

Propiedades ópticas, estructurales, y eléctricas de películas delgadas de ZnO - Mg preparadas por el método sol - gel

Optical, structural and electrical properties of ZnO - Mg films prepared by sol-gel method

Propriedades ópticas, estruturais e elétricas de filmes de ZnO - Mg preparados pelo método sol - gel

Alex Díaz Díaz^{1*}; Paul Acevedo Hurtado¹; Karina Alva Deza²; Gilda Casanova Morales²

Resumen

En la presente investigación se evaluaron películas delgadas de ZnO sintetizadas por el método sol-gel, dopadas con Mg a una concentración de 0,65 M. Se determinó el efecto de la temperatura de recocido (400, 500 y 600 °C) y del porcentaje molar del dopante (2, 4, 6 y 8%), sobre las propiedades eléctricas y morfológicas. Se encontró que las películas delgadas de ZnO muestran la mayor conductividad eléctrica y tamaño de grano al dopaje de 2% de Mg y a un recocido de 600 °C; siendo de $8,55 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ y de 38,56 nm respectivamente. Así también, la menor conductividad eléctrica y el menor tamaño de grano, se da a un dopaje del 8% de Mg y a un recocido de 400 °C; siendo los valores de $1,48 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ y 14,13 nm; de modo que, el tamaño de grano crece con el incremento de la temperatura; pero disminuye a medida que aumenta la concentración molar de Mg. El tamaño de grano se determinó mediante la ecuación de Scherrer sobre los picos de difracción de rayos X (DRX). Los resultados mostraron que las películas delgadas de ZnO dopadas con Mg poseen una estructura hexagonal tipo wurtzita con una orientación preferencial al plano (002).

Palabras clave: método sol-gel; portadores de carga; movilidad; nanoestructuras.

Abstract

In this research, thin films of ZnO doped Mg at 0,65 M synthesized by the sol-gel method were evaluated. The effect of the annealing temperature (400, 500 and 600 °C) and the molar percentage of the dopant (2, 4, 6 and 8%) on the electrical and morphological properties were determined. It was found that, the thin films of ZnO show the highest electrical conductivity and large grain size at doping of 2% Mg with an annealing temperature of 600 °C, with values of $8,55 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ and 38,56 nm respectively. Also, the lowest electrical conductivity and the smallest grain size is given to a doping of 8% Mg with an annealing temperature of 400 °C, with values of $1,48 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ and 14,13 nm; so, the grain size grows with the increase of the temperature; but it decreases as the molar concentration of Mg increases. The grain size was determined by the Scherrer equation on the X-ray diffraction peaks (XRD). The results showed that the thin films of ZnO doped with Mg have a wurtzite hexagonal structure with a preferential orientation to the plane (002).

Keyword: sol-gel method; charge carriers; mobility; nanostructures.

Resumo

Na presente investigação ZnO filmes finos sintetizados pelo método de sol-gel foram avaliadas, dopado com Mg com uma concentração de 0,65 M. O efeito da temperatura de recozimento (400, 500 e 600 ° C) e foi determinada porcentagem molar do dopante (2, 4, 6 e 8%), nas propriedades elétricas e morfológicas. Verificou-se que os filmes finos de ZnO apresentam a maior condutividade elétrica e granulometria na dopagem de 2% Mg e um recozimento de 600 ° C; sendo $8,55 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ e 38,56 nm respectivamente. Da mesma forma, a menor condutividade elétrica e o menor tamanho de grão são dados a uma dopagem de 8% de Mg e um recozimento de 400 ° C; os valores são $1,48 \times 10^{-7} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ e 14,13 nm; assim, o tamanho do grão cresce com o aumento da temperatura; mas diminui à medida que a concentração molar de Mg aumenta. O tamanho de grão foi determinado pela equação de Scherrer nos picos de difração de raios-X (DRX). Os resultados mostraram que os filmes finos de ZnO dopados com Mg possuem estrutura hexagonal wurtzita com orientação preferencial ao plano (002).

Palavras-chave: método sol-gel; portadores de carga; mobilidade; nanoestruturas.

