indicando que el método no logra identificar adecuadamente los límites reales de cada grano.

En consecuencia, la metodología seleccionada para determinar el diámetro de los granos fue la basada en ImageJ. Si bien requiere un tiempo de análisis mayor, sus resultados son más consistentes y representativos de la morfología real de la superficie en comparación con el método automático.

3.4.2. Rugosidad WSxM

Se denomina rugosidad superficial al conjunto de irregularidades o imperfecciones presentes en la superficie de un material [9].

En este trabajo, la rugosidad de las muestras fue determinada utilizando el programa WSxM, mediante la herramienta “Análisis de rugosidad”, la cual aplica la siguiente ecuación:

$$R_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L Y(x)^2 dx} \quad (3.1)$$

donde L corresponde a la longitud de muestreo y $Y(x)$ representa la altura en cada posi-

ción xy de la imagen de topografía.

Este procedimiento constituye una caracterización cualitativa, ya que no se miden parámetros físicos exactos (como energía o fracción de fase), sino que se analiza cómo varía la textura o el relieve superficial del material, lo cual puede asociarse a cambios estructurales o morfológicos.

4. Trabajo previo

Para el análisis correcto de este trabajo es necesario primero mencionar que como mencionamos en la sección de metodología las muestras fueron fabricadas en la precámara mediante deposición física en fase vapor por evaporación resistiva. A lo largo del proceso de evaporación, se efectuaron mediciones in situ de la resistencia, registrando su evolución conforme avanzaba el crecimiento de la película. Esta parte del trabajo fue realizada por Vicente De La Barra en su tesis para optar al grado de magister en ciencias, mención física [10]. Por ello, resulta pertinente presentar los principales resultados de su trabajo.

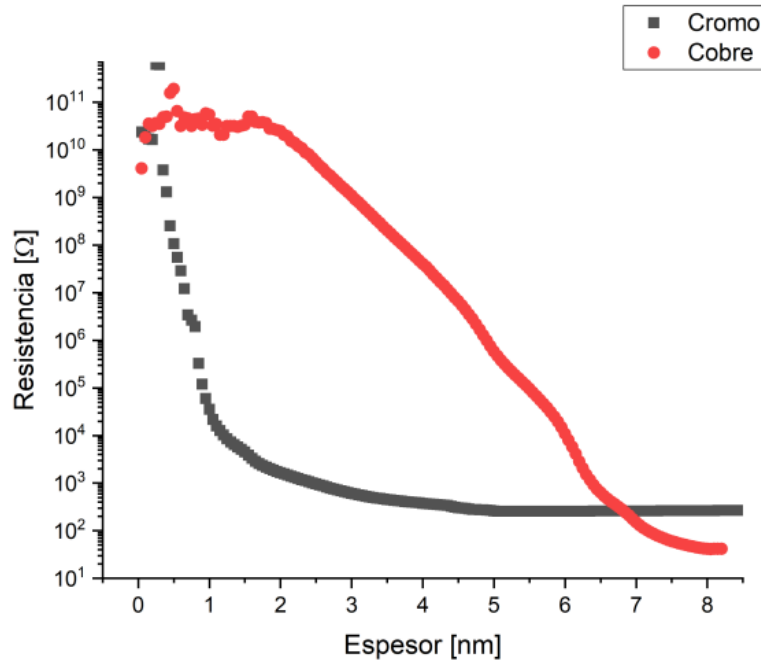


Figura 4.1: Resistencia vs Espesor para cromo (gris) y cobre (rojo). Se puede apreciar que en el cromo la caída de la resistencia es mucho más abrupta, pero que sobre cierto espesor la resistencia del cobre es menor.

En la Figura 4.1 se comparan los resultados obtenidos para películas de cobre, lo que permitió evidenciar diferencias en el mecanismo de crecimiento. Mientras que en metales no-

bles como el cobre el crecimiento ocurre según un modo Volmer–Weber, donde la resistencia alcanza valores bajos solo a mayores espesores, en el caso del cromo la disminución significativa de la resistencia se observa a espesores mucho menores. Esto sugiere que su modo de crecimiento difiere del comportamiento típico de los metales nobles.

