

ESTUDIO TEÓRICO – EXPERIMENTAL DE PELÍCULAS DE GAN PARA SIMULACIÓN DE DIODO EMISOR DE LUZ

THEORETICAL – EXPERIMENTAL STUDY OF GAN FILMS FOR LIGHT-EMITTING DIODE SIMULATION

Gerardo Valenzuela Hernández

Universidad de Sonora, México
gvh_26@hotmail.com

Dainet Berman Mendoza

Universidad de Sonora, México
gvh_26@hotmail.com

Roger Castillo Palomera

Universidad Politécnica de Chiapas
gvh_26@hotmail.com

Sergio de la Cruz

Universidad Politécnica de Chiapas
gvh_26@hotmail.com

Antonio Ramos-Carrasco

Universidad de Sonora, México
gvh_26@hotmail.com

Recepción: 29/octubre/2020

Aceptación: 8/diciembre/2020

Resumen

Este trabajo presenta el proceso de síntesis de películas de nitruro de galio (GaN) con sitios de nucleación de oro, y la síntesis de películas de GaN tipo p utilizando magnesio, mediante la técnica de depósito por vapor químico (CVD). Con el objetivo de estudiar el crecimiento del semiconductor, se empleó un diseño de experimentos factorial 2^3 con temperatura, substrato y capa de oro como factores. Los resultados de la caracterización de los materiales de GaN y GaN:Mg fueron obtenidos mediante las técnicas de SEM, XRD, XPS, CL y PL. Con base a lo anterior, la presencia del contaminante Mg en el GaN tipo-p fue demostrada. También, la emisión característica del GaN y GaN:Mg en la región del ultravioleta (UV) y luminiscencia azul (BL) fue analizada. Mediante el estudio del estado del arte de GaN y COMSOL

Multiphysics, se obtuvieron los resultados ópticos y eléctricos del diodo electroluminiscente de GaN/GaN:Mg. Así como un voltaje de disparo de $V_T = 3.22 V$, eficiencias interna y luminosa del LED de 84% y 210.7 lm/W.

Palabras clave: GaN, unión p-n, Simulación COMSOL.

Abstract

The following work presents the synthesis process of gallium nitride films with gold nucleation sites, and the synthesis of p-type magnesium doped GaN films, employing the chemical vapor deposition technique (CVD). The study of semiconductor growth was reached using a factorial design 2^3 with temperature, substrate and gold films as factors. Wurtzite GaN and GaN:Mg were analyzed through CL, SEM, EDS, PL and XPS characterization results. The presence of Mg in p-GaN was demonstrated by XPS results. Also, the characteristic UVL and BL of GaN and GaN:Mg were analyzed. Electrical and optical results of GaN based electroluminescent diode were obtained from GaN state of the art study and COMSOL Multiphysics with threshold voltage $V_T = 3.22 V$. Internal and luminous efficiencies of the simulated LED with 84 % and 210.7 lm/W, respectively, reported majority contribution of direct recombination in the device.

Keywords: GaN, COMSOL Simulation, p-n junction.

1. Introducción

La investigación sobre el crecimiento y caracterización de materiales semiconductores son temas de gran interés en los recientes años debido a las necesidades que se presentan con el avance de la tecnología. El desarrollo de diodos emisores de luz ha sido un tema de importante en la última década, con el objetivo de desarrollar fuentes luminosas altamente. Desde la aparición del nitruro de galio (GaN), nuevas oportunidades se presentaron en el área de los dispositivos electrónicos. Numerosas investigaciones se llevaron a cabo debido a las grandes expectativas que presentó el GaN en aplicaciones a dispositivos optoelectrónicos, tales como LEDs, LDs y fotodetectores. La calidad cristalográfica de este material ha sido tema de importante desde su descubrimiento en los años 60's. Amano *et al*

y Akasaki *et al*/ obtuvieron películas de GaN de alta calidad utilizando AlN como capa de apoyo y consecuentemente desarrollaron la primera unión p-n de GaN enfocado a la tecnología LED [Amano, 1985], [Amano, 1991], [Amano, 1989], [Koide, 1991]. Nakamura *et al*/ por su parte, presentaron la unión p-n de GaN sintetizadas sobre GaN como capa de apoyo, con enfoque al desarrollo del LED azul ultrabrillante, trabajo por el que posteriormente en el año 2014 recibieron el premio nobel en física por su gran aporte a lo que hoy conocemos como luz blanca LED [Nakamura, 1991], [Nakamura, 1993]. Por otro lado, se han utilizado técnicas más económicas para favorecer el crecimiento del semiconductor GaN, R. García *et al*/ emplearon una capa de oro sobre el substrato como catalizador y sitios de nucleación [García, 2008]. Tomando en cuenta el historial científico en este tema, en este trabajo se presenta el estudio del crecimiento de cristal en películas de GaN utilizando oro como sitios de nucleación. Diversos resultados presentados en este trabajo argumentan un mejor crecimiento de cristal al utilizar este tipo de capas de apoyo.

2. Métodos

En esta sección del trabajo se presenta, en primer lugar, la metodología utilizada en la síntesis de películas de GaN y GaN impurificado con Mg (GaN:Mg), brindando información a detalle sobre la técnica de depósito por vapor químico (CVD, por sus siglas en inglés). Posteriormente se muestran detalles sobre la metodología empleada en la simulación del diodo electroluminiscente de GaN en el software COMSOL Multiphysics.

Síntesis de películas de GaN y GaN:Mg

El diagrama esquemático del equipo CVD se muestra en la figura 1. La cámara de reacción consiste en un tubo de cuarzo de 3/4" concéntrico a otro de 1" colocados horizontalmente a través de en un horno (fuente de energía del sistema). Dentro del tubo de cuarzo se sitúan tres crisoles de alúmina, los cuales contiene los reactantes y el substrato. Un crisol contiene la fuente del metal (Ga o Ga-Mg) colocado en la zona caliente a 950 °C (o 1050 °C dependiendo del diseño de experimentos) junto a otro crisol que mantiene el substrato de silicio, tal como se muestra en la figura 1.

