

Síntesis y caracterización de películas de Co: Al₂O₃ y Ni:Al₂O₃ depositadas por AACVD con variación de concentración

L.G. Daza^{a*}, B. Cruz-Muñoz^b, I.V. Perez-Quintana^a, R. Castro-Rodríguez^c

^aUniversidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería, Industrias No Contaminantes S/N, Sin Nombre de Col 27, 97302, Mérida, Yucatán, México.

^bUniversidad Tecnológica de Pereira, Departamento de Física, C.P. 660003, Risaralda, Colombia

^cCINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, Km. 6 Antigua carretera a Progreso Apdo. Postal 73, Cordemex, 97310, Mérida, Yucatán, México

Fecha de recepción: 21 de octubre de 2024 - Fecha de aceptación: 27 de noviembre de 2024

Resumen

Se realizaron crecimientos de películas de óxidos metálicos de cobalto y de níquel combinadas con óxido de aluminio, sobre sustratos de aluminio, mediante la técnica de depósito químico de vapor asistido por aerosol a una temperatura de 400°C y con un ajuste en las concentraciones de las sales precursoras de los óxidos mencionados inicialmente. Las películas obtenidas de los óxidos de cobalto y níquel presentaron uniformidad y homogeneidad sobre todo el sustrato. Se realizaron mediciones de difracción de rayos x y espectros de energía dispersiva que confirmaron la presencia en las primeras muestras del óxido de cobalto y aluminio y en las muestras posteriores la presencia del óxido de níquel bunsenita, relacionadas con los porcentajes de las sales precursoras. Todas las muestras obtenidas presentaron valores de reflectancia inferiores al 40% en el rango de 300 a 1100 nm, llegando incluso a obtenerse muestras con valores de reflectancia óptica cercanas al 10% en el rango de 400 a 900 nm, lo que permitiría su aplicación como recubrimientos selectivos en piezas de colectores solares.

Palabras claves:

Colectores solares, Recubrimientos selectivos, AACVD, Co:Al₂O₃, Ni:Al₂O₃.

*luis.daza@correo.uady.mx

Synthesis and characterization of Co:Al₂O₃ and Ni:Al₂O₃ films grown by AACVD with concentration variation

Abstract

Metal oxide films of cobalt and nickel combined with aluminum oxide were grown on aluminum substrates using the aerosol-assisted chemical vapour deposition technique at a temperature of 400°C and with an adjustment in the concentrations of the precursor salts of the oxides mentioned initially. The films obtained from the cobalt and nickel oxides presented uniformity and homogeneity over the entire substrate. X-ray diffraction and EDS measurements were carried out, which confirmed the presence of cobalt and aluminum oxide in the first samples and the presence of bunsenite nickel oxide in the later samples, related to the percentages of the precursor salts. All the samples obtained presented reflectance values lower than 40% in the range of 300 to 1100 nm, even obtaining samples with optical reflectance values close to 10% in the range of 400 to 900 nm, which would allow their application as selective coatings on solar collector parts.

Keywords:

Solar collectors, Selective coatings, Co:Al₂O₃, Ni:Al₂O₃, AACVD.

Introducción

El uso excesivo de combustibles fósiles, la transición energética, y la alta demanda de energía hacen que la humanidad explore diversas fuentes de energía renovables, donde la energía solar es una de las fuentes más abundantes y aprovechables (Solangi et al. 2011). Hasta la fecha, la conversión solar térmica para calentar fluidos (agua, aire, etc) y la generación de vapor de agua, son los métodos más empleados, siendo usados en campos como la generación fototérmica (Yang et al. 2017), almacenamiento de energía fototérmica (Shi et al. 2020), desalinización de agua de mar (Liu et al. 2015a), secado de alimentos y tratamiento de aguas residuales (Xue et al. 2017). Sin embargo, algunas tecnologías aún tienen costos altos debido a la relativa complejidad de los sistemas, y por la

alta intermitencia de la radiación solar (Liu et al. 2015b).

En la actualidad el uso de colectores solares está en aumento, y la búsqueda del mejoramiento de sus eficiencias se trabajan en gran número, por ejemplo, Haran et. al., utiliza diferentes tubos absorbentes como el tubo de cobre pulido, el tubo de cobre sin pulir, el tubo de cobre recubierto de Ni-Al y el tubo de cobre recubierto de Ni-Cr en un colector solar parabólico para realizar estudios de rendimiento con fluidos de transferencia de calor de agua y agua salada (Harán y Venkataramaiah 2020). Los absorbedores solares espectralmente selectivos poseen en general una capa delgada cermet o unión metal - óxido metálico, que es depositada típicamente sobre una superficie metálica para una alta absorción solar mientras que es transparente a