¹ Departamento de Ingeniería de Materiales, Laboratorio de Materiales Electrónicos, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

² Escuela de Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

*Autor para correspondencia: didialfanet@hotmail.com (A. Díaz)

Introducción

Los sistemas de control, lectores ópticos, pantallas con luces LED, electrónica digital; todos ellos, utilizan materiales semiconductores. Desde las poderosas computadoras hasta las calculadoras de bolsillo, además de la mayoría de los aparatos electrodomésticos y los equipos de medición de laboratorio; así como las celdas solares, fotocopiadoras y una larga serie de otras aplicaciones, tienen que ver con los semiconductores (Korzhand, 2011). Los materiales semiconductores y el desarrollo de dispositivos han sido asombroso, y el impacto en la sociedad humana, monumental, ocupando un lugar prominente en el conjunto de los materiales. Esto se debe al alto grado de desarrollo que se ha alcanzado en el conocimiento de sus propiedades básicas, como también en el de sus aplicaciones. Podemos decir que hoy en día los semiconductores son piezas básicas en toda la tecnología electrónica, teniendo gran impacto también en la fotónica (Albella y Martínez-Duart, 2010; Uesh y Singh, 2008).

La palabra fotónica ha sido acuñada en las últimas dos décadas con el objetivo de describir el campo de la óptica, en el cual los electrones en aceleración constante generan ondas electromagnéticas. Hasta ahora, estamos acostumbrados a pensar en los electrones como partículas clásicas; pero la mecánica cuántica les asigna propiedades de onda (Wang, 1999; Capper, 2006).

De este modo se intensificó en la investigación de propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas de los semiconductores. Al mismo tiempo, se aplica la mecánica cuántica a los sólidos y se logra describir, en gran detalle, la estructura electrónica de los semiconductores. Por otro lado, se establecen las bases para el desarrollo de nuevos dispositivos electrónicos tales como láseres, detectores de rayos X, detectores de gases y otras aplicaciones (Deshwal y Arora, 2018).

En las últimas tres décadas se ha dedicado mucho interés a los óxidos semiconductores debido a sus propiedades particulares y a sus diversas aplicaciones. Hasta ahora el óxido de Indio dopado con Estaño es el más común, debido a su alta conductividad eléctrica y transmisión óptica. Sin embargo, el éxito de este semiconductor está limitado por un alto costo, toxicidad y la escasez de Indio. En busca de materiales alternativos, el ZnO ha

atraído la atención debido a su relativamente bajo costo (Velázquez-Nevárez *et al.*, 2016).

Por otra parte, tiene algunas características distintas, como una estructura de defectos no estequiométricos, anisotropía en su estructura cristalina, alta brecha energética (3,37 eV), transparencia en la región visible, gran variación de conductividad y es altamente sensible en su superficie a diferentes ambientes (Hasuike *et al.*, 2007).

Estas propiedades lo hacen útil para muchas aplicaciones como: celdas solares, absorción de rayos ultravioleta, fotocatalisis química, sensores de gas y transistores de efecto de campo, dispositivos optoelectrónicos (Othman y Matoussi, 2016).

Debido a que el radio del ion Mg^{2+} (0,57 Å) difiere de manera poco significativa con el radio del ion Zn^{2+} (0,60 Å), permite que la incorporación del ion Mg^{2+} en el enrejado del ZnO sea bastante factible, formando así MZO (óxido de zinc y óxido de magnesio), que pueden ser fácilmente controlados en una amplia gama de temperaturas. Las películas delgadas de ZnO dopadas con Mg^{2+} se han preparado usando diversos métodos, tales como pulverización por magnetrón radiofrecuencia (Rf), pirolisis por pulverización, deposición por láser pulsado, epitaxia de haz molecular, deposición química en fase vapor, método sol-gel, entre otros. También se ha establecido experimentalmente que las propiedades estructurales y ópticas de estas películas delgadas son muy favorables a las condiciones de deposición (Kaushal y Kaur, 2009; Sen-gupta *et al.*, 2013; Srinivasan *et al.*, 2015).

Entre estos métodos, el método sol-gel es atractivo debido a que ofrece muchas ventajas como preparación sencilla y barata; además permite optimizar la morfología de las películas, proporciona una película fina y homogénea de gran área junto con un excelente control de composición, una menor temperatura de cristalización y un espesor de película uniforme. Adquiere gran importancia el estudio de las propiedades estructurales y ópticas de las películas MZO para determinar sus aplicaciones optoelectrónicas (Sengupta *et al.*, 2013).

