

Deposición y caracterización de películas delgadas de W depositadas mediante evaporación térmica

Deposition and characterization of W thin films deposited by thermal evaporation

Leonid Ipaz¹
Nicole Arias²
Gijana Moreno³
Juan David Copete-Viatela⁴
Juan David Ipaz-Sabogal⁵

¹Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: lmipaz@sena.edu.co
orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9647-4707>

²Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: nicolejass45@gmail.com

³Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: gijana234@gmail.com

⁴Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia).
Correo electrónico: jhondavidcopete373150@gmail.com

⁵Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA, Colombia). Correo electrónico: vaporeom.agua@gmail.com

Recibido: 08-09-2023 Aceptado: 12-12-2023

Cómo citar: Ipaz, Leonid; Arias, Nicole; Moreno, Gijana; Copete-Viatela, Juan David; Ipaz-Sabogal, Juan David (2023). Deposición y caracterización de películas delgadas de W depositadas mediante evaporación térmica. *Informador Técnico*, 87(2), 165-176. <https://doi.org/10.23850/22565035.5894>

Resumen

El tungsteno (W) ha sido de gran importancia en la industria, debido a su estabilidad química y propiedades mecánicas, lo que ha permitido que sea usado en una amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, en la literatura, la mayoría de los reportes de investigación se enfocan en su interacción con otros elementos, formando aleaciones en compuestos tales como el semicarburo de tungsteno W_2C y carburo de tungsteno WC. El W, en forma de película y sin aleantes, no es reportado ampliamente en la literatura, por lo cual se hace pertinente este trabajo de investigación, enfocado en el estudio de la naturaleza estructural y morfológica de películas de W, depositadas sobre sustratos de vidrio y silicio (100) por medio de evaporación termoresistiva a diferentes valores de corriente. La naturaleza estructural de las capas se estudió usando difracción de rayos-X (XRD), identificando las reflexiones características de la estructura cristalina del W en los planos (110), (200) y (211), encontrando que no hay influencia de la corriente aplicada sobre la estructura cristalina de las capas. Las características morfológicas de las capas fueron estudiadas usando microscopía de fuerza atómica (AFM), encontrando una relación directa entre la corriente aplicada y los valores de rugosidad y tamaño de grano, el espesor de las capas varió entre 210 y 260 nm. Mediante microscopía electrónica de barrido se logró verificar la alta densificación de las capas depositadas. Esta investigación logró demostrar la posibilidad de depositar capas delgadas usando la técnica de evaporación termoresistiva, en las cuales se conserva la naturaleza estructural del material del bloque. Este tipo de películas, según la literatura consultada, podrían ser usadas en la fabricación de interconexiones en microprocesadores (Lee *et al.*, 2019).

Palabras clave: difracción; morfología; películas delgadas; tungsteno; estructura cristalina; microscopía de fuerza atómica; deposición por evaporación térmica; procesos PVD.

Abstract

Tungsten (W) has been of great importance in the industry due to its chemical stability and mechanical properties, which have allowed W to be used in a wide range of applications. However, in the literature most of the research reports focus on the interaction of tungsten with other elements, forming alloys in compounds such as W_2C and WC. Tungsten (W) in the form of a film and without alloys is not presented in the literature, so this research work focused on the study of the structural and morphological nature of W films deposited on to glass and silicon (100) substrates by thermo-resistive evaporation at different current values. The structural nature of the layers is studied using X-Ray Diffraction (XRD) identifying the characteristic reflections of the crystalline structure of W in the (110), (200), and (211) planes, where it was found that there is no influence of the current applied to the crystalline structure of the layers. The morphological characteristics of the layers were studied using Atomic Force Microscopy (AFM), finding a direct relationship between the applied current and the values of roughness and grain size, the thickness of the layers varied between 210 and 260 nm. Using scanning electron microscopy, the high densification of the deposited layers will be verified. This research managed to demonstrate the possibility of depositing thin films using the thermo-resistive evaporation technique in which the structural nature of the block material is preserved. These type of films, according to the literature consulted, could be used in the manufacture of interconnections in microprocessors (Lee *et al.*, 2019).

Keywords: diffraction; morphology; thin films; tungsten; crystal structure; atomic force microscopy; thermal evaporation deposition; PVD process.

1. Introducción

El tungsteno (W) es un material de gran importancia en la industria, debido a su estabilidad química y propiedades mecánicas, lo cual ha permitido manufacturarlo con distintos procesos y usarlo en una amplia gama de aplicaciones. Actualmente, el tungsteno se puede aplicar en bloque o en forma de película delgada (Lee *et al.*, 2019). Es así como lo encontramos en los componentes de los transistores de capa fina, y en pantallas LCD y OLED, cuando se requieren formatos de pantallas grandes, nitidez de imagen alta y contrastes optimizados, también se puede encontrar en sistemas de filtros de ondas acústicas de superficie y de masa.

