

INCORPORACIÓN DE Mg ó Zn EN POLVOS DE GaN OBTENIDOS POR LA RUTA DE PIRÓLISIS DEL COMPLEJO METALORGÁNICO $Ga(NO_3)_3-CH_6N_4O$ Y SU NITRIDACIÓN

Erick Gastellóu, Jorge A. Rodríguez, Mario Robles

División de Sistemas Automotrices, Universidad Tecnológica de Puebla (UTP), Puebla, Puebla, C.P. 72300, México;
tel: 2224699594; erick_gastellou@utpuebla.edu.mx; (E.G.); jorge.rodriguez@utpuebla.edu.mx; (J.R.);
mario.robles@utpuebla.edu.mx; (M.R.)

Ana M. Herrera

Ingeniería en Software, Universidad Politécnica de Amozoc (UPAM), Amozoc, Puebla, C.P. 72980, México;
ana.herrera@upamozoc.edu.mx; (A.H.)

Godofredo García, Crisoforo Morales, Enrique Rosendo, José A. Luna

Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP),
Puebla, Puebla, C.P. 72570, México; godofredo.garcia@correo.buap.mx; (G.G.);
crisoforo.morales@correo.buap.mx; (C.M.); enrique.rosendo@correo.buap.mx; (E.R.); jose.luna@correo.buap.mx
(J.L.)

Rafael García

Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, C.P. 83190, México;
rgarcia@cifus.uson.mx; (R.G.)

Gustavo A. Hirata

Centro de Nanociencias y Nanotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ensenada, Baja
California, C.P. 22800, México; hirata@cnyun.unam.mx; (G.H.)

Yani D. Ramírez

División de Ingeniería Ambiental, Universidad Tecnológica de Puebla (UTP), Puebla, Puebla, C.P. 72300, México;
yani.ramirez@utpuebla.edu.mx; (Y.R.)

RESUMEN

Polvos de GaN sin dopar y dopados con Mg o Zn, fueron obtenidos por la ruta de la pirólisis del complejo metalorgánico $Ga(NO_3)_3-CH_6N_4O$, seguido de su nitridación a 1000 °C durante 2 horas. Se usaron como reactivos carbohidrazida, nitrato de galio, y nitratos de magnesio o zinc. La caracterización por XRD mostró constantes de red para la estructura de wurtzita $a = 3.19 \text{ \AA}$ y $c = 5.18 \text{ \AA}$, con una relación c/a de 1.623. No se detectaron otras especies cristalinas como los óxidos, metales puros u otros nitruros. Polvos sin recocer mostraron una estructura amorfa, la cual mejora al llevar a cabo un recocido térmico en ambiente de amoníaco. Durante los diferentes estudios realizados se observó que entre más alta sea la temperatura de nitridación su calidad cristalina mejora. Usando el software ICCD PDF-4 + 2018 y la ecuación de Debye-Scherrer, se calculó el tamaño del cristal encontrando un promedio de 21.3 nm. Micrografías SEM muestran una morfología superficial de apariencia amorfa, la cual podría estar relacionada con la deficiencia de nitrógeno y la presencia de impurezas no intensionales como oxígeno. La caracterización Raman, mostró los tres modos de vibración característicos para el GaN con frecuencias de 527.25, 556.18 y 564.03 cm^{-1} para $A_1(TO)$, $E_1(TO)$ y $E_2(High)$ de la estructura hexagonal wurtzita de GaN, respectivamente. La espectroscopia de fotoluminiscencia (PL) presentó la emisión correspondiente a la transición banda a banda del GaN hexagonal con una energía máxima ubicada a 3.43 eV (361.51 nm), la cual pertenece a la región azul – violeta. Se piensa en la posible presencia de nanocristales que se forman al utilizar la ruta de la pirólisis del complejo metalorgánico $Ga(NO_3)_3-CH_6N_4O$.

