

Síntesis por Nebulizado de Superficies Hidrofóbicas, Durables y Antirreflectantes de SiO₂/TiO₂

López-Fuentes José F.¹, Vales-Pinzón Caridad^{1*}, Lizama-Tzec Francisco I.², Rodríguez-Gattorno G.²

¹Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY)

²Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV).

Fecha de recepción: 25 de octubre de 2024 - Fecha de aceptación: 29 de abril de 2025

Resumen

En este trabajo se realizó el estudio de parámetros de síntesis para obtener superficies antirreflectantes de capas simples y dobles de SiO₂/TiO₂ mediante la técnica de nebulización, aplicadas sobre vidrio conductor (TEC 15) y vidrio Corning. Para mejorar la hidrofobicidad, las capas de SiO₂ fueron funcionalizadas con octadecil-triclorosilano (OTS) y trietoxi-octil-silano (OD8). Las propiedades de las películas fueron caracterizadas utilizando técnicas de UV-VIS, FTIR, difracción de rayos X, Raman y mediciones del ángulo de contacto entre una gota de agua y la superficie. Las mejores condiciones de síntesis se lograron con 20 PSI, 70°C y 4 segundos para las películas de SiO₂, y 20 PSI, 400°C y 20 segundos para las capas de TiO₂. La funcionalización con silanos, particularmente OD8 y OTS, mejoró significativamente la hidrofobicidad, obteniéndose películas compactas, continuas, con alta transmitancia y buena resistencia al agua. Los resultados demuestran que la técnica de nebulización es efectiva para el depósito de películas delgadas con potencial para aplicaciones en superficies antirreflejantes e hidrofóbicas.

Palabras claves: Nebulizador, hidrofobicidad, película antirreflejante, TiO₂, SiO₂.

Nebulized Synthesis of Hydrophobic, Durable and Anti-Reflective SiO₂/TiO₂ Surfaces

Summary

In this work, synthesis parameters were studied to obtain anti-reflective surfaces of single and double layers of SiO₂/TiO₂ through the nebulization technique, applied on conductive glass (TEC 15) and Corning glass. The SiO₂ layers were functionalized with octadecyl-trichlorosilane (OTS) and triethoxy-octyl-silane (OD8) to improve hydrophobicity. The properties of the films were characterized using UV-VIS, FTIR, X-ray diffraction, Raman spectroscopy, and contact angle measurements between a water droplet and the surface. The best synthesis conditions were achieved with 20 PSI, 70°C, and 4 seconds for SiO₂ films, and 20 PSI, 400°C, and 20 seconds for TiO₂ layers. The silane functionalization, particularly with OD8 and OTS, significantly improved hydrophobicity, resulting in compact, continuous films with high transmittance and good water

*caridad.vales@correo.uady.mx

resistance. These results demonstrate that the nebulization technique effectively deposits thin films with potential applications in anti-reflective and hydrophobic surfaces.

Keywords: Nebulization, hydrophobicity, anti-reflective film, TiO₂, SiO₂.

Introducción

El vidrio solar es un componente importante de los colectores y celdas solares. La interfaz aire-vidrio, tiende a provocar que cerca del 7% de la luz solar sea reflejada según lo reporta (Wu et al., 2000), consecuentemente, la utilización de recubrimientos antirreflectantes (ARC) sobre el vidrio se hacen necesarios para mejorar la captura de la luz solar y la eficiencia mediante una mayor transmisión de los vidrios de cobertura en los dispositivos solares.

Es por resaltar que la capacidad de autolimpieza en los materiales ha sido de gran relevancia en los últimos años, la cual se puede obtener a través de propiedades hidrofóbicas, este fenómeno ocasiona de la pérdida de la afinidad del agua en una superficie (Doerr et al., 2000), lo que provoca que las gotas esféricas formadas en la superficie arrastren la suciedad y mantengan libre de humedad lo que se encuentre debajo de la superficie. Para poder clasificar como la superficie interactúa con el agua se determina con el ángulo de contacto generado entre la gota y la superficie: hidrófilas (ángulos menores de 90°), hidrofóbicas (ángulo comprendido entre 90° y 150°) y superhidrofóbica (ángulos mayores a 150°) (Ran et al., 2019).