La fabricación de películas delgadas de metales tiene como primera referencia a Egipto, 3000 a. C., cuando se usó el oro para decorar y recubrir distintos tipos de artefactos y estatuas (Greene, 2014). Milenios después, la creación de la tecnología del vacío, las teorías de la electricidad y el magnetismo generaron las condiciones perfectas para la fabricación de películas delgadas de distintos materiales, entre ellos, el tungsteno.

Generalmente, las capas delgadas de W se obtienen mediante métodos de pulverización catódica, tales como magnetron *sputtering*, HiPIMS o ALD (Wang *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2021; Potin *et al.*, 2022), los cuales implican montajes experimentales costosos, debido al número de parámetros del proceso a controlar. La técnica de evaporación térmica es un proceso de deposición física en fase vapor (PVD), el cual se realiza normalmente en alto vacío, y surge como un método alternativo para sintetizar capas delgadas (Park *et al.*, 1988; Shapoval *et al.*, 1990; Bradbury; Kamis, 1986). De esta manera, se puede garantizar que los átomos o las moléculas alcancen el sustrato con un mínimo de colisiones dentro de una cámara de vacío. En términos de técnicas de fabricación de películas delgadas, la evaporación térmica es la más simple y antigua (Faraday, 1857; Seshan, 2012; Acosta, 2015).

El material para evaporar es dispuesto sobre una fuente de evaporación, la cual es calentada junto con el material, por medio de una corriente eléctrica que puede ser generada de distintas formas, por ejemplo, una resistencia directa, radiación, corrientes parásitas, haz de electrones, radiación láser o descarga por arco. En evaporación térmica se pueden presentar procesos de sublimación, esto es cuando un sólido pasa directamente

a fase vapor y vaporización, cuando desde la fase líquida se pasa a fase vapor, el cual se expande en el interior de la cámara de vacío para luego condensarse sobre la superficie de un sustrato que se encuentra a una temperatura menor.

La evaporación de un metal bajo condiciones de vacío encierra conceptos termodinámicos, tales como transiciones de fase y presiones de equilibrio en fase vapor, además de conceptos de cinética de nucleación y crecimiento. Lo anterior es fundamental en el desarrollo de la microestructura de la película depositada. El entendimiento teórico del proceso de evaporación está fundamentado en la teoría cinética de los gases (Zalar, 1986), la cual era muy bien conocida por Hertz, Knudson y Langmuir, quienes fueron los primeros científicos en desarrollar la teoría de la evaporación (Frey, 1970).

El método de deposición utilizado en esta investigación fue la evaporación termoresistiva, usando evaporadores recubiertos de cerámica. Este proceso es el más utilizado para evaporar metales, y consiste en hacer circular, a través de un material, una corriente eléctrica y, de esta manera, generar el calentamiento hasta la evaporación de este (Watts, 1991; Ruisinger; Mossner, 1991; Baxter, 1993; Glocker, 1998). En esta investigación se realizó un estudio de caracterización primario de películas delgadas de W, las cuales fueron depositadas sobre sustratos de silicio y vidrio, con el fin de estudiar la influencia de la corriente continua (DC) aplicada sobre las propiedades estructurales y morfológicas de las capas, usando las técnicas de difracción de rayos X (XRD), microscopía de fuerza atómica (AFM) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

2. Materiales y metodología

Las películas fueron depositadas sobre sustratos de vidrio y silicio monocristalino con orientación (100), mediante evaporación termoresistiva, con una fuente de corriente TDK-LAMBDA 8-400. Se utilizaron piezas de tungsteno (W) en forma de pellets al 99,95 % de pureza, de la marca Kurt J. Lesker. La distancia entre la fuente de evaporación y el sustrato fue de 20 cm, los sustratos se limpiaron usando un baño ultrasónico UCP-20 de la firma Lab Companion, durante 30 minutos, en modo pulsado, con alcohol isopropílico. Las películas se depositaron con tres valores corriente DC diferentes: 400, 410 y 420 A, teniendo en cuenta que 400 A fue el límite inferior a partir del cual se generó la evaporación, y 420 A es el límite de corriente de la fuente utilizada. Se usaron evaporadores recubiertos de alúmina en una cámara hermética de acero inoxidable. Con la ayuda de una bomba turbomolecular, se alcanzó una presión de fondo de 10^{-6} Torr. Para cada evaporación se utilizó una masa de 0,1500 g de W, y la presión de trabajo fue de 10^{-5} Torr.

La Figura 1 muestra un diagrama del sistema de evaporación utilizado y sus partes. El proceso de calentamiento se realizó aplicando al evaporador, corriente DC lentamente y de manera gradual hasta alcanzar los valores de corriente antes citados para cada una de las muestras, que permanecieron constantes durante aproximadamente 30 segundos, hasta que se generó el proceso de evaporación. Finalmente, se disminuyó gradualmente la corriente hasta apagar la fuente, se apagó el sistema de vacío, se despresurizó la cámara y se extrajeron las muestras para su posterior caracterización. Se depositaron 4 muestras testigo de cada condición evaluada, con el fin de tener mayor confiabilidad en los análisis de resultados del proceso de caracterización.

