

# DEPÓSITO DE MICROESTRUCTURAS DE ZNO CON INCORPORACIÓN DE NANOPARTICULAS DE PLATA PARA SER APLICADO COMO SENSOR DE GASES

*DEPOSITION OF ZNO MICROSTRUCTURES  
WITH INCORPORATION OF SILVER NANOPARTICLES  
TO BE APPLIED AS A GAS SENSOR*

***Dainet Berman Mendoza***

Universidad de Sonora, México  
*dainet.berman@unison.mx*

***Jesús Víctor López Fernández***

Universidad de Sonora, México  
*a215204809@unison.mx*

***David Ramos Maldonado***

Universidad de Sonora, México  
*a217206718@unison.mx*

***Ricardo Rangel Segura***

Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, México  
*rrangel@umich.mx*

***Alicia Vera Marquina***

Universidad de Sonora, México  
*alicia.vera@unison.mx*

***Roberto Gómez Fuentes***

Universidad de Sonora, México  
*roberto.gomez@unison.mx*

***Antonio Ramos Carrasco***

Universidad de Sonora, México  
*antonio.ramos@unison.mx*

**Recepción:** 5/diciembre/2022

**Aceptación:** 8/abril/2023

## Resumen

Las microestructuras de óxido de zinc (ZnO) son semiconductores que buscan mejorar las propiedades eléctricas, ópticas y mecánicas. Diferentes métodos han sido empleados para la alteración de su superficie, sin embargo, éstos requieren de procesos complejos y costosos. En este trabajo, se propone realizar el depósito de

microestructuras de óxido de ZnO, para ser incorporadas con nanopartículas de plata (AgNPs) y así modificar sus propiedades eléctricas. Las AgNPs fueron sintetizadas por la técnica de electrolisis e incorporadas en la superficie del semiconductor mediante microaspersión. A través de un sistema de depósito por vapor químico (CVD) se realizó una serie de experimentos utilizando un precursor de zinc en forma de micro traza para la obtención de una película activa. Se midió la resistividad eléctrica de las películas de ZnO con AgNPs, y se demostró su potencial aplicación como capa activa para sensor de gases.

**Palabras Clave:** CVD, Nanopartículas, Plata, Resistividad, Zinc.

### **Abstract**

*Zinc oxide (ZnO) microstructures are semiconductors searching to improve electrical, optical, and mechanical properties. Different methods have been used to modify its surface; however, these require complex processes and high costs. In this work, it is proposed to carry out the deposition of ZnO oxide microstructures, to be incorporated with silver nanoparticles (AgNPs) to modify their electrical properties. The AgNPs were synthesized by the electrolysis technique and incorporated into the semiconductor surface by microsprinkling. Through a chemical vapor deposition (CVD) system, a series of experiments were carried out using a microtrace zinc precursor to obtain an active film. The electrical resistivity of ZnO films with AgNPs was measured, and their potential application as an active layer for gas sensors was demonstrated.*

**Keywords:** CVD, Nanoparticles, Resistivity, Silver, Zinc.

## **1. Introducción**

El óxido de zinc (ZnO) es un semiconductor que se ha utilizado como base para dispositivos detectores de gases. Los óxidos metálicos presentan propiedades eléctricas y piezoeléctricas para ser aplicados en el desarrollo de estos dispositivos [Dey, 2018]. Algunos de los materiales más estudiados son el dióxido de estaño (SnO<sub>2</sub>) [Choi, 2008], trióxido de molibdeno (MoO<sub>3</sub>) [Mane, 2017], trióxido de wolframio (WO<sub>3</sub>) [Labidi, 2005], dióxido de titanio (TiO<sub>2</sub>) [Ferroni, 1996], trióxido de

