Ingeniería y Competitividad
Vol 28 (3) 2026 doi: 10.25100/iyc.v28i3.15818

Vol 28 (3)

ISSN
0123-3033
e- 2027-8284

Artículo Original

Mejora de películas delgadas conductoras y transparentes de nanocables de plata mediante tratamientos mecánicos y térmicos

Improvement of transparent and conductive thin films based on silver nanowires through mechanical and thermal treatments

Angel Miguel Ardila[1] Andrés Mauricio Bernal[1]

[1]Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Resumen

Introducción: El ITO es ampliamente usado en electrodos transparentes, pero su fragilidad y la escasez de indio limitan aplicaciones flexibles. Las películas de nanohilos de plata (AgNW) ofrecen una alternativa prometedora por su alta conductividad y flexibilidad mecánica.
Objetivo: Se evaluaron el recocido térmico y el prensado mecánico como tratamientos post-deposición para mejorar las propiedades eléctricas y ópticas de películas de AgNW.
Métodos: Se depositaron películas de AgNW sobre sustratos de vidrio y PET por spin-coating y se trataron térmicamente (130–225 °C) o mecánicamente (2–10 tnf). Se emplearon mediciones de cuatro puntas, espectroscopía UV–Vis y SEM.
Resultados: Las películas iniciales presentaron resistencias de hoja inferiores a 30 Ω/sq y transmitancias cercanas al 75 % a 530 nm. El recocido a 165 °C durante 22,5 min redujo la resistencia en (50 ± 3) % sin pérdidas ópticas significativas. El prensado a 4 tnf durante 20 s logró una reducción de (76 ± 2) %, aunque la transmitancia disminuyó ~9 puntos porcentuales por densificación.
Conclusiones: Ambos tratamientos mejoran efectivamente el desempeño eléctrico de las redes de AgNW, posicionándolas como sustitutos viables del ITO en electrodos transparentes flexibles.

Palabras clave: Nanohilos de plata, electrodos transparentes, recocido térmico, prensado mecánico, ITO.

Abstract

Introduction: ITO is widely used in transparent electrodes, but its brittleness and indium scarcity limit flexible applications. Silver nanowire thin films offer a promising alternative due to their high conductivity and mechanical flexibility.
Objective: This work evaluated thermal annealing and mechanical pressing as post-deposition treatments to enhance the electrical and optical properties of AgNW thin films.
Methods: AgNW films were deposited on glass and PET substrates by spin-coating and subsequently treated by thermal annealing (130–225 °C) or mechanical compression (2–10 tnf). Characterization included four-point probe measurements, UV–Vis spectroscopy, and SEM.
Results: As-prepared films showed sheet resistances below 30 Ω/sq and transmittances near 75 % at 530 nm. Thermal treatment at 165 °C for 22.5 min reduced sheet resistance by (50 ± 3) % without significant optical losses. Mechanical pressing at 4 tnf for 20 s achieved a (76 ± 2) % reduction, though transmittance decreased by ~9 percentage points due to nanowire densification.
Conclusions: Both treatments effectively improve the electrical performance of AgNW networks, positioning them as viable ITO replacements for flexible transparent electrodes.

Keywords: Silver nanowires, transparent electrodes, thermal annealing, mechanical pressing, ITO.

¿Cómo citar?

Ardila MA, Bernal AM. Mejora de películas delgadas conductoras y transparentes de nanocables de plata mediante tratamientos mecánicos y térmicos. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(3) e-20115818

https://doi.org/10.25100/iyc.v28i3.15818

Recibido: 5/06/26
Revisado: 11/07/26
Aceptado: 20/08/26
Online: 14/09/26

Correspondencia

ambernalf@unal.edu.co

CrossMark

CC BY NC SA

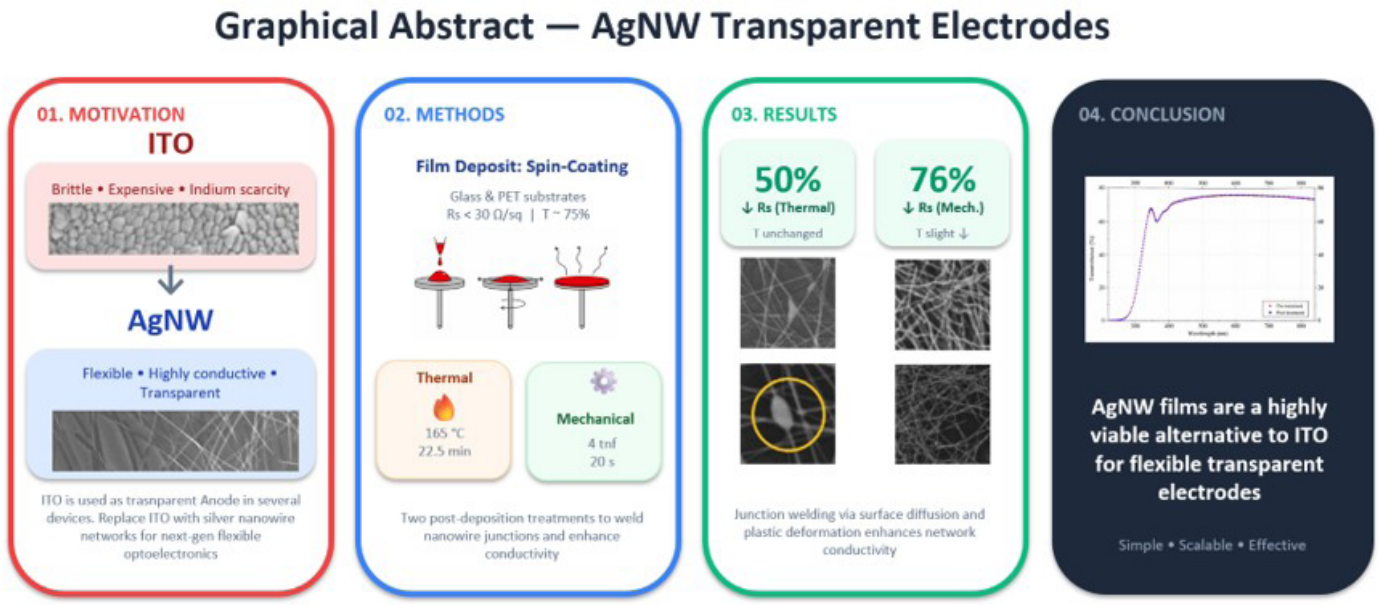
OPEN ACCESS

¿Por qué se realizó el estudio?
El estudio se llevó a cabo para encontrar una alternativa viable al óxido de indio y estaño (ITO) —material costoso, escaso y frágil— utilizado ampliamente como ánodo en dispositivos optoelectrónicos para fabricar electrodos transparentes. Los investigadores buscaban mejorar el rendimiento eléctrico de películas delgadas de nanocables de plata (AgNW), fabricadas mediante recubrimiento por rotación (*spin-coating*), aplicando tratamientos sencillos posteriores a la deposición.

¿Cuáles fueron los hallazgos clave?
Los hallazgos clave indican que tanto el recocido térmico como el prensado mecánico reducen significativamente la resistencia laminar de las películas de AgNW. El tratamiento térmico a 165 °C durante 22,5 minutos logró una reducción de aproximadamente el 50 %, mientras que el prensado mecánico con una fuerza de 4 toneladas durante 20 segundos consiguió una reducción más sustancial, de cerca del 76 %; ambos métodos lograron estos resultados sin comprometer gravemente la transmitancia óptica.

¿Qué aportan estos hallazgos?
Estos hallazgos contribuyen a establecer una vía práctica, escalable y eficaz para mejorar los electrodos transparentes de AgNW sin necesidad de utilizar materiales compuestos complejos. Asimismo, definen pautas de procesamiento claras que equilibran el rendimiento eléctrico y la transparencia óptica, reforzando así la viabilidad de las películas de AgNW como una alternativa de alto rendimiento y bajo costo al ITO en dispositivos optoelectrónicos.

Graphical Abstract



doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

Introducción

Los dispositivos optoelectrónicos como pantallas de cristal líquido (LCD), células solares, paneles táctiles, electrónica flexible, diodos emisores de luz (LED) y LEDs orgánicos (OLED) requieren películas conductoras transparentes que proporcionan simultáneamente alta conductividad eléctrica y alta transmitancia óptica en el rango visible. Estas propiedades se logran mediante materiales con una alta densidad de portadores de carga en la banda de conducción, manteniendo una absorción mínima de luz visible. Entre los materiales más utilizados se encuentran los óxidos conductores transparentes (TCO), incluyendo óxido de estaño (SnO_2), óxido de indio (In_2O_3), óxido de estaño dopado con flúor (FTO) y especialmente óxido de estaño de indio (ITO), que presenta alta transmitancia óptica (T ≈ 85%) y bajas resistencias () $R_s < 100$ (1–4). La transparencia de los TCO se debe a su amplia banda prohibida (típicamente > 3 eV), que impide su absorción en el espectro visible; para ITO, este valor es aproximadamente 3,8 eV (3–5).