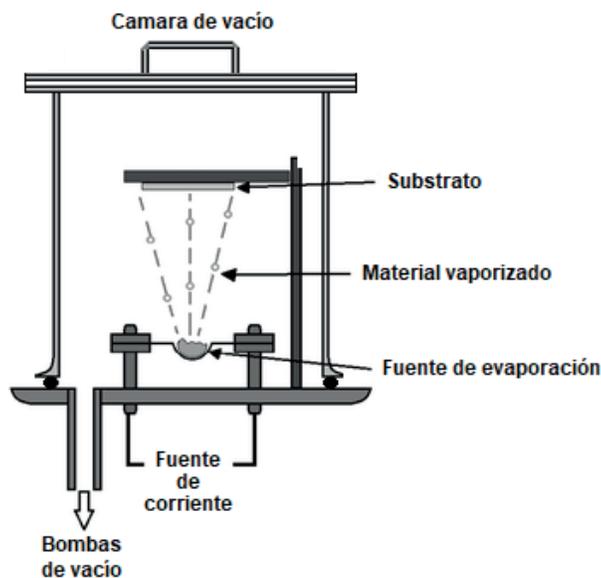


Figura 1. Diagrama del evaporador térmico y sus partes
Fuente: elaboración propia.

2.1. Caracterización de las películas

Las películas depositadas sobre sustratos de vidrio se utilizaron para realizar la caracterización estructural, y las depositadas sobre silicio (100) para la caracterización morfológica. Los sustratos de vidrio fueron seccionados usando una punta de tungsteno, y los sustratos de silicio fueron seccionados por clivaje, teniendo en cuenta su orientación cristalina, hasta obtener muestras aproximadamente cuadradas de 1 cm de lado, esto con el fin de cumplir con las condiciones de tamaño de muestra para los diferentes sistemas de caracterización.

2.1.1. Difracción de rayos X (XRD)

Para determinar la naturaleza cristalina de las películas depositadas, se utilizó un difractómetro X'Pert PRO MRD de PANalytical usando una fuente de cobre con una longitud de onda en la línea $K\alpha_1$ de $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$. Los ensayos se realizaron usando la geometría Bragg-Brentano, con un barrido de 10 a 90 grados en muestras depositadas sobre sustratos de vidrio.

2.1.2. Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

Para estudiar el tamaño de grano y la morfología de las películas a escala nanométrica, se utilizó un microscopio de fuerza atómica MFP-3D de Asylum Research, con puntas de silicio sin recubrimiento, referencia AC240TS de la firma Oxford Instruments, en modo "no contacto". Las muestras evaluadas fueron depositadas sobre sustratos de silicio monocristalino (100), con el fin de minimizar la influencia de la rugosidad del sustrato sobre las películas.

2.1.3. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Para estudiar la morfología de las películas depositadas, se utilizó un microscopio de barrido electrónico NeoScope JCM-5000, las muestras fueron seccionadas y recubiertas con una fina capa de oro mediante un sistema de sputtering Cressington *Sputter Coater* 108 Auto, con el fin de garantizar una buena conductividad en la superficie y alta calidad de la imagen.

3. Resultados y análisis

3.1. Difracción de rayos X (XRD)

Para evaluar el efecto de la corriente aplicada sobre la estructura cristalina de las películas de W depositadas, se usaron tres valores de corriente. En la Figura 2, se muestran los difractogramas de rayos X obtenidos para las muestras depositadas a 400, 410 y 420 A. Luego del proceso de indexación, se logró identificar las reflexiones características del tungsteno a $40,416^\circ$, $58,357^\circ$, $73,339^\circ$ y $86,907^\circ$, usando la carta JCPDF: 00-001-1203, correspondiente a la estructura BCC del tungsteno. Las líneas punteadas corresponden a los ángulos de las reflexiones para la estructura cristalina teórica, se logran asociar a los planos cristalinos de la estructura BCC (110), (200), (211) y (220), respectivamente. Resultados similares fueron reportados (Potin *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022) para capas depositadas por técnicas PVD. El análisis de los diferentes difractogramas mostró que no hay variaciones en la estructura cristalina de las películas por efecto de la corriente aplicada, y la dirección (200) se conserva en todos los casos como dirección preferencial de crecimiento.