Los ARC son materiales porosos, los más estudiados son basados en sílice los cuales manifiestan índice de refracción ajustable dependiendo de su preparación; una desventaja es que son suficientemente solubles para ser disueltos paulatinamente por la lluvia este fenómeno se ve aumentada por la presencia de la porosidad; estos poros en escala mesoporosa son hidrófilos pudiendo atrapar agua provocando una reducción significativa de las propiedades antirreflectantes. Por otra parte, los poros también favorecen la adsorción de contaminantes del ambiente exterior; bajando la capacidad del ARC de transmitir luz. El problema de la absorción de agua puede resolverse haciendo hidrofóbica la superficie mediante el uso de precursores de sílice funcionalizados con grupos alquilo de acuerdo con el reporte hecho por (Zhang et al., 2012). Por otro lado, para evitar la contaminación de los poros se pueden bloquear aplicando una capa barrera compacta de TiO₂ sobre el ARC cuya función adicional sería limpiar la porosidad mediante la descomposición de la materia orgánica según lo reporta (Zhao et al., 2008), además puede ser depositado en forma compacta mediante diversas técnicas como el rocío pirolítico (Delgado et al., 2020), sus facetas pueden obtenerse con alta pureza según los reportes por (Reyes-Coronado et al., 2008), de esta manera mediante el uso de combinaciones de capas de TiO₂, SiO₂ y grupos alquilo se espera lograr recubrimientos durables.

Una técnica resaltante para la síntesis de películas es el nebulizado, la cual se basa en el fenómeno de refinamiento de la atomización de líquidos, en éste se utiliza un gas que puede ser aire para aspirar un líquido y generar finas gotas de aerosol del orden de micras, mediante un chorro del gas creando una zona de presión negativa para sifonar un líquido hacia la corriente del chorro (Feng, 2018) su aplicación principal ha sido de carácter médico para proporcionar medicamento por inhalación, sin embargo, en la actualidad resulta en una técnica prometedora.

Un problema encontrado es obtener ARC sobre áreas grandes debido a que deben obtenerse sobre la superficie de los vidrios para dispositivos de tamaño real por lo tanto se hace necesario que las técnicas de síntesis de películas sean escalables y económicas permitiendo obtener los

índices de refracción adecuados El índice de refracción de un medio es importante para interpretar con precisión los resultados de la dispersión de la luz. El nebulizado es una técnica de bajo costo, tiene bajo consumo de reactivos, es de bajo consumo energético, fácil de implementar y es compatible con el método de sol-gel para la síntesis de películas delgadas como la ha demostrado Erik Zäll (Zäll et al., 2023). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue evaluar parámetros de síntesis de capas simples y dobles de $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ o $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ todas por la técnica de nebulizado sobre vidrio conductor y vidrio Corning además de funcionalizar los recubrimientos de SiO_2 con grupos alquilo para mejorar la hidrofobicidad.

Metodología

Los soles para la fabricación de películas de SiO_2 fueron preparadas mezclando el alcóxido metálico tetraetil ortosilicato (TEOS) con 100 ml de etanol (99.5 %) y 1 mL de n-Propil-trietoxisilano (PTES). Posteriormente se adicionó 2.7 ml de HCl con valor de pH 2.02 y se dejó hidrolizar, después de 2 horas de agitación a 250 r.p.m., los soles pueden ser aplicados, la silica obtenida de esta solución se designará como silica modificada (MS). La solución precursora de TiO_2 se preparó diluyendo 7.10 mL de isopropóxido de titanio en 100 ml de isopropanol. La solución de octadecil-triclorosilano (OTS) se obtuvo diluyendo 0.5 g en 49.62 ml de Etanol. La solución de Trietoxi-octil-silano (OD8) se obtuvo diluyendo 5 g en 100 g de etanol.

Para el proceso de nebulización, se optimizaron los parámetros utilizando portaobjetos de vidrio Corning (VC) de $7.5 \times$

2.5 cm como sustrato inicial. Posteriormente, las películas se aplicaron sobre vidrio conductor tipo TEC 15, recubierto con óxido de estaño dopado con flúor $\text{SnO}_2:\text{F}$ (FTO, por sus siglas en inglés), con dimensiones de 2×2 cm. Las películas antirreflectantes consisten en una o dos capas de SiO_2 y TiO_2 , y para mejorar la hidrofobicidad de la MS, se aplicó una capa adicional de OTS u OD8 mediante nebulización.