Al analizar la resistividad, los autores observaron la presencia de un mínimo alrededor de los 3 nm. Una posible explicación a este comportamiento corresponde al crecimiento tipo Stranski–Krastanov . En este tipo, las primeras capas se forman de manera más ordenada, pero dicho orden se pierde a partir de cierto espesor, dando paso a una estructura granular. Como consecuencia, aunque la resistencia global continúa disminuyendo al aumentar el espesor, la resistividad puede incrementarse debido a la presencia de los granos.

Este comportamiento se complementa con el análisis de percolación eléctrica, donde se reporta que alrededor de 0,9 nm se alcanza la percolación. A ese espesor ya existen caminos que permiten una “conducción metálica”. A partir de ahí, se deberían seguir completando dichos caminos, y luego depositando material sobre ellos.

5. Resultados y Análisis

Para comprender los mecanismos responsables de la baja resistividad observada en películas ultradelgadas de cromo, se empleó el modelo de Mayadas Shatzkes para describir la influencia de la dispersión en los límites de grano sobre la resistividad eléctrica. Como se indica en la ecuación 2.11 el modelo depende explícitamente del tamaño de grano como un parámetro determinante de la resistividad, resulta esencial cuantificar este valor experimentalmente.

En este capítulo se presentan, en primer lugar, los resultados de la caracterización morfológica de las muestras y, posteriormente, el análisis del transporte eléctrico en función de dichos parámetros estructurales.

5.1. Caracterización morfológica

Con el fin de caracterizar la morfología de las muestras, se realizaron mediciones mediante STM. Se eligieron seis espesores entre 1 y 4,1 nm. Para cada espesor se obtuvieron entre tres y ocho imágenes, según la calidad alcanzada en cada medición. A continuación, se presentan las imágenes más representativas para cada espesor.

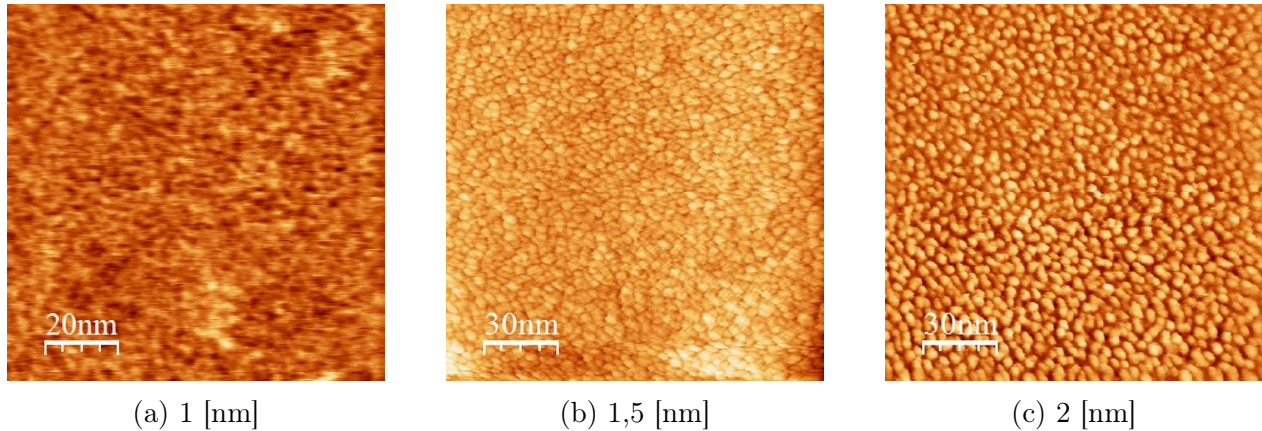


Figura 5.1: Imágenes STM de distintas muestras de cromo con espesores 1, 1,5 y 2 nm.