la radiación IR. Estos absorbedores solares tienen un espacio muy amplio de parámetros ajustables que van desde las especies constituyentes, espesores de recubrimiento y hasta la concentración de partículas, tamaño, forma y orientación, con el fin de optimizar su selectividad espectral. Por lo tanto, muchos absorbedores solares con base en estos materiales han sido estudiados en la actualidad como, por ejemplo: diversas combinaciones de materiales anfitriones como Al_2O_3 y SiO_2 con átomos metálicos como Ni, Co, Ti, Mo, W, Pt, Cu, Ag y Au en términos de rendimiento óptico y de la estabilidad térmica de las superficies (Santibáñez et al. 2016; Shimizu et al. 2017; Bagheri et al. 2016). El óxido de aluminio (Al_2O_3) es un cerámico, catalizador y dieléctrico importante. Debido a su baja corriente de fuga, su valor de constante dieléctrica y en especial al intervalo de energía de banda prohibida, que puede ir de 6.5 a 9 eV (para depósitos mediante CVD) en función de los parámetros de crecimiento. El Al_2O_3 es un aislante adecuado para diversas aplicaciones electrónicas, desde ser dieléctrico en transistores de semiconductores de óxido metálico hasta ser aislante de atrapamiento en celdas de memoria no volátiles. (Liu et al. 2014).

El depósito químico de vapor (CVD, por sus siglas en inglés) es un proceso utilizado para producir productos de alta pureza y de alto rendimiento de materiales sólidos. En este proceso el sustrato se expone a uno o más precursores volátiles, que reaccionan o se descomponen en la superficie del sustrato para producir el depósito deseado. Con frecuencia, también se producen subproductos volátiles, que son eliminados por medio de un flujo de gas que pasa a través de la cámara de reacción (Cai et al. 2018) y en concreto el depósito químico de vapor asistido por aerosol (AACVD, por sus siglas en inglés) implica la

atomización de una solución precursora líquida en finas gotas de aerosol de tamaño submicrométrico que se distribuyen a través de un medio gaseoso. Posteriormente, el aerosol se transporta a una zona de reacción calentada, donde el disolvente experimenta una rápida evaporación y / o descomposición, formando el vapor precursor a una temperatura elevada. Esto permite que los productos deseados se sinteticen mediante descomposición u otras reacciones químicas del precursor vaporizado (Hou y Choy 2006).

Capas cermets como la de $\text{Co}:\text{Al}_2\text{O}_3$ obtenidos por técnicas como spray pirolisis han permitido obtener óptimos resultados como capa absorbidora selectiva mediante ajustes de su temperatura de depósito y de la concentración de sus sales precursoras, así por ejemplo con parámetros como la temperatura cercana a 400°C y concentraciones de 40% y 60% para las concentraciones de cobalto y alúmina, respectivamente, Ziabari et. al. obtuvieron valores de reflectancia cercanos al 5% en rangos de longitud de onda ultravioleta y visible (Ziabari y Khatibani 2017), de igual manera la capa de Ni-Al es utilizada y estudiada a fondo en el uso de colectores solares, por ejemplo Suriwong et. al., investiga la influencia del espesor del recubrimiento de Ni-Al en la selectividad espectral y el rendimiento térmico de un colector cilindro parabólico, variando los espesores con Ni-5% en peso de polvo de Al mediante spray de llama (Suriwong et al. 2018). El objetivo de este trabajo fue depositar películas de $\text{Co}:\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Ni}:\text{Al}_2\text{O}_3$ con propiedades ópticas y morfológicas adecuadas para su aplicación en películas selectivamente absorbentes utilizadas en colectores y concentradores solares. Para ello, se ajustaron diversos parámetros de la técnica AACVD, con énfasis en la concentración de sales precursoras, complementando con una prueba adicional

como la exposición en una cámara salina para estudiar su respuesta óptica.

Metodología

El depósito de las películas se llevó a cabo con el equipo de AACVD que se ilustra en la figura 1, el cual fue diseñado, desarrollado y ajustado para poder tener gran versatilidad en la selección de sus múltiples parámetros de crecimiento y con esto aumentar el número de resultados y de propiedades que se puedan obtener. Para el depósito de las películas de $\text{Co:Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Ni:Al}_2\text{O}_3$ se utilizó aire comprimido filtrado como gas de arrastre a un flujo de 4 L/min y una temperatura aproximada para este flujo de 30°C , una distancia entre la tobera y el sustrato de 1 mm, una velocidad de la tobera igual a 0.5 cm/min, un número de 6 pasadas (6 capas) y una temperatura de depósito de 400°C . Esta temperatura se determinó a partir de las curvas termogravimétricas (TGA) de las tres sales precursoras donde se obtiene que a partir de 350°C son todas estables y la selección de los demás parámetros iniciales se determinó en base a trabajos anteriores con diferentes materiales (Hincapié et al. 2020; Montes et al. 2020). Como sustratos se utilizaron láminas de aluminio con un tratamiento abrasivo (lijado desde la lija 220 hasta la 2000) sobre una de las caras de la superficie hasta alcanzar el pulido espejo (inspección visual), con dimensiones 2.5 cm x 8 cm, adicionalmente, todos los sustratos fueron sometidos a un tratamiento de limpieza en un baño ultrasónico (inmersión en metanol y posteriormente en acetona durante 20 minutos cada uno), con el fin de eliminar la grasa de la superficie. Los crecimientos iniciales de $\text{Co:Al}_2\text{O}_3$ se obtuvieron a partir de las sales precursoras nitrato de cobalto hexahidratado ($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ – Marca Sigma Aldrich, 99% de pureza) y de nitrato de