El método consiste en nebulizar la solución con una compresora a 20 PSI. De la misma manera se realizaron varias películas por duplicado variando el número de aplicaciones o variando la temperatura de un tratamiento térmico que se les realiza entre exposiciones a la neblina. Primero se encontraron los parámetros que favorecen las propiedades ópticas de las películas monocapa y posteriormente las bicapas de MS/TiO_2 . En la tabla 1 se exponen los parámetros de películas sobre vidrio Corning y en la tabla 2 se encuentran para el vidrio conductor.

Tabla1. Depósitos de películas en vidrio Corning.

Nomenclatura	Material	Tiempo de nebulizado por material	Temperatura de la parrilla	Utilización de tratamiento térmico extra
SiO_2 -2S	MS	2s	70 °C	Sin tratamiento térmico
SiO_2 -5S	MS	5s	70 °C	Sin tratamiento térmico
TiO_2	TiO_2	20s	400 °C	Sin tratamiento térmico
S8TA	MS/OD8/ TiO_2	4s/60s/20s	70 °C/ 70 °C/ 400 °C	Sin tratamiento

S8TB	MS/OD8/ TiO ₂	4s/60s/20s	70 °C/ 70 °C/ 400 °C	Con tratamiento térmico (1h a 400 °C)
SOTA	MS/OTS/ TiO ₂	4s/60s/20s	70 °C/ 70 °C/ 400 °C	Sin tratamiento
SOTB	MS/OTS/ TiO ₂	4s/60s/20s	70 °C/ 70 °C/ 400 °C	Con tratamiento térmico (1h a 400 °C)
ST4DE58	MS/ TiO ₂ /OD8	4s/20s/60s	70 °C/ 400 °C/ 70 °C	Con tratamiento térmico (1h a 400 °C)

Tabla 2. Depósitos de películas en vidrio conductor.

Nomenclatura	Material	Tiempo de exposición por material	Temperatura de la parrilla	Utilización de tratamiento térmico extra
FTO/TiO ₂ -A	TiO ₂	20s	400 °C	Sin tratamiento térmico
FTO/TiO ₂ -B	TiO ₂	20s	400 °C	Con tratamiento térmico (1h a 400 °C)
FTO/TiO ₂ /SiO ₂ A	MS/ TiO ₂	4s/20s	400 °C	Sin tratamiento térmico
FTO/TiO ₂ /SiO ₂ B	MS/ TiO ₂	4s/20s	70 °C/ 400 °C	Con tratamiento térmico (1h a 400 °C)

Caracterización de las películas

Se realizó el análisis de la transmitancia de las películas mediante un espectrofotómetro UV-Vis Agilent 8453. La difracción de rayos X sobre los ARC se realizó utilizando un Siemens D-5000 con radiación monocromática Cu-K α ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$). La microscopía de barrido electrónico (SEM) fue realizada utilizando un equipo FE-SEM; JEOL JSM-7600F. La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier de reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) se llevó a cabo con un espectrómetro FTIR Thermo Scientific Nicolet iS5. Las mediciones de espectroscopia Raman se realizaron a temperatura de laboratorio (25 °C) utilizando luz láser de 488 nm en un espectrofotómetro Raman confocal (Alpha 300, WiTec) para la excitación en una geometría de retrodispersión. El microscopio confocal cuenta con un detector iluminado por retroiluminación. Las mediciones se realizaron en tres puntos de cada muestra y en general, las características observadas en cada espectro

fueron independientes de la ubicación. Los datos se suavizaron utilizando un filtro FFT de corte del 25% con el software Origin. El grado de hidrofobicidad de las películas se determinó utilizando un microscopio digital, con 50 μ L de agua desionizada sobre la película a temperatura de laboratorio, tomando una fotografía de la sección transversal para poder determinar el ángulo que se forma con la superficie.

Resultados

En la Figura 1 se observan los resultados de monocapas de 2 s y 5 s de exposición a la nebulización para MS y 20 s para TiO₂, donde la curva de transmitancia para el depósito de MS por 5 s es la más alta con una transmitancia promedio de 100.8% en el intervalo de 400 nm – 1000 nm, contrario a su depósito de 2s que se encuentra gran parte por debajo de la referencia del vidrio con un promedio de 100.0 %. Para las monocapas de MS a mayor temperatura de síntesis

