

HIDRÓXIDO DE AMONIO COMO PRECURSOR DE NITRÓGENO PARA EL CRECIMIENTO DE NITRURO DE GALIO POR EL MÉTODO DE CRECIMIENTO POR CAPAS ATÓMICAS

*María Magdalena Montserrat Contreras
Turrubiartes*

Universidad Autónoma de San Luis
Potosí, Coordinación para la Innovación y
Aplicación de la Ciencia y la Tecnología.
San Luis Potosí, México.
<https://orcid.org/0000-0001-5833-137X>

Ulises Zavala Moran

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Facultad de Ciencias.
San Luis Potosí, México.
<https://orcid.org/0000-0003-0940-0118>

Jorge Alberto López Gallardo

Universidad de Texas en El Paso.
Texas, Estados Unidos.

Miguel Angel Vidal Borbolla

Universidad Autónoma de San Luis
Potosí, Coordinación para la Innovación y
Aplicación de la Ciencia y la Tecnología.
San Luis Potosí, México.
<https://orcid.org/0000-0002-3601-2148>

Edgar López Luna

Universidad Autónoma de San Luis
Potosí, Coordinación para la Innovación y
Aplicación de la Ciencia y la Tecnología.
San Luis Potosí, México.
<https://orcid.org/0000-0001-5064-0469>

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: Se llevo a cabo el crecimiento de películas delgadas de nitruro de galio por el método de capas atómicas. El crecimiento se realizó sobre sustratos de silicio (100). Se utilizó hidróxido de amonio como un nuevo precursor de nitrógeno sustituyendo a los métodos tradicionales de plasma y amonio. El precursor de galio fue trimetil galio sigma-aldrich. La temperatura del sustrato se fijó en 325°C de acuerdo con los resultados obtenidos para la ventana de temperaturas de crecimiento. Los resultados de espectroscopia de fotoelectrones de rayos x confirman el crecimiento de nitruro de galio. Los resultados de la microscopia electrónica de transmisión corroboran el depósito de la película y el espesor de esta. Con este trabajo se abre la alternativa para el crecimiento de materiales III-N a bajas temperaturas y con menor costo.

Palabras clave: Hidróxido de amonio; nitruro de galio; películas delgadas; crecimiento por capas atómicas; silicio.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el nitruro de galio (GaN) ha sido estudiado ampliamente debido a sus propiedades (Zheng, Y,2021). Por lo que este material se perfila como un candidato ideal para aplicaciones en optoelectrónica, electrónica de potencia y electrónica flexible (Zuhairi A. et al.,2022). El nitruro de galio es uno de los materiales más importantes que abarca las longitudes de onda azul y ultravioleta del espectro electromagnético (Kour et al., 2019), lo anterior debido a su ancho de banda directo y su estabilidad térmica (Urban A. et al.,2015), además el nitruro de galio es químicamente estable en presencia de ácidos (Wilkins et al.,2015), bases (Nallabala L. et al. 2021) y agua a temperatura ambiente (Yimeng S. et al.,2022). El nitruro de galio se puede utilizar para incrementar el tiempo de vida de dispositivos como láseres de diodo azul, celdas solares y detectores. Se distinguen dos formas

principales para la estructura del nitruro de galio, cúbica y hexagonal. Experimentalmente se ha crecido utilizando técnicas como depósito de vapor químico órgano metálico (MOCVD) (Jumaah O.D. y Jaluria Y., 2021), y epitaxia de haces moleculares (MBE) (Zhang Q. et al.,2021). El crecimiento de películas de alta calidad se obtiene a temperaturas entre 700-1100°C. (Ravanbakhsh, H., & Shekari, L.,2022). Principalmente se utilizan sustratos de zafiro (Pal Y. et al.,2021) y cuarzo (Liu S. et al.,2022), para la fase hexagonal. Para la fase cúbica se prefieren silicio (Jabbar et al.,2022), óxido de magnesio, arseniuro de galio y carburo de silicio (Tan A.K. et al.,2022). El silicio se ha convertido en un material atractivo para reemplazar otras opciones debido a su bajo costo y alta calidad cristalina, abriendo las puertas para la creación de dispositivos híbridos de materiales III-V (Doerr C. y Chen L.,2018).