A pesar de estas propiedades sobresalientes, el uso de ITO presenta limitaciones significativas. El indio es un elemento escaso y costoso, y las películas ITO presentan un comportamiento frágil similar a la cerámica, lo que las hace inadecuadas para dispositivos flexibles (1,5,6). En consecuencia, se ha dirigido una considerable investigación hacia materiales alternativos, incluyendo nanoestructuras basadas en carbono como el grafeno y los nanotubos de carbono (7–9). Sin embargo, las nanoestructuras metálicas—particularmente los nanohilos metálicos—han surgido como los candidatos más prometedores debido a su excelente rendimiento eléctrico y óptico (2,10–12). Entre ellas, los nanohilos de plata (AgNWs) destacan por la alta conductividad eléctrica de la plata (~6,3 × 10^7 S/m), la más alta de todos los metales, junto con su tasa de oxidación relativamente baja (10,13,14). Las redes basadas en AgNW ya han demostrado un rendimiento comparable al ITO en aplicaciones como células solares, LEDs y electrónica flexible (2,11,15). Estas nanoestructuras suelen consistir en diámetros del orden de decenas de nanómetros y longitudes de hasta cientos de micrómetros, formando redes conductivas percolativas que permiten un transporte eficiente de carga manteniendo la transparencia óptica (10,12,16).

Aunque se han desarrollado múltiples técnicas de fabricación para depositar AgNWs, lograr un control preciso sobre la morfología de la película y las condiciones de deposición sigue siendo un desafío crítico (12,14,17). Estos parámetros influyen fuertemente en propiedades clave como el grosor, la uniformidad y la conectividad de la película. En general, aumentar el grosor de la película mejora la conductividad eléctrica gracias a las interconexiones mejoradas de los nanohilos, pero reduce la transmitancia óptica debido al aumento de la absorción y dispersión de la luz. Por el contrario, las películas más finas presentan mayor transparencia pero un rendimiento eléctrico inferior (18,25). En este contexto, el recubrimiento de spin ha surgido como una técnica simple, rentable y escalable, adecuada para aplicaciones industriales (11,12). Este método consiste en depositar una pequeña cantidad de soluciones de nanohilos sobre un sustrato, que luego se gira a altas velocidades para dispersar la solución mediante fuerza centrífuga, formando una película fina y uniforme. Tras la deposición, se aplica normalmente un secado térmico para eliminar disolventes e impurezas residuales, dando lugar a una red aleatoria de nanohilos donde ocurre conducción eléctrica en las uniones y se permite la transmisión de luz a través de espacios vacíos dentro de la red (11,14).

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

Estudios recientes han demostrado que varias estrategias post-deposición pueden mejorar significativamente el rendimiento de los electrodos transparentes de AgNW. El recocido térmico se ha empleado ampliamente para eliminar especies orgánicas residuales y promover la difusión superficial activada térmicamente en las uniones de nanohilos, lo que conduce a una menor resistencia a las uniones y una mejor conductividad eléctrica (22–25). La compresión mecánica también ha demostrado ser una alternativa eficaz al aumentar el área de contacto físico entre nanohilos adyacentes, reducir la rugosidad superficial y mejorar tanto la conductividad eléctrica como la adhesión al sustrato (12,17,23). Más recientemente, se han desarrollado arquitecturas híbridas y de electrodos compuestos que incorporan AgNWs con polímeros conductores, óxidos metálicos, grafeno, nanotubos de carbono u otros materiales funcionales para mejorar aún más el rendimiento eléctrico, la estabilidad mecánica y la durabilidad ambiental (2,12,17,23,28).

Aunque estos enfoques han demostrado mejoras notables en electrodos conductores transparentes, con frecuencia implican pasos adicionales de fabricación y múltiples materiales funcionales, lo que dificulta aislar la contribución intrínseca de los tratamientos térmicos o mecánicos post-deposición en la propia red conductora de AgNW. Además, los efectos combinados de materiales compuestos y el postprocesamiento suelen complicar la identificación de las condiciones de procesamiento que maximizan de forma independiente el rendimiento eléctrico mientras preservan las propiedades ópticas de las películas de AgNW (12,17,22–25).

En este contexto, el presente trabajo investiga películas delgadas de AgNW depositadas directamente por recubrimiento de espín sin incorporar componentes conductores o poliméricos adicionales. Este enfoque permite la evaluación independiente del recocido térmico y la compresión mecánica sobre las propiedades eléctricas, ópticas y morfológicas de la red de AgNW. Optimizando sistemáticamente la temperatura de procesamiento, el tiempo de exposición, la presión aplicada y el tiempo de prensado, este estudio establece directrices prácticas para reducir la resistencia de la lámina manteniendo una alta transmitancia óptica, proporcionando una vía sencilla y escalable para la fabricación de electrodos conductores transparentes basados en AgNW.

Experimental

Para depositar nanohilo de plata (AgNW), películas delgadas, un recubridor de spin Laurell y una suspensión comercial AgNW (Blue Nano Inc.). Los nanohilos tenían un diámetro medio de 35 nm y una longitud media de 10 µm, y se dispersaban en etanol a una concentración del 1,5% en peso con una densidad de 10 mg mL^{-1}, donde la plata representaba aproximadamente el 95,5% en peso del contenido sólido. Las películas finas de AgNW se fabricaban mediante la técnica de recubrimiento por spin, un método de deposición simple, versátil, de bajo coste y escalable, adecuado para electrodos conductores transparentes de gran superficie.

La suspensión AgNW se depositó a velocidades de rotación de 3000 rpm y 15000 rpm para sustratos de vidrio y PET, respectivamente. Para mejorar la adhesión y reproducibilidad de la película, todos los sustratos se sometieron al mismo protocolo de limpieza, que consistía en limpieza ultrasónica con jabón desengrasante, agua desionizada, acetona y alcohol isopropílico, seguida de secado y tratamiento con plasma de oxígeno para obtener una limpieza y humedad superficiales comparables. Un volumen fijo de suspensión de 60 µL fue depositado por micropipeta

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

sobre sustratos de 4 cm² y recubierto por centrifugación durante 3 minutos a temperatura ambiente antes de secar en una placa caliente.

Todas las películas se fabricaron utilizando parámetros de deposición idénticos, incluyendo concentración de AgNW, volumen depositado, preparación del sustrato, condiciones de recubrimiento por centrifugado y procedimiento de secado, para asegurar la fabricación reproducible de la película. Aunque las películas de AgNW recubiertas por spin consisten inherentemente en nanohilos distribuidos aleatoriamente que generan fluctuaciones locales de densidad, el protocolo de fabricación adoptado produjo redes percolativas estadísticamente reproducibles con propiedades ópticas y eléctricas comparables. Por lo tanto, los resultados eléctricos y ópticos reportados a lo largo de este trabajo corresponden a valores medios obtenidos de múltiples películas fabricadas bajo condiciones experimentales idénticas.

El tratamiento térmico post-deposición se realizó en un horno de resistencia tipo caja, mientras que el tratamiento mecánico se realizó mediante una prensa hidráulica mecánica. La caracterización óptica se realizó midiendo los espectros de transmitancia entre 300 y 800 nm con un espectrofotómetro Varian Cary 5000. La caracterización morfológica se realizó utilizando un microscopio electrónico de barrido TESCAN VEGA3 (SEM). La caracterización eléctrica se realizó midiendo la resistencia de la lámina () con un sistema de sonda Veeco FPP5000 de cuatro puntos. Para cada condición post-deposición, se midieron aproximadamente cinco muestras fabricadas de forma independiente. La resistencia de la lámina se determinó en la región central de cada muestra mientras se rotaba ligeramente la muestra entre mediciones sucesivas para minimizar posibles efectos asociados a la orientación preferencial de los nanohilos. Los valores reportados corresponden a la variación porcentual media obtenida de las muestras independientes, y las barras de error en los gráficos representan el error estándar correspondiente.R_s

Una vez fabricadas, las películas de AgNW fueron sometidas a tratamiento térmico post-deposición a temperaturas que oscilaban entre 130 y 225 °C y tiempos de exposición entre 22 y 90 minutos. Las películas depositadas sobre sustratos PET fueron sometidas a compresión mecánica aplicando fuerzas entre 2 y 10 toneladas-fuerza (tnf) durante duraciones que iban de 10 a 30 s. Posteriormente se evaluó la influencia de ambos tratamientos postdeposición sobre la morfología de la película, la resistencia de la lámina y la transmitancia óptica.