indio (III) ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) [Yamazoe, 1996], y el óxido de hierro (III) ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [Han, 2020]. El ZnO es un material semiconductor tipo n, con banda prohibida en la región UV, presenta propiedades eléctricas, ópticas, y electroquímicas muy parecidas al  $\text{SnO}_2$ . Los sensores de gas a base de ZnO han eliminado la necesidad de implementar resistencias térmicas para mejorar la eficiencia de detección [Zhu, 2017]. Existen detectores de gas que no son a base de óxidos metálicos, tales como el fosfuro de indio (InP) [Nyembe, 2021], nitruro de galio (GaN) [Chitara, 2010] e incluso materiales como el diamante [Krstev, 2014] que han sido utilizados con estos propósitos de detección. El ZnO es un material semiconductor que presenta características piezoeléctricas [Bdikin, 2010], catalíticas [Georgekutty, 2008], foto detectoras [Liu, 2010]. Entre las características más importantes que presenta el ZnO están sus propiedades electroquímicas [Dong, 1997], las cuales son perfectas para la detección de gases [Cheng, 2007]. Estudios previos del ZnO han propiciado avances en dispositivos electrónicos como fotodetectores UV [Giménez, 2011], transistores [Vyas, 2018], dispositivos piezoeléctricos [Kuoni, 2003] y como sensores de gas [Lu, 2008]. Para el último dispositivo, se han aprovechado las contaminaciones controladas usando aluminio (Al), cromo (Cr) y cerio (Ce) en el óxido de zinc. Incluso otros semiconductores como el  $\text{TiO}_2$ , ha sido propuesto debido a que presenta aportes excepcionales en las características eléctricas [Gui, 2008]. En particular, las microestructuras de ZnO, han mostrado gran interés en el diseño de nuevos dispositivos. Utilizando las propiedades que aporta una estructura a escalas micro y nano métricas [Cheng, 2007] [Ozga, 2008], se pueden aprovechar diferentes características como capas activas. En este trabajo, se presenta un estudio detallado del desarrollo experimental para la incorporación de nanopartículas de plata (AgNPs) en microestructuras de ZnO. El proceso de síntesis usando las técnicas químicas de depósito en fase gaseosa y electrolisis, para el ZnO y las AgNPs es presentado, respectivamente. Las técnicas de caracterización para identificar a los materiales son presentadas en este documento. Finalmente, se analiza la respuesta eléctrica comparativa entre el semiconductor prístino y el alterado con el metal Ag superficialmente. La capacidad de detectar gases usando ZnO con AgNPs es propuesto como conclusión de este proyecto.

## 2. Métodos

### Sistema de electrólisis para la síntesis de AgNPs

En la figura 1, se muestra el proceso para la formación de AgNPs. Esta síntesis se lleva a cabo en un sistema térmico con una agitación constante, usando unos electrodos de plata (1.5 mm x 1.5 mm) inmersos a 80 mm de profundidad. Una fuente de voltaje polariza a los electrodos de Ag y mediante un circuito se alterna la polaridad entre éstos.

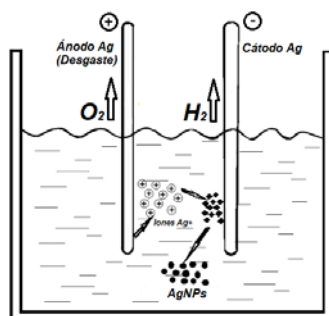


Figura 1 Formación electroquímica de las AgNPS en agua destilada.

Los siguientes parámetros de síntesis: el voltaje entre electrodos, el tiempo de conmutación o de polaridad, el tiempo de síntesis, la temperatura del agua destilada y el volumen del agua, fueron considerados para aplicar un diseño de experimentos, como se aprecia en las tablas 1 y 2. Todos los experimentos fueron realizados en un sistema de electrólisis automatizado.

Tabla 1 Serie de experimentos para determinar el tamaño de AgNPs.

Número de experimento	Nombre de muestra	Voltaje (V)
0	nv 6	20
1	nv 7	22
2	nv 8	24
3	nv 9	26
4	nv 10	28
5	nv 11	30

Tabla 2 Parámetros constantes usados en la síntesis de AgNPs.

Temperatura (°C)	Volumen (mL)	Tiempo de síntesis (min)	Tiempo de conmutación (min)
80	500	90	4

## Crecimiento de óxido de silicio sobre el sustrato de silicio

Para los depósitos de ZnO se utilizaron sustratos de silicio tipo p de alta resistividad, con una orientación (100). Estas obleas se llevaron a un horno de laboratorio marca Thermo scientific, a 1000 °C durante 90 min. El tamaño del sustrato utilizado en las síntesis de ZnO fue limitado a 1 x 1 cm.

## Sistema de depósito por vapor químico para el ZnO nanoestructurado

El sistema usado para la síntesis de ZnO es conocido como horno horizontal CVD, como el que se observa en la figura 2. Para realizar la síntesis de diferentes muestras de ZnO, se llevó a cabo un diseño factorial  $2^3$ . Para realizar el experimento, se utilizó polvo de zinc, con un tamaño de grano de 150 micras con 99.995% de pureza. Los principales parámetros de síntesis considerados en el diseño fueron: la temperatura, la presión del sistema, la cantidad de polvo de zinc, el flujo de nitrógeno y el flujo de oxígeno.