Material y métodos

Se utilizaron como materiales de partida, acetato de zinc dihidratado ($ZnAc$) [$Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$], $M = 219,5276$ g/mol;

cloruro de magnesio (MgCl_2), $M = 249,08236$ g/mol; etanol absoluto (EtOH) [$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$], $M = 46,0684$ g/mol; agua desionizada (AD) [H_2O], $M = 18,01528$ g/mol; dietanolamina (DEA) [$\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$], $M = 105,14$ g/mol y los sustratos de borosilicato.

La síntesis sol-gel del ZnO para la solución patrón y dopadas, fueron preparadas de la siguiente manera: el acetato de Zinc o la mezcla de acetatos fue disuelta en etanol (0,3 M) y agitado a 60°C por un tiempo de 10 minutos. Cuando la solución cambió a emulsión se le agregó dietanolamina en agua desionizada, con una relación molar de MEA/ZnAc 1:1 y AD/ ZnAc de 2:1, respectivamente. Las probetas de óxido de zinc fueron dopadas al 2, 4, 6, y 8% de Mg, con una concentración 0,65 molar. Después de un periodo de agitación de 5 minutos la solución cambió a transparente. Se realizó la deposición de 5 capas de sustrato en un spin coater a una velocidad giro aproximada de 2000 rpm, con un tiempo de 40 segundos por capa, secando a 60°C por 10 minutos cada capa depositada. Finalmente el recocido se realizó a las temperaturas de 400°C , 500°C y 600°C durante 30 minutos.

Técnicas de caracterización

Espectroscopia UV, permitió en primera instancia reconocer las bandas de absorción en el espectro visible atribuidas a la incorporación exitosa del Magnesio a la red de ZnO y descartar la formación de fases secundarias que fueron contrastadas con los resultados de DRX.

Difracción de rayos X (DRX), este ensayo permitió observar el cambio en la estructura cristalina con la temperatura de recocido de las películas semiconductoras dopadas con Magnesio respecto de las películas patrón, así como la orientación, parámetros de red y tamaño de los cristales de las películas; y así determinar su influencia sobre el número de portadores y resistividad eléctrica, y su relación con los resultados UV-Vis.

Funcionalidad por Efecto Hall, el ensayo consistió en determinar en primera instancia el campo magnético neto producido utilizando la ley de Biot – Savart del electromagnetismo, anulando el componente del campo magnético terrestre, ubicando paralelamente al campo producido por los dos electroimanes. Haciendo uso de la técnica de Efecto Hall, que usa este campo magnético para desviar hacia uno de

los extremos de la película delgada a los portadores de carga, se crea el voltaje Hall para determinar el número y la movilidad de portadores de carga; con esos datos y la carga del electrón se puede aproximar la conductividad eléctrica del semiconductor.

Resultados y discusión

1. Propiedades Ópticas: transmitancia y brecha energética

En la figura 1 se observa que las películas delgadas de ZnO dopadas a diferentes porcentajes molares de Mg recocidas a 400°C , presentan una transmitancia de 65 a 90% en el rango visible. También se muestra una fuerte absorción para todas las películas delgadas en el intervalo de 300 a 400 nm de longitud de onda, debido a la excitación y la migración de los electrones de la banda de valencia a la banda de conducción.

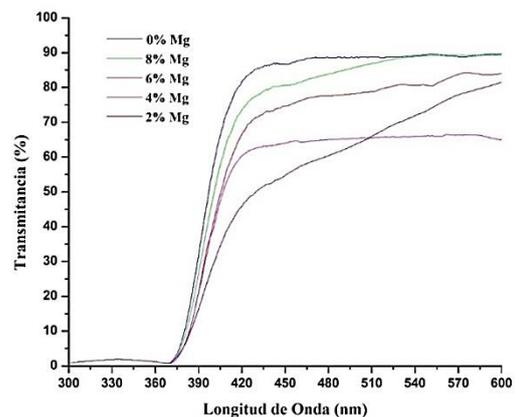


Figura 1. Transmitancia de películas delgadas de ZnO a diferentes porcentajes molares de Mg recocidas a 400°C .