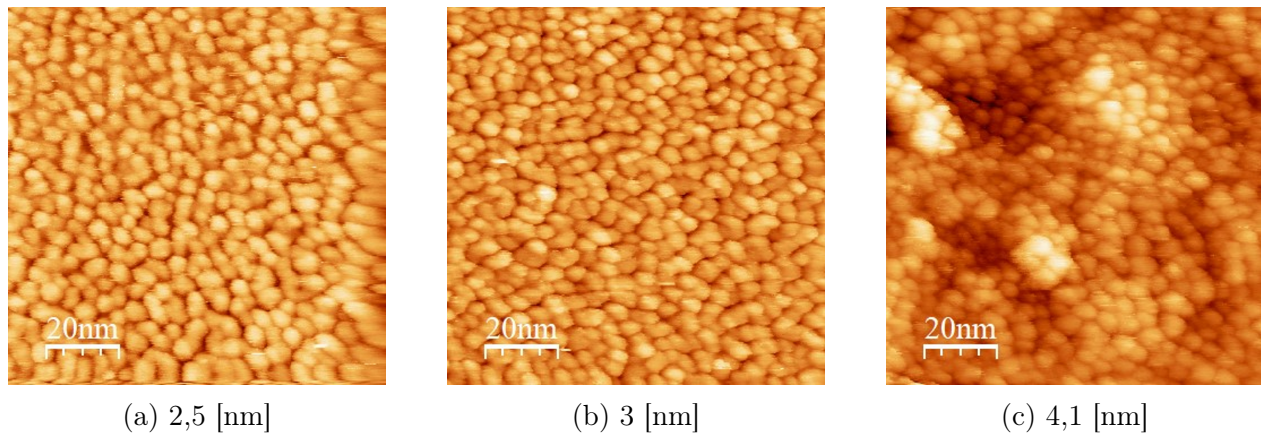


Figura 5.2: Imágenes STM de distintas muestras de cromo con espesores 2,5, 3 y 4,1 nm.

En las figuras 5.1 y 5.2 se observa una morfología granular bien definida, donde el tamaño de los granos aumenta progresivamente con el espesor de la película. Para los menores espesores, la superficie presenta una distribución más uniforme de granos y pequeñas variaciones de altura, como se aprecia en la Figura 5.1a, donde la película de cromo muestra un comportamiento cercano al de una capa continua. De manera similar, en la Figura 5.1b se observan granos bien definidos, pero aún con escasas diferencias de altura entre ellos.

A medida que el espesor aumenta, las diferencias de altura entre los granos se vuelven más evidentes, lo que puede atribuirse tanto al crecimiento lateral como vertical de las estructuras granulares. Al comparar, por ejemplo, las Figuras 5.2b y 5.2c, se observa que en la primera no existen diferencias de altura significativas entre conjuntos de granos, mientras que en la segunda los granos parecen comenzar a crecer unos sobre otros. Este cambio sugiere una transición desde un crecimiento predominantemente desde el sustrato hacia un régimen donde el crecimiento ocurre también sobre granos previamente formados, dando lugar a la formación de conjuntos de granos con mayor relieve y reflejando una evolución progresiva del mecanismo de crecimiento.

5.2. Relación entre diámetro medio de grano y espesor

A partir de las imágenes STM se observa que el tamaño de los granos varía con el espesor de la película. Para cuantificar esta variación, se utilizó el programa ImageJ, mediante el cual se midió el diámetro de los granos siguiendo la metodología descrita en la sección 3.4.1. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.3.