Resultados y discusión

Las películas delgadas de AgNW fabricadas mediante el método de recubrimiento de spin se caracterizaron eléctrica, óptica y morfológicamente, logrando resultados parciales comparables a los de las películas comerciales de ITO. Esta técnica de deposición permite obtener películas finas mediante la dispersión centrífuga de la solución, mientras que las propiedades físicas finales pueden controlarse variando los parámetros de fabricación. Bajo las condiciones utilizadas en este trabajo, las películas delgadas de AgNW depositadas sobre vidrio mostraron una resistencia media de lámina (Rs) de (24 ± 2) Ω/cuadrado y una transmitancia de (76 ± 1)%, mientras que las películas depositadas en PET mostraron valores correspondientes de (27 ± 2) Ω/sq y (63 ± 1)%, respectivamente. La menor transmitancia observada en los sustratos PET se debe principalmente a las propiedades ópticas intrínsecas del sustrato polimérico.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

La Fig. 1 muestra imágenes superficiales representativas de películas de AgNW depositadas en vidrio a ampliaciones de 100 µm y 10 µm. La distribución de AgNW observada en estas micrografías es cualitativamente similar a la obtenida en sustratos PET bajo las mismas condiciones de deposición. Las imágenes revelan la formación de una red aleatoria de nanohilos percolativos que permite la transmisión de luz a través de las regiones descubiertas mientras la conducción eléctrica tiene lugar a través de los nanohilos metálicos interconectados. También es evidente que el material no está distribuido de forma homogénea a lo largo del sustrato, lo que resulta en regiones con diferentes densidades de nanohilos. Estas variaciones locales pueden aumentar la rugosidad superficial, generar una distribución de corriente no uniforme y producir uniones con diferentes cualidades de contacto eléctrico.

Esta morfología heterogénea es una característica intrínseca de las redes percolativas de AgNW recubiertas por espín y surge de la distribución estocástica de los nanohilos durante el proceso de deposición. Aunque no se puede esperar una uniformidad morfológica perfecta, el protocolo de fabricación fue diseñado para maximizar la reproducibilidad de muestra a muestra manteniendo la preparación idéntica del sustrato, concentración de AgNW, volumen de solución depositada, parámetros de recubrimiento de espín y condiciones de secado. Bajo estas condiciones controladas, se obtuvieron de forma consistente redes percolativas estadísticamente equivalentes. En consecuencia, los valores reportados de resistencia en lámina y transmitancia óptica corresponden a mediciones medias obtenidas de muestras fabricadas de forma independiente preparadas bajo condiciones experimentales idénticas. Las barras de error asociadas representan el error estándar calculado a partir de estas muestras independientes, reflejando así la variabilidad inherente del proceso de fabricación en lugar de la incertidumbre asociada a mediciones repetidas en una sola muestra.

Aunque la uniformidad morfológica es deseable para electrodos conductores transparentes, el objetivo de este trabajo no es eliminar la naturaleza intrínseca aleatoria y percolativa de las redes AgNW. En cambio, los tratamientos post-deposición propuestos buscan mejorar el rendimiento eléctrico mejorando las uniones de nanohilos mientras se preservan las vías conductoras responsables del transporte de carga. En dispositivos optoelectrónicos prácticos, los vacíos restantes dentro de la red AgNW suelen ser parcialmente infiltrados por capas funcionales depositadas posteriormente, como PEDOT:PSS; AZO, TiO_2 o ZnO, que mejoran la interfaz con capas adyacentes y facilitan la integración del dispositivo sin requerir que la red conductora se convierta en una película metálica continua (29).

Por ello, se investigaron dos tratamientos post-deposición, a saber, el recocido térmico y el prensado mecánico, para mejorar la morfología de las películas de AgNW fabricadas y, en consecuencia, optimizar su rendimiento eléctrico y óptico.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

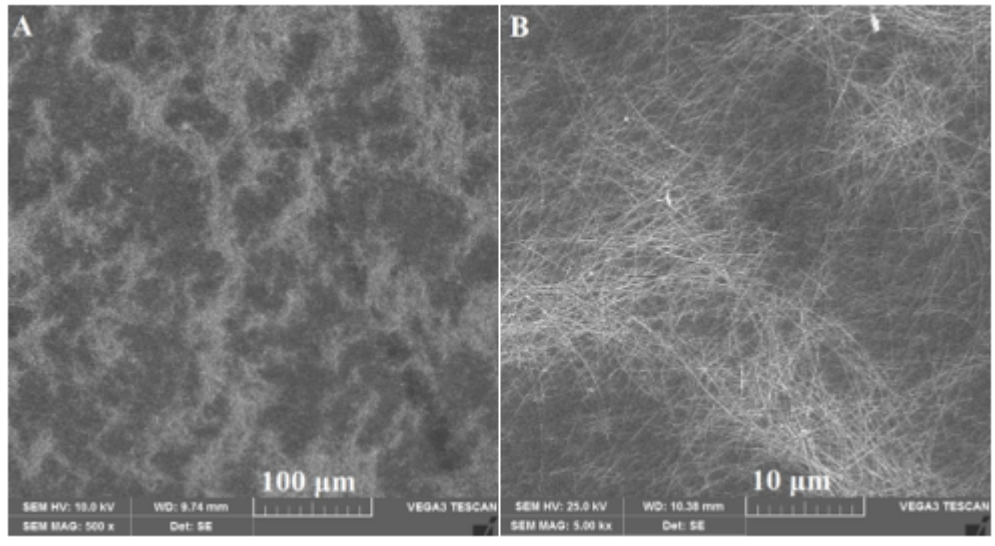


Figura. 1. Micrografías representativas de superficie de películas delgadas de AgNW depositadas en vidrio a las escalas (A) 100 y (B) 10. Las imágenes muestran la distribución de la red de AgNW a lo largo del sustrato y la formación de regiones con diferentes densidades de nanohilos. La morfología observada es cualitativamente similar a la obtenida para películas de AgNW depositadas en PET bajo las mismas condiciones de fabricación.μm

R. Método térmico

Las películas delgadas se sometieron a ambientes de alta temperatura, típicamente entre 100 y 250 °C, como parte de un tratamiento térmico post-deposición. Este proceso desempeña un papel crucial en la mejora del rendimiento eléctrico de las redes de nanohilos de plata (AgNW). Dependiendo de la temperatura específica y el tiempo de exposición, se puede lograr un aumento significativo en la conductividad. Esta mejora se atribuye principalmente a la evaporación y descomposición de compuestos orgánicos residuales —como disolventes y tensioactivos— que quedan de los procesos de síntesis y deposición (15,16).

Además, el tratamiento térmico promueve cambios morfológicos en las uniones entre AgNWs adyacentes. A diferencia de la plata a granel, cuyo punto de fusión es aproximadamente 962 °C, las redes AgNW pueden experimentar una evolución significativa de la unión a temperaturas mucho más bajas mediante difusión superficial activada térmicamente. Debido a la alta relación superficie-volumen de los nanohilos, la movilidad atómica en la superficie se ve lo suficientemente potenciada como para promover la formación local del cuello y el fortalecimiento gradual de los contactos entre nanohilos sin fusión masiva. Como resultado, la resistencia de la unión, que domina la resistencia global de láminas de las redes AgNW, se reduce sustancialmente, lo que conduce a un transporte de carga más eficiente a través de la red percolativa mientras se preserva la morfología global de los nanocables (22,23,26–29).

Además, el recocido térmico puede mejorar la adhesión entre los AgNW y el sustrato, contribuyendo a una mayor estabilidad mecánica y durabilidad de las películas (23). Sin embargo, es importante optimizar cuidadosamente las condiciones de recocido, ya que temperaturas excesivamente altas o tiempos de exposición prolongados pueden provocar degradación de

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

nanohilos, aglomeración o daño en sustratos sensibles a la temperatura, especialmente en aplicaciones electrónicas flexibles (26–28).