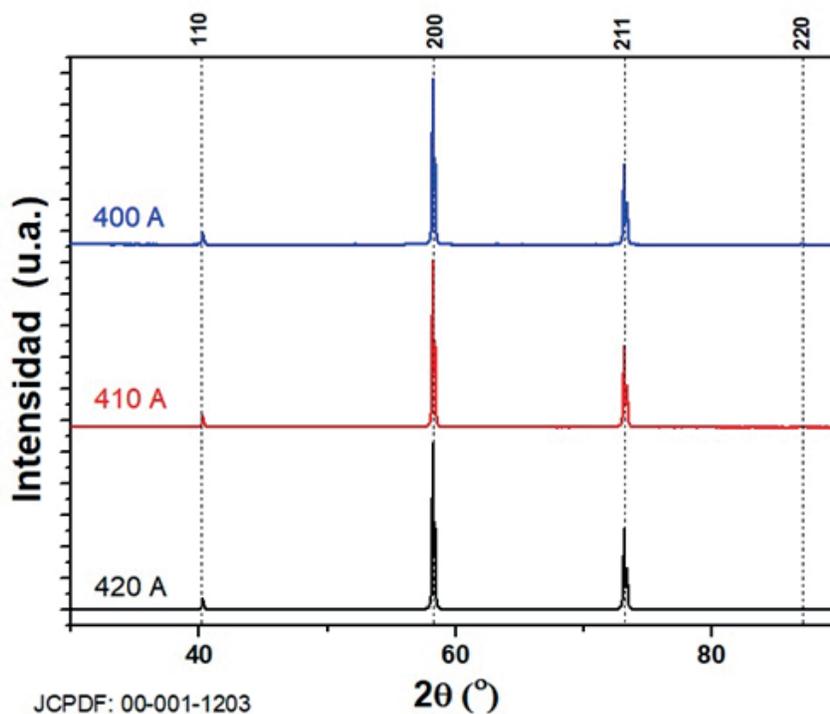


Figura 2. Difractogramas de las películas de tungsteno depositadas a diferentes valores de corriente, 400, 410 y 420 A
Fuente: elaboración propia.

Usando el software X'Pert PRO, se realizaron los cálculos de los parámetros de red de la estructura cristalina BCC, propia del tungsteno, con grupo espacial Im3m, correspondiente a las capas depositadas, encontrando valores muy similares a los reportados por la literatura para este tipo de material. Adicionalmente, usando el pico de mayor intensidad asociado al plano (200), se realizó el cálculo del tamaño de cristalito para cada uno de los difractogramas, utilizando la ecuación de Scherrer (Patterson, 1939) (Ecuación 1. Ecuación de Scherrer).

$$Dv = \frac{K \lambda}{\beta(\cos\theta_B)} \quad (1)$$

Donde:

Dv: Tamaño de cristalito

K = 0,94

$\lambda_{K\alpha Fe} = 1,5406 \text{ \AA}$

θ_B = Ángulo de Bragg

β = Ancho medio del pico FWHM

Para este cálculo, se ajustó el pico de mayor intensidad a una función gaussiana, con el fin de determinar el ancho del pico a media altura, conocido como FWHM (*full width high maximum*), usando el software Origin Pro 9.0. El ángulo de Bragg $2\theta_B$ utilizado fue 58,357 grados, la longitud de onda de la radiación usada en los ensayos fue $\lambda_{Fe} = 1,5406 \text{ \AA}$ en la línea $K\alpha 1$ del hierro, K es la constante de Scherrer que, para el caso de estructuras simétricas cúbicas, toma el valor de 0,94. En la Tabla 1 se muestran los parámetros utilizados para los cálculos y los tamaños de cristalito y parámetros de red encontrados. Los resultados muestran que el tamaño de cristalito tiende a aumentar con la corriente aplicada al proceso, y esto está íntimamente relacionado con la temperatura, cuando esta se incrementa, se genera mayor movilidad atómica y mayor difusión superficial, con lo cual se promueve el crecimiento de los cristalitos. Estos fenómenos fueron reportados por Sundgren y Cheng, en investigaciones similares con capas generadas por procesos PVD (Al-Kuhaili *et al.*, 2023; Cheng *et al.*, 2002). El parámetro de red no muestra mayores desviaciones del valor teórico 3,1550 Å, esto es comprensible debido a que el material usado es de alta pureza.

Tabla 1. Tamaños de cristalito y parámetros de red calculados

Corriente (A)	β FWHM	Tamaño de Cristalito (nm)	Parámetro de red (Å)
420	0,261230	36,379	3,156
410	0,296830	32,016	3,151
400	0,312590	30,402	3,153

Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que la naturaleza cristalina de las películas, es decir, la estructura BCC del tungsteno en bloque, se conserva en forma de película delgada. Lo anterior fue comprobado usando en software CaRIne V3.1, usando los parámetros estructurales para el tungsteno (W) mostrados en la Tabla 2. Con dichos parámetros se simuló la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) del tungsteno, mostrada en la Figura 3 (a) y su patrón de difracción, Figura 3 (b). Al comparar el patrón de difracción simulado con los difractogramas experimentales de las capas, se observa que las reflexiones características de los planos (110), (200) y (211), asociados a la estructura BCC simuladas, coinciden con las reflexiones teóricas marcadas con líneas punteadas en la Figura 1, lo cual es evidencia que la naturaleza cristalina del material en bloque se conserva en las películas depositadas.