ABSTRACT

Undoped GaN powders, and Mg- or Zn-doped GaN powders were obtained by the route of the pyrolysis of a metalorganic complex $Ga(NO_3)_3-CH_6N_4O$, followed of a nitridation process at 1000 °C for 2 hours. Carbohydrazide, gallium nitrate, and magnesium or zinc nitrates were used as reagents. XRD characterization showed lattice constants for the wurtzite structure $a = 3.19 \text{ \AA}$ and $c = 5.18 \text{ \AA}$, with a ratio c/a of 1.623. Other crystalline species such as oxides, pure metals or other nitrides were not detected. Unannealed powders showed an amorphous structure, which is improved by thermal annealing in an ammonia environment. During the different studies carried out, it was observed that the higher the nitriding temperature its crystalline quality improves. Using the ICCD PDF-4 + 2018 software and the Debye-Scherrer equation, the crystal size was calculated finding an average of 21.3 nm. SEM micrographs show a surface morphology with an amorphous appearance, which could be related to nitrogen deficiency and the presence of non-intensional impurities such as oxygen. The Raman characterization showed the three characteristic vibration modes for GaN with frequencies of 527.25, 556.18 and 564.03 cm^{-1}

for $A_1(\text{TO})$, $E_1(\text{TO})$ and $E_2(\text{High})$ of the hexagonal wurtzite structure of GaN, respectively. Photoluminescence (PL) spectroscopy presented the emission corresponding to the band-to-band transition of hexagonal GaN with a maximum energy located at 3.43 eV (361.51 nm), which belongs to the blue-violet region. The possible presence of nanocrystals that are formed when using the pyrolysis route of the metal-organic complex $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3\text{-CH}_6\text{N}_4\text{O}$ is considered.

Palabras Clave: Polvo; GaN; Pirólisis; Red Cristalina; Complejo Metalorgánico.

1. Introducción

Los compuestos semiconductores III-V han atraído la atención de los investigadores debido a su ancho de banda de energía prohibida directa. Entre los compuestos semiconductores III – V, destaca el grupo de los III - Nitruros (GaN, AlN e InN) debido a sus propiedades ópticas y eléctricas. En particular, el Nitruro de Galio (GaN) fue sintetizado por primera vez en 1932 por Johnson – Parson - Crew [1] y su importancia fue demostrada por los laboratorios Radio Corporation of America (RCA) en 1968 [2]. A partir de entonces los investigadores han centrado sus esfuerzos en la tecnología del GaN, para resolver la problemática que existe en el desacople de red del material con respecto a los sustratos no nativos, así como su dopado tipo p [3]. Fue precisamente por el desacople de red que algunos investigadores mencionaron que el GaN era uno de los peores materiales desde el punto de vista estructural, pero con interesantes características ópticas y eléctricas [4]. En las décadas de los 80's y 90's, investigadores como Akasaki en la Universidad de Nagoya (Japón), Nakamura en Nichia y Amano también en la Universidad de Nagoya, desarrollaron las tecnologías necesarias para que en la actualidad el GaN tenga múltiples aplicaciones comerciales como lámparas luminiscentes, y pantallas de tecnología LED, además de anuncios comerciales, computadoras, dispositivos de almacenamiento con mayor capacidad de información, aplicaciones médicas, dispositivos semiconductores de potencia y de telecomunicaciones [3].