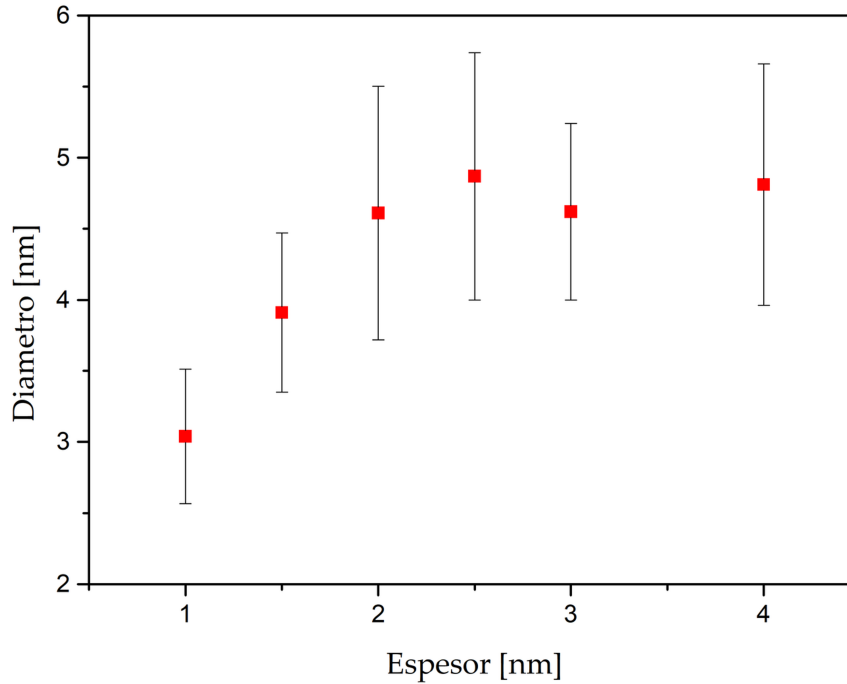


Figura 5.3: Diámetro en función del espesor

El gráfico confirma cuantitativamente lo observado de manera visual en las Figuras 5.1 y 5.2 a medida que el espesor de la película aumenta, también lo hace el diámetro medio de los granos. Asimismo, se observa un cambio en la tendencia entre 2,5 y 3 nm, donde el incremento del diámetro comienza a disminuir, sugiriendo la aproximación a un valor constante. Este comportamiento es coherente con el crecimiento de películas delgadas, ya que el diámetro de grano no aumenta indefinidamente, sino que tiende a estabilizarse una vez alcanzado cierto espesor.

En particular, la muestra de 3 nm presenta un comportamiento ligeramente distinto, alejándose de la tendencia general. Como se mencionó en la sección anterior 4, se reporta un mínimo de resistividad alrededor de este espesor, lo que podría estar relacionado con esta variación en el diámetro promedio de los granos.

Si bien se menciona en [10] que a partir de 3 nm comienzan a aparecer los granos, esto no es completamente consistente con lo observado en nuestras imágenes STM. No obstante, podría estar ocurriendo que el diámetro alcance un valor máximo que marque un cambio en el régimen de crecimiento. En este punto, los granos dejan de crecer lateralmente y comienzan a superponerse, como se aprecia en la Figura 5.2c.

5.3. Relación entre rugosidad superficial y espesor

Por otro lado, ahora que entendemos cómo cambia el diámetro en función del espesor, busquemos analizar cómo las variaciones de altura influyen en el crecimiento de las películas de cromo. Para esto se determinó la rugosidad superficial de las películas utilizando el programa WSxM, y los resultados obtenidos se presentan en la Figura 5.4.

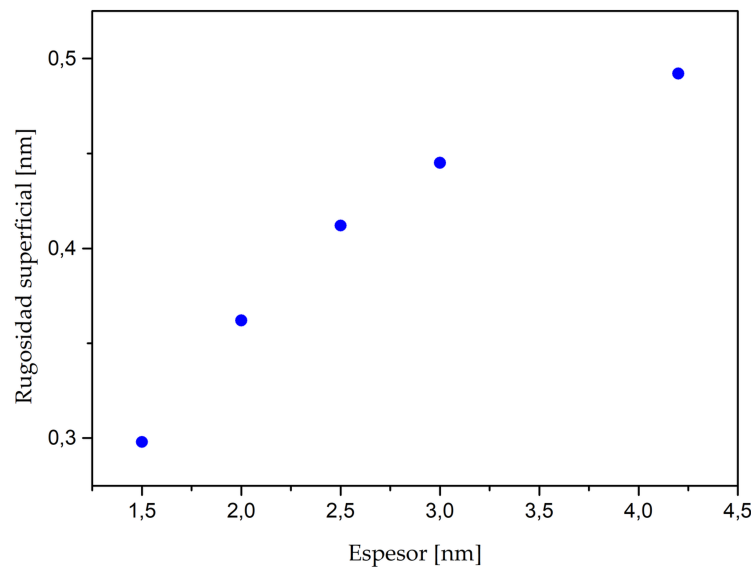


Figura 5.4: Rugosidad superficial en función del espesor

A partir de este gráfico se aprecia una evolución progresiva de la rugosidad superficial con el espesor de la película. Inicialmente, para espesores cercanos a 1 nm, la superficie presenta una rugosidad relativamente baja, lo que sugiere la formación de una capa casi continua. A medida que los granos aumentan su diámetro, también se incrementa la rugosidad superficial, evidenciando un crecimiento progresivo de la estructura.