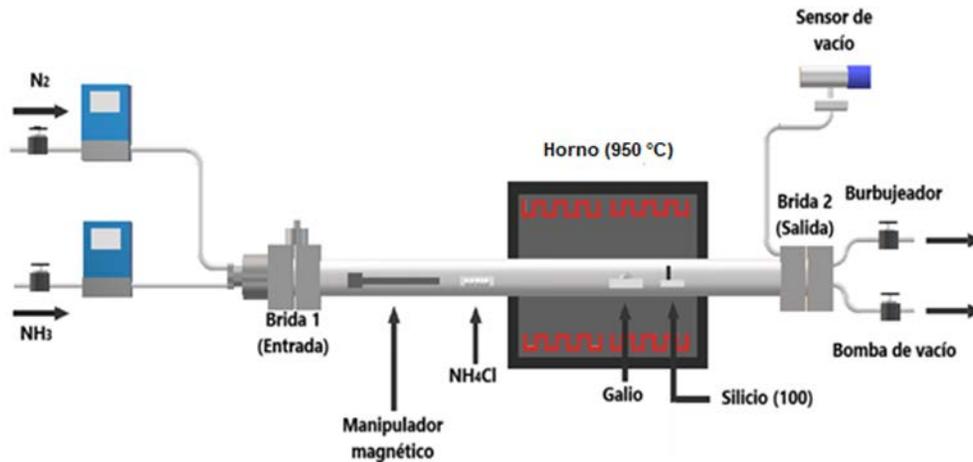
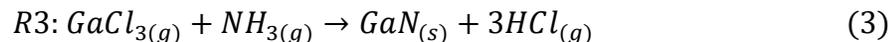
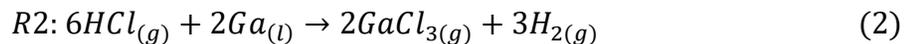
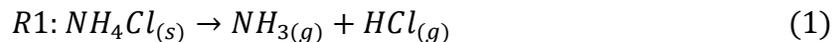


Figura 1 Diagrama esquemático de sistema CVD para síntesis de películas de GaN.

Previamente, se depositó sobre el substrato una película de oro con un grosor de 30 nm mediante *sputtering*, con la finalidad de crear sitios de nucleación al aplicar tratamiento térmico. Las aleaciones de Ga-Mg con proporciones de 1, 2 y 3 % de Mg (14.3, 28.5 y 43 μMol , respectivamente) fueron preparadas a 750 °C utilizando un sistema de aleación en vacío (~80 mTorr). La concentración molar de Mg fue calculada a partir del estudio estequiométrico de la síntesis del nitruro de galio. Gas amoníaco (NH_3) con flujo masico de 450 *sccm* y nitrógeno (N_2) a 150 *sccm* fueron utilizados como precursor de nitrógeno y gas transportador, respectivamente. La mezcla de gases fluye desde la brida de entrada (zona izquierda del diagrama), pasa a través del tubo de cuarzo hasta ser expulsado mediante un burbujeador (zona derecha del diagrama esquemático). De esta manera, las reacciones toman lugar para formar películas de GaN sobre Au/Si (ecuaciones 1, 2 y 3).



El proceso de depósito se describe a continuación. Una vez que los crisoles que contienen el metal (500 mg), el substrato (Au/Si) y el cloruro de amonio NH_4Cl (600 mg) son situados dentro de la cámara, inicia la etapa de vacío utilizando una bomba mecánica hasta alcanzar el máximo rendimiento de la bomba (en rango de mTorr).

Posteriormente, inicia la rampa de temperatura hasta alcanzar 950 °C (según indique el diseño de experimentos) y de esta manera dar paso al tratamiento térmico donde se generan los sitios de nucleación de Au sobre el substrato. Cumplido el tiempo, la bomba es interrumpida y el flujo de gases de NH_3 y N_2 comienza. Con el uso de un manipulador magnético, la sal es empujada gradualmente hacia la entrada del horno el cual se encuentra a ~ 350 °C . En este punto, el NH_4Cl se descompone en amoníaco y ácido clorhídrico (HCl), donde este último compuesto reacciona con el Ga para formar cloruro de galio ($GaCl_3$). Este mismo es transportado por la mezcla de gases hasta el substrato donde se forman los enlaces Ga-N para el nitruro de galio (GaN o GaN:Mg). El proceso de síntesis termina cuando la sal se descompone por completo. Finalmente, se apaga el horno para principiar la etapa de enfriamiento, el flujo de NH_3 se suspende alcanzados los 400 °C dejando solamente el N_2 . Las muestras son retiradas del reactor hasta llegar a temperatura ambiente. Con fines de profundizar el estudio del crecimiento en las películas de GaN, se propuso el diseño de experimentos de la tabla 1. Las películas de GaN:Mg fueron sintetizadas considerando los mejores parámetros del diseño de experimentos basándose en el análisis de las caracterizaciones de la tabla 1.

Tabla 1 Diseño de experimentos 2³ para síntesis de películas de GaN.

Muestra	Temperatura (°C)	Substrato	Nucleación con oro
GaN01	950	Silicio	No
GaN02	950	Silicio	Si
GaN03	950	Zafiro	No
GaN04	950	Zafiro	Si
GaN05	1050	Silicio	No
GaN06	1050	Silicio	Si
GaN07	1050	Zafiro	No
GaN08	1050	Zafiro	Si

Simulación de unión p-n GaN en COMSOL Multiphysics

La unión p-n de GaN/GaN:Mg fue simulada empleando el software COMSOL Multiphysics versión 5.1, haciendo uso del módulo de física de semiconductores. Los parámetros del semiconductor fueron recopilados de diversas investigaciones (Tabla 2) con base a los resultados de caracterización de este trabajo.

Tabla 2 Parámetros para la simulación del diodo GaN en COMSOL.

Parámetro	Unidad	Magnitud	Referencia
Permisividad relativa		8.9	[Saini, 2015]
Banda prohibida	eV	3.35	Resultados CL
Movilidad del electrón	$cm^2/V \cdot s$	2000	[Saini, 2015]
Movilidad del hueco	$cm^2/V \cdot s$	30	[Saini, 2015]
Factor de recombinación Auger del electrón	cm^6/s	1×10^{-30}	[Kim, 2014]
Factor de recombinación Auger del hueco	cm^6/s	2×10^{-31}	[Kim, 2014]
Factor de recombinación directa	cm^3/s	1×10^{-11}	[Kim, 2014]
Tiempo de vida del electrón, SRH	s	0.7×10^{-11}	[Lophitis, 2018]
Tiempo de vida del hueco, SRH	s	2×10^{-11}	[Lophitis, 2018]
Portadores aceptores	cm^{-3}	5×10^{-17}	[Vaudo, 1995] [Ebong, 2002]
Portadores donadores	cm^{-3}	1×10^{-18}	[Ganchenkova, 2006]
Función trabajo de la plata	1	4.26	[Greco, 2016]
Función trabajo del aluminio	1	4.06	[Greco, 2016]

Mediante el uso de primitivas geométricas se dibujó la estructura de la unión p-n de GaN como 1 solo dominio (Figura 2), y utilizando las herramientas del módulo de semiconductores en COMSOL se introdujeron los parámetros de la tabla 2 a las capas p y n.