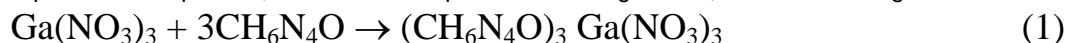
Económicamente el GaN ha demostrado ser rentable para el mercado de las telecomunicaciones con dispositivos que operarán a 5 W y por debajo de los 3.8 GHz para tecnología WIMAX (IEEE 802.16e-2005-2.5GHz), con ganancias económicas en 2011 de 1 billón de dólares. En este mismo ramo NEC Electronics desarrolló transistores de potencia que operan a 45 V y 2.14 GHz para Toyoda Gosei [5]. Las propiedades mecánicas del GaN lo hacen ser un material muy duro, muy estable, con alta capacidad de conducción de calor, con un ancho de banda de energía prohibida directa de 3.4 eV para la estructura hexagonal (wurtzita, $a = 3.18 \text{ \AA}$, $c = 5.18 \text{ \AA}$) y 3.2 eV para la estructura cúbica (zinc blenda, $a = 4.5 \text{ \AA}$), una concentración intrínseca de $n_i = 1.9 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$, y movilidades de $\mu_n = 1500$ y $\mu_p = 30$ [6]. En la actualidad la técnica epitaxial más empleada en la industria para la obtención del GaN es la deposición química en fase vapor utilizando metal-orgánicos o MOCVD por sus siglas en inglés. Si bien el MOCVD es una técnica probada para la obtención de películas de alta calidad y pureza, con una variedad de materiales importante, también es un hecho que esta técnica presenta algunos inconvenientes, como el alto costo de precursores metal-orgánicos (trimetil-galio, trimetil-indio y trimetil-aluminio), un manejo delicado de gases, los cuales al ser pirofóricos requieren de dispositivos especiales para su manejo y almacenamiento. Además, los III-Nitruros presentan dificultades para controlar su conductividad mediante la técnica de dopado. Otra técnica utilizada recientemente para el depósito de películas delgadas es magnetron RF sputtering, el cuál puede usar blancos fabricados con polvos de GaN dopados con Mg o Zn. Los polvos pueden ser obtenidos por nitridación de las soluciones metálicas líquidas Ga – Mg, o Ga – Zn, realizando el dopado “in situ” mediante el uso de magnesio y zinc metálico [7]. Este trabajo presenta la obtención de polvos de GaN dopados con Mg o Zn via pirólisis de nitrato de galio ($\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$), carbohidrazida ($\text{CH}_6\text{N}_4\text{O}$), y nitratos de magnesio o zinc seguido de su nitridación a 1000 °C durante 2 horas. Además se presenta la obtención de polvos de GaN sin dopar con una forma de comparar los resultados obtenidos.

2. Experimental

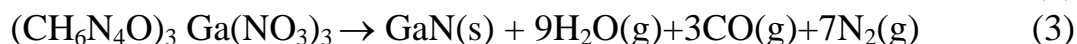
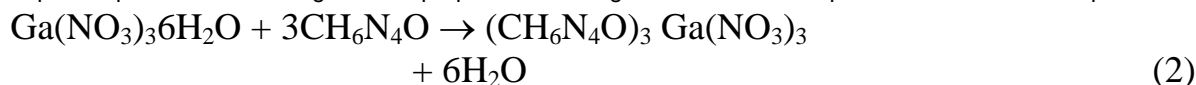
La obtención de GaN por la ruta de pirólisis consiste en un proceso termoquímico mediante el cual un material metalorgánico ó subproducto polimérico sólido generado por nitratos se descompone por la acción de calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla de polvos de nitruros.

2.1 Polvos de GaN sin dopar

La síntesis de polvos de GaN obtenidos por el método de combustión se realizó mediante la pirólisis de nitrato de galio $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3$ y carbohidrazida ($\text{CH}_6\text{N}_4\text{O}$) como agente reactante. Donde la ecuación propuesta para la reacción de obtención de polvos de GaN por la ruta de pirólisis, fue balanceada por el método algebraico, obteniendo lo siguiente:



Como resultado se formó un subproducto de complejo metalorgánico y el denominado “quelante bidentado”. Sintetizado el compuesto polimérico metalorgánico se propusieron las siguientes reacciones para la obtención de los polvos de GaN:



Obtenido los polvos de GaN propuestos en la reacción (3), se realizó posteriormente su recocido en ambiente de NH_3 durante 2 horas. La temperatura de recocido fue de $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Esta temperatura se seleccionó, debido que a bajas temperaturas las propiedades cristalinas son de menor calidad. El recocido tuvo el objetivo de mejorar la calidad cristalina del GaN.