Los resultados muestran que el aumento conductivo tiene tres etapas diferentes: es decir, en un rango de temperatura de 100 a 140°C se eliminará moléculas orgánicas que mejorará el contacto con el AgNW. A medida que aumenta la temperatura, la difusión superficial activada térmicamente se vuelve más significativa debido a la alta energía superficial de los nanohilos (29). Este proceso promueve la reorganización atómica en las uniones de nanohilos, favoreciendo la formación del cuello y mejorando el contacto eléctrico entre nanohilos adyacentes sin requerir fusión masiva de plata. Este proceso lleva a que en muchos de los contactos de AgNW exista un tipo de soldadura que facilitará el tránsito de portadores de carga, disminuyendo así el . ii. A medida que la temperatura aumenta entre 150-180°C, mejora en los registros conductores, encontrando un mínimo de los cuales dependería de la temperatura y el tiempo de exposición, proporcionando los valores óptimos donde obtendrá la mayor resistencia relativa decreciente. iii. Para temperaturas superiores a 180°C, se alcanzará un punto en el que la energía superficial se minimiza de tal manera que degenera las nanoestructuras rompiéndolas y recristalizándolas en forma de una especie de nanoesferas de Ag. Este proceso de máxima reducción conduce a puntos desconectados, reduciendo la conductividad y aumentando el valor de la . La Fig. 2 muestra dos imágenes SEM diferentes de superficies de películas de AgNW, la Fig. 2A una superficie obtenida tras la deposición de espín sin ningún tratamiento post-depósito y la Fig. 2B una superficie tras tratamiento térmico, que resalta el grupo de nanoesferas obtenidas a una temperatura de 225°C durante 90 minutos, lo que significa que la destrucción de AgNW se produce con esta temperatura, un resultado que no desea. Intentamos encontrar los mejores parámetros, que son el tiempo y la temperatura óptimos, donde se obtiene la máxima reducción relativa de .$R_s R_s R_s R_s$

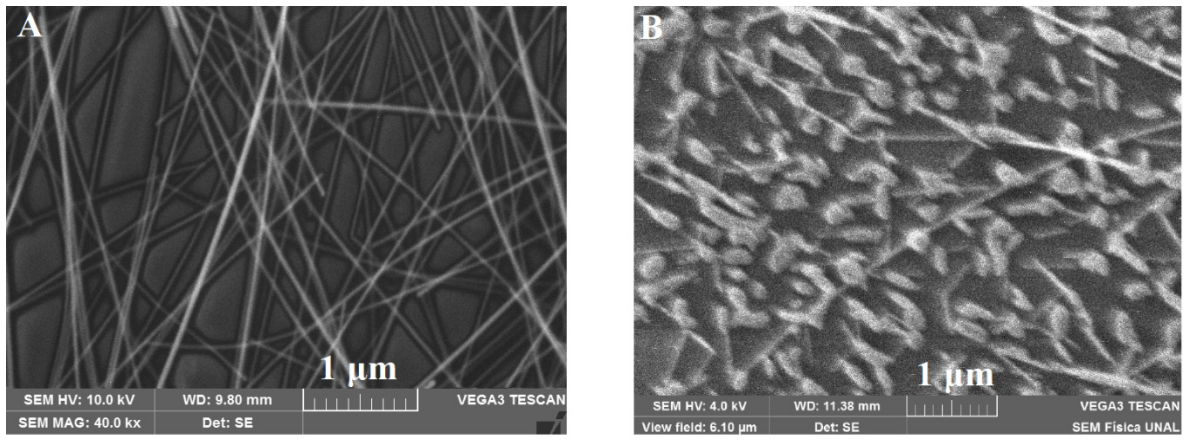


Figura 2. Películas delgadas de AgNW. A) Superficie obtenida con técnica de depósito de recubrimiento de espín. B) Esferoidización de AgNW tras tratamiento térmico post-depósito a 225 °C durante 90 minutos.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

Para encontrar un tiempo óptimo (t_{opt}), fije una temperatura de 165 °C y barrida en un intervalo de tiempo entre 10 y 40 minutos. Los resultados obtenidos se detallan en la Fig. 3, donde se muestra que la disminución relativa para cada tiempo fue del 29%, 54%, 49% y 25%, es decir, una reducción entre un cuarto y la mitad de los valores iniciales de resistencia. La curva que ajusta la variación relativa de la resistencia en función del tiempo deja claro la existencia de dos regiones con un tiempo máximo. El modelo indica que la curva de ajuste tiene un máximo local en 22,5 minutos, donde se lograría una disminución teórica de hasta un 59%. A partir de ahí, comienza a disminuir, pasando de la mitad a una cuarta parte de la resistencia inicial, el valor obtenido en los tiempos de exposición más altos. El tiempo óptimo elegido fue $t_{R_{s_{opt}}}$ = 22,5 min, la cantidad utilizada para variar la temperatura de recocido.

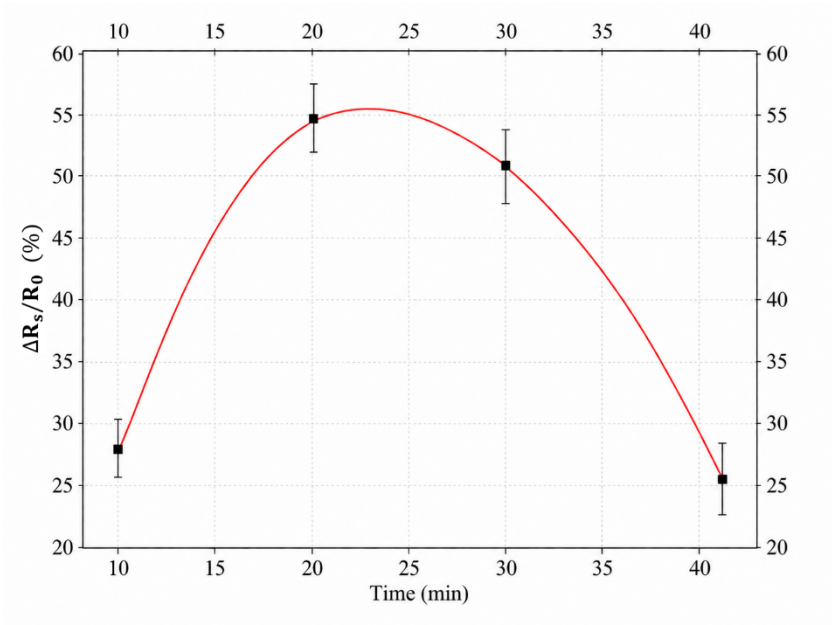


Figura 3. Relación entre la disminución relativa de y el tiempo de exposición en T=165 °C.R_s

El tiempo óptimo se utiliza para realizar un barrido de temperaturas entre 130 y 190 °C, resultados que se consignan en la Fig. 4, donde se observa que para valores entre 158 y 165 °C existe un máximo local cuya variación alcanza el 50%. Valores cercanos a este máximo, temperaturas de 160 y 165 °C, muestran una disminución media de alrededor del (51±2 %).

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

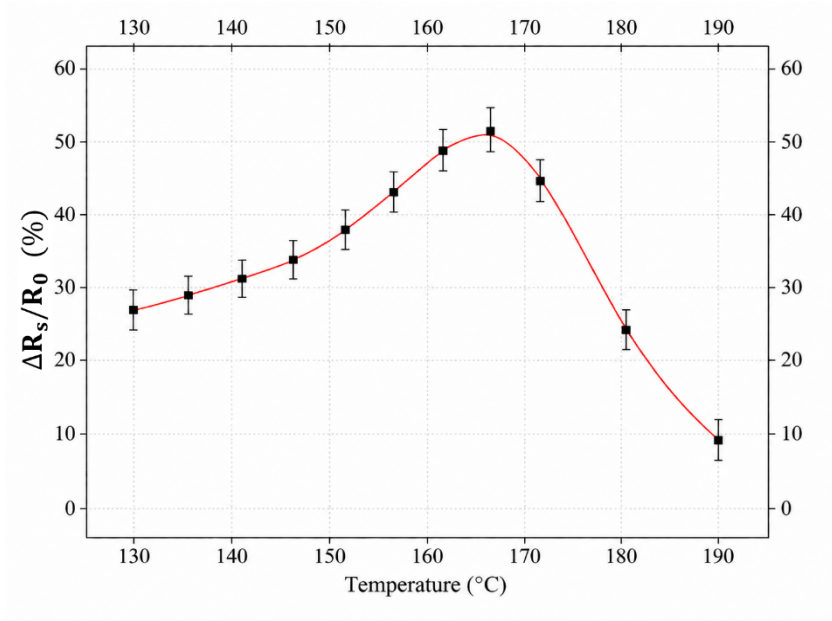


Figura 4. Relación entre la disminución relativa de y la temperatura en t$R_{s_{opt}}$ 22,5 min.