5.4. Caracterización eléctrica y análisis del transporte eléctrico mediante el modelo de Mayadas Shatzkes

Una vez obtenidas las caracterizaciones eléctrica y morfológica, busquemos comprender el comportamiento del transporte eléctrico en las películas. Para ello, se empleó el modelo de Mayadas y Shatzkes, el cual permite calcular la resistividad total considerando tres mecanismos principales de dispersión de electrones: la dispersión isotrópica de fondo, la dispersión en los límites de grano y la dispersión en las superficies externas. Así se empleó la ecuación 2.11 para distintos valores de R y P , con un camino libre medio de 15,2 nm.

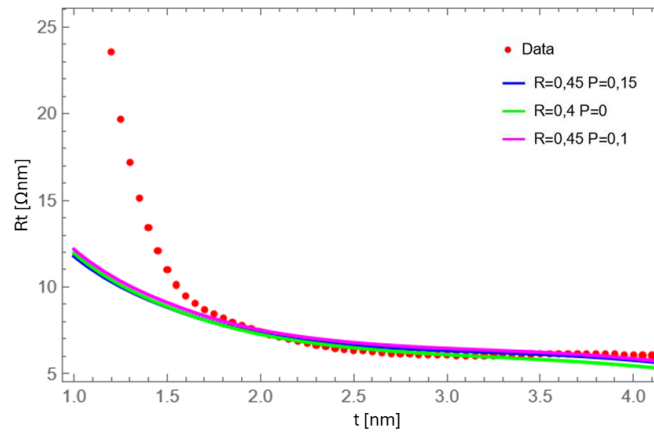


Figura 5.5: Grafica de Rt en función del espesor más el ajuste realizado con el modelo MS. Se presentan los tres ajustes con menor error cuadrático, la curva azul 2,34, la curva verde 5,43 y la curva magenta 3,06

La Figura 5.5 presenta una grafica de Rt vs t , debido a que Rt es proporcional a la resistividad. Se presentan los tres ajustes que exhiben el menor error cuadrático, correspondientes a distintas combinaciones de los parámetros R y P . Cabe destacar que el ajuste no resulta altamente sensible a variaciones moderadas de estos parámetros, ya que cambios en R y P dentro del rango considerado no producen modificaciones drásticas en la forma de la curva ajustada, como se observa en la superposición de los distintos ajustes presentados. Los valores que proporcionaron el mejor ajuste a los datos experimentales fueron $R = 0,45$ y $P = 0,15$. Para facilitar la visualización, en la Figura 5.6 se presenta únicamente la curva correspondiente a este ajuste.

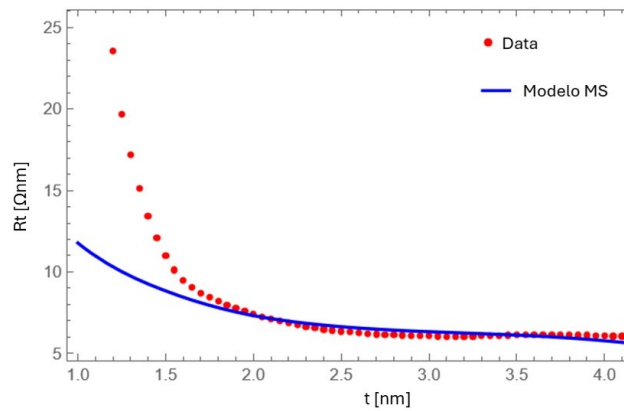


Figura 5.6: Rt en función del espesor más el ajuste con menor error cuadrático realizado con el modelo MS, $R = 0,45$ y $P = 0,15$

Este resultado indica que la probabilidad de reflexión electrónica en los límites de grano es significativamente mayor que la fracción de electrones dispersados en la superficie. En consecuencia, se puede inferir que el mecanismo encargado de generar resistencia es mayoritariamente por el borde de grano.

No obstante, se observa que para espesores extremadamente pequeños el modelo no reproduce adecuadamente los valores experimentales, incluso al variar los parámetros R y P . Este desajuste sugiere que, el transporte eléctrico podría estar influenciado por mecanismos adicionales, como el tunelamiento entre granos.

6. Innovación

La innovación constituye un elemento esencial en el desarrollo científico, tecnológico y social, ya que permite transformar ideas en soluciones. De acuerdo con el Manual de Oslo (OCDE, 2018) [11], la innovación se define como la implementación de un producto, proceso o método organizativo nuevo o significativamente mejorado, que contribuya a mejorar el desempeño de una organización o la calidad de vida de las personas. En la ciencia, innovar implica aplicar el conocimiento adquirido mediante la investigación para resolver problemas reales o generar nuevos avances que impulsen el progreso tecnológico.