2.2 Polvos de GaN dopados con nitrato de magnesio o nitrato de zinc

Una forma alterna propuesta de obtener los polvos de GaN dopados con Mg o Zn, es mediante la ruta de pirólisis con nitratos de Mg y Zn, la cuál es una técnica económica y fácil de implementar en cuanto a reactivos se refiere. En general el proceso de obtención del complejo metalorgánico es el mismo que para los polvos de GaN sin dopar, sin embargo, la parte de pirólisis puede variar dependiendo el nitrato dopado a obtener. En general el proceso de obtención del complejo metalorgánico es el mismo que para los polvos de GaN sin dopar, sin embargo, la parte de pirólisis puede variar dependiendo el nitrato dopado a obtener. El proceso para la obtención de polvos de GaN dopados con Mg o Zn, se describe a continuación: se colocaron 20 ml de tolueno grado HPLC en un vaso de precipitado de teflón, el cual estuvo sobre una parrilla antes de agregar los nitratos. Después se diluyó el nitrato de galio y nitrato de magnesio o zinc, en el tolueno grado HPLC a $111\text{ }^\circ\text{C}$ con agitación magnética, durante 10 minutos (el tiempo puede variar dependiendo del material a obtener). Después de lo cuál se agregó la carbohidrazida mientras la solución continuaba en agitación magnética, la síntesis terminó al mezclarse los nitratos con la carbohidrazida y evaporarse el tolueno por completo. El proceso anterior puede tardar en promedio entre 15 a 45 minutos. Más tarde y una vez formado el complejo metalorgánico se introdujo en el horno (reactor de tres zonas Lindberg Blue M) en una cantidad que puede variar entre 1 o 2 gramos. Se realizó un proceso de vacío y llenado (purga) con N_2 o Ar_2 , del reactor durante tres ocasiones para reducir impurezas residuales. Se introdujo un flujo de N_2 a 100 sccm como gas de arrastre de subproductos de la reacción del complejo metalorgánico. Para el caso de la obtención de polvos de GaN se dejó homogenizar la mezcla a $200\text{ }^\circ\text{C}$ durante 40 minutos para preparar la pirólisis controlada del complejo metalorgánico. Posteriormente, se realizó la pirólisis a $250\text{ }^\circ\text{C}$ durante 30 minutos, obteniéndose un GaN pobre hasta este momento. Se dejó enfriar el material obtenido en el reactor en flujo de N_2 hasta la temperatura ambiente y se extrajo el material. Luego se realizó la molienda de los polvos y se introdujeron nuevamente en el horno, donde se realizó el recocido de los polvos de GaN en ambiente de NH_3 a 100 sccm a $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Cabe señalar que entre mayor sea la temperatura y el tiempo de nitración, mayor será la calidad cristalina de los polvos de GaN. Finalmente, se dejó enfriar el reactor y se sacaron los polvos para su caracterización.

2.3 Caracterizaciones

Los polvos de GaN dopados con Mg o Zn obtenidos por la ruta de la pirólisis fueron caracterizados por difracción de rayos X usando un equipo Bruker AXS D8 discover con una longitud de onda ($\text{Cu K}\alpha$) de 1.5406 \AA . Los patrones de difracción XRD fueron obtenidos en un rango de 25 a 60° . La morfología superficial y análisis elemental fueron obtenidos usando un equipo (SEM/EDS) JEOL JIB-4500 (SEM+FIB). Los espectros de Fotoluminiscencia (PL) fueron medidos a temperatura ambiente con una longitud de onda de excitación de 243 nm y un filtro de 310 nm para un espectrofotómetro Hitachi F-7000 FL con lámpara de xenón de 150 W . Los espectros de difracción Raman para los polvos de GaN dopados con Mg o Zn fueron obtenidos con un espectrofotómetro Micro Raman Horiba Jobin Yvon HR-800.