La caída abrupta del borde de absorción en los espectros de transmisión es característica de un semiconductor con una amplia banda prohibida (band gap), lo que hace de las películas delgadas de ZnO dopadas con Mg un material adecuado para los dispositivos optoelectrónicos (Shi *et al.*, 2012).

Por otra parte, el aumento de la temperatura de recocido tiene el efecto contrario al dopaje de las películas delgadas, debido a que disminuye la transmitancia; esto puede estar relacionado con la rugosidad superficial de las películas delgadas que presentan al ser recocidas, donde una mayor rugosidad dispersa la luz incidente. La brecha energética de las películas delgadas de ZnO disminuye con el aumento de la temperatura, pero aumenta con el incremento del porcentaje

molar de Mg (Hong, 2009; Velasquez-Navárez, 2016).

En la tabla 1, se puede observar los valores de brecha energética para todas las películas delgadas, presentándose la mayor brecha energética a un dopaje de 8% de Mg²⁺ y recocido a 400°C, siendo el un valor de 3,45 eV. Este aumento se explica por el efecto Moss-Burstein, que es un fenómeno en el cual la banda prohibida de un semiconductor aumenta a medida que se empuja el borde de absorción a energías más altas, como resultado de que algunos estados se encuentran más cercanos a la banda de conducción (Huang *et al.*, 2012).

Tabla 1

Valores de brecha energética de las películas delgadas de ZnO dopadas a 2, 4, 6 y 8% de Mg, recocidas a 400, 500 y 600°C

% Molar Mg	Temperatura de recocido (°C)	Eg (eV)
2%	400	3,37
	500	3,27
	600	3,24
4%	400	3,39
	500	3,30
	600	3,25
6%	400	3,42
	500	3,31
	600	3,26
8%	400	3,45
	500	3,33
	600	3,28

2. Tamaño de grano y estructura cristalina

En la figura 2 se observan los resultados obtenidos de la difracción de rayos X (DRX) que se realizó a las películas delgadas de ZnO recocidas a diferentes temperaturas. Los picos que se muestran coinciden con los valores del manual JCPDS 36 – 1451. Estos picos aumentan su intensidad a medida que incrementa la temperatura de recocido (Sengupta *et al.*, 2013). De los resultados del DRX para las muestras de ZnO dopadas al 8% molar de Magnesio a diferentes temperaturas, se observa que a medida que incrementa la temperatura de recocido de 400 a 600°C, la intensidad de difracción es alta en el plano (002), lo que indica una alta orientación de las películas delgadas al eje c. Los picos relacionados con el plano (002) se desplazaron sistemáticamente hacia un mayor ángulo de 34,58° a 34,60°.

El tamaño de grano (τ) de las películas delgadas fue calculado usando la ecuación de Debye - Scherer.

$$\tau = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta}$$

Dónde:

k = 0,9, es el factor de forma,

$\lambda = 1,5405 \text{ \AA}$, es la longitud de onda del rayo X incidente,

β = la medida de FWHM en radianes y,

Θ = ángulo de difracción del pico de difracción.

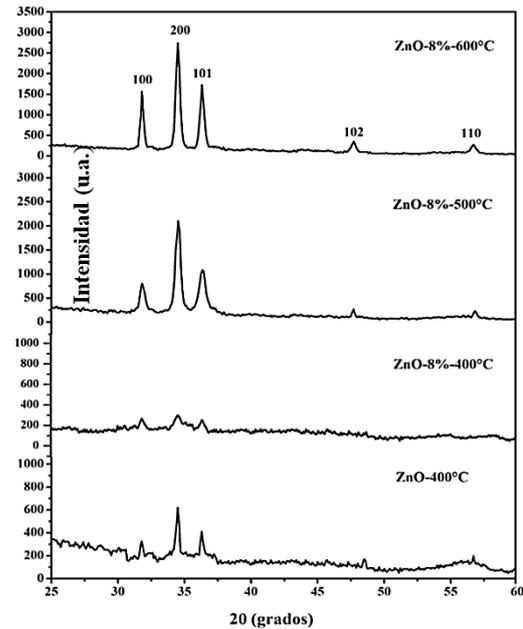


Figura 2. Patrón de difracción a diferentes temperaturas de recocido para películas de Zn dopado con 8% de Mg.