encontramos para tiempos iguales de nebulizado la transmitancia siempre fue menor a la referencia lo cual indica que 70 °C fue la temperatura más adecuada. Comparado con los resultados de transmitancia presentados en la literatura, por ejemplo (Li et al., 2017), en ambos materiales los incrementos de transmitancia fueron pequeños, pero en un intervalo ancho de longitudes de onda abarcando el visible y parte del infrarrojo. El anterior comportamiento lo explicamos mediante una disminución del índice de refracción (n_f), nos basamos en el trabajo de (Xiaolin et al., 2000) donde reporta que el espesor de la película es un factor que contribuye al efecto antirreflectante y este debe acercarse a un múltiplo impar de $\lambda/4$ (donde λ

es la longitud en la cual la transmisión es mínima) . El espesor de nuestras películas fue encontrado con un valor promedio de 50 ± 10 nm (medido por perfilometría) el cual está lejos de los valores reportados por Xiaolin et. al., además las imágenes de SEM en la Figura 1 b) y 1 c) para la MS y TiO₂ presentan una superficie bastante desvanecida lo que nos lleva a inferir que la dispersión de luz fue menor debido a una disminución del índice de refracción. Como un resultado preliminar la Figura 1 d) muestra una fotografía del VC tratado con MS/TiO₂ por 5/20 s, se indica con una flecha la sección tratada, esta sección se nota que transmite mejor la luz respecto a la mitad no tratada.

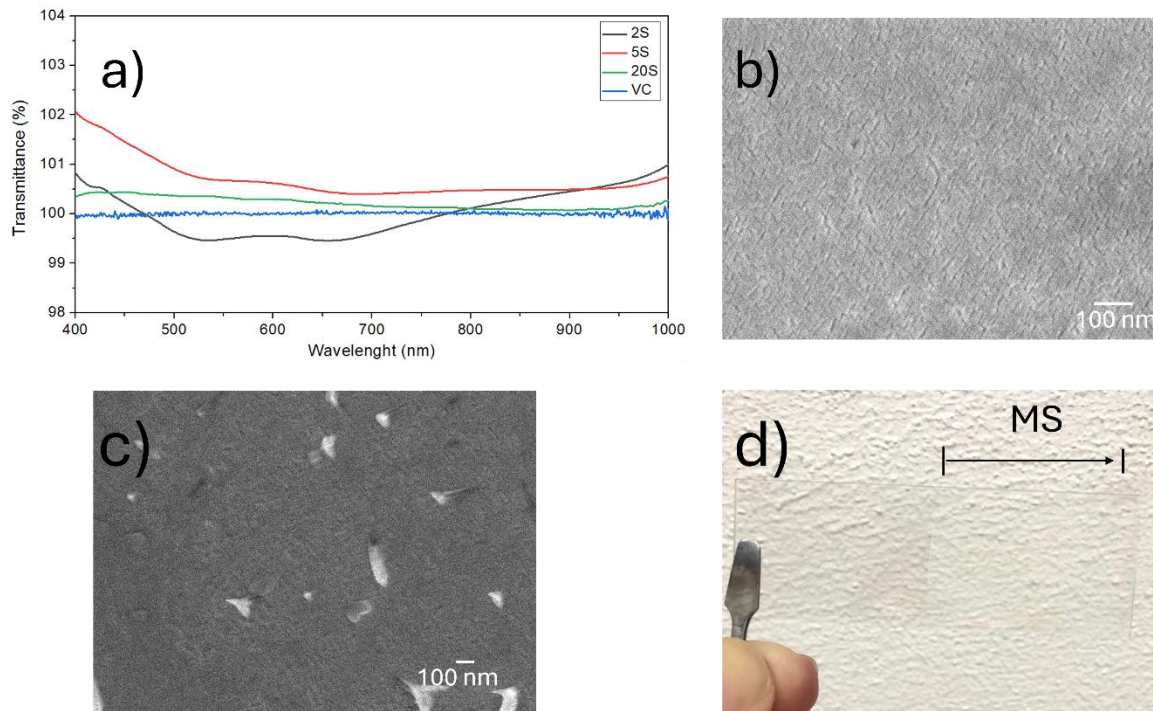


Figura 1. a) espectro UV-Vis de capas de MS y TiO₂ sobre vidrio Corning. b) imagen de SEM de la superficie de MS por nebulizado. c) imagen de SEM de TiO₂ nebulizado. d) imagen de VC el cual muestra que la mitad derecha fue nebulizada con MS/TiO₂ (indicado con una flecha del centro hacia la izquierda).