3. Resultados y Discusión

3.1 Análisis Estructural

Los polvos de GaN sin dopar y dopados con Mg o Zn fueron obtenidos por la ruta de pirólisis del complejo metalorgánico $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3\text{-CH}_6\text{N}_4\text{O}$, seguido de su nitración en un flujo de amoníaco a 1000°C , durante dos horas. La Figura 1, muestra los patrones de difracción de los polvos de GaN sin recocer (Figura 1a)), recocidos en ambiente de amoníaco (Figura 1b)), y dopados con Mg o Zn (Figura 1c) y Figura 1d)), respectivamente. Todos los picos fueron indexados en la tarjeta ICDD PDF No. 01-076-0703. El pico **a** está ubicado en el plano (100), **b** en (002), **c**, que tiene la mayor intensidad, en (101), **d** en (102) y **e** en (110). Las constantes de red calculadas para la estructura de wurtzita fueron $a = 3.19\text{ \AA}$ y $c = 5.18\text{ \AA}$, con una relación c/a de 1.623. No se detectaron otras especies cristalinas como los óxidos, metales puros u otros nitratos. Por otro lado, los polvos sin recocer mostraron una estructura amorfa, la cual mejora al llevar a cabo un recocido térmico en ambiente de amoníaco. Durante los diferentes estudios realizados se observó que entre más alta sea la temperatura de nitración su cristalina mejora. La medida FWHM del pico de mayor intensidad en el plano (101) fue de 0.40667 . Usando el software ICDD PDF-4 + 2018 y la ecuación de Debye-Scherrer, se calculó el tamaño del cristal encontrando un promedio de 21.3 nm . El ensanchamiento de los picos de la Figura 1, puede estar asociado a la naturaleza de la pirólisis del complejo organometálico $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3\text{-CH}_6\text{N}_4\text{O}$, la cual genera una deficiencia de nitrógeno en los polvos de GaN. Estos polvos están compuestos de nanocristalitos, tal como lo demostró R. Garcia et al. [8]. La deficiencia de nitrógeno puede introducir oxígeno e impurezas de carbono, mejorando su estequiometría del nitrógeno después del recocido con NH_3 .

3.2 Microscopía Electrónica

La figura 2a), muestra los polvos de GaN sin dopar y sin recocer, donde se puede observar una morfología superficial de apariencia amorfa, la cual podría estar relacionada con la deficiencia de nitrógeno y la presencia de impurezas no



intensionales como oxígeno. La figura 2e), muestra las contribuciones de galio y oxígeno principalmente. En esta figura también se puede observar la deficiencia de nitrógeno, lo cual apoya lo discutido en la figura 2a). La figura 2b), muestra los polvos de GaN sin dopar obtenidos a través de la pirólisis del complejo organometálico $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3\text{-CH}_6\text{N}_4\text{O}$, recocidos en ambiente de amoníaco a 1000 °C durante dos horas. Esta figura presenta una morfología superficial también de apariencia amorfa, la cual podría estar relacionada nuevamente con la deficiencia de nitrógeno en este proceso de síntesis y un pobre crecimiento de cristales. La figura 2f) muestra las contribuciones elementales de galio y nitrógeno, se observa también la fuerte disminución de la contribución de oxígeno, la cual se redujo con el recocido térmico, así como el incremento de nitrógeno. La Figura 2c) muestra los polvos de GaN dopados con Mg. En esta ocasión la morfología presenta una superficie porosa con aglomerados, así como estructuras planas, las cuales pueden estar relacionadas con la acumulación del Mg en diferentes zonas. La figura 2g), solo muestra contribuciones elementales de galio y nitrógeno, esto debido a que el Mg no pudo ser observado debido a la baja concentración de este elemento dopante (1%). La figura 2d), muestra los polvos de GaN dopados con Zn al 1%, donde nuevamente resalta la morfología superficial amorfa y porosa, mientras que la figura 2h) muestra nuevamente solo las contribuciones de galio y nitrógeno con mayor intensidad con respecto a las figuras 2a) y 2b).