alúmina nonahidratado ($\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ – Marca Sigma Aldrich, 99% de pureza), disueltos en alcohol metílico (Fisher Chemical 99,8 % de pureza) con una concentración molar de 0.25 M. Los crecimientos de $\text{Ni:Al}_2\text{O}_3$ se obtuvieron a partir de las sales precursoras nitrato de níquel hexahidratado $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (de la marca Sigma Aldrich, 99.8% de pureza) y del nitrato de alúmina nonahidratado $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (de la marca Sigma Aldrich, 99% de pureza), disueltos en alcohol metílico (Fisher Chemical 99.8 % de pureza) con una concentración molar de 0.25 M. Para la variación de concentración de las sales precursoras se utilizó la siguiente relación:

$$P.M.S.P \cdot C.M. \cdot C.S. \cdot \% S.P. = M.S.P. \quad (1)$$

Donde $P.M.S.P$ es peso molecular de la sal precursora (g/mol), $C.M.$ es concentración molar (mol/L), $C.S.$ es cantidad del solvente (L), $\% S.P$ es porcentaje de la sal precursora y $M.S.P.$ es masa de la sal precursora (g). Para el depósito de $\text{Co:Al}_2\text{O}_3$ se prepararon 4 concentraciones diferentes, ajustando el porcentaje de la sal precursora, por ejemplo la primera muestra con un porcentaje de 30% de $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y un 70% de $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ se denominó 30:70, y subsecuentemente con las demás muestras 40:60, 50:50 y 60:40 se realizó variación del porcentaje de la sal precursora. A partir de los resultados obtenidos inicialmente con el $\text{Co:Al}_2\text{O}_3$ se prepararon 4 muestras aumentando inicialmente la concentración de la sal precursora del níquel, en una relación de 90% a 10% en relación con la sal precursora del óxido de aluminio, y se denominó 90:10, las demás muestras fueron denominadas 60:40, 50:50 y 40:60, disminuyendo el porcentaje de la sal precursora del níquel.

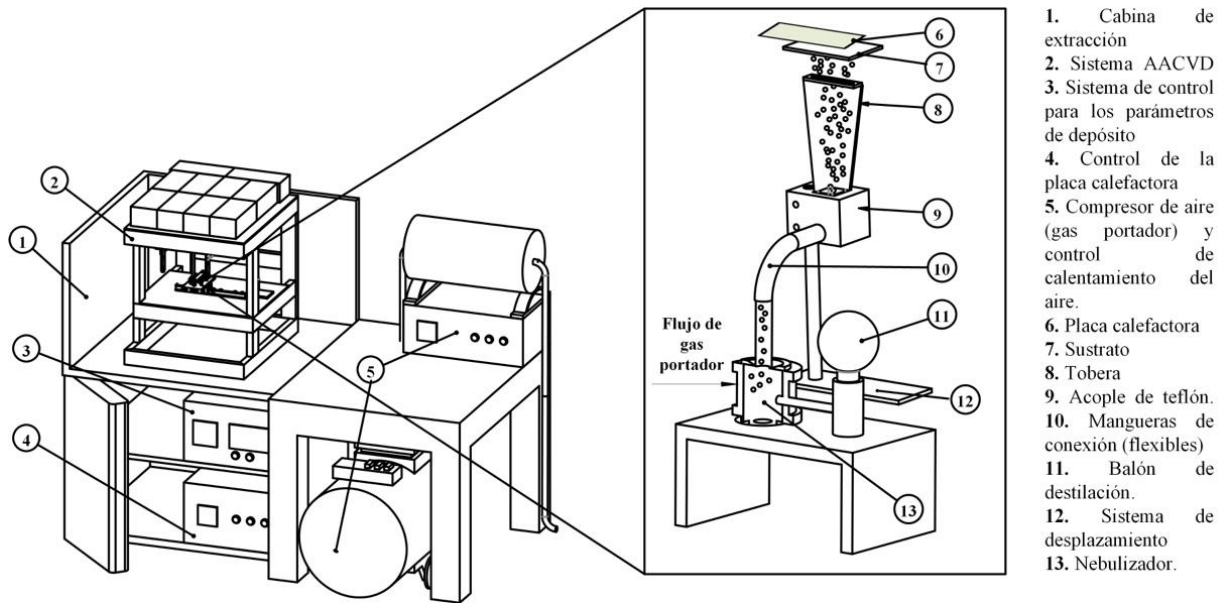


Figura 1. Esquema de la técnica AACVD utilizada para los depósitos de Co:Al₂O₃ y Ni:Al₂O₃ (Cruz et al. 2020)

Finalmente, la muestra con mayor concentración de níquel (90:10) fue colocada en una cámara salina por un periodo de 6 días, este sistema actúa simulando las condiciones de humedad y salinidad que sufriría una muestra expuesta al medio ambiente, debido a la alta concentración salina acelera el proceso de degradación de los materiales sometidos a estas condiciones permitiendo inferir si es resistente o no a estas condiciones.