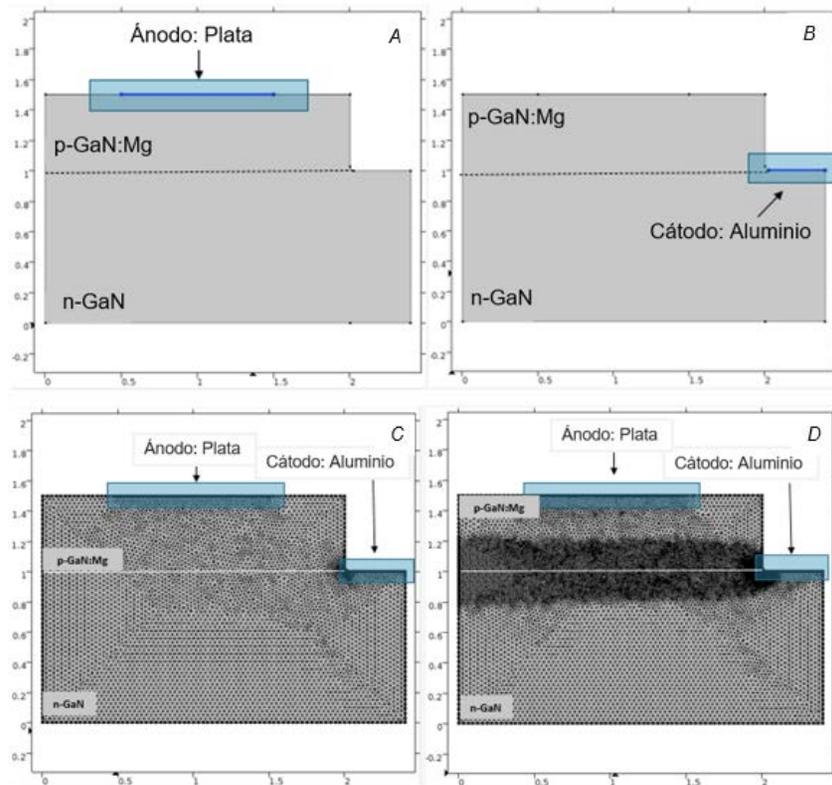


Figura 2 Estructura de unión p-n GaN simulada en COMSOL Multiphysics.

La herramienta *Modelo de contaminación analítica* fue utilizada para definir la región y concentración de portadores donadores y aceptores en las capa n y p, respectivamente. Los contactos del dispositivo (ánodo y cátodo) se asignaron con la función *Contacto Metálico*, seleccionando bordes del dominio como condición de frontera, tal como se muestra en figuras 2A y 2B. Se introdujeron las propiedades de la plata y el aluminio (Tabla 2) para el ánodo y cátodo, respectivamente. La simulación cuenta con dos tipos de estudios: el preliminar, encargado de distribuir las propiedades de las capas p y n de la unión, y el de análisis eléctrico. Por esta razón se construyeron dos diferentes mallados, tal como se muestra en la figura 2C y 2D asignadas para el estudio preliminar y eléctrico, respectivamente. La figura 3 presenta el diagrama de flujo utilizado en la simulación de la unión p-n de GaN en COMSOL Multiphysics.

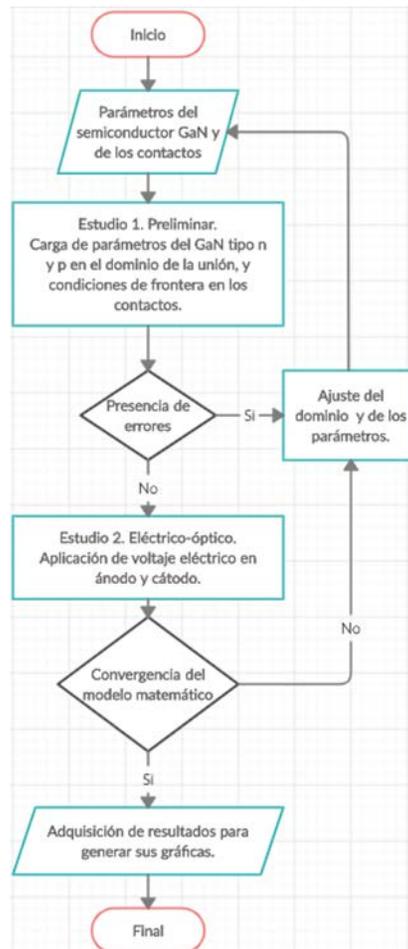


Figura 3 Diagrama de flujo empleado en la simulación de unión p-n GaN en COMSOL.

El diagrama de flujo expone, a modo resumen, la ejecución de la simulación en función de los dos estudios previamente descritos, para finalmente exportar la información de los resultados hacia el software OriginLab versión 8 y obtener las gráficas que se muestran en la siguiente sección.

3. Resultados

En esta tercera sección, se presenta el análisis de resultados de las caracterizaciones SEM, XRD, XPS, CL y PL de las películas sintetizadas de GaN y GaN:Mg siguiendo el diseño de experimentos presentado en la tabla 1. Posteriormente se muestran los resultados ópticos-eléctricos de la simulación del diodo electroluminiscente de GaN realizada en COMSOL Multiphysics.

Morfología superficial de películas de GaN

Tomadas con un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo y de alta resolución (SE-SEM) JSM-7100F (Figura 4), en la figura 5 se exponen las imágenes SEM de GaN del diseño de experimentos. Para llevar a cabo la caracterización SEM se utilizaron los siguientes parámetros en el equipo; una ampliación de 5000X, voltaje de aceleración de 15 KV y una escala de $5\mu m$.