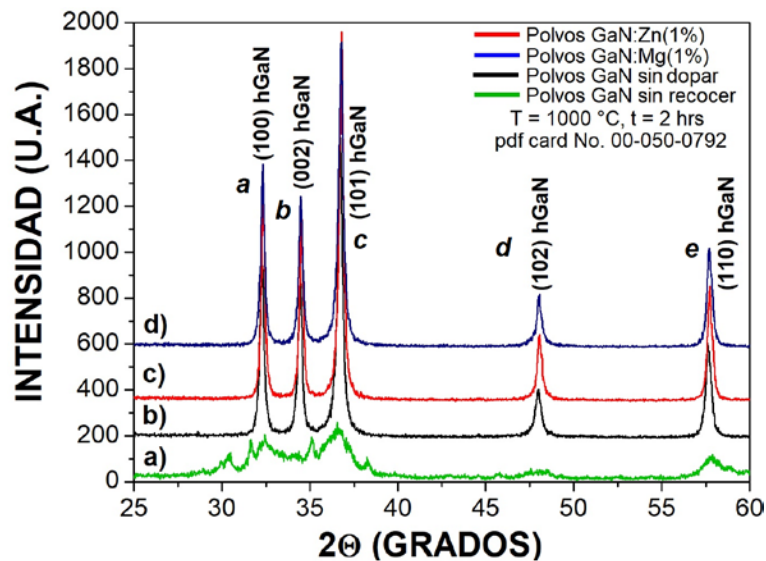


Figura 1. Patrones de difracción de rayos X: a) polvos de GaN sin recocer, b) polvos de GaN sin dopar, c) polvos de GaN dopados con Zn, d) polvos de GaN dopados con Mg.

3.3 Fotoluminiscencia y Dispersión Raman

La Figura 3 muestra los espectros PL de los polvos de GaN por pirólisis del complejo organometálico $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3\text{-CH}_6\text{N}_4\text{O}$. En esta figura se puede observar una clara emisión ubicada en la región UV, excepto para los polvos de GaN sin recocer. Esta emisión corresponde a la transición banda a banda del GaN hexagonal con una energía máxima ubicada a 3.43 eV (361.51 nm). Claramente se puede observar que no existe gran diferencia entre los espectros de los polvos de GaN sin dopar, GaN dopado con Mg o GaN dopado con Zn, lo cual indica que el dopante se incorporó muy ligeramente a la estructura de red. Se piensa que la posible presencia de nanocristales formados durante la pirólisis del complejo metalorgánico $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3\text{-CH}_6\text{N}_4\text{O}$, sea la responsable de la pobre incorporación del dopante en la estructura de red. Los espectros Raman obtenidos para los polvos de GaN sintetizados por pirólisis del complejo organometálico $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3\text{-CH}_6\text{N}_4\text{O}$, seguido de su nitrificación en ambiente de amoníaco a 1000 °C durante dos horas se muestran en la Figura 4. En los espectros es posible identificar tres modos de vibración Raman característicos para el GaN con frecuencias de 527.25, 556.18 y 564.03 cm^{-1} . Para los polvos de GaN sin recocer se presenta una menor definición de los tres modos de vibración. Las frecuencias de vibración fonónicas corresponden a los modos $A_1(\text{TO})$, $E_1(\text{TO})$ y $E_2(\text{High})$ para la estructura hexagonal wurtzita de GaN.