Resultados

Como se puede apreciar en la figura 2, se obtuvieron películas de Co:Al₂O₃ sobre sustratos de aluminio, homogéneas y uniformes, manteniendo su tonalidad e igualdad a lo largo de todo el sustrato, se aprecia una variación en la intensidad el tono en función del aumento de la concentración de la sal precursora del cobalto, donde las muestras con relación de 50:50 y 60:40 tienen un tono azulado oscuro, el cual es característico del óxido de aluminio y cobalto o conocido como el azul cobalto (Co₂AlO₄) (Xi et al. 2012)

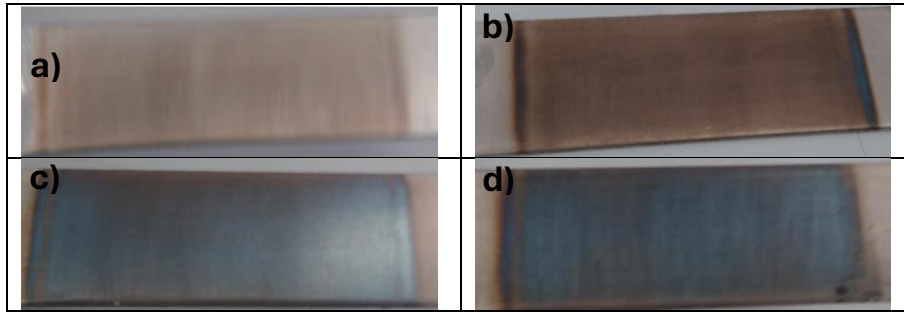


Figura 2. Imágenes de las películas de $\text{Co:Al}_2\text{O}_3$ obtenidas sobre sustrato de aluminio con concentraciones de
a) 30:70, b) 40:60, c) 50:50 y d) 60:40.

Con el fin de observar las características ópticas de las películas depositadas se realizaron medidas espectroscópicas que permitieran determinar la cantidad de luz que pueden transmitir o reflejar. Si en general se tiene un haz de luz incidente que interaccione con algún material, puede resultar en luz reflejada, absorbida o transmitida (está última se considerara nula por la naturaleza del sustrato). En este sentido, la cantidad de luz absorbida en el material vendrá dada por la relación entre la cantidad de luz que incide sobre el material y la que es reflejada que, a la vez, vienen relacionados por:

$$A=100-R \quad (2)$$

donde A es el porcentaje de la cantidad de luz que absorbe el material y R es el porcentaje de la cantidad de luz reflejada. Las propiedades ópticas de las películas obtenidas en este estudio fueron caracterizadas por medio de medidas de reflectancia óptica medidas en el rango UV-

Vis (300 nm – 1100 nm) mediante un espectrofotómetro Thermo Scientific-Evolution 220 con esfera de integración. Las medidas se realizaron a temperatura ambiente con luz no polarizada y en incidencia normal a la muestra. En la figura 3 se puede apreciar la medida de reflectancia realizada sobre el sustrato de aluminio empleado para el depósito de todas las películas, y cuyo valor promedio esta cercano al 50% de reflectancia para todo el rango de medición entre 300 y 1100 nm. Para las películas con concentración de 30:70 y 40:60 se observa un valor de reflectancia cercano a 10% en el rango 300 a 400 nm aproximadamente, y un valor medio cercano al 20% de reflectancia en el rango de 400 a 1100 nm, para las muestras 50:50 y 60:40 se aprecia un aumento cercano al 20% de reflectancia en el rango de 300 a 400 nm, pero una disminución a un valor medio cercano al 10% de reflectancia en el rango de 400 a 1100 nm, por lo que estas últimas películas tienen una mayor absorción efectiva en todo el rango de medición y con ello una posible mejor aplicación como capa absorbente.