La Fig. 4 delimita nuevamente dos regiones diferentes. La primera se encuentra entre 130 °C y el máximo local, donde hay un aumento en la variación porcentual de la resistencia conforme aumenta la temperatura. La segunda región va entre el máximo y 190 °C donde hay una disminución en los valores porcentuales. Ambas regiones mostradas en las Fig. 3 y 4 están relacionadas con el cambio sufrido por las capas nanoestructuradas antes del aumento de temperatura. En primer caso, lo que causa este tratamiento es la limpieza complementaria a la realizada en el proceso de fabricación. Las regiones circundantes cerca de los máximos locales representan un equilibrio entre la eliminación de especies orgánicas residuales y la evolución activada térmicamente de las uniones AgNW. Una vez eliminados la mayoría de los compuestos residuales, la energía térmica suministrada promueve la difusión superficial atómica en las uniones de nanohilos. Este mecanismo aumenta el área de contacto efectiva entre nanohilos vecinos mediante la formación local del cuello, reduciendo sustancialmente la resistencia de la unión, que es la contribución dominante a la resistencia global de la lámina de la red AgNW. Bajo estas condiciones, la red de nanohilos alcanza su máximo rendimiento eléctrico sin una degradación morfológica significativa, mientras que las temperaturas más altas favorecen una difusión superficial excesiva, lo que conduce a la esferoidización y a un deterioro progresivo de las vías conductoras. Según los datos medidos, los valores óptimos obtenidos son mínimos y se logra una reducción en la resistencia de láminas de aproximadamente el 50% (22,23,26–30).$t_{opt} = 22.5 T_{opt} = 160°C,$

En la forma de estudiar morfologías de películas tras el postratamiento, la Fig. 5 agrupa algunas imágenes tomadas con el SEM de diferentes películas sometidas a este proceso. La Fig. 5a muestra la superficie de una película a diferentes escalas y cuya reducción de resistencia fue del 49% tras estar a una temperatura de 165 °C durante 22,5 minutos. Es evidente cómo la superficie presenta múltiples puntos de alto brillo junto a las conexiones del AgNW que no existían en las imágenes de películas sin tratamiento. Esto resalta lo explicado anteriormente, que existe un proceso de degradación del material que provoca la recristalización entre conexiones que mejora su

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

conductividad. También se evidencia en la Fig. 5b que la recristalización puede ocurrir alrededor de un alambre individual, lo que conduce a un engrosamiento del diámetro que no afecta mucho a la transmitancia.

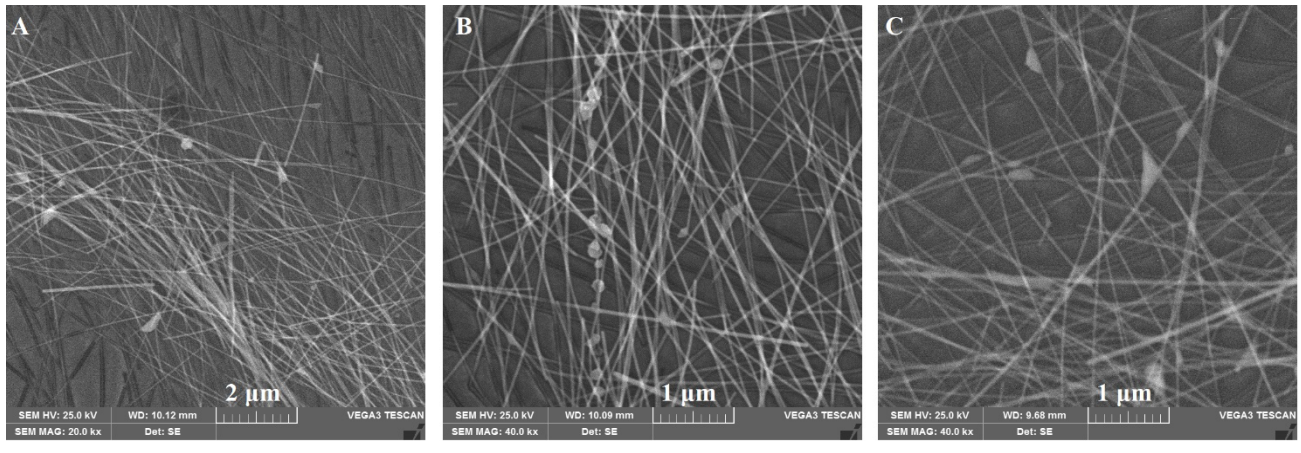


Figura 5. (a): Superficies de AgNW tras tratamiento térmico a 165 °C durante 22,5 min, disminuyendo relativamente un 49%, los puntos brillantes observados alrededor de varias intersecciones de nanohilos son consistentes con modificaciones morfológicas localizadas producidas durante el recocido, lo que sugiere un aumento en el área de contacto entre nanohilos adyacentes. (b): Muestra que el cristal puede recristalizarse alrededor de un NW individual. (c): Superficies de AgNW tras un tratamiento térmico a 190 °C durante 22,5 min, disminuyendo relativamente un 13%. Es evidente que existe una especie de soldadura entre materiales de conexión.

Los resultados indicaron que para temperaturas muy altas, la conductividad eléctrica disminuyó significativamente respecto a los valores máximos encontrados. Para examinar este punto, se analiza la Fig. 5c, que muestra la superficie expuesta a una temperatura de 190 °C durante 22,5 minutos. Se observa que el número de puntos brillantes aumenta considerablemente respecto a las primeras imágenes mostradas. En principio, lo que ocurrió en este régimen térmico es que la tasa de degradación del material nanoestructurado que se degrada tras la difusión atómica y se redeposita alrededor del material o entre las conexiones es tan alta que provoca una degradación total del material, lo que conduce a procesos de división o fractura de las nanoestructuras. Esto último afecta al número de conexiones presentes en la nanored, lo que hará que la variación relativa de la resistencia tenga una tendencia decreciente hasta alcanzar cambios porcentuales negativos.

Finalmente, en la Fig. 6, el material sobre el sustrato se aprecia a una escala de 1 µm, donde varias uniones presentan cambios morfológicos consistentes con un contacto entre nanohilos mejorado tras el recocido térmico, donde el material parece más grueso debido a la recristalización. Este fenómeno se repite junto con la superficie, provocando una reducción significativa de la resistencia de contacto y resultando en una mejora conductiva.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

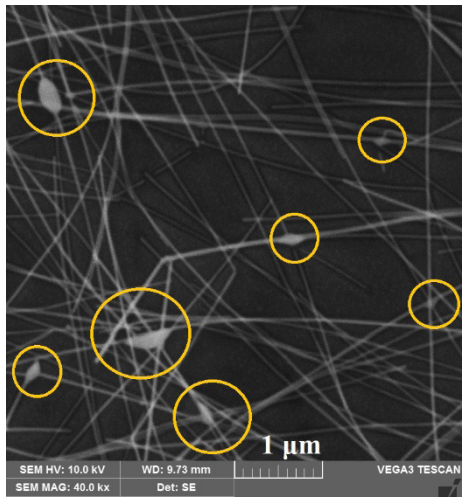


Figura 6. Superficie de AgNW a escala de 1 µm que destaca puntos de unión de soldadura tras tratamiento térmico a 165 °C durante 22,5 minutos.

En el caso de las propiedades ópticas, la Fig. 7 muestra dos espectros correspondientes a la media de la transmitancia de las superficies anteriores (rojas) y una vez sometidas (azul) al tratamiento térmico. Muestra que no hay cambios sustanciales en la tendencia de los espectros; incluso en 550 nm los valores difieren unos pocos decimales, pasando del 78 % al 77 %, por lo que los cambios presentados en esta región del espectro son prácticamente nulos. Los resultados concluyen que las variaciones realizadas por el método térmico respecto a la transmitancia son insignificantes en lo visible.

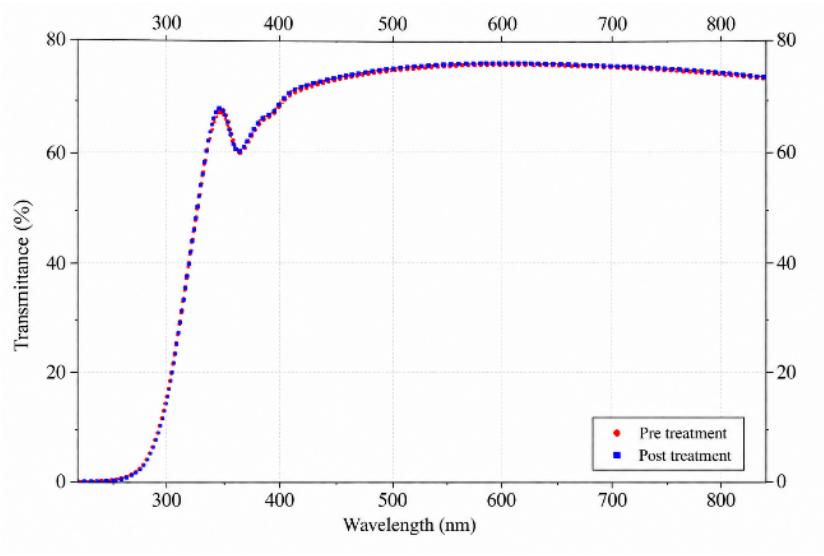


Figura 7. Comparación entre espectros de transmitancia media antes (rojo) y después de aplicar tratamiento térmico (azul) en películas delgadas de AgNW.