Tabla 2. Parámetros de la estructura cristalina BCC del tungsteno

Material	Fuente de datos	Radio iónico (Å)	Estructura cristalina	Grupo espacial	Parámetro de red (a0) (Å)
Tungsteno	AMCSD (American Mineralogist Crystal Structure Database)	0,60	BCC	Im3m	0,3155

Fuente: elaboración propia.

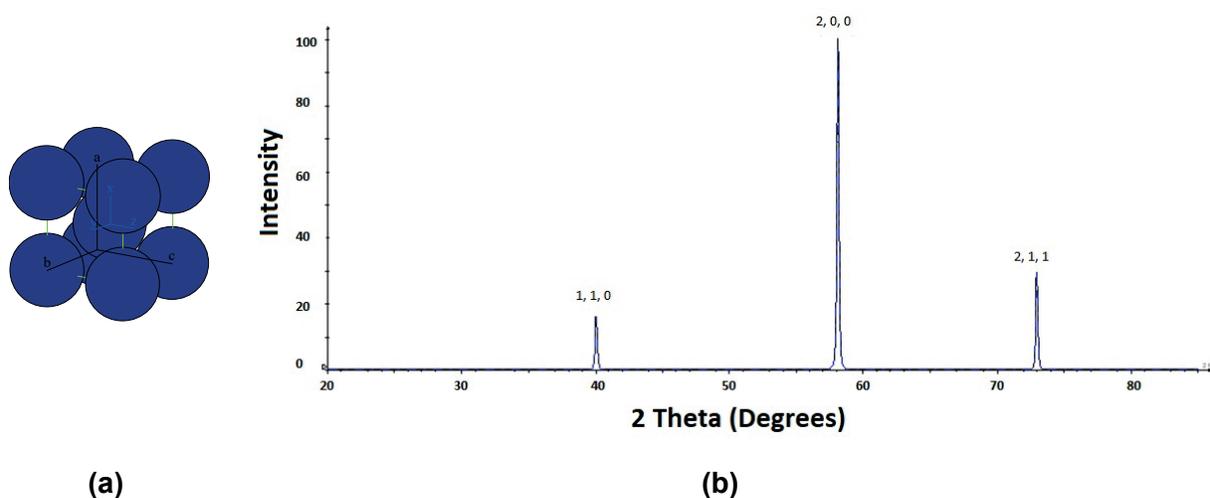


Figura 3. (a) Estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) propia del Tungsteno, (b) Patrón de difracción del tungsteno simulado en el software CaRIne V3.1.

Fuente: elaboración propia

3.2. Microscopía de Fuerza Atómica (AFM)

La morfología de las películas de W depositadas sobre sustratos de silicio monocristalino (100) se estudió con microscopía de fuerza atómica (AFM) en modo no contacto, con un área de barrido de $5 \mu\text{m}^2$. En la Figura 4, se pueden observar imágenes de AFM en 2D y 3D para las diferentes películas depositadas, en todos los casos se observa una microestructura granular típica del crecimiento de grano columnar, como las reportadas en literatura (Agudelo *et al.*, 2013; Hsiao *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2022; Grünwald *et al.*, 2015; Lu *et al.*, 2019). Se logró calcular la rugosidad y el tamaño de grano para varias muestras analizadas, los resultados son resumidos en la Tabla 3. Se encontró que, con el aumento de la corriente aplicada, los valores de rugosidad y tamaño de grano aumentaron hasta valores máximos de 24 y 98 nm, respectivamente. En general, la morfología de las capas depende en gran medida de la temperatura del proceso y, en nuestro caso, está directamente relacionada con la corriente aplicada: a mayor corriente, mayor energía térmica, que proporciona mayor difusión atómica para el crecimiento de los granos. Este tipo de crecimiento en función de la temperatura es descrito en el diagrama de Thornton, donde se establece la relación de la temperatura del proceso y la presión sobre la dinámica de crecimiento de los granos (Albella, 2003). Este comportamiento es coherente con los resultados encontrados con difracción de rayos X, en donde el crecimiento de los cristalitas depende directamente de la corriente aplicada.

En la literatura se reportan estudios morfológicos similares de capas basadas en tungsteno, donde hay una fuerte influencia de la temperatura sobre los parámetros morfológicos de las capas (Al-Kuhaili *et al.*, 2023; Agudelo; Restrepo, 2011).