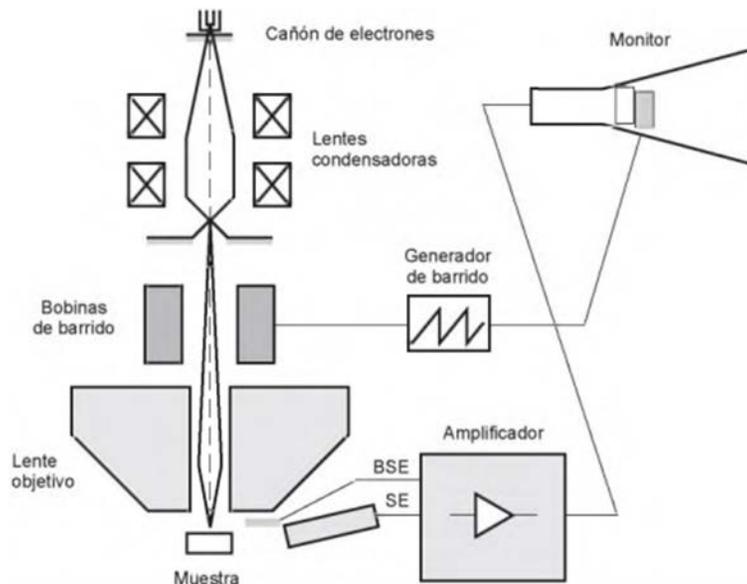


Figura 4 Diagrama esquemático del microscopio electrónico de barrido.

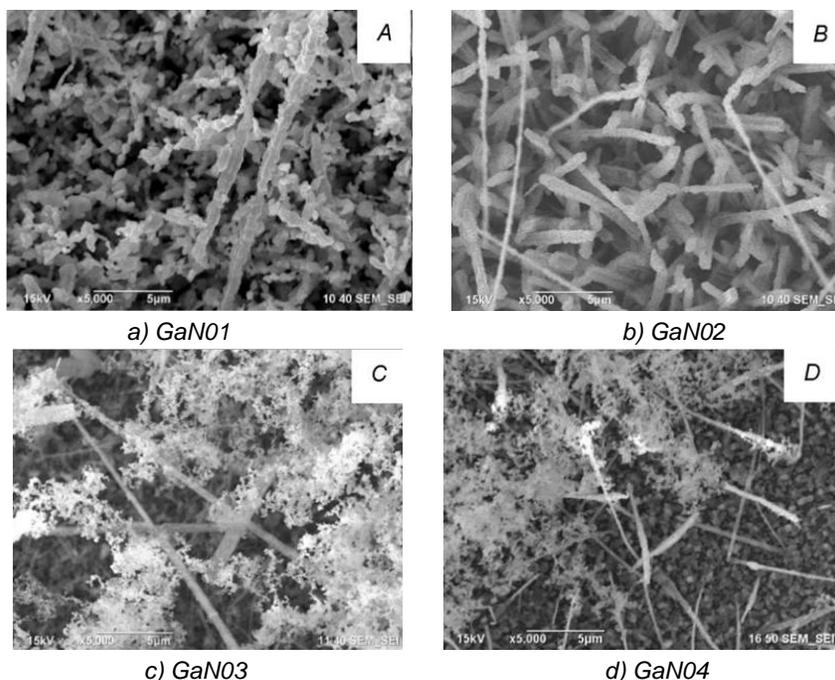


Figura 5 Imágenes SEM de GaN.

Las muestras fueron caracterizadas en vacío (orden de los mTorr). Los depósitos de GaN sintetizados sobre silicio (GaN01 y GaN02) revelaron formación de micro varillas. Esta estructura representa un crecimiento anticipado de GaN debido a la formación de múltiples cristales producto de varias estructuras unidas por defectos de dislocación, generalmente esta morfología se presenta en ambientes con bajo flujo de amoníaco [Niebelschütz, 2006]. El uso de sitios de nucleación de Au favorece la formación en la estructura del material, tal como se observa en la figura 5(B). Las micro varillas en este espécimen tienen una apariencia más sólida y mejor definida respecto al depósito GaN01. Por otro lado, los depósitos sintetizados sobre zafiro (GaN03 y GaN04) no presentan morfología definida.

Difracción de rayos X de películas de GaN y GaN:Mg

Los depósitos de GaN y GaN:Mg fueron caracterizados mediante un difractómetro de rayos-X Rigaku SmartLab, con rango 2θ de 25 a 70°. La figura 6 presenta el diagrama esquemático de la caracterización XRD. El patrón característico del GaN wurtzita fue localizado utilizando la carta cristalográfica 00-050-0792. Las muestras sintetizadas sobre silicio presentan los tres picos

característicos del material, tal como se muestra en la figura 7. Estos están localizados en los ángulos 32.8 , 34.6 y $36.8^\circ 2\theta$ correspondientes a los planos (100), (002) y (101) del GaN fase Wurtzita, respectivamente. Los depósitos sintetizados sobre Au/Si tienen un incremento de cristales orientados en el plano basal (002), tal es el caso en los especímenes GaN02 y GaN06.

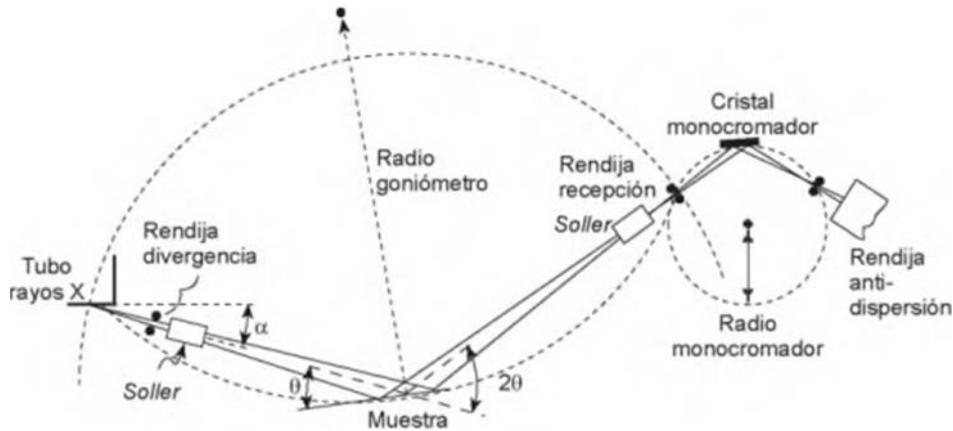


Figura 6 Diagrama esquemático del equipo de difracción de rayos X.