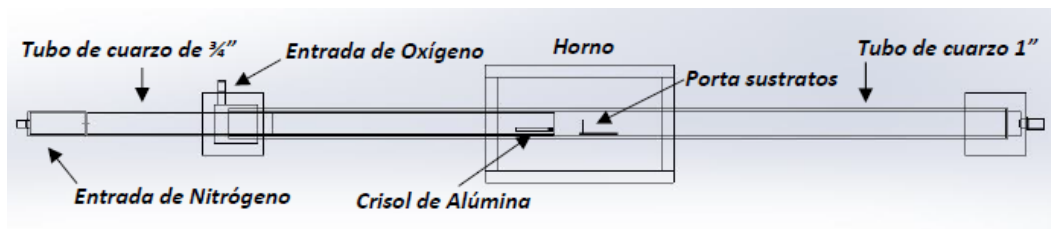


Figura 2 Diagrama esquemático del sistema CVD utilizado.

En la tabla 3 se muestra a detalle los niveles asignados para los parámetros de síntesis de cada experimento. Para obtener las muestras de la tabla 3, se lleva a cabo el siguiente procedimiento: extracción del aire con una bomba mecánica, purga de nitrógeno con un flujo de 800 sccm por 5 minutos. Posteriormente, inyección de gases y prueba de vacío hasta alcanzar 100 mTorr y un tratamiento térmico por 1 hora. Una vez estabilizada la temperatura, se inyecta nitrógeno a 200 sccm y 75 sccm de oxígeno. Al alcanzar una estabilidad termodinámica, se introduce el precursor Zn a la entrada del CVD para que sea evaporado. Finalmente, se produce la reacción del ZnO durante 30 min y se procede a un enfriamiento del sistema, en presencia de oxígeno.

Tabla 3 Experimentos factoriales 2<sup>3</sup>.

Muestra	Temperatura (°C)	Presión (Torr)	Masa de zinc (mg)
S0	750	10	50
S1	750	10	100
S2	750	730	50
S3	750	730	100
S4	950	10	50
S5	950	10	100
S6	950	730	50
S7	950	730	100

### Incorporación de las AgNPs por microaspersión en el ZnO

Posterior a la síntesis de ZnO, se utilizó un sistema de microaspersión para incorporar AgNPs en 6 muestras etiquetándose desde nv6 a nv11, como el que se presenta en la figura 3. Este equipo consiste en un compresor libre de aceite y de uso médico, el cual administra aire comúnmente como sistema de nebulización grado farmacéutico. Este equipo genera gotas en la escala micrométrica, facilitando el transporte controlado de AgNPs hacia cualquier superficie. El proceso para la incorporación de las AgNPs consiste en: carga en contenedor, donde la nebulización del coloide llega a un recipiente metálico donde se encuentra una muestra de ZnO a una temperatura de 35 °C, proporcionada por una placa térmica. En este trabajo, se utilizó un total 120 mL de AgNPs.



Figura 3 Sistema de microaspersión utilizado para incorporar nanopartículas.

## 3. Resultados

### Resultados y análisis de las AgNPs

Para la medición del tamaño de las AgNPs sintetizadas, se utilizó un sistema DLS marca “Zsizer nano” modelo “ZS” con un rango de medición de 0.3 nm -10 µm, y

utilizando un láser rojo de 632.8 nm de 4 mW de potencia. En función de los parámetros del diseño de experimentos, se obtuvo el tamaño de las AgNPs en un rango entre 6.5 a 18.2 nm, para voltajes entre 20 y 30 V, respectivamente. Por medio de la técnica de DLS, los tamaños obtenidos de las partículas son graficados en histogramas para cada experimento, figura 4. En la tabla 4 se exhibe la relación de tamaño de nanopartículas obtenidas respecto al voltaje aplicado en el sistema de electrolisis.

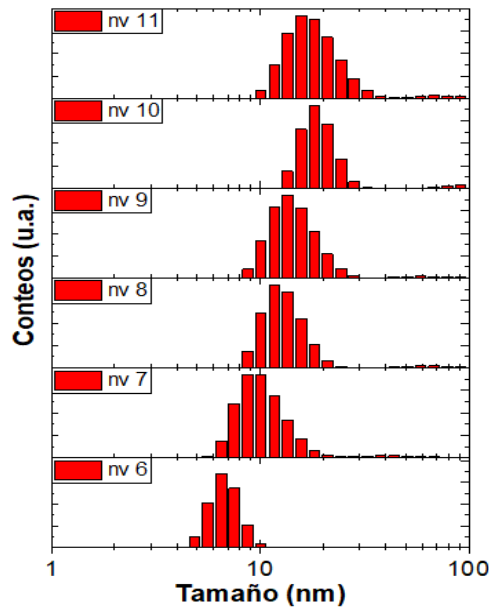


Figura 4 Tamaño de las AgNPs obtenidas usando electrolisis.

Tabla 4 Relación tamaño de partícula contra voltaje de síntesis.

Muestra	Voltaje (V)	Tamaño (nm)
nv 6	20	6.5
nv 7	22	10.1
nv 8	24	11.7
nv 9	26	13.5
nv 10	28	18.2
nv 11	30	18.2

En la figura 5, se muestra una gráfica del tamaño de partícula respecto al voltaje entre electrodos, mostrando que el sistema de electrolisis aquí presentado controla el tamaño en la escala nanométrica con una tendencia lineal.