En la Figura 2 a) se exponen los resultados de las curvas de transmitancia de las bicapas funcionalizadas con OTS u OD8 las cuales denotamos de aquí en adelante como MSF para la MS funcionalizadas con alguno de los dos silanos. En esta misma Figura también se comparan las películas con tratamiento térmico. Puede notarse el mejor efecto antirreflectante en el rango de 400 nm a 1000 nm para las muestras tratadas térmicamente, teniendo con una curva ligeramente más alta para la película con el depósito de OTS. Durante la síntesis de estas películas fue necesario hacer ligeros ajustes en el tiempo de nebulizado de la capa de MS para poder obtener un mejor ajuste entre los distintos

índices de refracción de las películas que se depositaron encima. Para las bicapas de MSF/TiO₂ pudo notarse que el TiO₂ antes y después del tratamiento térmico fue hidrófilo, entonces fabricamos otras donde el OD8 u OTS se depositó sobre el TiO₂, esta bicapa mostró baja transmitancia respecto al VC pero fue hidrofóbica como se muestra en la Figura 2 b) donde el ángulo de contacto fue 100°. Los resultados ponen de manifiesto que es posible fabricar bicapas de buena calidad además que es posible optimizar el proceso de múltiples maneras con la finalidad de incrementar la transmitancia. Un ejemplo puede ser atomizar el OD8 en una concentración mayor o incrementar la presión de nebulizado.

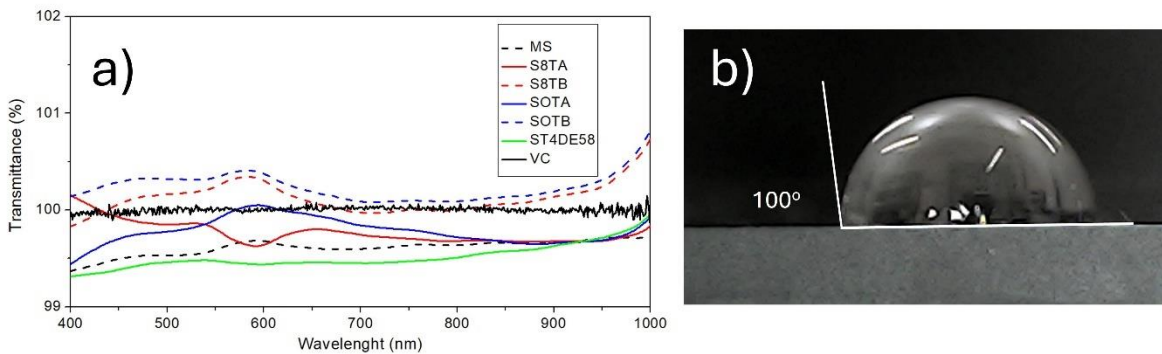


Figura 2. a) espectro UV-Vis de muestra MSF/TiO₂ en vidrio Corning. b) Imagen del ángulo de contacto de una gota de agua sobre las superficies de la bicapa MSF/TiO₂/OD8.

En la Figura 3 a) se exponen los resultados para el sustrato de FTO, es visible la importancia del depósito de MS para poder observar el efecto de antirreflejante, de igual

manera se concluye que el tratamiento térmico es necesario ya que proporciona mayor transmitancia en un intervalo de longitud de onda más grande (480nm a 1000nm).

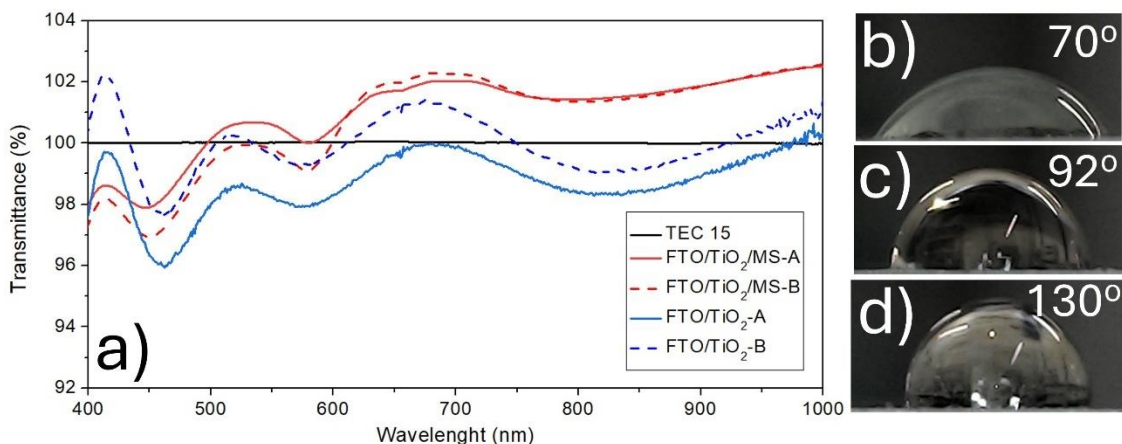


Figura 3. a) espectro UV-Vis de muestra TiO_2/MSF vidrio FTO. Ángulo de contacto de b) superficie de MS, c) superficie de MS con OD8 y d) superficie de MS con OTS.