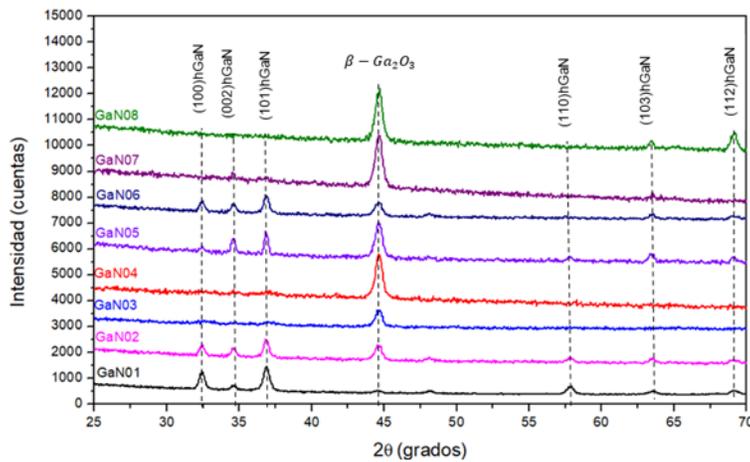


Figura 7 Resultados de XRD de películas de GaN sobre silicio y zafiro.

Las películas de GaN sintetizadas sobre zafiro no exhiben fase alguna, complementando con los resultados de SEM se argumenta el crecimiento de películas de GaN amorfo [Everett, 2004]. La muestra GaN08 presenta los últimos picos del GaN Wurtzita en 67.8° y 69.1° correspondientes a los planos (103) y (112), respectivamente. Esta respuesta se le puede acreditar al uso de Au sobre el

substrato y a la temperatura de síntesis, mostrando cierta mejora en el crecimiento del semiconductor. El pico localizado en 44.7° corresponde a la fase $\beta - Ga_2O_3$ encontrada con la carta JCPDS No. 41-1103. Se puede justificar la presencia de esta fase debido a niveles de oxígeno dentro de la cámara de reacción.

El patrón de difracción del GaN Wurtzita se preservó en los depósitos de GaN:Mg, como se muestra en la figura 8. La presencia de la fase óxido de magnesio (MgO) corresponde al proceso inherente de oxidación durante la síntesis del semiconductor [Nikiforov, 2016]. La ausencia de esta fase en el depósito GaN:Mg2 puede acreditarse a una aleación totalmente homogénea, además de niveles insignificantes de oxígeno en la cámara.

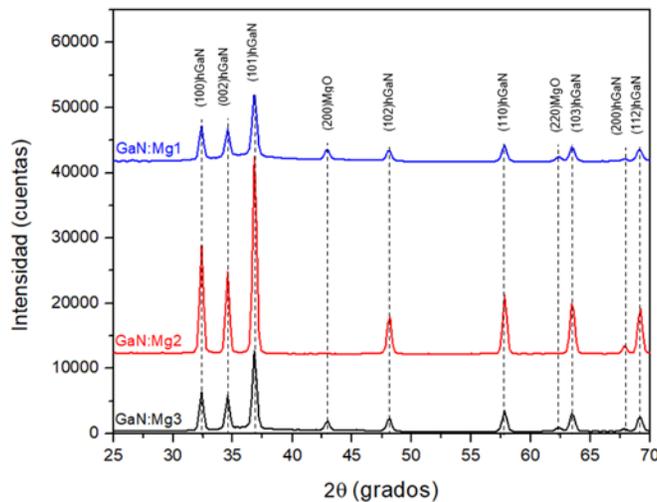


Figura 8 Resultados de XRD de películas de GaN contaminadas con Mg.

Resultados XPS de película GaN:Mg

El espectro de XPS del depósito GaN:Mg2 se observa en la figura 9a, muestra caracterizada por espectroscopia de fotoelectrones dispersados. Mencionado espécimen presenta los elementos Ga, N, Mg, C, O, P y S. El espectro fue ajustado en C1s a una energía de enlace BE de 285 eV. La deconvolución de los niveles Ga3d y N1s (figuras 9b y 9c, respectivamente) demostraron la presencia y contribución de los enlaces del GaN, así mismo los estados de oxidación presentes en el material. El pico localizado en 21.5 eV del nivel Ga3d, corresponde a la contribución del nivel Ns1. Los picos en 23 y 25 eV pertenecen a los enlaces $Ga - O$

y $Ga - N$, respectivamente. Los enlaces Ga_{Auger} y $N - Ga$ en 400 eV y 404 eV, contribuyen en el nivel $N1s$. La presencia del nivel $Mg3s$ argumenta el aporte de átomos de Mg como portadores aceptores en la red del GaN de forma sustitucional e intersticial [Gastellóu, 2018], [Ravi, 2018].

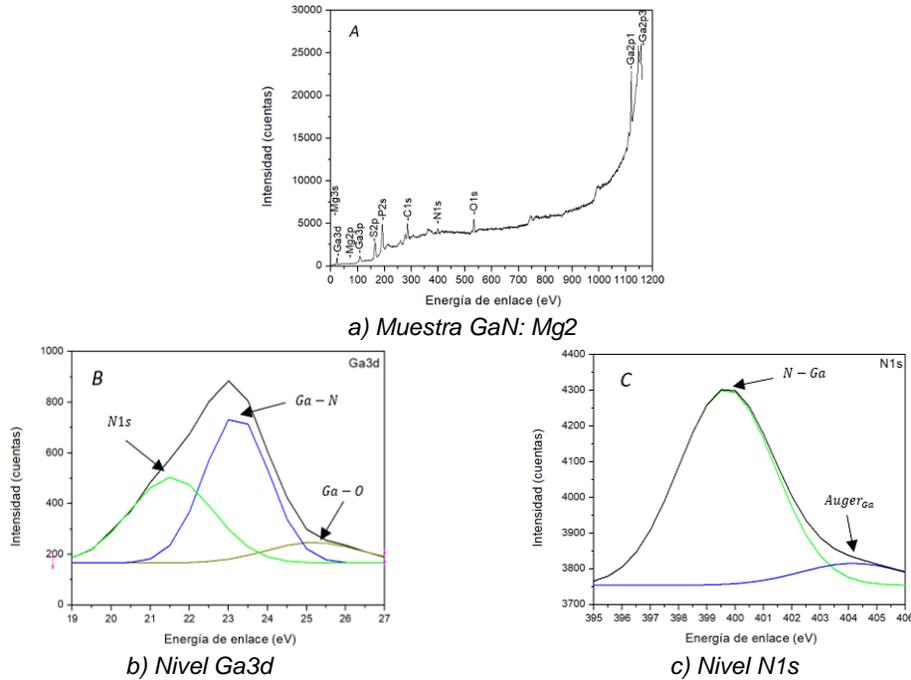


Figura 9 Resultados de XPS.