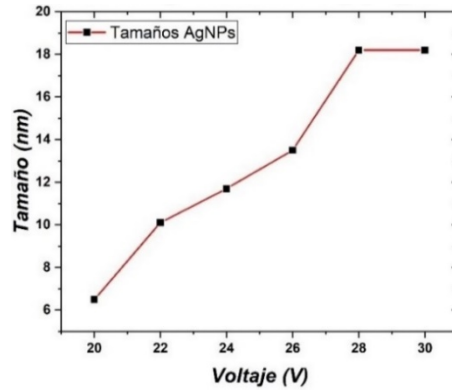


Figura 5 Relación tamaño versus voltaje de los experimentos de AgNPs.

Para las mediciones de absorbancia se utilizó un espectrofotómetro UV/Vis marca “Thermo Scientific” modelo “Multiskan GO” con un rango de 200 a 1000 nm. Para esta caracterización de las AgNPs, se empleó un rango de longitudes de onda de 300 a 700 nm. Los resultados UV/Vis obtenidos permiten identificar el plasmón de resonancia (PR) característico de las AgNPs. La figura 6 muestra el PR de las AgNPs ubicado entre 350 y 500 nm. Cabe mencionar, que, con el incremento del voltaje de síntesis, se presenta una reducción en el ancho a media altura (FWHM) de los picos correspondientes al plasmón. En trabajo futuro, es recomendable explorar el efecto de la morfología y el tamaño de partículas sobre el PR.

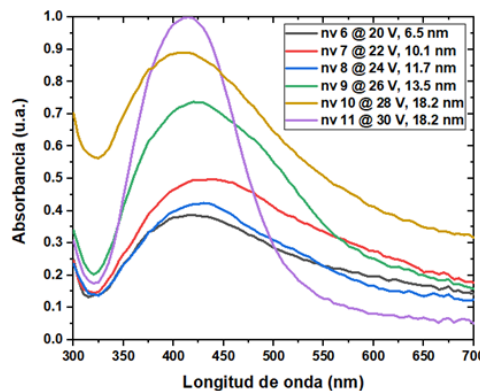


Figura 6 Espectro de absorbancia las muestras obtenidas de plata.

## Resultados y análisis de las microestructuras activas de ZnO

Las micrografías por medio de microscopía electrónica se realizaron con el objetivo de seleccionar una muestra que presente una estructura tipo varilla en la



superficie del material, para después ser incorporada con AgNPs. En las figuras 7 y 8 se muestra la morfología obtenida para cada experimento, revelando variaciones de estructuras tipo dendritas o varillas, así como diferentes tamaños para cada estructura. Las dimensiones de las estructuras se ven influenciadas por los parámetros de síntesis. Es importante mencionar, que la morfología tiene una relación con la masa de zinc, la presión y la temperatura. Como resultado de la caracterización del ZnO, las propiedades requeridas para desarrollar este trabajo las exhibe la muestra S1.

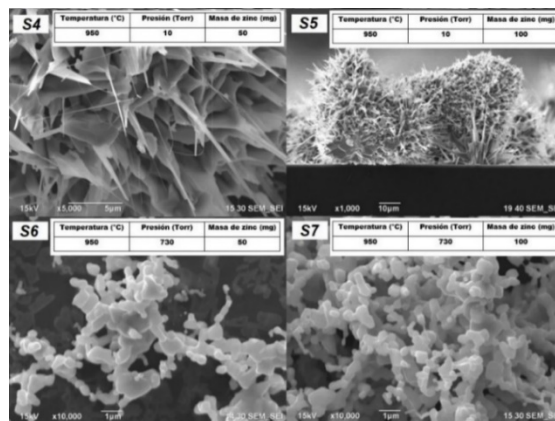


Figura 7 Imágenes SEM de las muestras sintetizadas a baja temperatura.

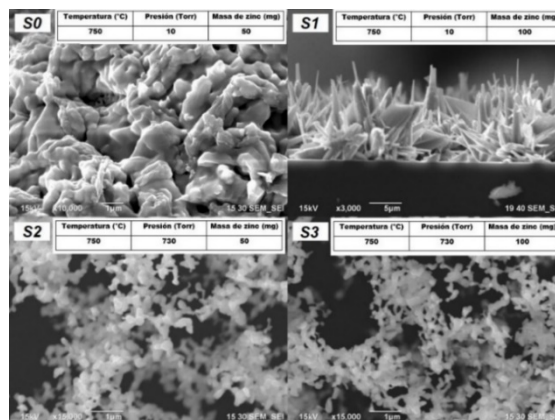


Figura 8 Imágenes SEM de las muestras sintetizadas a alta temperatura.