La Figura 3 b) muestra los resultados de películas depositadas de MS y se compara con el efecto de hidrofóbico del OTS y OD8. Se puede notar que el mayor ángulo de contacto fue para las películas con OTS pues el ángulo de contacto fue 130° . En esta configuración primero se trata el sustrato/ TiO_2 a 400°C , luego se aplica MS y al final se aplica alguno de los dos silanos. Esta configuración fue más efectiva para mantener alta la hidrofobicidad del OTS sin embargo la capacidad de degradar contaminantes será reducida ya que la película expuesta en la superficie es la MS funcionalizada. Los resultados demuestran que mediante el nebulizado es posible depositar películas de buena calidad sobre FTO.

Las mediciones del FTIR-ATR nos permiten identificar las especies químicas remanentes en las películas luego de su síntesis y tratamientos térmicos aplicados. En la Figura 4 se observa los picos que corresponden a los grupos (Si-O-Si) en ambos depósitos de sílica que corresponde en la región alrededor de los 900 cm^{-1} , y en las bandas que se encuentran en

el rango $700\text{ cm}^{-1} - 800\text{ cm}^{-1}$ se encuentran los grupos silanol (Si-OH) correspondientes a la sílica funcionalizada con OTS u OD8. Por otra parte, se observan ligeros picos en 2924 cm^{-1} y 2927 cm^{-1} correspondientes a los enlaces C-H de los grupos (- CH_2) producto de la larga cadena de alquiles del OTS y OD8 se espera que a medida que la cadena de los grupos incrementa estos picos sean más intensos, sin embargo, no se encontró una correlación entre las cadenas de 18 carbonos y de 8 carbonos correspondiente a cada reactivo con la intensidad. Además, para TiO_2 las bandas infrarrojas asociadas a vibraciones Ti-O se encuentran entre $400-600\text{ cm}^{-1}$ según lo reporta (Carrera-Figueiras et al., 2024). El rango anterior se traslapa con las vibraciones de Si-O del vidrio además que el límite de análisis del equipo es hasta 560 cm^{-1} , lo anterior hace difícil asociar los modos vibracionales a alguna especie química en particular, por lo tanto, para capas sobre VC de TiO_2 con tratamiento térmico a 400°C por una hora se caracterizó mediante espectroscopia Raman.

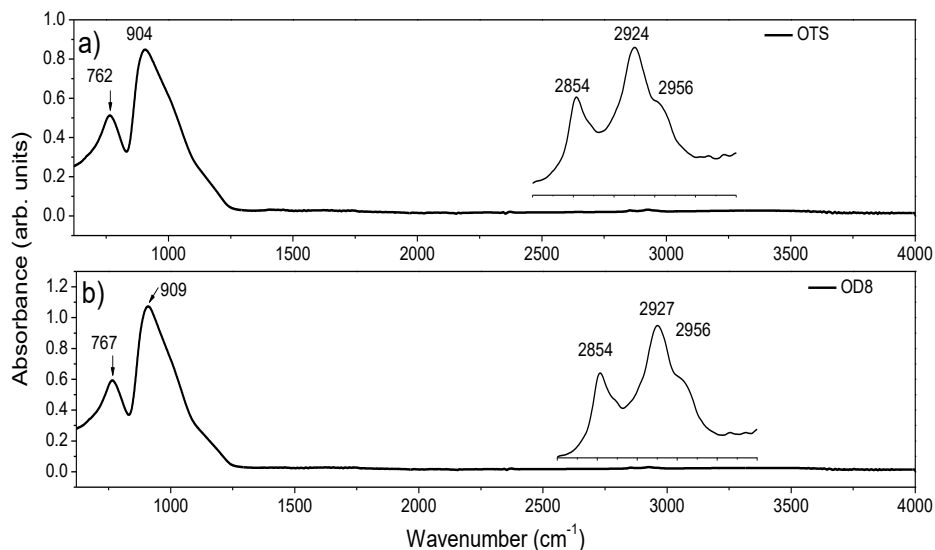


Figura 4. Espectro de FTIR-ATR, a) superficie de MS con OTS y b) superficie de MS con OD8.