Catodoluminiscencia y fotoluminiscencia de películas de GaN y GaN:Mg

Los resultados de catodoluminiscencia de GaN y fotoluminiscencia de GaN:Mg se obtuvieron con un microscopio electrónico de barrido JSM-7100F y un láser KIMMON He-Cd, respectivamente. Estos resultados se presentan en las figuras 10 y 11. La respuesta CL en 408 nm (3.03 eV) en la muestra GaN01 es debida a las transiciones de C_{Ga} como portador donador y C_N como aceptor, produciendo la banda azul (BL) [Seager, 2002], [Reshchikov, 2005]. La emisión UVL del depósito GaN02 en 370 nm (3.35 eV), corresponde al grupo Y_6 de la clasificación característica de emisiones en el GaN, generalmente causada por pares donadores-aceptores en superficies rugosas o no uniformes. Esta muestra, al igual que el GaN01, presenta la emisión BL. Los picos localizados entre 500-600 nm (emisiones GL-YL), corresponden a defectos en la red del GaN causados por átomos

sustitucionales de O_N y H_{Ga} . La muestra GaN02 contiene emisión en el rojo provocada por una mayor concentración atómica de Ga con respecto a N [Reshchikov, 2005].

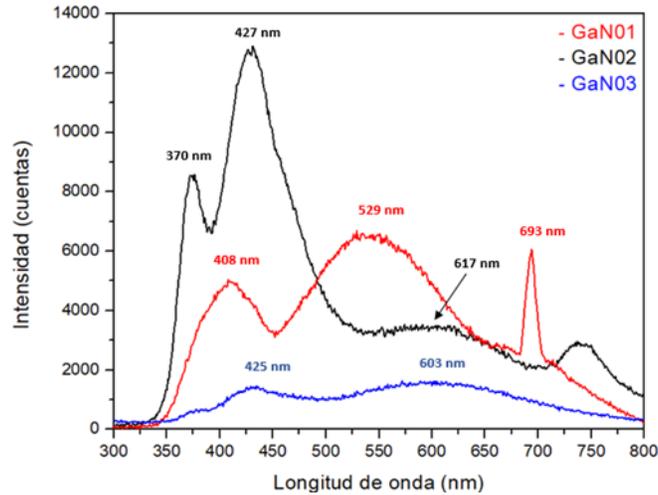


Figura 10 Respuesta CL de las muestras GaN01, GaN02 y GaN03.

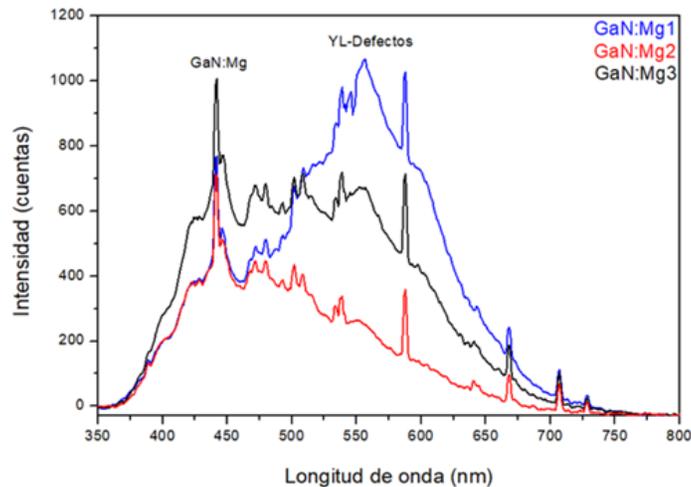


Figura 11 Respuesta PL de las muestras GaN:Mg1, GaN:Mg2 y GaN:Mg3.

Los depósitos GaN:Mg respondieron en 442 nm (2.8 eV) en la emisión BL, causada principalmente por la interacción de átomos donadores del GaN y aceptores del contaminante Mg_{Ga} [Pal, 2007]. La emisión YL persiste en los depósitos contaminados con Mg y la fase MgO contribuye en la respuesta PL entre 450 y 500 nm [Anpo, 1988].

Una vez realizada la caracterización del GaN y que se encontraron las condiciones adecuadas para el desarrollo de una unión p-n, se procedió con el diseño y simulación del dispositivo utilizando COMSOL Multiphysics. Para realizar la simulación, se usaron los resultados de caracterización del GaN y algunos parámetros del semiconductor de acuerdo con el estado del arte del nitruro. Con el fin de obtener información del desempeño del prototipo de diodo emisor de luz, en la siguiente sección, los resultados de la simulación son explorados de acuerdo con el modelo de la unión p-n utilizando GaN tipo n y tipo p.

Resultados eléctricos de unión p-n GaN simulados en COMSOL Multiphysics

La curva I-V del diodo GaN se muestra en la figura 12, resultado del estudio eléctrico simulado en COMSOL Multiphysics 5.1. El dispositivo exhibió un comportamiento rectificador con un voltaje de disparo $V_T = 3.22 V$, considerando como referencia de inicio de conducción eléctrica a partir de 1 mA a temperatura ambiente (línea azul de figura 12, 293 K). Esta conducta es atribuible al voltaje interconstruido V_D formado en la región de agotamiento en la unión y también simulando contactos totalmente óhmicos para cada capa semiconductor. Este resultado eléctrico es semejante a resultados reportados en uniones p-n basadas en el nitruro de galio, presentando aproximaciones en el voltaje de disparo V_T [Vaudo, 1995], [Hu, 2017].

La discrepancia de este último parámetro es atribuible a las propiedades del material, diferencia de temperatura y a las propiedades de los contactos. Además, cabe mencionar que el software COMSOL considera algunas condiciones físicas como ideales. A raíz de lo anterior, la respuesta eléctrica de la estructura GaN/GaN:Mg presentó cambios a medida que se reduce la temperatura. El voltaje de disparo V_T se acerca al valor de energía de banda prohibida en el semiconductor ($V_T \approx E_g/q$, 3.4 eV para el GaN aproximadamente). Este efecto puede argumentarse mediante la ecuación de Shockley de la unión p-n y a las impurezas con baja energía de ionización (susceptibles a estar excitadas a temperatura ambiente, $\sim 10 - 20 meV$) las cuales presentan menor contribución negativa a medida que baja la temperatura.