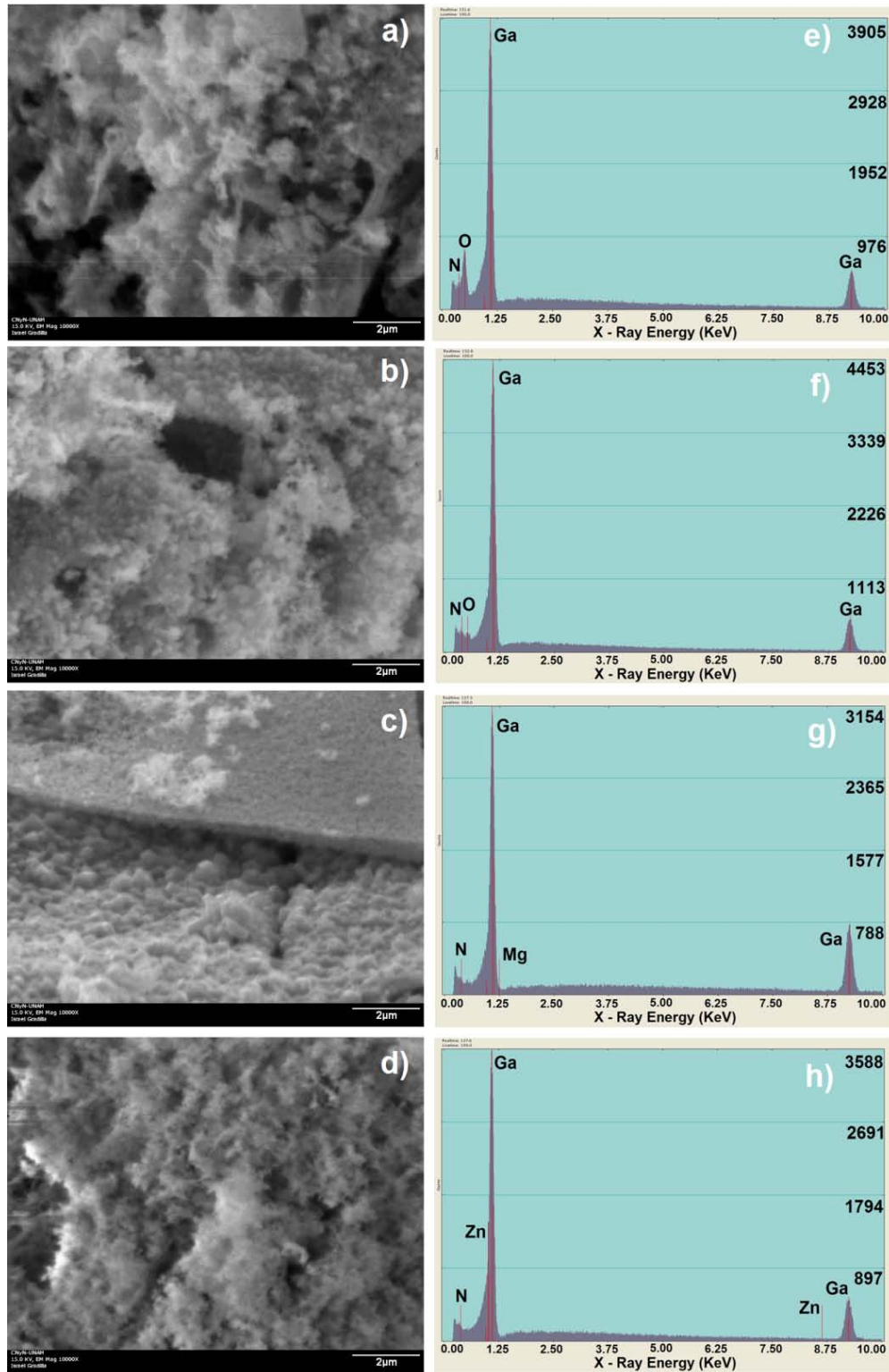


Figura 2. Micrografías SEM-EDS: a)-e) polvos de GaN sin recocer, b)-f) polvos de GaN sin dopar, c)-g) polvos de GaN dopados con Mg y d)-h) polvos de GaN dopados con Zn.

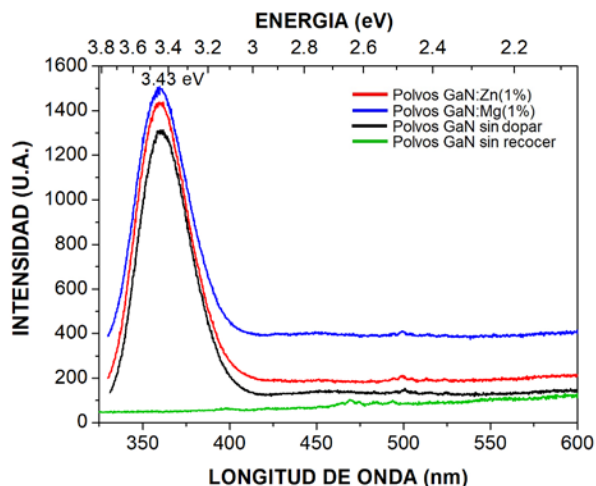


Figura 3. Espectros de PL de los polvos de GaN sin recocer, polvos de GaN sin dopar, polvos de GaN dopados con Zn, y polvos de GaN dopados con Mg.

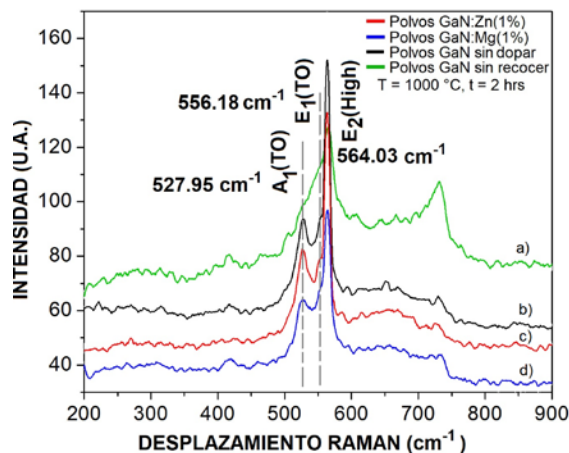


Figura 4. Espectros Raman para: a) polvos de GaN sin recocer, b) polvos de GaN sin dopar, c) polvos de GaN dopados con Zn, d) polvos de GaN dopados con Mg.