### Caracterización de la incorporación de las AgNPs en ZnO

La figura 9 muestra la topografía con AgNPs incorporadas en la superficie de un sustrato de silicio, obtenida con un equipo AFM marca “JEOL” modelo “JSPM-4210”.

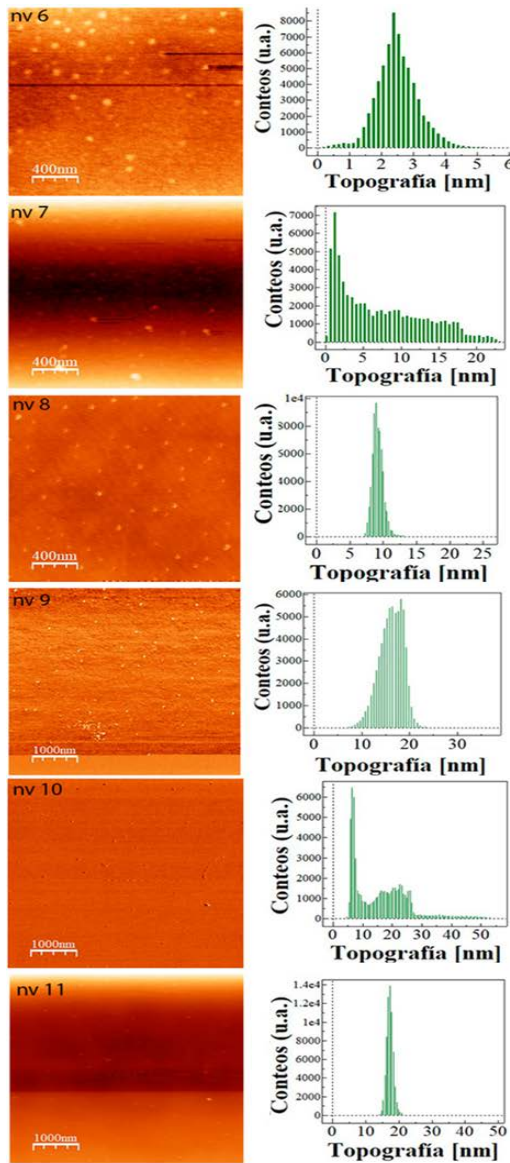


Figura 9 AFM mostrando la topografía de las AgNPs incorporadas sobre silicio.

Es importante mencionar que no hay aglomeraciones producto de la incorporación de las nanopartículas. Se observa que en las muestras nv 6 a nv9, la morfología es cuasi-esférica. En las muestras nv 10 y 11 la topografía presenta valores similares a los reportados en DLS. De acuerdo con las diferentes técnicas de caracterización: absorbancia, dispersión de luz y concentración de coloides, la muestra nv 11 presentó los mejores resultados. En las siguientes secciones, esta muestra será referida como la referencia y se excluirán el resto de los resultados obtenidos en el diseño de experimentos.

La figura 10a muestra el mapeo elemental de zinc y en la figura 10b se presenta el mapeo de oxígeno en el material, en donde los puntos blancos representan la presencia del elemento en cuestión. En la figura 11 se presentan imágenes de SEM de la muestra S1 de ZnO con morfología de varillas sin AgNPs. Las imágenes demuestran que la referencia no contiene superficialmente rastros de impurificantes o metales no deseados.

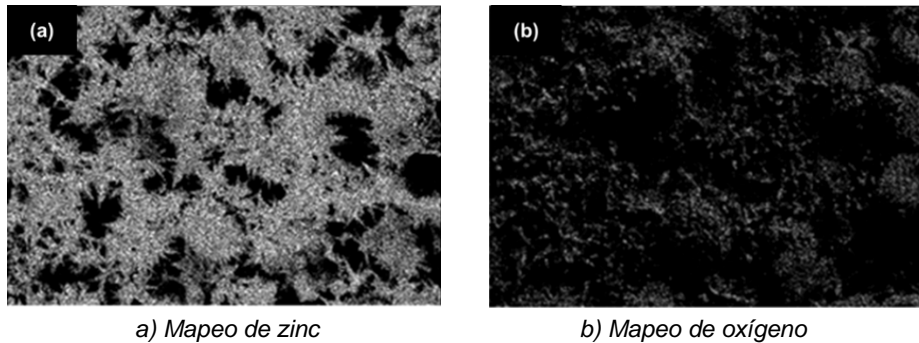


Figura 10 Espectros de EDS, muestra S1 sin AgNPs.