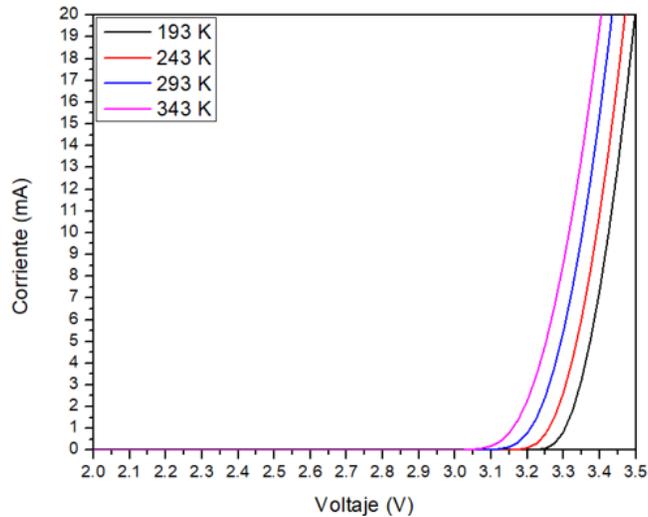


Figura 12 Simulación de curva I-V del diodo GaN bajo diferentes temperaturas.

Con base a los resultados ópticos de la simulación en COMSOL y aplicando la ecuación 4, se obtuvo una eficiencia interna del 84% a partir de la conducción eléctrica del diodo (1 mA).

$$IQE = \frac{P/(hc/\lambda)}{I/e} \quad (4)$$

$$IQE = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3} \quad (5)$$

Donde P y λ son la potencia del diodo y la longitud de onda de emisión, respectivamente. Los factores A, B y C pertenecen a los coeficientes de las recombinaciones asistidas por trampas, radiativas y Auger (Ecuación 5). Es notorio que la mayor eficiencia del diodo emisor de luz se encuentra en plena conducción ($V_T = 3.22$) considerando que la corriente y la potencia en el diodo son linealmente dependientes. Sin embargo, la contribución de las recombinaciones no-radiativas (recombinación asistida por trampas y Auger) incrementan a medida que lo hace I , tal como se observa en la relación de las ecuaciones 4 y 5. El incremento en la densidad de defectos dentro del material (representados por los factores A y C) promueve a generar pérdidas de energía en forma de calor (fonones) dentro de las capas p y n de la unión.

Lo anterior mencionado justifica el decaimiento en la eficiencia del dispositivo mostrado en la figura 13. A pesar de lo anterior, el rango de este parámetro en la

unión GaN/GaN:Mg se encuentra entre 84% a 1mA y 79.2% a 50 mA, con un decremento de 4.8%, lo que indica la capacidad de preservar la eficiencia interna IQE pese al incremento de corriente I . Este tipo de resultados es comparable a los reportados en diodos emisores de luz basados en nitruros del grupo III-V con alta eficiencia [Naruwaka, 2007], [Narukawa, 2010]. Implementando el concepto de visión fotópica, el LED de GaN presentó una eficiencia luminosa de 210.7 lm/W en 1 mA (resultado mostrado en la figura 14).

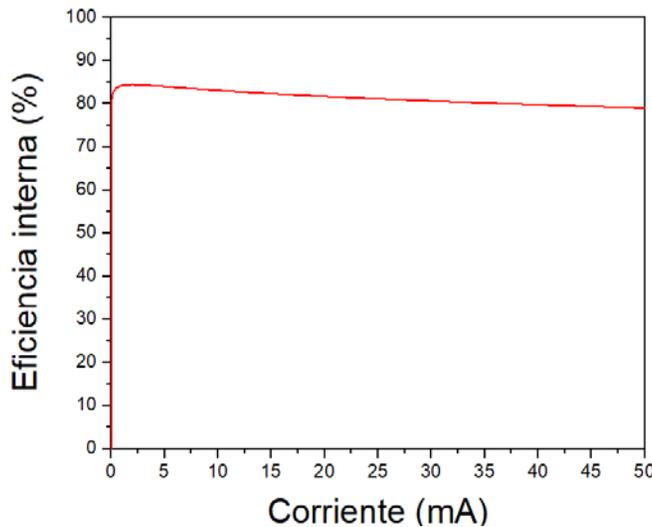


Figura 13 Simulación de eficiencia interna de la unión p-n GaN/GaN:Mg.

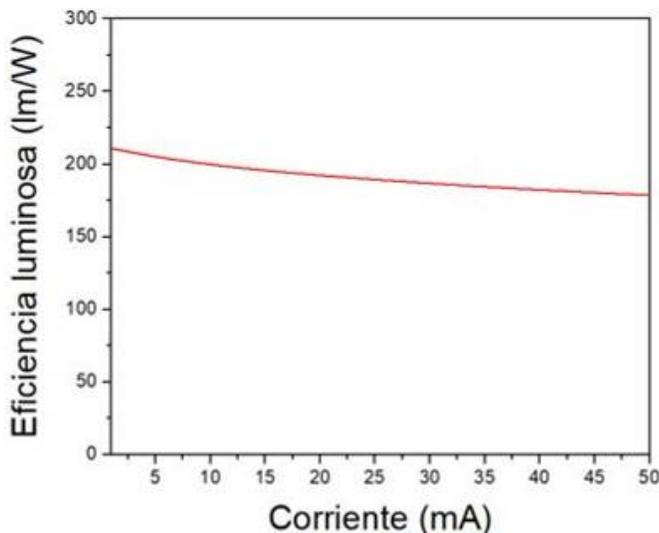


Figura 14 Simulación de eficiencia luminosa de la unión p-n GaN/GaN:Mg.

Los resultados fueron calculados a partir de la relación longitud de onda de emisión del LED y su potencia, ecuación 6.

$$\eta_L = \frac{V_\lambda P_i P}{I V} \quad (6)$$

Donde V_λ , P_i y P son la constante de visión fotópica, los lúmenes ideales por unidad de potencia (683 lm/W) y la potencia presente en el diodo, respectivamente.

Considerando nuevamente la contribución de los factores de recombinación no-radiativa (A y C, para ser preciso), es de esperar un decremento de la eficiencia luminosa con respecto a la potencia en el diodo (enfocándonos en el voltaje y la corriente de entrada en la ecuación 6). Este resultado es directamente dependiente al comportamiento en la eficiencia interna IQE en el diodo de la figura 13. Sin embargo, analizando desde el punto de mayor eficiencia a menor, se encuentra una diferencia del 14.4% (210.7 a 180.2 lm/W de 1 a 50 mA), esto indica que el dispositivo puede mantener una buena eficiencia luminosa a altas corrientes, análogo al caso de IQE . Este comportamiento es característico de los LED basados en nitruros del grupo III-V [Naruwaka, 2010].

4. Discusión

Se obtuvieron resultados correspondientes a películas de GaN fase wurtzita sintetizadas sobre zafiro y silicio, utilizando la técnica de depósito por vapor químico (CVD).