Existen diversos tipos de innovación según su naturaleza y propósito. La innovación de producto se refiere a la introducción de productos o servicios nuevos o mejorados, la innovación de proceso corresponde a cambios significativos en los métodos de producción o distribución y la innovación organizacional involucra nuevas formas de gestión o coordinación.

Durante julio de 2025 tuve la oportunidad de participar en el Entrepreneurship Innovation Bootcamp 2025, gracias a Ciencia 2030 y ChileMass, un programa internacional desarrollado en la ciudad de Boston que tuvo como objetivo formar agentes de cambio capaces de integrar la ciencia y la tecnología con la innovación y el emprendimiento. El programa siguió las metodologías de innovación reconocidas internacionalmente, como el Design Thinking y el Lean Startup. A través de estas herramientas se promovió la identificación de problemas, la creación de soluciones creativas, la validación de las propuestas y diseños. Además, durante el desarrollo del Bootcamp, aprendimos a aplicar principios de innovación abierta, gestión de proyectos y comunicación efectiva para transformar una idea inicial en una propuesta concreta. Además de las actividades prácticas, el programa incluyó charlas y talleres dictados por investigadores, emprendedores y mentores de prestigiosas instituciones académicas y empresas tecnológicas. Estas instancias permitieron comprender cómo los avances científicos pueden transformarse en soluciones aplicables y escalables, y cómo la vinculación entre la academia y el sector productivo resulta clave para impulsar la innovación.

Los conocimientos obtenidos de las metodologías de innovación, como la identificación de necesidades, la validación de ideas y el diseño de soluciones, fueron aplicados en esta tesis. El estudio de las películas ultradelgadas de cromo constituye un área de investigación con un alto potencial innovador debido a sus múltiples aplicaciones en la micro y nanoelectrónica, así como en el desarrollo de recubrimientos funcionales y sensores de alta sensibilidad.

Desde una mirada innovadora, este trabajo muestra que podemos repensar completamente cómo se fabrican las películas ultradelgadas metálicas. Metales como el oro o el cobre normalmente crecen en modo Volmer–Weber, lo que significa que en los primeros nanómetros solo aparecen islas separadas y la resistencia eléctrica es muy alta. Sin embargo, en una capa ultradelgada de cromo, ese comportamiento cambia de forma muy marcada. El Cr funciona como una capa inicial que obliga al material que viene encima a crecer de forma más continua, lo que permite obtener conducción a espesores pequeños.

Si bien en la literatura ya se había mencionado que el Cr funciona como surfactante para Au [12] y Cu [13], nunca se había discutido en detalle cuánta cantidad de Cr es realmente útil. A partir de nuestros resultados, queda claro que poner más de 1,5 nm de Cr no aporta nada en términos de conducción y solo aumenta innecesariamente el espesor total. En cambio, las caídas de resistencia más interesantes y que uno busca cuando trabaja con películas ultradelgadas aparecen para espesores por debajo de 1 nm. Esto demuestra que el efecto surfactante del Cr ocurre principalmente en ese rango, y que ahí es donde realmente ayuda a mejorar la continuidad y la cobertura.

En resumen, este comportamiento abre la posibilidad de diseñar películas más delgadas, más uniformes y con mejor conducción usando una mínima cantidad de material. Y eso, justamente, es lo que convierte esta línea de investigación en una oportunidad innovadora.

7. Conclusiones

Las películas de cromo fueron fabricadas exitosamente mediante PVD en condiciones de alto vacío, alcanzando espesores entre 1 y 4,1 nm. Además, se logró caracterizar las muestras mediante STM, sin exponerlas a condiciones ambientales. Para la caracterización morfológica se determinó cuál era el mejor procedimiento para obtener el diámetro de grano y, con ello, analizar las imágenes mediante los programas WSxM e ImageJ, siendo este último el que entregó resultados más representativos.

A partir de los valores de diámetro de grano y rugosidad superficial fue posible comprender cómo crecen estas películas. Inicialmente se forma una capa de aproximadamente 1 nm de cromo, sobre la cual comienzan a aparecer los primeros granos. Conforme estos granos aumentan su diámetro, también lo hace la rugosidad superficial, mostrando un crecimiento progresivo de la estructura.