Cabe destacar que la mejora observada tras el recocido térmico no proviene de la fusión masiva de plata. Debido a las dimensiones a nanoescala de los AgNW y su alta relación superficie-volumen, la movilidad atómica en la superficie del nanohilo se vuelve significativa a temperaturas muy por debajo del punto de fusión de la plata a granel. En consecuencia, la difusión superficial local en las uniones de nanohilos puede reducir la resistencia de contacto sin fundir todo el nanohilo.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

B. Presiones mecánicas

Algunas de las principales limitaciones de las películas delgadas de AgNW incluyen la pobre homogeneidad, derivada de la distribución aleatoria de los nanohilos, y la débil adhesión al sustrato, lo que puede comprometer tanto el rendimiento eléctrico como la estabilidad mecánica (12,17). Estos problemas son críticos en aplicaciones que requieren conductividad uniforme y durabilidad a largo plazo, como dispositivos optoelectrónicos flexibles (2,20). Una estrategia eficaz para mitigar estos inconvenientes es la aplicación de compresión mecánica como tratamiento post-deposición (23,24).

La compresión mecánica no solo mejora la conductividad eléctrica, sino que también mejora la uniformidad y adhesión de la película. Este proceso reduce la rugosidad superficial y fuerza a la red de nanohilos a un contacto más cercano con el sustrato, promoviendo un anclaje físico más fuerte (24,28). A nanoescala, la compresión aumenta significativamente el área de contacto entre nanohilos adyacentes, reduciendo así la resistencia a la unión, que es uno de los principales factores que contribuyen a la resistividad general de las películas de AgNW (22,23). Como resultado, el transporte de carga a través de la red se vuelve más eficiente, lo que conduce a una mejora del rendimiento eléctrico (20,21).

Además, la densificación de la red de nanohilos inducida por la compresión disminuye el número de vacíos y regiones mal conectadas, que suelen ser responsables de las inhomogeneidades eléctricas (12,17). Sin embargo, este proceso debe controlarse cuidadosamente, ya que una presión excesiva puede dañar la estructura del nanohilo o reducir la transmitancia óptica debido al aumento de la densidad de la película y la dispersión de la luz (18,25-28).

Las fuerzas utilizadas variaron de 2 a 10 tnf y se aplicaron en diferentes momentos. Con la técnica de presión, buscamos encontrar los parámetros físicos con los que se obtiene la mayor variación porcentual de la , es decir, encontrar el tiempo y la fuerza óptimos. Las primeras fuerzas utilizadas fueron 2, 4 y 6 tnf y los tiempos de 5, 10, 15, 20 y 30 s. La Fig. 8 muestra la variación porcentual de en función del tiempo de presión para cada fuerza aplicada. La razón roja fue 2 tnf, la azul para 4 tnf y la amarilla para 6 tnf. Las tres tendencias muestran que la disminución es prácticamente independiente del tiempo-presión utilizado, lo que indica que los cambios morfológicos y estructurales presentados por el material se saturan tras unos segundos, estableciendo un valor menor para la reorganización del material en la superficie. El único valor que difiere de las tendencias constantes se presenta en el tiempo más corto de la fuerza 2 tnf, tiempo que está por debajo de la tendencia constante que determina la media. Los valores medios de la disminución porcentual son (40±3) %, (76±2) % y (59±2%) % para 2, 4 y 6 tnf respectivamente, es decir, el mayor cambio porcentual se obtiene para 4 tnf. Además, se determinó que el tiempo óptimo de presión para $R_s R_s R_{s_{optar}}$ es de 20 segundos, se eligió por el tiempo suficiente para que los cambios morfológicos y estructurales ocurrieran en las superficies sin inconvenientes.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

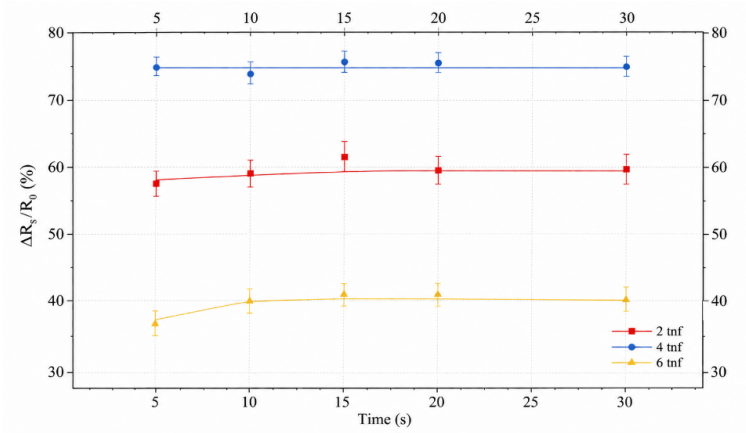


Figura 8. Relación entre la disminución relativa de y el tiempo de presión en tres fuerzas fijas 2 tnf (rojo), 4 tnf (azul) y 6 tnf (amarillo).R_s

El t_{opt} se utiliza para determinar el comportamiento entre las variaciones de la resistencia respecto a las diferentes fuerzas. La Fig. 9 resume los resultados obtenidos al ampliar este estudio con dos nuevas fuerzas, 8 y 10 tnf. En todas las fuerzas, hay valores positivos en la variación de la resistencia, donde se alcanzó que el valor más bajo fue aproximadamente el 40% (para 2 y 10 tnf), lo cual en sí mismo son buenos resultados. Se logra un máximo alrededor de 4 tnf con una disminución cercana al 75 %. Se pueden diferenciar dos regiones en la Fig. 9. La primera, relativa a una región de 2 a 4 tnf, donde la variación porcentual respecto a la fuerza tiene una tangente positiva. La siguiente va desde el pico hasta el 10 tnf. Esta última región se presenta por la presión que comienza a romper el material nanoestructurado y por la penetración dentro del sustrato plástico que afecta a la conductividad, como veremos más adelante. Si la tendencia continúa, habrá fuerzas lo suficientemente altas que causarán variaciones relativas negativas, debido a la fractura total del material o su sumergimiento dentro del plástico. Estos resultados indican que la fuerza óptima F_{opt} es 4 tnf, lo que permite un equilibrio entre el aumento del contacto entre nanohilos y la velocidad de fractura que afecta a la conductividad.

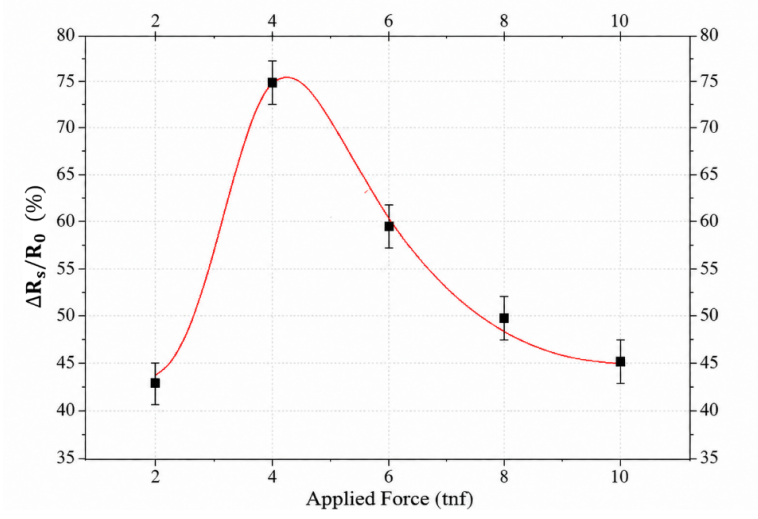


Figura 9. Relación entre la disminución relativa de y la fuerza aplicada en t$R_{s_{opt}}$ 20 s.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