La figura 3 muestra el tamaño de grano de las películas delgadas de ZnO dopadas a diferente porcentaje molar de Mg y recocidas a distintas temperaturas. Donde el tamaño de grano va aumentando de 15 nm (400°C) a 38,57 nm (600°C) para un dopaje de 2% Mg, y de 14,13 nm (400°C) a 33,07 nm (600°C) para un dopaje de 8% Mg con el incremento de la temperatura. Esto podría ser atribuido a la coalescencia de granos que se genera a mayores temperaturas de recocido; sin embargo, el tamaño de grano disminuye para una temperatura de recocido de 600°C desde 38,57 nm con un dopaje de 2% Mg a 33,07 nm con un dopaje de 8% Mg, por lo tanto, se puede decir que la incorporación del Mg²⁺ en la red del ZnO deteriora ligeramente la cristalinidad, y la coalescencia de granos es menor con altos porcentajes de dopaje (Korzhand *et al.*, 2011).

El tamaño de grano fue calculado por la fórmula de Scherrer en el pico (002) implicando que el resultado también fue afectado por el

movimiento de la posición del pico debido a tensiones residuales en las películas delgadas (Sengupta *et al.*, 2013).

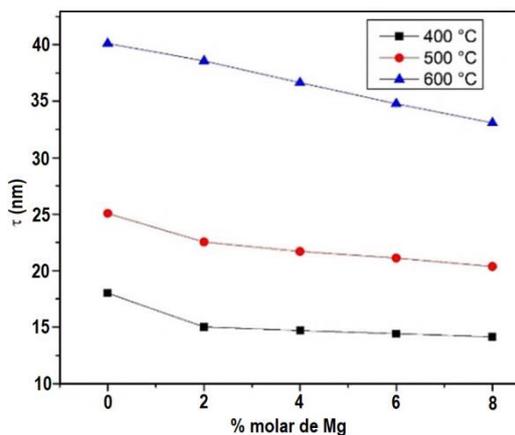


Figura 3. Tamaño de grano de las películas de ZnO dopadas con diferente porcentaje molar de Mg a diferentes temperaturas de recocido.

3. Propiedades eléctricas

En las figuras 4 y 5 se muestran claramente que la conductividad eléctrica disminuye con el aumento del porcentaje molar de Mg e incrementa la resistividad, siendo las valencias de Zn^{2+} y Mg^{2+} las mismas. La sustitución de Mg^{2+} por el catión Zn^{2+} perteneciente al grupo II, no debe generar ni consumir portadores de ZnO (Chaudhary *et al.*, 2018).

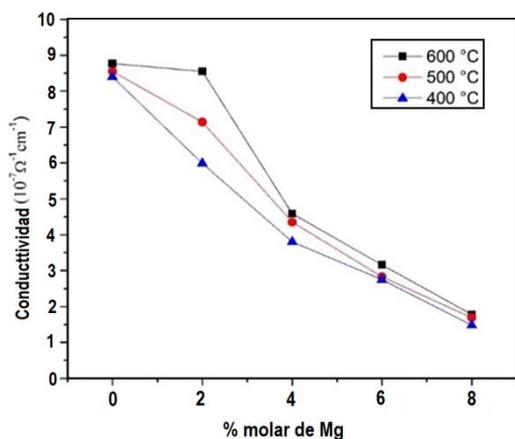


Figura 4: Conductividad eléctrica de las películas delgadas de ZnO dopadas con diferentes porcentajes molar de Mg a diferentes temperaturas de recocido.

Sin embargo, después del dopaje a diferentes porcentajes molares de Mg, las propiedades eléctricas de las películas delgadas de ZnO cambian; resultado de la sustitución de iones de Mg^{2+} por iones de Zn^{2+} en la red de ZnO; debido a que, el radio iónico del Mg^{2+} es más pequeño (57 pm) que el radio iónico del Zn^{2+} (60 pm) creando alteraciones en la red

cristalina como defectos reticulares (vacancias, dislocaciones, límites de grano, etc.).