La Figura 5 a) muestra el patrón de difracción para rayos X de haz rasante de la MS a) y b) TiO₂ recién depositados sobre VC, para estudiar la cristalinidad de las monocapas de MS y TiO₂. Los espectros concuerdan para materiales amorfos ya que no tienen picos bien definidos. Sin embargo, los análisis demuestran que los materiales fueron sintetizados mediante el nebulizado sobre el VC. La Figura 5 c) muestra el espectro Raman para la monocapa de TiO₂ tratada térmicamente. Según lo reporta (Ceballos-Chuc et al., 2018) los modos vibracionales para la anatasa son: 144, 200, 294, 397, 516 y 639

cm⁻¹ y se produce un corrimiento del pico a 144 cm⁻¹ hacia el azul cuando el material tiene una mezcla de fases cristalinas de anatasa y brookita, En la figura se deja indicado en líneas punteadas rojas las posiciones de los picos asociados a los modos vibracionales de la brookita. Para nuestra muestra indicado con números azules vemos que hay dos picos bastante intensos a 157 y 284 cm⁻¹. Basándonos en esta observación experimental podemos inferir de manera preliminar que la capa luego del tratamiento térmico cristaliza en dos fases cristalinas del TiO₂ predominando la anatasa respecto a la brookita.

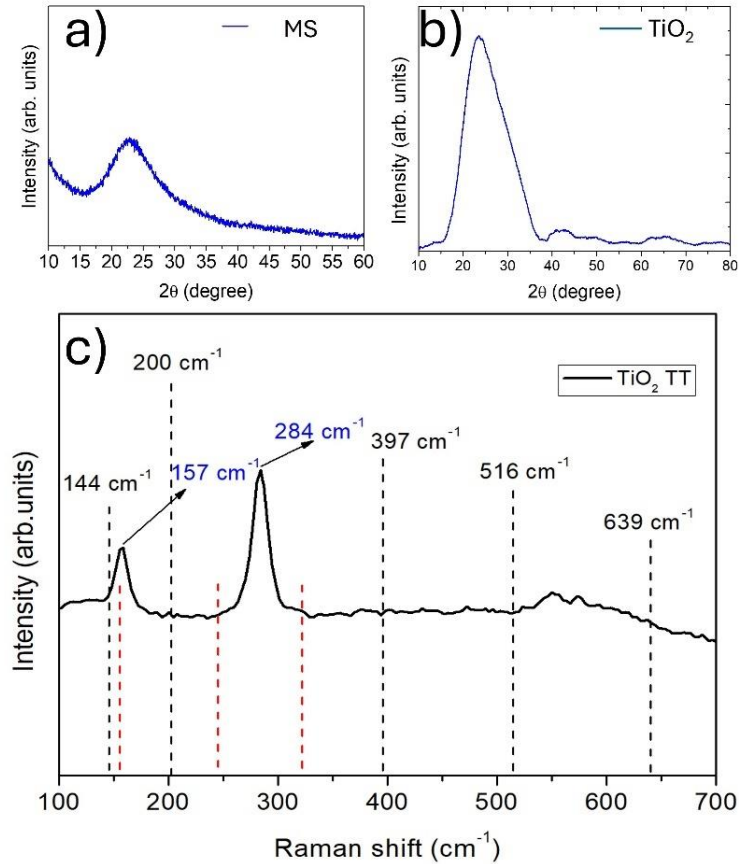


Figura 5. espectro de XRD, a) Muestras de MS, b) Muestras de TiO₂, c) espectro Raman para TiO₂ tratado 1 hora a 400 °C.