4. Conclusiones

Se obtuvieron polvos de GaN dopados con Mg o Zn por la ruta de pirólisis del complejo organometálico $\text{Ga}(\text{NO}_3)_3\text{-CH}_6\text{N}_4\text{O}$, seguido de su nitrización en un flujo de amoníaco a 1000 °C, durante dos horas. Los patrones de difracción de rayos X mostraron picos anchos debido a la deficiencia de nitrógeno e impurezas de oxígeno, además la anchura de los picos podría también estar relacionada a la presencia de nanocristalitos, tal como lo demostró R. García et al. El tamaño de cristal promedio encontrado fue de 21.3 nm. Los espectros de fotoluminiscencia de los polvos de GaN mostraron un predominio de las transiciones banda a banda del GaN hexagonal con una energía máxima ubicada a 3.43 eV (361.51 nm). Este predominio demostró que el dopante se incorporó muy ligeramente a la estructura de red del GaN. La falta de una incorporación mayor del Mg o Zn provocó que no se pudieran observar las emisiones características de GaN en el rango azul – violeta. La caracterización Raman, mostró los tres modos de vibración característicos para el GaN con frecuencias de 527.25, 556.18 y 564.03 cm^{-1} para $A_1(\text{TO})$, $E_1(\text{TO})$ y $E_2(\text{High})$ de la estructura hexagonal wurtzita de GaN, respectivamente. Se piensa que durante la disolución de los nitratos y la carbohidracida en el tolueno durante la formación del complejo metalorgánico existe una ligera evaporación de los nitratos, lo cual afecta la mayor incorporación del Mg ó del Zn en el GaN.

Referencias

- [1] P. Kung and M. Razeghi. (2000). III-Nitride wide band gap semiconductors: a survey of the current status and future trends of the material and device technology. *Opto-electronics review*. 8(3), Pág. 201-239.
- [2] H. P. Maruska, W. C. Rhines. (2015, April). A modern perspective on the history of semiconductor nitride blue light sources. *Solid States Electronics*. 111. Pág. 32 – 41.
- [3] G. Fasol. (1996, June). Room-Temperatura Blue Gallium Nitride Laser Diode. *Science*. Vol. 272(21). Pag. 1751.
- [4] Joaquín Darío Tutor – Alexys Bruno Alfonso. (2012, junio). El nitruro de galio y sus aleaciones. *Mundo Nano*. Vol. 5 (1). Pag. 42-58. www.mundonano.unam.mx.
- [5] Michael Hatcher. (2006, September). GaN developers are “chasing wrong market”. *Compound semiconductor*. Vol. 12 (8). Pag. 7-21.
- [6] S. Strite and H. Morko. (1992, March). GaN, AlN and InN: A review. *American Vacuum Society*. Vol 10 (4). Pag. 1237 – 1266.
- [7] Gastellóu, E.; García, G.; Herrera, A.M.; Morales, C.; García, R.; Hirata, G.A.; Rosendo, E.; Luna, J.A.; Robles, M.; Rodríguez, J.A.; Ramírez, Y.D. (2021). Effects in the Optical and Structural Properties Caused by Mg or Zn Doping of GaN Films Grown via Radio-Frequency Magnetron Sputtering Using Laboratory-Prepared Targets. *Appl. Sci*. 11, 6990. <https://doi.org/10.3390/app11156990>
- [8] Rafael Garcia, Gustavo A. Hirata, Alan C. Thomas, Fernando A. Ponce, (2006). Structure and luminescence of nanocrystalline gallium nitride synthesized by a novel polymer pyrolysis route. *Optical Materials* 29 Pag.19–23.