Estos defectos, son irregularidades de la red cristalina, y por lo tanto dispersan las ondas electrónicas favoreciendo el incremento de la resistividad. El cambio de posición de los picos de difracción (002) que muestra el DRX da como resultado una distorsión en la red, lo que aumentaría la resistividad de las películas delgadas de ZnO. También existe la posibilidad de que el Mg^{2+} se haya situado en los límites de grano, pudiendo producir barreras eléctricas; lo que aumenta la dispersión de portadores y por lo tanto incrementa la resistividad (Huang *et al.*, 2012).

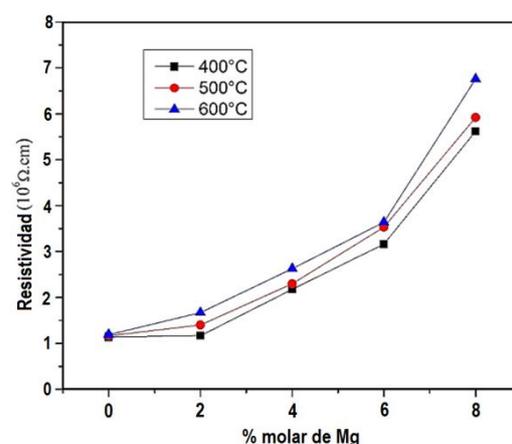


Figura 5: Resistividad eléctrica de las películas delgadas de ZnO dopadas con diferentes porcentajes molar de Mg a diferentes temperaturas de recocido.

Por otro lado, la temperatura de recocido tiene un efecto contrario, al aumentar la conductividad eléctrica de las películas delgadas de ZnO dopadas con diferentes porcentajes molares de Mg. Esto se explica, mediante la ecuación de Arrhenius, que relaciona la dependencia de la constante de velocidad cinética de una reacción química con respecto a la temperatura a la que se lleva a cabo esa reacción.

La velocidad de las reacciones químicas se da en función de la temperatura, en la cual, los reactivos adquieren una mínima cantidad de energía llamada "energía de activación"; la cual se intensifica con el incremento de la temperatura y favorece la formación de productos (Hammad *et al.*, 2010).

La formación o dispersión de defectos reticulares, incrementa la conductividad iónica del ZnO, siendo la corriente transmitida por el exceso de electrones para compensar los iones intersticiales Zn^{2+} , y el transporte iónico es

transmitido por los iones intersticiales (movimiento hacia tetraedros vacíos).

Conclusiones

Mediante el método de efecto Hall se determinó que la conductividad eléctrica disminuye con el incremento del porcentaje molar de Mg, como resultado de la sustitución de iones de Mg²⁺ por iones de Zn²⁺ en la red de ZnO ya que el radio iónico del Mg²⁺ es más pequeño (0,57Å) que el radio iónico del Zn²⁺ (0,60 Å), creando alteraciones en la red cristalina como defectos reticulares. Por otro lado, la temperatura de recocido tiene un efecto contrario, aumentando la conductividad eléctrica de las películas delgadas de ZnO dopadas con diferentes porcentajes molares de Mg.

La mejor conductividad eléctrica para las películas delgadas de ZnO se dio a un dopaje de 2% de Mg²⁺, siendo de $8,55 \times 10^{-7} (\Omega \text{cm})^{-1}$ a una temperatura de recocido de 600°C. Mediante la técnica de DRX se determinó que las películas son policristalinas con una estructura wurtzita hexagonal, presentando una orientación preferencial al plano (002), además no existe presencia de fases de Mg o MgO en los patrones de DRX. Se determinó que el tamaño de grano va en aumento de 15,00 nm (400 °C) a 38,57 nm (600 °C) para un dopaje de 2% Mg, y de 14,13 nm (400 °C) a 33,07 nm (600 °C) para un dopaje de 8% Mg; sin embargo, el tamaño de grano disminuye para una temperatura de recocido de 600°C desde 38,57 nm con un dopaje de 2% Mg a 33,07 nm con un dopaje de 8% Mg; por lo tanto, se puede decir que la incorporación del Mg en la red del ZnO deteriora ligeramente la cristalinidad.