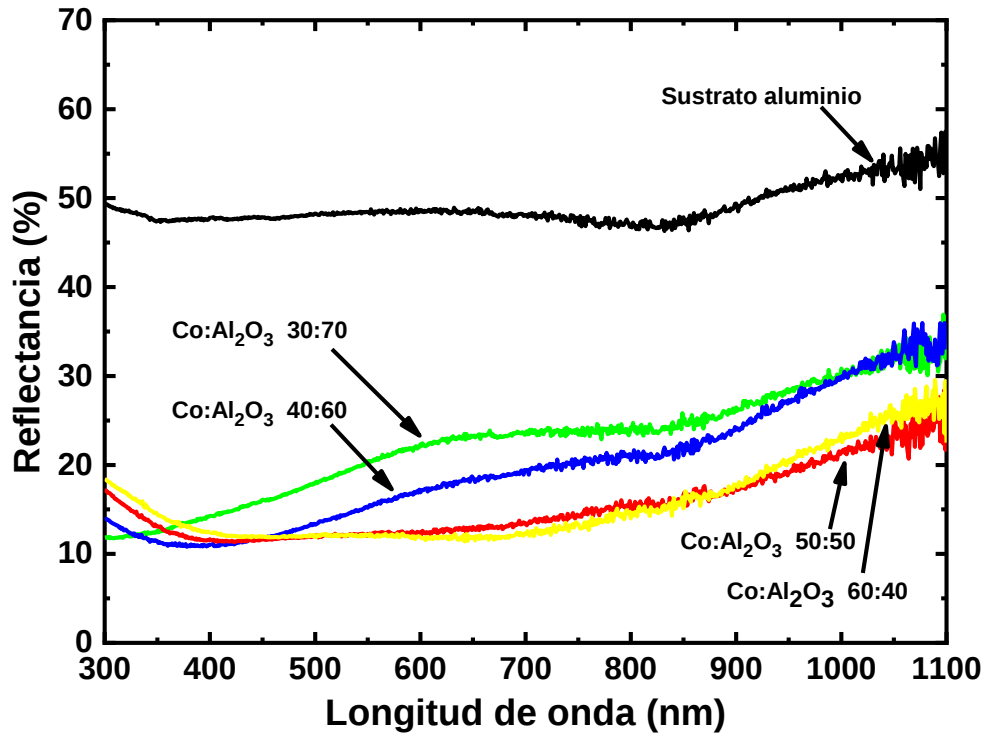


Figura 3. Espectro de reflectancia del sustrato y las películas de $\text{Co:Al}_2\text{O}_3$ con variación en la concentración

Para confirmar la presencia del depósito de la mezcla de cobalto y aluminio sobre los sustratos de aluminio se empleó difracción de rayos x, las medidas se realizaron en el rango 2θ de 20° – 80° , con un tamaño de paso de $0,02^\circ$ y tiempos de adquisición de 10s por paso. Los datos se obtuvieron mediante un difractómetro de rayos X Siemens D5000 con un haz de radiación monocromática filtrada $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=0,14518\text{nm}$) para 40 kV con 35 mA y un diafragma de apertura de 0,2 mm. En los resultados es posible apreciar que para la muestra del sustrato de aluminio están presentes 4 picos intensos en 39° , 44° , 66° y 78° correspondientes al aluminio metálico, para las muestras con concentración 30:70 y

40:50 no se aprecian cambios sustanciales en estos picos o la aparición de nuevos picos, pero para las muestras de 50:50 y 60:40 comienza a notarse un leve pico cercano a $36,8^\circ$ característico del Co_2AlO_4 (Xi et al. 2012), confirmando la presencia del azul cobalto. Además, se realizó un análisis elemental (EDS) mediante el equipo SEM JEOL-7600F (se omiten las figuras) donde se obtuvieron valores de cobalto entre 2.03% a 4.02% de peso según la menor y la mayor concentración de la sal precursora relacionada al cobalto, respectivamente. Debido a este bajo % en peso de cobalto, en los difractogramas se observa levemente el pico característico del azul cobalto.