Conclusiones

Se evaluaron los parámetros de síntesis para obtener superficies antirreflectantes de capas simples y dobles de SiO₂/TiO₂ mediante la técnica de nebulización, logrando películas de calidad óptica adecuada y mediante un proceso reproducible. Los recubrimientos funcionalizados con OD8 y OTS mejoraron notablemente las propiedades hidrofóbicas, alcanzando ángulos de contacto de 92° y 130°, respectivamente, lo que evidencia un excelente comportamiento frente al agua. Estas superficies también mostraron una transmitancia promedio de hasta 100.8% en el intervalo de 400–1000 nm, y un espesor de aproximadamente 50 ± 10 nm, lo cual refuerza su efectividad como recubrimientos

antirreflectantes. La viabilidad del método de nebulización, junto con la simplicidad del proceso y los resultados obtenidos, demuestra un alto potencial para implementaciones a mayor escala en la industria de recubrimientos. En conjunto, los resultados confirman que el método propuesto constituye una alternativa económica y escalable para la producción de películas delgadas con propiedades antirreflectantes e hidrofóbicas duraderas.

Agradecimientos

“Se agradece el apoyo técnico brindado por el Dr. William Santiago González Gómez y a Jose Bante Guerra en el Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, Cinvestav-IPN”.

Referencias

- Carrera-Figueiras, C., Torres-Miranda, S., Medina-Peralta, S., & Muñoz-Rodríguez, D. (2024). Síntesis y caracterización de partículas de SiO₂ y TiO₂ modificadas con poliestireno para extracción por dispersión de matriz en fase sólida. *Ingeniería*, 28(2), 8–22.
- Ceballos-Chuc, M. C., Ramos-Castillo, C. M., Alvarado-Gil, J. J., Oskam, G., & Rodríguez-Gattorno, G. (2018). Influence of brookite impurities on the raman spectrum of TiO₂ anatase nanocrystals. *Journal of Physical Chemistry C*, 122(34), 19921–19930. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b04987>
- Delgado, L. P., Figueroa-Torres, M. Z., Ceballos-Chuc, M. C., García-Rodríguez, R., Alvarado-Gil, J. J., Oskam, G., & Rodríguez-Gattorno, G. (2020). “Tailoring the TiO₂ phases through microwave-assisted hydrothermal synthesis: Comparative assessment of bactericidal activity”. *Materials Science and Engineering C*, 117, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111290>
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & Walsh, R. P. D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, 51, 33–65. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00011-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00011-8)
- Feng, J. Q. (2018). A computational analysis of gas jet flow effects on liquid aspiration in the collision nebulizer. *Proceedings of the 5th International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, 180. <https://doi.org/10.11159/ffhmt18.180>
- Li, H., Li, N., Zhang, Y., He, H., & Liu, Z. (2017). Anti-reflection OTS-treated SiO₂ thin films with super-hydrophobic property. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 83(3), 518–526. <https://doi.org/10.1007/s10971-017-4458-0>
- Ran, M., Zheng, W., & Wang, H. (2019). Fabrication of superhydrophobic surfaces for corrosion protection: a review. In *Materials Science and Technology (United Kingdom)* (Vol. 35, Issue 3, pp. 313–326). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1560985>
- Reyes-Coronado, D., Rodríguez-Gattorno, G., Espinosa-Pesqueira, M. E., Cab, C., De Coss, R., & Oskam, G. (2008). Phase-pure TiO₂ nanoparticles: Anatase, brookite and rutile. *Nanotechnology*, 19(14). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/14/145605>
- Wu, G., Yang, T., Wang, J., Zhang, H., Shen, J., Fan, B., Zhou, D., & Zhang, F. (2000). Nanoporous silica antireflective coatings for solar heat collectors. *High Temperatures - High Pressures*, 32(6), 687–692. <https://doi.org/10.1068/htwu176>
- Xiaolin, L., Weiqing, Z., Yueqin, L., Yongxing, T., Jinren, S., & Peihui Liang. (2000). Influence of H₂O on structure of base-catalyzed porous SiO₂ antireflective coatings. *Acta Photonica Sinica*, 29, 1035–1039. <https://doi.org/10.1117/12.300638>
- Zäll, E., Järn, M., Karlsson, S., Tryggeson, H., Tuominen, M., Sundin, M., & Wågberg, T. (2023). Aerosol-based deposition of broadband antireflective silica coating with closed mesoporous structure. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 250, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.112078>
- Zhang, Y., Zhang, X., Ye, H., Xiao, B., Yan, L., & Jiang, B. (2012). A simple route to prepare crack-free thick antireflective silica coatings with improved antireflective stability. *Materials Letters*, 69, 86–88. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.11.043>

Zhao, X., Zhao, Q., Yu, J., & Liu, B. (2008). Development of multifunctional photoactive self-cleaning glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354(12–13), 1424–1430.
<https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2006.10.093>