Las películas delgadas de ZnO dopadas a diferentes porcentajes molares de Mg²⁺ recocidas a 600°C tienen una transmitancia de 65 a 90% en el rango visible, siendo las muestras que contienen 8% de Mg las que tienen mayor transmitancia. También se muestra una fuerte absorbancia para todas las películas delgadas en el intervalo de 300 a 400 nm de longitud de onda. La brecha energética de las películas delgadas de ZnO disminuye con el aumento de la temperatura, pero se incrementa con el aumento del porcentaje molar de Mg, teniendo una mayor brecha energética con el 8% de dopaje y recocido a 400°C con un valor de 3,45 eV.

Referencias bibliográficas

- Albella, J.M.; Martínez-Duart, J.M. 2010. Fundamentos de electrónica física y microelectrónica. España: Universidad Autónoma de Madrid. España. Pp. 63-71.
- Capper, K. 2006. Handbook of Electronic and Photonic Materials. Optical & Electronic Materials. Springer, USA.
- Chaudhary, S.; Umar A.; Bhasin K.; Baskoutas S. 2018. Chemical Sensing Applications of ZnO Nanomaterials. Materials MPDI.
- Deshwal, M.; Arora A. 2018. Enhanced acetone detection using Au doped ZnO thin film sensor. Journal of Materials Science: Materials in Electronics 29:15315-15320.
- Hammad, T.; Salem, J.; Harrison, R. 2010. The influence of annealing temperature on the structure, morphologies and optical properties of ZnO nanoparticles. Superlatt. & Microstruct 47(2): 335-340.
- Hasuike, R.; Deguchi, R.; Katoh, H.; Kisoda, K.; Nishio, K.; Harima, H. 2007. Structural properties of nanometre-sized ZnO crystals doped with Co. Journal of Physics: Condensed Matter 19(36): 1-8.
- Hong, Z.; Zhaoxiang, W.; Chen, L.; Huang, J. 2009. Research on Advanced Materials for Li-ion Batteries. Advanced Materials 21(45): 4593-4607.
- Huang, K.; Tang, Z.; Zhang, L.; Yu, J.; Jianguo, L.; Liu, X.; Liu, F. 2012. Preparation and characterization of Mg-doped ZnO thin films by sol-gel method. Applied Surface Science 258(8): 3710-3713.
- Kaushal, A.; Kaur, D. 2009. Effect of Mg content on structural, electrical and optical properties of Zn_{1-x}Mg_xO nanocomposite thin films. Solar Energy Materials and Solar Cells 93(2): 193-198.
- Korzhand, Z.; Abrishami, E.; Abd, W.H.; Yousefi, E.; Hosseini, S. 2011. Effects of annealing temperature on some structural and optical properties of ZnO nanoparticles prepared by a modified sol-gel combustion method. Ceramics International 37: 393 - 398.
- Othman, Z.; Matoussi, A. 2016. Morphological and optical studies of zinc oxide doped MgO. Journal of Alloys and Compounds 671: 366-371.
- Sengupta, J.; Ahmed, A.; Labar, R. 2013. Structural and optical properties of post annealed Mg doped ZnO thin films deposited by the sol-gel method. Materials Letters 109: 265-268.
- Shi, Q.; Zhang, J.; Zhang, D.; Wang, C.; Yang, B.; Zhang, B.; Wang, W. 2012. Red luminescent and structural properties of Mg-doped ZnO phosphors prepared by sol-gel method. Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology 177(9): 689-693.

- Srinivasan, G.; Priya, S.; Sun, N. 2015. Composite Magnetolectrics: Materials, Structures, and Applications. USA: Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials.
- Uesh, K.; Singh, J. 2008. Semiconductor Device Physics and Design. S. S. & B. Media, Edit. Netherlands: Springer.
- Velázquez-Nevárez, G.; Vargas-García, J.; Aguilar-Hernandez, Veja-Becerra, O.; Chen, F; Shen, Q.; Zhang, L. 2016. Optical and Electrical Properties of (002)-Oriented ZnO Films Prepared on Amorphous Substrates by Sol-Gel Spin-Coating. *Materials Research* 19(suppl 1): 113-117.
- Wang, X.; Li, Q; Liu, Z.; Zhang, J.; Liu, Z.; Wang, R. 2008. Low-temperature growth and properties of ZnO nanowires. *Appl. Phys. Lett.* 84 (24): 4941-4943.