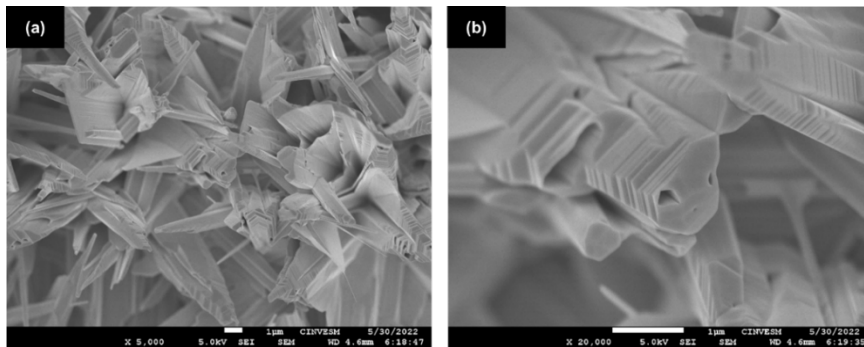


Figura 11 Imágenes SEM de la muestra S1 sin AgNPs.

En la figura 12, se exhiben imágenes SEM de microestructuras con una terminación tipo varilla de ZnO (muestra S1) con AgNPs incorporadas en la superficie. En comparación con la imagen anterior, las partículas rodean al cristal semiconductor y son evidentes en la superficie del ZnO. Los tamaños corresponden a los resultados obtenidos por las técnicas de microscopía AFM en silicio, y por la técnica óptica de DLS en los coloides de Ag. Estas partículas de Ag presentan un tamaño que va desde 20 hasta 76 nm aproximadamente. Estos resultados fueron corroborados usando la espectroscopia de dispersión de rayos X, conocida para la

identificación de elementos químicos. Este resultado demuestra que con el sistema de microaspersión utilizado de forma innovadora en este trabajo, se controla de forma eficiente el transporte de las AgNPs hacia la superficie del sustrato.

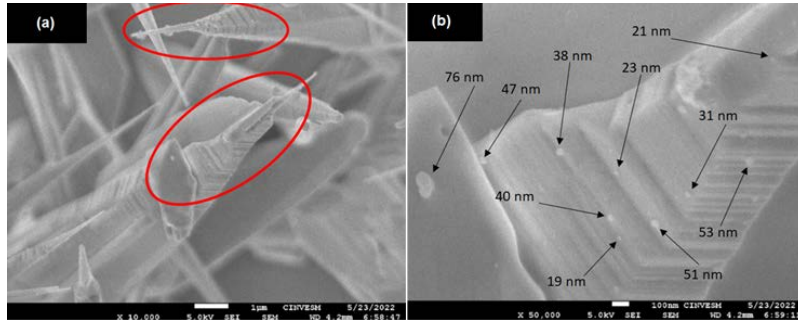


Figura 12 Imágenes SEM de la muestra ZnO S1 con AgNPs.

### Caracterización eléctrica de las películas activas de ZnO

Para las mediciones eléctricas de resistividad se utilizó el equipo analizador de parámetros semiconductores Keithley 4200 y una estación de trabajo para mediciones directas sobre la superficie. La figura 13 presenta gráficas de corriente versus voltaje de las muestras de ZnO con nanopartículas de plata. Con los valores obtenidos de las mediciones I-V, se calcula la resistividad inyectando corriente y midiendo el voltaje de acuerdo con el método de cuatro puntas colineales.

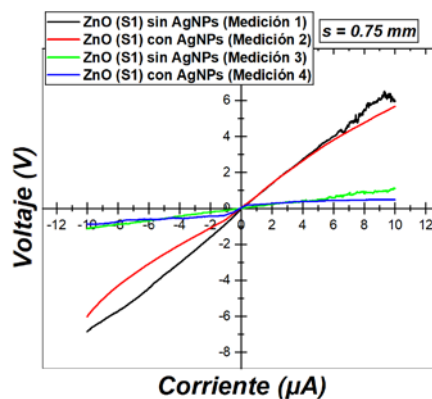


Figura 13 Curvas I-V de la muestra S1 con y sin AgNPs.

En la tabla 5 se presentan los principales resultados de la caracterización eléctrica. Se presentan los resultados del valor de la resistencia obtenidos de la figura 13. De

acuerdo con los parámetros de las películas activas (F1: espesor, F2: separación entre puntas y F3: su posición sobre la muestra) se obtiene un estimado del factor de corrección “F”. La resistividad 1 no contempla el factor de corrección, mientras que la resistividad 2 si es considerada. Ambos valores son un promedio obtenido de las curvas I-V de cada medición. El comportamiento de cada resultado indica que el material que contiene las AgNPs resulta menos resistivo, en al menos 17.88 %.

Tabla 5 Parámetros eléctricos de las curvas de I-V del ZnO y AgNPs/ZnO.