Los depósitos de GaN sobre Au/Si tuvieron el mejor crecimiento del plano basal (002) de GaN fase wurtzita con estructura hexagonal. Además, este material tuvo respuesta luminiscente característica del semiconductor en 370 nm (3.35 eV). Los estudios químicos de EDS y XPS corroboraron la presencia del contaminante Mg en las películas de GaN tipo p, y su contribución para la emisión BL en 442 nm (2.8 eV). El estudio eléctrico del diodo elaborado en COMSOL Multiphysics reportó conducción eléctrica a partir de $V_T = 3.22 \text{ V}$, a temperatura ambiente. El estudio óptico de la simulación exhibió una alta eficiencia interna de $IQE = 84\%$ a 1 mA, con eficiencia luminosa de 210.7 lm/W para la misma corriente.

5. Bibliografía y Referencias

- [1] Anpo M., Yamada Y. and Kubokawa Y., Photoluminescence Properties of MgO Powders with Coordinatively Unsaturated Surface Ions, *J. Chem. Soc.* vol. 84, no. 3, 1988.
- [2] Amano H., Kito M., Hiramatsu K., and Akasaki I., P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI), *Japanese journal of applied physics*, vol. 28, no. 12, 1989.
- [3] Amano H., Sawaki N., Akasaki I. and Toyoda Y., Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer, *Appl. Phys. Lett.* vol. 48, no. 5.
- [4] Amano H., Asahi T., Kito M. and Akasaki I., Stimulated emission in MOVPE-grown GaN film, *Journal of Luminescence*, vol. 48-49, no. part-P2, 1991.
- [5] Ebong A., Arthur S., Downey E., Stokes E. B., Cao X. A., LeBoeuf S., Sandvik P. M. and Walker D., Modeling and circuit simulation of GaN-Based light emitting diodes for optimum efficiency through uniform current spreading, *Proc. Of SPIE*, vol. 4776, 2002.
- [6] Everett S. E., Formation and characterization of amorphous gallium nitride, The Australian National University, 2004.
- [7] Ganchenkova M. G. and Neiminen R. M., Nitrogen Vacancies as Major Point Defects in Gallium Nitride, *Physical Review Letters*, vol. 96, no. 19, 2006.
- [8] García R., Thomas A. C. and Ponce F. A., Growth of free-standing highly luminescent undoped and Mg-doped GaN thick films with a columnar structure, *Journal of Crystal Growth*, vol. 310, no. 12, 2008.
- [9] Gastellóu E., Morales C., García R., García G., Hirata G. A., Herrera A. M., Galeazzi R., Rosendo E., Díaz T. and Tejeda E. M., P-type GaN powders obtained by nitridation of Ga-Mg liquid metallic solution, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 772, 2018.
- [1] Kim J. G., Park E. H., Kang D. and Park B. G., Extraction of recombination coefficients and internal quantum efficiency of GaN-based light emitting diodes considering effective volumen of active región, *Optical Society of America*, vol. 200, no. 2, 2014.

- [2] Greco G., Iucolano F. and Roccaforte F., Ohmic contacts to Gallium Nitride materials, *Applied Surface Science*, 2016.
- [3] Hu Z., Nomoto K., Qi M., Li W., Zhu M., Gao X., Jena D., and Xing G., 1.1 kV Vertical GaN p-n Diodes With p-GaN Regrown by Molecular Beam Epitaxy, *Electron Device Letters*, vol. 38, no. 8, 2017.
- [4] Koide N., Kato H., Sassa M., Yamasaki S., Manabe K., Hashimoto M., Amano H., Hiramatsu K. and Akasaki I., Doping of GaN with Si and properties of blue m/i/n/n+ GaN LED with Si-doped n+ layer by MOVPE, *Journal of Crystal Growth*, vol. 115, no. 1-4, 1991.
- [5] Lophitis N., Arvanitopoulos N., Perkins S. and Antoniou M., *TCAD Device Modelling and Simulation of Wide Bandgap Power Semiconductors*, IntechOpen, Chapter 2, 2018.
- [6] Nakamura S., Mukai T., Senoh M., Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes, *Appl. Phys. Lett.* vol. 64, no. 1687, 1993.
- [7] Nakamura S., Mukai T. and Senoh M., High-Power GaN P-N Junction Blue-Light-Emitting Diodes, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 30, no. 13A, 1991.
- [8] Naruwaka Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., and Mukai T., White light emitting diodes with super-high luminous efficacy, *Journal of Physics*, vol. 43, no. 35, 2010.
- [9] Naruwaka Y., Narita J., Sakamoto T., Yamada T., Narimatsu H., Sano M., and Mukai T., Recent progress of high efficiency White LEDs, *phys. stat. sol.* vol. 204, no. 6, 2007.
- [10] Niebelschütz M., Cimalla V., Ambacher O., Machleidt T., Ristic J. and Calleja E., Electrical performance of gallium nitride nanocolumns, *Physica E*. vol. 37, no. 1-2, 2006.
- [11] Nikiforov S. V., Kortov V. S., Kiryakov A. N. and Petrovykh K. A., Luminescence of ultrafine magnesium oxide ceramics with Deep traps, 5th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects, *Journal of Physics*, vol. 830, 2016.

- [12] Pal S., Ingale A., Dixit V. K., Sharma T. K., Porwal S., Tiwari P. and Nath A. K., A comparative study on nanotextured high density Mg-doped and undoped GaN, *Journal of applied physics*, vol. 101, 2007.
- [13] Ravi L., Boopathi K., Panigrahi P. and Krishnan B., Growth of Gallium Nitride Nanowires on Sapphire and Silicon by Chemical Vapor Deposition for Water Splitting Applications, *Applied Surface Science*, 2018.
- [14] Reshchikov M. A. and Morkoc H., Luminescence properties of defects in GaN, *Applied Physics Reviews*, vol. 97, no. 6, 2005.
- [15] Saini D. K., Gallium nitride: Analysis of physical properties and performance in high-frequency power electronic circuits, Wright State University, 2015.
- [16] Seager C. H., Wright A. F., Yu J. and Götz W., Role of carbon in GaN, *Journal of applied physics*, vol. 92, no. 11, 2002.
- [17] Vaudo R. P., Goepfert I. D., and Moustakas T. D., Beyea D. M., Frey T. J. and Meehan K., Characteristics of light-emitting diodes base don GaN p-n junctions grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy, *Journal of Applied Physics*, vol. 79, no. 5, 1995.