Desde el punto de vista del transporte eléctrico, la aplicación del modelo de Mayadas y Shatzkes permitió identificar que la dispersión en los límites de grano es el mecanismo dominante en la resistividad de las películas de cromo. Los valores obtenidos, $R=0,45$ y $P=0,15$, muestran que los electrones son reflejados con mucha mayor probabilidad en los límites de grano que en la superficie externa. Si bien el modelo MS reproduce adecuadamente la resistividad en la mayoría del rango estudiado, no logra describir completamente los valores para espesores extremadamente delgados, lo que sugiere que podrían intervenir otros mecanismos como el tunelamiento entre granos.

Finalmente, estos resultados no solo caracterizan el comportamiento eléctrico del cromo en espesores nanométricos, sino que también lo posicionan como un material con un enorme potencial para aplicaciones en nanotecnología. Su capacidad para formar películas continuas y conductoras por debajo de 1 nm, junto con su rol como surfactante metálico, abre una línea clara para el diseño de recubrimientos ultra delgados más uniformes, estables y eficientes.

Bibliografía

- [1] Francisca Marín et al. «Electrical transport during growth, aging and oxidation of copper ultrathin films before percolation». En: *Results in Physics* 19 (2020), pág. 103691. ISSN: 2211-3797. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103691>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211379720321100>.
- [2] J. A. Venables, G. D. T. Spiller y M. Hanbücken. «Nucleation and growth of thin films». En: *Reports on Progress in Physics* 47 (1984), págs. 399-459. DOI: [10.1088/0034-4885/47/4/002](https://doi.org/10.1088/0034-4885/47/4/002).
- [3] K. S. Sree Harsha. *Principles of Physical Vapor Deposition of Thin Films*. 1st. Elsevier, 2006. ISBN: 978-0-08-044699-8. URL: <https://www.sciencedirect.com/book/9780080446998>.
- [4] J. Tersoff y D. R. Hamann. «Theory of the scanning tunneling microscope». En: *Physical Review B* 31.2 (1985), págs. 805-813. DOI: [10.1103/PhysRevB.31.805](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.31.805).
- [5] Steven H. Simon. *The Oxford Solid State Basics*. Oxford, UK: Oxford University Press, 2013. ISBN: 978-0-19-968077-1.
- [6] M. S. P. Lucas. «Electrical Conductivity of Thin Metallic Films with Unlike Surfaces». En: *Journal of Applied Physics* 36.5 (mayo de 1965), págs. 1632-1635. DOI: [10.1063/1.1703100](https://doi.org/10.1063/1.1703100).
- [7] A. F. Mayadas y M. Shatzkes. «Electrical Resistivity Model for Polycrystalline Films: the Case of Arbitrary Reflection at External Surfaces». En: *Physical Review B* 1.4 (1970), págs. 1382-1389. DOI: [10.1103/PhysRevB.1.1382](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.1.1382).
- [8] G. R. Jones, M. Jackson y K. O'Grady. «Determination of grain size distributions in thin films». En: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 193 (1999), págs. 75-78.
- [9] Edwin Fernando Mendoza Carreño y Arturo Plata Gómez. «Análisis de rugosidad y determinación de los desplazamientos en aleaciones de Níquel-Titanio mediante microscopía de fuerza atómica». En: *Innovaciencia* 3.1 (2015), págs. 3-13. DOI: [10.15649/2346075X.360](https://doi.org/10.15649/2346075X.360).

-
- [10] Vicente De La Barra Toloza. «Efecto de la oxidación sobre el transporte eléctrico y morfología de películas ultradelgadas de cobre y cromo». En: (2022). Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Física.
- [11] OECD y Eurostat. *Manual de Oslo: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation (4th Edition)*. Paris: OECD Publishing, 2018. DOI: [10.1787/9789264304604-en](https://doi.org/10.1787/9789264304604-en). URL: <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>.
- [12] R. Henriquez et al. «Effect of a metallic surfactant on the electrical percolation of gold films». En: (). DOI: doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.347.
- [13] Gabriel Gray San Martín. «Adsorción de tioles y su efecto sobre el transporte eléctrico de películas ultradelgadas de cobre». Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias, Mención Física. Valparaíso, Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, 2020.