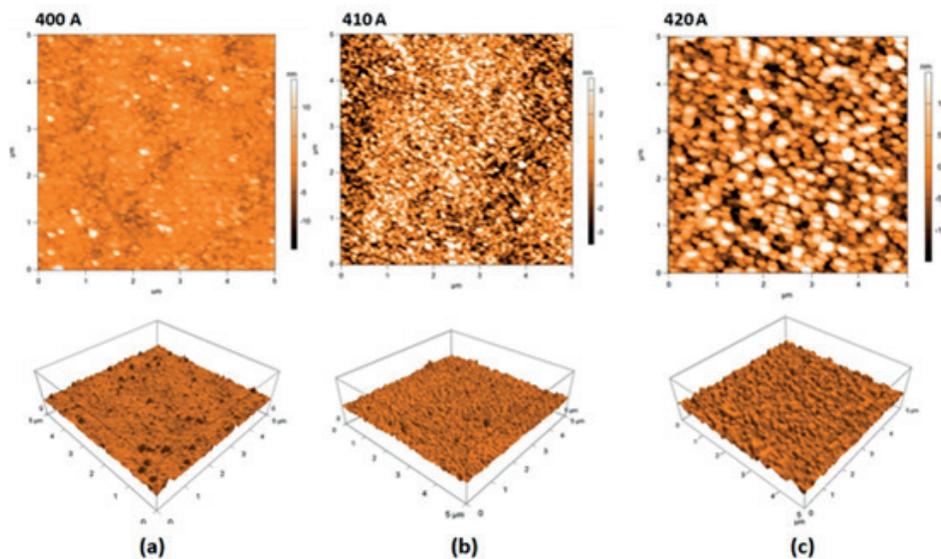


Figura 4. Imágenes de AFM en 2D y 3D

Nota. Imágenes para las películas de W depositadas a diferentes valores de corriente aplicada, (a) 400 A, (b) 410 A, (c) 420 A.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Valores de rugosidad, tamaño de grano y espesor de las capas depositadas a diferentes valores de corriente aplicada

Corriente (A)	Rugosidad (± 1 nm)	Tamaño de grano (± 1 nm)	Espesor (± 1 nm)
400	9	72	240
410	14	87	210
420	24	98	230

Fuente: elaboración propia.

El espesor de las películas depositadas fue estimado usando AFM en zonas donde el substrato estaba descubierto intencionalmente para este fin. Se realizaron barridos de $3 \mu\text{m}^2$ en distintas zonas, para que los resultados sean más representativos, luego se construyeron 6 perfiles en cada muestra con ayuda del software del microscopio, y se calculó el espesor promedio de cada una de las muestras. En la Figura 5 se puede apreciar una imagen en 2D de una de las muestras, su reconstrucción en 3D y uno de los perfiles usados para realizar los cálculos. Los valores del espesor de las películas se muestran en la Tabla 1, y oscilan entre 210 y 240 nm. No se encontró una relación con la corriente aplicada.

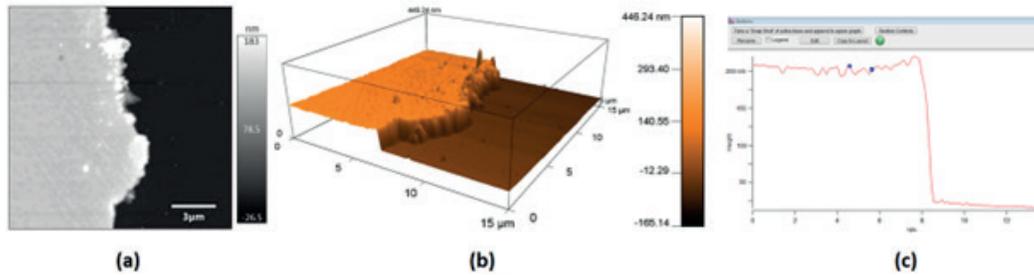


Figura 5. Imágenes usadas para realizar los cálculos del espesor de las películas de W

Nota. (a) Imagen en 2D, (b) imagen en 3D y (c) perfil.

Fuente: elaboración propia

3.3. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) se estudió la morfología a escala microscópica de las películas de W depositadas, a diferencia de lo observado por microscopía de fuerza atómica, donde el área de barrido fue mucho más pequeña, $5 \mu\text{m}^2$. Mediante SEM, con un área de barrido aproximada de $70 \mu\text{m}^2$ se observa que todas las muestras presentan una superficie libre de defectos (ver Figura 6), lo cual evidencia una alta densificación de las películas, además no se observan procesos de delaminación, lo cual muestra que los parámetros usados en el proceso de deposición son adecuados. La calidad superficial de las películas es comparable con otras películas depositadas, usando otros procesos diferentes a la evaporación térmica (Potin *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2021; Wang *et al.*, 2022; Grünwald *et al.*, 2015).