En la Fig. 10 se agrupa una serie de micrografías para observar la variación estructural que presentan las películas tras aplicar la técnica mecánica. Muestra cómo los nanohilos tienden a curvarse y solaparse tras aplicar una fuerza de 6 tnf. Estas curvaturas indican que los cables superiores rodean a los que están por debajo, lo que aumenta el área de contacto y, por tanto, la conductividad de la superficie. En la Fig. 10a se ve la superficie original, y en la Fig. 10b se muestra una película prensada, donde las modificaciones morfológicas son evidentes por la rugosidad y deformaciones sufridas por el material. Afortunadamente, las presiones solo provocan una deformación en el nanomaterial y no rompen completamente la nanored. Otros beneficios de este método son el crecimiento del área de contacto entre nanohilos, lo que facilita la conducción eléctrica a través de la superficie. Además, disminuye la rugosidad a lo largo de la película fina y aumenta la adherencia de AgNW al sustrato. Aunque con todas las fuerzas sondeadas hubo una reducción en , fuerzas mayores significaron una reducción menor en la variación del parámetro eléctrico, como se ve en la Fig. 9 para 8 y 10tnf. No se descarta que esta reducción sea producto del deterioro de las nanoestructuras debido a su fractura o ruptura. Además, la Fig. 10c nos permite ver la superficie tras ser sometida a 10 tnf a escalas de 50 y 10 µm, allí el sustrato destaca respecto al AgNW, una característica que no habíamos visto antes del tratamiento, lo que podría indicar cómo el nanomaterial está incrustado en la superficie plástica, creando una atmósfera aisladora que limitaría la conducción. Estas dos características podrían ser las principales causas de que, una vez superado el máximo local donde se obtuvo la mayor disminución porcentual, esta cantidad comience a disminuir a medida que aumenta la fuerza.R_s

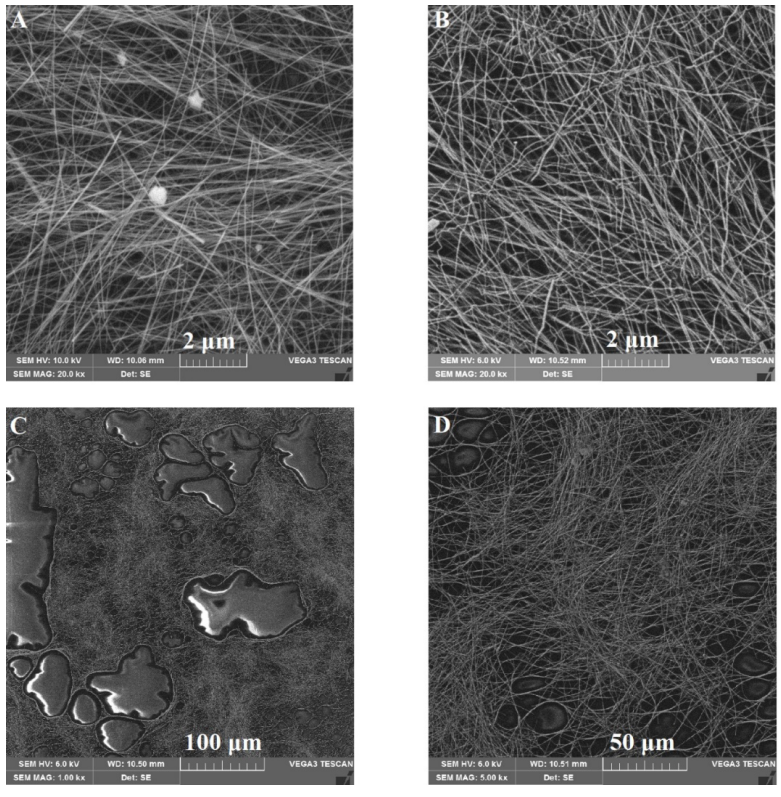


Figura 10. (Superior) Comparativa entre dos superficies de la misma película sometidas al método con una presión de 6 tnf (a): Antes de aplicar el método, (b) Después de aplicar presiones mecánicas. (Inferior): Superficies de la misma película Tras aplicar presiones con una fuerza de 10 tnf, parece que el AgNW está incrustado dentro del plástico, con diferentes aumentos, (c) 1 kx, (d) 5 kx.

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

Finalmente, el espectro de transmitancia alcanzado para las diferentes películas se detalla en la Fig. 11 después y antes del proceso. Inicialmente, el valor alcanzado para las películas sobre el sustrato plástico fue del 67 % a 550 nm; tras aplicar presiones y mejorar las propiedades eléctricas, el valor medio alcanzado para es de aproximadamente (59 ± 4) % en la misma longitud de onda. Los resultados obtenidos tras la aplicación del método muestran que hay disminuciones de algunos puntos porcentuales que afectan a la transmisión de la luz en la superficie, lo que podría estar relacionado con la redistribución del material que ocupa la mayoría de los espacios en el sustrato y que impide una menor transmisión de luz. Además, aunque la presión mejoró las propiedades de la película delgada, afecta permanentemente las propiedades físicas del sustrato plástico, haciendo que tras el procesamiento pueda absorber más luz.

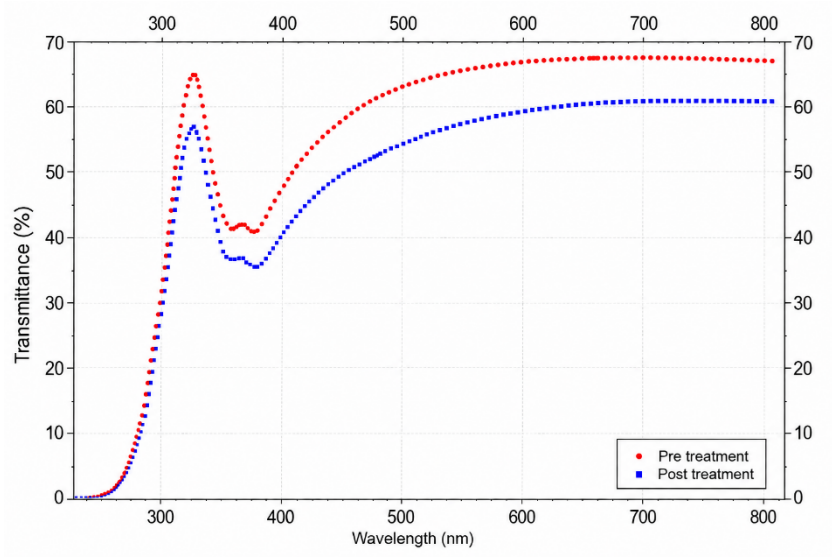


Figura 11. Espectro medio de transmitancia antes (rojo) y después del tratamiento mecánico a presión (azul).

Conclusión

Los resultados obtenidos tras la fabricación de las películas de AgNW y la posterior aplicación de tratamientos post-depósito son muy satisfactorios. Se fabricaron películas delgadas con menos de 30 Ohm/sq y transmitancias (incluidos los sustratos) alrededor del 77 % para sustrato de vidrio y del 67 % para sustrato plástico, a 550 nm. Las películas finas de AgNW depositadas sobre sustrato plástico son menos transparentes que las películas depositadas en vidrio. Para el tratamiento térmico, se encontró que el porcentaje máximo de variación se obtiene a 163 °C durante 22,5 min, obteniendo una reducción del (51 ± 2) %, sin cambiar significativamente su transmisancia. Las imágenes SEM de las estructuras mostraron cómo la variación se debía a la soldadura en múltiples intersecciones de la nano-red.$R_s R_s$

Para el tratamiento con presiones, se encontró que la disminución porcentual de la resistencia era prácticamente independiente del tiempo, lo que indica que los cambios en la morfología y, por tanto, en la aplicación de presión sobre las películas de AgNW son rápidos y menores que el tiempo aplicado en este trabajo, lo que da al método un punto a favor para aplicaciones

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

industriales. Se obtuvo una reducción cercana al (76 ± 2) % para una fuerza de 4 tnf, afectando la transmitancia en unos nueve puntos porcentuales a 550 nm, en comparación con su valor inicial. Las imágenes del SEM muestran cómo las presiones modifican la estructura del nanohilo, en el mejor de los casos, aumentando el área de contacto con posible incrustación del nanomaterial dentro del sustrato plástico, mejorando la conductividad eléctrica y la adherencia del film. Los resultados apuntan a las películas nanoestructuradas de plata como un candidato alto para reemplazar a la ITO en la fabricación de electrodos transparentes para aplicaciones optoelectrónicas.$R_s R_s$

Declaración de contribución de los autores

Conceptualización – Ideas: A.M. Bernal, A.M. Ardila; Curación de datos: A.M. Bernal; Análisis formal: A.M. Bernal; Obtención de financiación: A.M. Ardila; Investigación: A.M. Bernal, Sandra Buitrón; Metodología: A.M. Bernal; Administración del proyecto: A.M. Ardila; Supervisión: A.M. Ardila; Validación: A.M. Bernal, A.M. Ardila; Visualización: A.M. Bernal; Redacción – revisión y edición – Preparación: A.M. Bernal, A.M. Ardila.

Implicaciones éticas: ninguna declarada; Conflictos de interés: ninguno declarado.