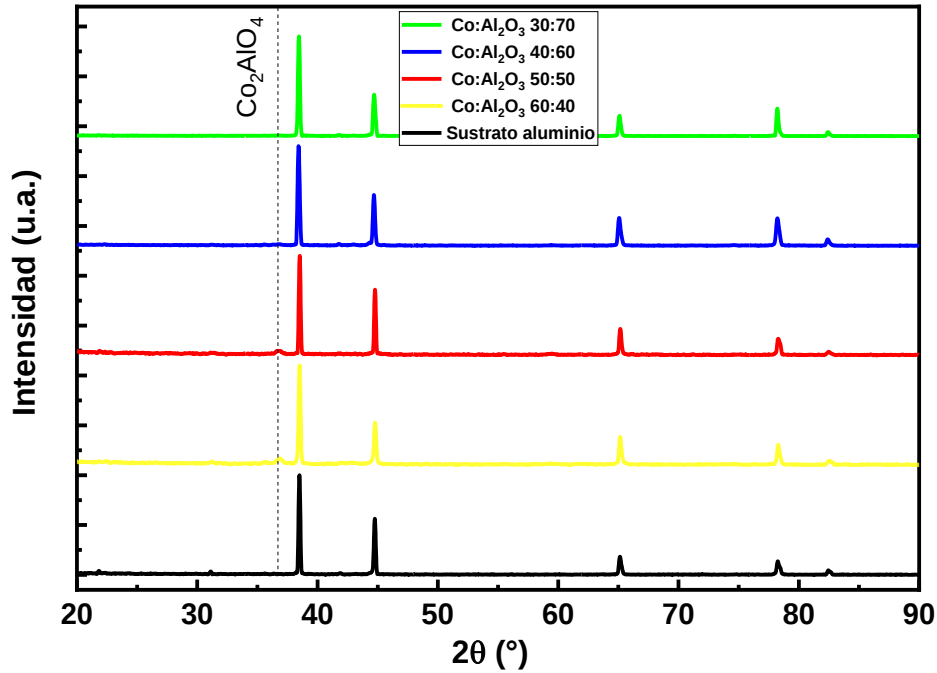


Figura 4. Patrón de difracción de rayos x del sustrato y las películas de Co:Al₂O₃ con variación en la concentración

Las películas obtenidas de Ni:Al₂O₃ presentaban al igual que las películas de cobalto uniformidad y homogeneidad a lo largo de todo el sustrato depositado, pero al obtenerse resultados similares a los mostrados en la figura 2, se omitieron y nos enfocamos más en la medición óptica de reflectancia, la cual puede ser apreciada en la figura 5. Para la muestra con mayor concentración de níquel (Ni:Al₂O₃ 90:10) se obtuvieron valores de reflectancia cercanos a un 15% en el rango de 300 a 400 nm, pero en el rango cercano de 400 a 700 nm el valor medio está próximo a un 30% y finalmente de 700 a 1100 nm, nuevamente cercano a 15%, los cuales no son valores óptimos de absorción, pero podrían ser aplicados como una capa reflejante en el visible. Las muestras de 60:40 y 50:50 presentan valores medios cercanos al 30% en el rango de 300 a 400 nm, y en el rango de 400 a 1100 nm

valores aproximados de un 25% y un 15 %, la muestra 40:60 en el rango de 300 a 400 nm tiene un valor cercano al 15% pero para longitudes de onda de 400 nm en adelante va en aumento hasta llegar casi a valores de 35%. Finalmente a la muestra de 90:10 se le realizó una prueba de intemperismo acelerado mediante una cámara salina (con la norma ASTM B 117-07 Las condiciones ambientales de funcionamiento fueron: temperatura = 35°C, presión = 18 psi, flujo de agua destilada = 5 litros, sal = 5% en peso, humedad relativa = 100%.) que simula algunas condiciones ambientales a las que podría estar la muestra en el medio ambiente, por ejemplo en un colector solar, la muestra se dejó en cámara salina por un periodo de 6 días y los resultados (Ni:Al₂O₃ 90:10 sal) obtenidos muestran una reducción en todo el rango de longitudes de onda medido (como se aprecia en la figura

5), de casi un 10% menos, que la muestra inicial, cambiando significativamente su absorción (se empleó la norma ASTM D 610-08 para la evaluación del grado de oxidación de superficies. Esta práctica proporciona un medio estandarizado para cuantificar la cantidad y distribución óxido

en la superficie. Se observaron varias manchas de óxido que se distribuyen aleatoriamente a través de la superficie (1 % -3 %)). Este resultado sugiere la degradación del recubrimiento, lo cual afecta la durabilidad de sus propiedades en el medio salino.

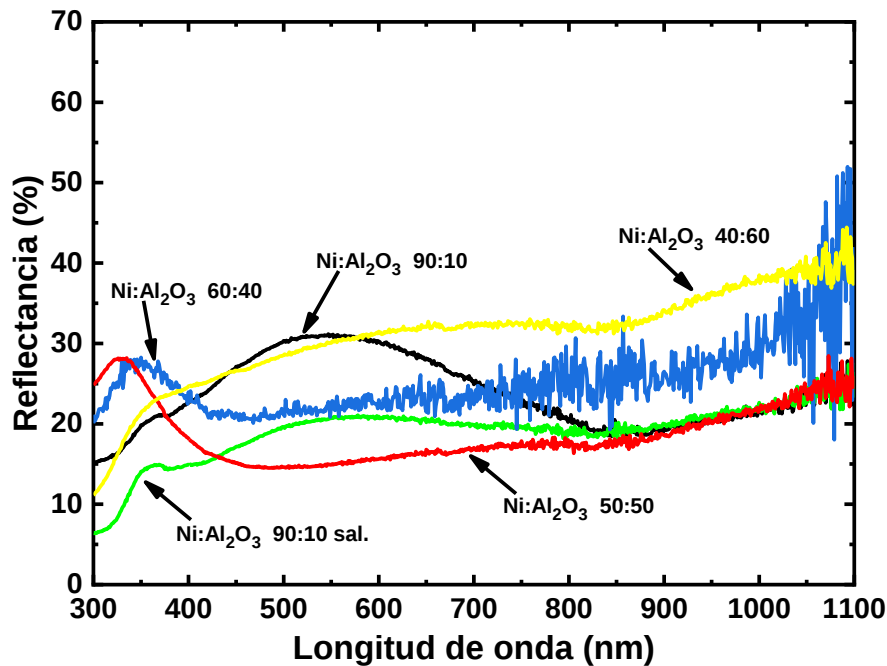


Figura 5. Espectro de reflectancia de las películas de Ni:Al₂O₃ con variación en la concentración y con prueba en cámara salina.