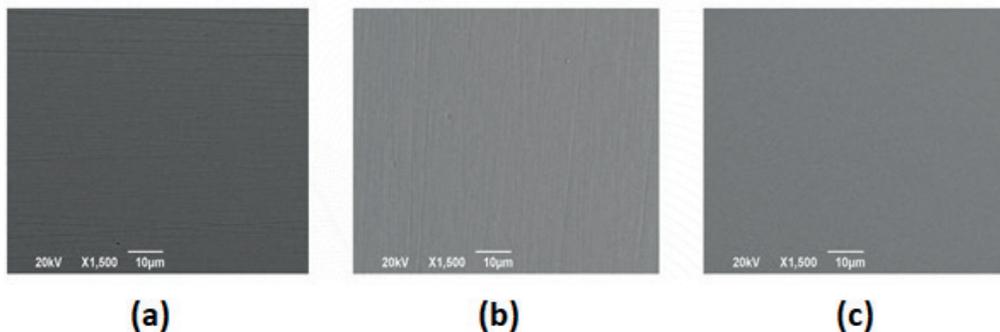


Figura 6. Imágenes de microscopía electrónica de barrido para las películas de W depositadas

Nota. Valores de corriente de (a) 400 A, (b) 410 A y (c) 420 A.

Fuente: elaboración propia.

Este estudio de caracterización primaria sirve de apoyo para futuros trabajos que puedan llevar a la aplicación de las películas delgadas de tungsteno como una nueva generación de metales en interconexiones para circuitos integrados, como se ha planteado en la literatura (Lee *et al.*, 2019). Adicionalmente, surge la posibilidad de evaluar a futuro propiedades mecánicas y electroquímicas de estas capas, teniendo en cuenta que este tipo de propiedades están íntimamente relacionadas con los parámetros estructurales y morfológicos de las capas.

4. Conclusiones

Se logró depositar exitosamente películas de W sobre sustratos de vidrio y silicio monocristalino (100). Los resultados de difracción de rayos X mostraron que no hay variaciones en la estructura cristalina de las capas por efectos de la corriente aplicada. Además, la estructura cristalina BCC del material en bloque se conserva en forma de película. Se logra identificar las reflexiones características del tungsteno a $40,416^\circ$, $58,357^\circ$, $73,339^\circ$ y $86,907^\circ$, asociadas a los planos cristalinos de la estructura BCC (110), (200), (211) y (220), respectivamente..

El tamaño de cristalito de las capas depende directamente de la corriente aplicada en el proceso de deposición, y los parámetros de red mostraron pocas variaciones del valor teórico, $3,1550 \text{ \AA}$.

El análisis por medio de microscopía de fuerza atómica (AFM) muestra un aumento de la rugosidad y el tamaño de grano cuando se aumenta la corriente, esto puede estar asociado a que, con una corriente mayor, la cinética del proceso de deposición se hace más energética.

Los ensayos de microscopía electrónica de barrido evidencian, a microescala, una superficie homogénea y alta densificación en todas las capas sin una variación apreciable, además no hay evidencia de porosidad ni de procesos de delaminación en las películas.

Agradecimientos

Los autores agradecen el valioso apoyo del personal de las líneas de nanotecnología y diseño del Tecnoparque, nodo Cali.

Referencias

- Acosta, Gabriel (2015). *Formación de capas moleculares en superficies* [Tesis de pregrado]. Universidad Tecnológica Metropolitana.
- Agudelo, Liliam; Restrepo, Elisabeth (2011). *Síntesis y estudio del comportamiento de bicapas de tungsteno, carburo de tungsteno (W/WC) obtenidas por la técnica sputtering DC* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Agudelo, Liliam; de la Roche, Jhonattan; Escobar, Daniel; Ospina, Rogelio; Restrepo, Elisabeth (2013). Substrate heating and post-annealing effect on tungsten/tungsten carbide bilayers grown by non-reactive DC magnetron sputtering. *Ceramics International*, 39(7), 7355-7365.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.02.075>
- Albella, José (2003). *Láminas Delgadas y Recubrimientos. Preparación, Propiedades y Aplicaciones*. CSIC Press.
- Al-Kuhaili, Mohammad; Qahtan, Talal; Mekki, Mogtaba (2023) Temperature-dependent electrical resistivity of tungsten oxide thin films. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 182, 111607.
<https://doi.org/10.1016/j.jpics.2023.111607>
- Baxter, Ilich (1993). Advanced Resistance Deposition Technology for Productive Roll Coating. En *Proceedings of the 36th Annual Technical Conference* (p. 197). Society of Vacuum Coaters.