Referencias

1. Patel, J., Sharma, R. K., Quijada, M. A., & Rana, M. M. (2024). A review of transparent conducting films (TCFs): Prospective ITO and AZO deposition methods and applications. Nanomaterials, 14(24), 2013.

https://doi.org/10.3390/nano14242013

2. Sharma, N., Nair, N. M., Nagasarvari, G., Ray, D., & Swaminathan, P. A review of silver nanowire-based composites for flexible electronic applications. Flexible and Printed Electronics, (2022) 7(1), 014009.

https://doi.org/10.1088/2058-8585/ac4b7d

3. Chavan, G. T., Kim, Y., Khokhar, M. Q., Hussain, S. Q., Cho, E. C., Yi, J., & Jeon, C. W. A brief review of transparent conducting oxides (TCO): The influence of different deposition techniques on the efficiency of solar cells. Nanomaterials, (2023)13,(7), 1226.

https://doi.org/10.3390/nano13071226

4. Afre, R., Sharma, N., Sharon, M., & Sharon, M. Transparent conducting oxide films for various applications: A review. Reviews on Advanced Materials Science, (2018), 53(1), 79–89.

https://doi.org/10.1515/rams-2018-0006

5. Pasquarelli, R. M., Ginley, D. S., & O'Hayre, R. Solution processing of transparent conductors: From flask to film. Chemical Society Reviews, (2011) 40(11), 5406–5441.

https://doi.org/10.1039/c1cs15031e

6. Ma, J. H., Kim, M. G., Jeong, J. H., Park, M. H., Ha, H. J., Kang, S. J., & Kang, S. J. Highly efficient ITO-free quantum-dot light emitting diodes via solution-processed PEDOT:PSS semitransparent electrode. Materials, (2023) 16(11), 4053.

https://doi.org/10.3390/ma1611405

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818

7. Zhang, J., Chen, Z., Xu, X., Liao, W., & Yang, L. A simple and efficient approach to fabricate graphene/CNT hybrid transparent conductive films. RSC Advances, (2017) 7(83), 52555–52560.

https://doi.org/10.1039/c7ra10225h

8. Rosli, N. N., Ibrahim, M. A., Ludin, N. A., Teridi, M. A. M., & Sopian, K. A review of graphene-based transparent conducting films for use in solar photovoltaic applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (2019) 99, 83–99.

https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.020

9. Siwal, S. S., Saini, A. K., Rarotra, S., Zhang, Q., & Thakur, V. K. Advancements in transparent carbon nanotube films: Chemistry and imminent challenges. Journal of Nanostructure in Chemistry, (2021) 11(1), 93–130.

https://doi.org/10.1007/s40097-020-00374-5

10. Tan, D., Jiang, C., Li, Q., Bi, S., & Song, J. Silver nanowire networks: Preparation and applications. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, (2020) 31(18), 15669–15696.

https://doi.org/10.1007/s10854-020-04171-0

11. Tokuno, T., Nogi, M., Karakawa, M., Jiu, J., Nge, T. T., Aso, Y., & Suganuma, K. . Fabrication of silver nanowire transparent electrodes at room temperature. Nano Research, (2011) 4(12), 1215–1222.

https://doi.org/10.1007/s12274-011-0162-6

12. Li, W., Zhang, H., Shi, S., Xu, J., Qin, X., He, Q., & Fahlman, M. Recent progress in silver nanowire networks for flexible organic electronics. Journal of Materials Chemistry C, (2020) 8(14), 4636–4674.

https://doi.org/10.1039/c9tc05891a

13. Dinh, D. A., Hui, K. N., Hui, K. S., Kumar, P., & Singh, J. Silver nanowires: A promising transparent conducting electrode material for optoelectronic and electronic applications. Reviews in Advanced Sciences and Engineering, (2013) 2(4), 324–345.

https://doi.org/10.1166/rase.2013.1050

14. Wang, H., Wang, Y., & Chen, X. Synthesis of uniform silver nanowires from AgCl seeds for transparent conductive films via spin-coating at variable spin-speed. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, (2019) 565, 154–161.

https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.12.063

15. Hu, L., Kim, H. S., Lee, J. Y., Peumans, P., & Cui, Y. Scalable coating and properties of transparent, flexible, silver nanowire electrodes. ACS Nano, (2010) 4(5), 2955–2963.

https://doi.org/10.1021/nn1005232

16. Khaligh, H. H. Silver nanowire transparent electrodes: Fabrication, characterization, and device integration (Doctoral dissertation, University of Waterloo). (2013)

17. Meena, J. S., Choi, S. B., Jung, S. B., & Kim, J. W. Advances in silver nanowire-based composite electrodes: Materials processing, fabrication, and applications. Advanced Materials Technologies, (2023) 8(19), 2300602.

https://doi.org/10.1002/admt.202300602

18. Lam, K. K., Ng, S. M., Wong, H. F., Fei, L., Liu, Y., Chan, K. H., & Mak, C. L. Effect of thickness on the optical and electrical properties of ITO/Au/ITO sandwich structures. ACS Applied Materials & Interfaces, (2020) 12(11), 13437–13446.

https://doi.org/10.1021/acsami.9b22108

19. Wang, S., Liu, H., Pan, Y., Xie, F., Zhang, Y., Zhao, J., & Gao, F. Performance enhancement of silver nanowire-based transparent electrodes by ultraviolet irradiation. Nanomaterials, (2022) 12(17), 2956.

https://doi.org/10.3390/nano12172956

20. Wang, J., Fan, J., Wan, T., Hu, L., Li, Z., & Chu, D. Recent progress in silver nanowire-based transparent conductive electrodes. Advanced Energy and Sustainability Research, (2025). 6(9), 2500033.

https://doi.org/10.1002/aesr.202500033

21. Li, J., Luo, J., & Liu, Y. Recent advances in silver nanowire-based transparent conductive films: From synthesis to applications. Coatings, (2025) 15(7), 858.

https://doi.org/10.3390/coatings15070858

22. Song, T. B., Chen, Y., Chung, C. H., Yang, Y., Bob, B., Duan, H. S., Li, G., Tu, N. G., Huang, Y., & Yang, Y. Nanoscale joule heating and electromigration enhanced ripening of silver nanowire contacts. ACS Nano, (2014) 8(3), 2804–2811.

https://doi.org/10.1021/nn406405s

23. Azani, M. R., Hassanpour, A., & Torres, T. Benefits, problems, and solutions of silver nanowire transparent conductive electrodes in indium tin oxide (ITO)-free flexible solar cells. Advanced Energy Materials, (2020) 10(48), 2002536.

https://doi.org/10.1002/aenm.202002536

24. Ding, Y., Cui, Y., Liu, X., Liu, G., & Shan, F. Welded silver nanowire networks as high-performance transparent conductive electrodes: Welding techniques and device applications. Applied Materials Today, (2020) 20, 100634.

https://doi.org/10.1016/j.apmt.2020.100634

25. Im, H. G., Jang, J., Jeon, Y., Noh, J., Jin, J., Lee, J. Y., & Bae, B. S. Flexible transparent crystalline-ITO/Ag nanowire hybrid electrode with high stability for organic optoelectronics. ACS Applied Materials & Interfaces,(2020).12(50), 56462–56469.

https://doi.org/10.1021/acsami.0c16572

26. Hu, Y., Zhang, X., Ding, H., & Hu, Y. Laser shock-enabled optical–thermal–mechanical coupled welding method for silver nanowires. International Journal of Machine Tools and Manufacture, (2024) 199, 104162.

https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2024.104162.

27. Bian, M., Qian, Y., Cao, H., Huang, T., Ren, Z., Dai, X., Zhao, W., Li, J., & Yin, S. Chemically welding silver nanowires toward transferable and flexible transparent electrodes in heaters and double-sided perovskite solar cells. ACS Applied Materials & Interfaces, (2023) 15 (10), 13307–13318.

https://doi.org/10.1021/acsami.2c22864

28. Garnett, E. C., Cai, W., Cha, J. J., Mahmood, F., Connor, S. T., Greyson Christoforo, M., Cui, Y., McGehee, M. D., & Brongersma, M. L. Self-limited plasmonic welding of silver nanowire junctions. Nature Materials, (2012), 11(3), 241–249.

https://doi.org/10.1038/nmat3238

29. Sekkat, A., Sanchez-Velasquez, C., Bardet, L., Weber, M., Jiménez, C., Bellet, D., Muñoz-Rojas, D., & Nguyen, V. H. Towards enhanced transparent conductive nanocomposites based on metallic nanowire networks coated with metal oxides: A brief review. Journal of Materials Chemistry A, (2024). 12(38), 25600–25621.

https://doi.org/10.1039/D4TA05370B

doi: 10.25100/iyc.v28i2.15818