Se realizaron de igual manera mediciones de difracción de rayos x, en el rango 2θ de 20° – 80° , para las muestras más significativas (50:50 y 40:40), como se aprecia en la figura 6, además se realizó la medida del sustrato de aluminio y una medición especial para un crecimiento con un porcentaje de 100% de la sal precursora asociada al níquel (Ni 100), para que fuese más practica la comparación. De nuevo la muestra de referencia del sustrato presenta los 4 picos intensos en 39° , 44° , 66° y 78° correspondientes al aluminio metálico, pero al compararla con la muestra Ni100, en esta última se observa la aparición

de 3 picos en 37° , 43° y 63° aproximadamente, relacionados al óxido de níquel bunsenita (NiO) (Kim et al. 2017), los cuales aparecen con menor intensidad, también en la muestra 60:40 y mucho menos definidos en la muestra 40:60. Finalmente se realizó un EDS para las muestras y se obtuvieron valores de níquel entre 6.74% a 16.78% de peso según la menor y la mayor concentración de la sal precursora relacionada al níquel, respectivamente.

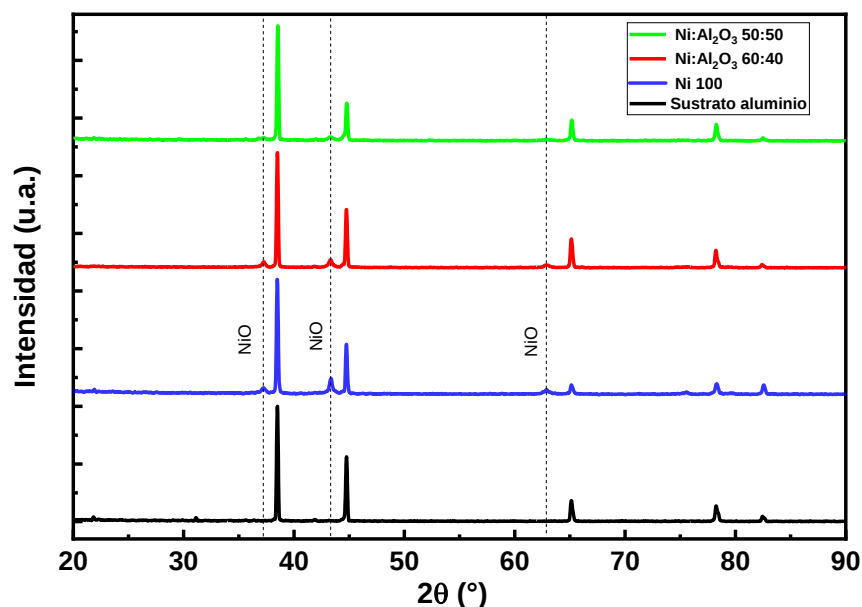


Figura 6. Patrón de difracción de rayos x del sustrato de Al y las películas de $\text{Ni:Al}_2\text{O}_3$ con variación en la concentración

Conclusiones

Mediante la técnica de AACVD se llevaron a cabo crecimientos de películas de materiales absorbentes $\text{Co:Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Ni:Al}_2\text{O}_3$ sobre sustratos de aluminio, con resultados ópticos, morfológicos y estructurales. Los valores de reflectancia y con ellos de absorción en las diversas muestras permitieron apreciar valores altos de esta última propiedad y con ello resultados prometedores para ser aplicadas como posibles capas absorbentes en aplicaciones de colectores solares, además se pudo corroborar mediante imágenes morfológicas la buena adherencia y uniformidad de los crecimientos efectuados. El análisis elemental y difracción de rayos x permitió corroborar la presencia de los elementos que se querían obtener, con variación en algunos parámetros de crecimientos seleccionados. Mediante la prueba de cámara salina se pudo obtener una disminución en la reflectancia y la aparición

de manchas en la superficie que indican degradación del recubrimiento por lo que posteriormente se espera confirmar este resultado con todas las muestras.

Reconocimientos

Los autores agradecen a la Dra. Patricia Quintana por el apoyo de sus laboratorios de caracterización experimental de Conacyt Fomix-Yucatán con contrato 2008-108160, y Conacyt-Lab [2009-01-123913, 29-(2692, 4643), 188345, 204822]. El autor L.G. Daza agradece a CONAHCYT por la estancia postdoctoral 2022 (2) bajo la convocatoria Estancias Postdoctorales en México para la Formación y Consolidación de Investigadores en México y a la UTP por financiar parcialmente los depósitos a través del proyecto 3-23-3. También agradecemos a Mario Herrera, Oswaldo Gómez y Daniel Aguilar por el apoyo técnico.