Medición	R	F	Resistividad 1	Resistividad 2	ΔR1%	ΔR2%
1	711.9 kΩ	0.026	335 kΩ•cm	8.72 kΩ•cm	-17.46%	-17.88%
2	587.6 kΩ		275 kΩ•cm	7.16 kΩ•cm		
3	110.4 kΩ		53 kΩ•cm	1.38 kΩ•cm	+27.71%	+52.17%
4	141 kΩ		81 kΩ•cm	2.1 kΩ•cm		
Ecuación	$R = \frac{V}{I}$	$F = F_1 F_2 F_3$	$\rho = 2\pi s \frac{V}{I}$	$\rho = 2\pi s F \frac{V}{I}$	-	-

#### 4. Discusión

En este trabajo se discute la mejora de las propiedades eléctricas del semiconductor ZnO, mediante la incorporación de nanopartículas de plata. Además, utilizando el método de microaspersión se mejora el control de la adición de las AgNPs en la superficie del semiconductor ZnO. Este trabajo se basa en dos etapas experimentales principales: a) síntesis de partículas de Ag en la escala nanométrica utilizando el método de electrólisis, y b) la obtención del semiconductor usando la técnica de depósito por vapor químico. Como etapa inicial, la obtención de AgNPs se demostró por medio de las técnicas de dispersión dinámica de luz y absorbancia. El tamaño de las nanopartículas obtenidas por un sistema construido en laboratorio se encuentra en el rango que va desde 6 nm hasta 18 nm, con un control eficiente dependiente del voltaje aplicado. Adicionalmente, se identificó el PR característico de la plata nanométrica según el espectro de absorbancia medido en la región de 350 nm a 550 nm. Para el semiconductor, el análisis morfológico fue demostrado a partir de microscopía electrónica de barrido, el cual es influenciado por la temperatura, la presión y masa como parámetros de control. De las etapas de síntesis, se seleccionaron muestras de AgNPs y de ZnO que presentaron las mejores cualidades para desarrollar la mejora de la respuesta eléctrica del

semiconductor. Para profundizar en el análisis de la incorporación de nanopartículas de plata en la superficialmente, se presentaron imágenes AFM. Como resultado, se demuestra la presencia de NPs metálicas, inicialmente sobre un sustrato de silicio, y posteriormente sobre el óxido. Finalmente, usando micrografías de microscopía electrónica de barrido, se identificaron partículas incorporadas en microestructuras con una terminación tipo varilla de ZnO. Para realizar el estudio eléctrico, se midió la respuesta superficial del material usando un sistema de parámetros semiconductores Keithley 42000. A partir de curvas I-V, se demostró que la incorporación de AgNPs, modifica significativamente la resistividad eléctrica del ZnO. Los niveles de resistividad se reducen drásticamente con la adición de las NPs de Ag lo que implica una mejora en la conductividad. Consecuentemente, el material requiere de una menor cantidad de cargas fluyendo superficialmente, por lo que puede ser aplicado como capa activa en detectores de gases.

## **5. Conclusiones**

Se obtuvieron AgNPs de aproximadamente 20 nm por medio del método de electrolisis. Se depositaron microestructuras de ZnO mediante la técnica de CVD con una morfología tipo varilla. En este trabajo se demostró la modificación de las propiedades eléctricas de ZnO mediante la incorporación de AgNPs en su superficie mediante el método de microaspersión, que es económico y de simple aplicación. Esta alteración de las propiedades eléctricas permite aplicar este material como sensor de gases. Como trabajo futuro se propone desarrollar un sistema de caracterización eléctrica desarrollado en el laboratorio para explorar la respuesta de otras morfologías derivadas del ZnO. Así mismo se estudiará el efecto de tratamientos térmicos, y el uso de otros metales en estructuras modificadas del ZnO.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Bdikin I. K., Gracio J., Ayouchi R., Schwarz R., and Kholkin A. L., Local piezoelectric properties of ZnO thin films prepared by RF-plasma-assisted pulsed-laser deposition method, *Nanotechnology*, vol. 21, no. 23, doi: 10.1088/0957-4484/21/23/235703, 2010.