- Bradbury, David; Kamis, Ted (1986). Effect of Insulator Surface on Selective Deposition of CVD Tungsten Films. *Journal of The Electrochemical Society*, 133(6), 1214-1217.
- Cheng, Yuhang; Tay, Beng-Kang; Lau, Shu-Ping (2002). Influence of deposition temperature on the structure and internal stress of TiN films deposited by filtered cathodic vacuum arc. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum Surfaces and Films*, 20(4), 1270-1274.
<https://doi.org/10.1116/1.1481043>
- Faraday, Michael (1857). Experimental relations of gold (and other metals) to light. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 147(1857), 145-181.
- Frey, Hartmut (1970). Vacuum Evaporation. En Frey, Hartmut; Khan, Hamid (Eds.), *Handbook of Thin Film Technology* (pp. 13-71). McGraw-Hill.
- Glocker David (1998). *Handbook of Thin Film Process Technology* (1st ed.). CRC Press.
- Greene, Joseph (2014). Tracing the 5000-year recorded history of inorganic thin films from 3000 BC to the early 1900s AD. *Applied Physics Reviews*, 1(4), 041302.
<https://doi.org/10.1063/1.4902760>
- Grünwald, Eva; Nuster, Robert; Treml, Ruth; Kiener, Daniel; Paltauf, Guenther; Brunner, Roland (2015). Young's Modulus and Poisson's Ratio Characterization of Tungsten Thin Films Via Laser Ultrasound. *Materials Today: Proceedings*, 2(8), 4289-4294.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.09.015>
- Hsiao, Yu-Jen; Nagarjuana, Yempati; Huang, Guo-Yu; Lin, Meichun (2023). Preparation of tungsten-doped zinc oxide thin films by co-sputtering for micro-gas sensing devices. *Journal of Alloys and Compounds*, 960, 170567.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170567>
- Lee, Soo-Jung; Kim, Tae-Hyung; Jeong, Byeong-Hwa; Kim, Kyong-Nam; Yeom, Geun-Young (2019). Properties of tungsten generation interconnect metal. *Thin Solid Films*, 674, 64-70.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.01.051>
- Lee, Yujin; Seo, Seunggi; Nam, Taewook; Lee, Hyunho; Yoon, Hwi; Sun, Sangkyu; Oh, Il-Kwon; Lee, Sanghun; Shong, Bonggeun; Seo, Jin-Hyung; Seok, Jang-Hyeon; Kim, Hyungjun (2021). Growth mechanism and electrical properties of tungsten films deposited by plasma-enhanced atomic layer deposition with chloride and metal organic precursors. *Applied Surface Science*, 568, 150939.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150939>
- Lu, Yimin; Huang, Guojun; Cheng, Yong; Wang, Sai; Mi, Chaowei; Wei, Shangfang; Tian, Fangtao; Guo, Yanlong (2019). Tribological and adhesive properties of the tungsten-doped diamond-like carbon film prepared by double lasers deposition. *Diamond and Related Materials*, 99, 107534.
<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2019.107534>
- Park, Heung-Lak; Park, Chong-Do; Chun, John (1988). The Deposition Mechanisms and Microstructures of Tungsten Films Produced by Silicon Reduction of WF₆. *Thin Solid Films*, 166, 37-44.
[https://doi.org/10.1016/0040-6090\(88\)90364-1](https://doi.org/10.1016/0040-6090(88)90364-1)
- Patterson, Arthur (1939). The Scherrer Formula for X-Ray Particle Size Determination. *Physical Review Journals*, 56(10), 978-982.

- Potin, Valérie; Boukhalfa, Housseem; Martin, Nicolas (2022). Oblique angle co-deposition of nanocolumnar tungsten thin films with two W sources: Effect of pressure and target current. *Materials Chemistry and Physics*, 281, 125864.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125864>
- Ruisinger, Bernd; Mossner, Brigitte (1991). Evaporation Boats—Properties, Requirements, Handling, and Future Development. En *Proceedings of the 34th Annual Technical Conference* (p. 335). Society of Vacuum Coaters.
- Seshan, Krishna (2012). *Handbook of thin film deposition*. William Andrew.
- Shapoval, Sergei-Yu; Balvinskii, O. E.; Malikov, I. V.; Chumakov, Alexander; Niselson, L. A. (1990). Chemical Vapor Deposition Tungsten Layers at Low Substrate Temperature. *Applied Surface Science*, 45(3), 257-262.
[https://doi.org/10.1016/0169-4332\(90\)90008-N](https://doi.org/10.1016/0169-4332(90)90008-N)
- Wang, Ziwei; Balogun, Oluwaseyi; Kim, Yun-Young (2022). Nanomechanical property evaluation of tungsten thin film via frequency-domain photoacoustic microscopy. *Thin Solid Films*, 742, 139050.
<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2021.139050>
- Watts, Idan (1991). 20 years of Resistant Source Development. En *Proceedings of the 34th Annual Technical Conference* (p. 118). Society of Vacuum Coaters.
- Zalar, Anton (1986), Auger electron spectroscopy depth profiling during sample rotation. *Surface and Interface Analysis*, 9(1), 41-46.
<https://doi.org/10.1002/sia.740090108>