REFERENCIAS

- Bagheri A., Rozati. S. (2016). Spray pyrolytically grown NiAlOx cermets for solar thermal selective absorbers: Spectral properties and thermal stability. "Bulletin of Materials Science", 39 (1) 97–107.
- Cai Z., Liu B., Zou X., Cheng H. (2018). Chemical Vapor Deposition Growth and Applications of Two- Dimensional Materials and Their Heterostructures. "Chemical reviews", 118 (13) 6091-6133.
- Cruz B., Dorantes R., Florez L. (2020). Construcción e implementación de equipos de depósito químico usando las técnicas: Depósito Químico de Vapor Asistido por Aerosol (AACVD) y Sol –Gel por inmersión, 1st ed. Pereira: Editorial UTP.
- Haran V., Venkataramaiah P. (2020). Study on Solar Parabolic Trough Collector with Different Copper Absorber Tubes, Intelligent Manufacturing and Energy Sustainability. "Smart Innovation, Systems and Technologies", 169 (1) 271-278.
- Hincapié J., Dorantes R., Cruz-Muñoz B. (2020). Definition of criteria and design parameters of aerosol-assisted chemical vapor deposition system (AACVD). "Scientia et Technica", 25 (1) 137-141.
- Hou X., Choy K.(2006). Processing and Applications of Aerosol-Assisted, Chemical Vapor Deposition. "chemical vapor deposition", 12 (10) 583-596.
- Kim K., Yoshihara Y., Abe Y., Kawamura M., Kiba T. (2017). Morphological characterization of sphere-like structured ZnO-NiO nanocomposites with annealing temperatures. "Materials Letters", 1806 (1) 364-367.
- Liu X., Wu F., Li Y., Keller S., Speck J., Mishra U. (2014). Metalorganic chemical vapor deposition of Al₂O₃ using trimethylaluminum and O₂ precursors: Growth mechanism and crystallinity. "Journal of Crystal Growth", 48 (1), 78-84.
- Liu Y. Yu S., Feng R., Bernard A., Liu Y., Zhang Y., Deng T. (2015). A bioinspired, reusable, paper-based system for high-performance large-scale evaporation, "Advanced Materials", 27 (17), 2768 – 2774.
- Liu. Y., Chen J., Guo D. (2015). Floatable, self-cleaning, and carbon-black-based superhydrophobic gauze for the solar evaporation enhancement at the air-water interface. "ACS Applied Materials & Interfaces", 7 (24), 13645–13652.
- Montes J., Florez L., Mósquera L., Dorantes R., Cruz B. (2020). Influence of the variation of the experimental conditions when obtaining the TiO₂ antireflective thin film. "Journal of Physics: Conference Series", 1541 (1) 012008.
- Santibañez A., Herrera M., Oliva J., Martinez A. (2016). Electrochemical deposition of Ni-Fe alloys into porous alumina for solar selective absorbers. "Superlattices and Microstructures", 100 (1) 973–982.

Shi L., Hu Y, Bai Y, He Y. (2020). Dynamic tuning of magnetic phase change composites for photo-thermal conversion and energy storage. “Applied Energy”, 263 (3), 114570.

Shimizu M., Suzuki M., Iguchi F., Yugami H. (2017). High spectral selectivity for solar absorbers using a monolayer transparent conductive oxide coated on a metal substrate. “Journal of Applied Physics”, 121 (18) 183103 .

Solangi K., Islam M., Saidur R., Rahim N., Fayaz H. (2011). A review on global solar energy policy. “Renewable and Sustainable Energy Reviews”, 15(4), 2149 - 2163.

Suriwong T., Bunmephiphit C., Wamae W., Banthuek S. (2018). Influence of Ni-Al coating thickness on spectral selectivity and thermal performance of parabolic trough collector. “materials for renewable and sustainable energy”, 7 (14) 3.

Xi X., Nie Z., Ma L., Li L., Xu X., Zuo T. (2012). Synthesis and characterization of ultrafine Co₂AlO₄ pigment by freeze-drying. “Powder Technology”, 226 (1)114-116.

Xue G., Xu Y., Ding T. (2017). Water-evaporation-induced electricity with nanostructured carbon materials. “Nature Nanotechnology”, 12 (4), 317 - 321.

Yang P., Liu K., Chen Q. (2017). Solar-driven simultaneous steam production and electricity generation from salinity. “Energy and Environmental Science”, 10 (9), 1923 - 1927.

Ziabari A., Khatibani A. (2017). Optical properties and thermal stability of solar selective absorbers based on Co–Al₂O₃ cermets. “Chinese Journal of Physics”, 55 (3) 876-885