- [2] Cheng C., Xu G., Zhang H., and Luo Y., Fabricating ZnO nanorods sensor for chemical gas detection at room temperature, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 7, no. 12, 4439–4442, doi: 10.1166/jnn.2007.864, 2007.
- [3] Chitara B., Late D. J., Krupanidhi S. B., and Rao C. N. R., Room-temperature gas sensors based on gallium nitride nanoparticles, *Solid State Commun.*, vol. 150, no. 41–42, 2053–2056, doi: 10.1016/j.ssc.2010.08.007, 2010.
- [4] Choi Y. J., Hwang I. S., Park J. G., Choi K. J., Park J. H., and Lee J. H. Novel fabrication of an SnO<sub>2</sub> nanowire gas sensor with high sensitivity, *Nanotechnology*, vol. 19, no. 9, doi: 10.1088/0957-4484/19/9/095508, 2008.
- [5] Dey A., Semiconductor metal oxide gas sensors: A review, *Mater. Sci. Eng. B Solid-State Mater. Adv. Technol.*, vol. 229, no. December 2017, 206–217, doi: 10.1016/j.mseb.2017.12.036, 2018.
- [6] Dong L. F., Cui Z. L., and Zhang Z. K., Gas sensing properties of nano-ZnO prepared by arc plasma method, *Nanostructured Mater.*, vol. 8, no. 7, 815–823, doi: 10.1016/S0965-9773(98)00005-1, 1997.
- [7] Ferroni M., Guidi V., Martinelli G., Faglia G., Nelli P., and Sberveglieri G., Characterization of a nanosized TiO<sub>2</sub> gas sensor, *Nanostructured Mater.*, vol. 7, no. 7, 709–718, doi: 10.1016/S0965-9773(96)00050-5, 1996.
- [8] Georgekutty R., Seery M. K., and Pillai S. C., A highly efficient Ag-ZnO photocatalyst: Synthesis, properties, and mechanism, *J. Phys. Chem. C*, vol. 112, no. 35, 13563–13570, doi: 10.1021/jp802729a, 2008.
- [9] Gimenez A. J. and Ya J. M., ZnO - Paper Based Photoconductive UV Sensor, vol. 2, no. 3, 282–287, 2011.
- [10] Gui Y., Li S., Xu J., and Li C., Study on TiO<sub>2</sub>-doped ZnO thick film gas sensors enhanced by UV light at room temperature, *Microelectronics J.*, vol. 39, no. 9, 1120 – 1125, doi: 10.1016/j.mejo.2008.01.052, 2008.
- [11] Han D. and Zhao M., Facile and simple synthesis of novel iron oxide foam and used as acetone gas sensor with sub-ppm level, *J. Alloys Compd.*, vol. 815, 152406, doi: 10.1016/j.jallcom.2019.152406, 2020.
- [12] Krstev I., Helwig A., Müller G., Garrido J., and Stutzmann M., Detection of random vapour concentrations using an integrating diamond gas sensor,

- Sensors Actuators, B Chem., vol. 195, 603–608, doi: 10.1016/j.snb.2014.01.093, 2014.
- [13] Kuoni A. and Boillat M., Polyimide membrane with ZnO piezoelectric thin film pressure transducers as a differential pressure liquid flow sensor, 2003.
- [14] Labidi A. et al., Impedance spectroscopy on WO<sub>3</sub> gas sensor, Sensors Actuators, B Chem., vol. 106, no. 2, 713–718, doi: 10.1016/j.snb.2004.09.022, 2005.
- [15] Liu K., Sakurai M., Photodetectors, ZnO-Based Ultraviolet Photodetectors, 8604–8634, doi: 10.3390/s100908604, 2010.
- [16] Lu C. Y., Chang S. P., and Chang S. J., ZnO nanowire-based oxygen gas sensor, 2008 IEEE Int. Conf. Electron Devices Solid-State Circuits, EDSSC, vol. 9, no. 4, 485–489, doi: 10.1109/EDSSC.2008.4760698, 2008.
- [17] Mane A. and Moholkar A. V., Orthorhombic MoO<sub>3</sub> nanobelts based NO<sub>2</sub> gas sensor, Appl. Surf. Sci., vol. 405, 427–440, doi: 10.1016/j.apsusc.2017.02.055, 2017.
- [18] Nyembe S. et al., Indium phosphide nanowires: Synthesis and integration into a gas sensing device, Sensors Actuators, B Chem., vol. 333, 129552, doi: 10.1016/j.snb.2021.129552, 2021.
- [19] Ozga K. et al., Second order optical effects in Au nanoparticle-deposited ZnO nanocrystallite films, Nanotechnology, vol. 19, no. 18, 2008, doi: 10.1088/0957-4484/19/18/185709, 2008.
- [20] Vyas S., A short review on: Optimization techniques of ZnO based thin film transistors, Chinese J. Phys., vol. 56, no. 1, 117–124, doi: 10.1016/j.cjph.2017.12.002, 2018.
- [21] Yamazoe N., Miura N., Moriya K., Jinkawa T., Tamaki J., and Yamaura H., Indium oxide-based gas sensor for selective detection of CO, Sensors Actuators B Chem., vol. 36, no. 1–3, 325–332, doi.org/10.1016/S0925-4005(97)80090-1, 1996.
- [22] Zhu L. and Zeng W., Room-temperature gas sensing of ZnO-based gas sensor: A review, Sensors Actuators, A Phys., vol. 267, 242–261, 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.10.021, 2017.