La técnica de crecimiento de películas delgadas por el método de capas atómicas (ALD) es una técnica de crecimiento de películas delgadas que permite controlar el espesor de las películas en función del número de ciclos de crecimiento (Oviroh P.O. et al.,2019). Esto garantiza la reproducibilidad del experimento, además de tener la ventaja de que las temperaturas de crecimiento generalmente son menores a las utilizadas por otras técnicas. Las películas que se obtienen por medio de ALD tienen una calidad cristalina comparable con técnicas más costosas y que requieren equipos más especializados (Cai J. et al.,2020). El crecimiento de Nitruro de Galio por el método de depósito por capas atómicas (ALD) tiene su origen en el año 2009, cuando se reportó el crecimiento utilizando como precursores tricloruro de galio (GaCl_3) y Amoniaco (NH_3) sobre Si(100) a una temperatura de 500°C, obteniendo como resultado películas policristalinas (Oh H.K. et al.,2009). A partir de esa fecha se han

realizado estudios mediante la técnica de ALD con el fin de mejorar la calidad cristalina de las películas obtenidas, utilizando como substratos Si (111) y Si (100) principalmente. En la literatura se reporta el uso de TrimetilGalio (TMGa) (Banerjee et al.,2019) y TrietilGalio (TGa) como precursores de Galio (Gungor N. y Alevli M.,2018), y como precursores de Nitrógeno se encuentran reportados el Amoníaco (NH_3) (Banerjee et al.,2019) y el plasma de Nitrógeno (Qiu P. et al.,2020). En la literatura se reporta el uso de tricloruro de galio (GaCl_3) como precursor de galio, lo que deriva en la formación de ácido clorhídrico como un subproducto del proceso, por lo que se ha detectado contaminación de cloro en las películas depositadas con este material (Gupta G. et al.,2018). Para prevenir la contaminación y garantizar la calidad de las películas de nitruro de galio es preferible el uso de un precursor organometálico como el trimetil-galio ($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$), que proporciona una alternativa libre de cloro y previene la contaminación de las películas. Las temperaturas de crecimiento varían entre los 150 y 500°C obteniendo películas amorfas y policristalinas. Sin embargo, el costo de la operación de un equipo de plasma y el mantenimiento del sistema al utilizar amoníaco hacen necesario buscar nuevas alternativas de precursores de nitrógeno, más económicos y fáciles de manipular. El hidróxido de amonio es una solución de amoníaco en agua, químicamente estable y que tiene la ventaja de que no daña las tuberías del sistema ALD, por lo que no es necesario estar proporcionando mantenimiento al equipo. Un factor importante en el crecimiento de GaN por ALD sobre silicio es que las condiciones de temperatura deben ser las adecuadas de tal forma que se permita la quimio adsorción del material sobre la superficie de óxido de silicio (SiO_x), además de que se debe considerar que las primeras capas de crecimiento pueden

estar sometidas a stress debido a la diferencia entre las constantes de red del óxido de silicio y el nitruro de galio, por lo que al aumentar el número de ciclos de crecimiento la película se ira relajando y formando una superficie homogénea.

La propuesta que se presenta en este trabajo consiste en el uso de Hidróxido de Amonio como precursor de Nitrógeno, considerando que es un material económico sin efectos tóxicos ni degradación del sistema de crecimiento en comparación con los precursores que se utilizan actualmente, en conjunto con TrimetilGalio para el crecimiento de Nitruro de Galio por el método de Depósito de Capas Atómicas (ALD).

MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

CRECIMIENTO DE PELÍCULAS DELGADAS

El crecimiento de las películas delgadas se llevó a cabo utilizando un reactor Savannah-ALD (Cambridge Nanotech) con una presión base de ≈ 0.25 Torr, y nitrógeno a 5sccm(N_2) con una pureza de 99.99% como gas de arrastre y purga, previo a los crecimientos se llevó a cabo un estudio para determinar la ventana de temperatura, de acuerdo con los resultados la temperatura de la cámara de crecimiento se fijó en 325°C y se realizó un crecimiento de 100 ciclos ALD. Los precursores fueron hidróxido de amonio (Solución de 28% de amoníaco (NH_3) en agua (H_2O)) como precursor de nitrógeno y trimetil galio ($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$) Sigma-Aldrich, CAS:1445-79-0, ambos se mantuvieron a una temperatura de 40°C durante el tiempo de crecimiento. La propuesta de hidróxido de amonio se considera dado que es una solución en equilibrio entre amoníaco ((NH_3) y iones de amonio (NH_4^+) de acuerdo con la siguiente reacción; $\text{NH}_4^{++} \text{OH}^- \longleftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$. De acuerdo con la constante de ionización de

amoníaco en agua (Kb) que es de 1.8×10^{-5} se puede calcular una concentración de 14.3M para obtener una solución en equilibrio, dicha concentración corresponde a la solución utilizada como precursor, garantizando que es suficiente para funcionar como precursor del nitrógeno.

Los crecimientos se realizaron sobre sustratos de Si (100) con 2.3 nm de óxido de silicio (SiO_2) nativo en la superficie. Antes del crecimiento se llevó a cabo el desengrasado de los sustratos de acuerdo al siguiente tratamiento: 1) El sustrato se introduce en agua y se lleva a cabo una limpieza ultrasónica por 5 minutos, 2) Se reemplaza el agua por acetona y se dan 5 minutos de tratamiento en el limpiador ultrasónico, 3) Se coloca el sustrato en tricloroetileno hirviendo por 15 minutos, 4) Se vuelve a limpiar el sustrato en acetona de manera ultrasónica, 5) Como último paso se limpia el sustrato 5 minutos en agua con el limpiador ultrasónico. Debido al desengrasado la terminación de la superficie del sustrato contiene óxidos de silicio (SiO_x).

Un ciclo de crecimiento de GaN-ALD se muestra en la figura 1. Consiste en una secuencia de 4 pulsos intercalados con tiempos de purga, 1) Pulso de $\text{NH}_4\text{OH}/\text{N}_2$ durante 0.02 s. 2) Tiempo de reacción dentro de la cámara de crecimiento de 10s 3) 30s de purga con N_2 4) Pulso de Ga (CH_3)₃ durante 0.1s 5) Tiempo de reacción dentro de la cámara de crecimiento de 10s 6) 30s de purga con N_2 . El tiempo de reacción dentro de la cámara para cada uno de los precursores se fijó de tal manera que se alcanza la cobertura superficial.

DETERMINACIÓN DE LA VENTANA DE TEMPERATURA DE CRECIMIENTO

Para determinar la temperatura de la cámara de crecimiento tal que el crecimiento se lleve a cabo en un régimen de ALD utilizando los precursores propuestos, se

llevaron a cabo una serie de crecimientos. En estos crecimientos se mantuvieron las mismas condiciones que se describen en la sección anterior, únicamente se varió la temperatura del sustrato (cámara de crecimiento) entre 150 y 350°C y se depositaron películas de un espesor de 100 ciclos-ALD. Es importante mencionar que el depósito por capas atómicas es un proceso que requiere de energía térmica para lograr que los precursores reaccionen con la superficie del sustrato y se lleve a cabo el proceso de adsorción en los sitios o enlaces disponibles, por ello, la temperatura del sustrato juega un papel fundamental a la hora de llevar a cabo este tipo de crecimientos. Si la temperatura no es la suficiente, la energía térmica disponible no será suficiente para garantizar una completa cobertura superficial durante el tiempo de reacción dentro de la cámara de crecimiento. Por el contrario, si la temperatura es muy alta, pueden ocurrir procesos como la descomposición del precursor o la desorción de los materiales, generando estructuras tridimensionales. Es por ello por lo que antes de realizar el crecimiento de un nuevo material se debe identificar la ventana óptima de temperatura, garantizando que en el proceso existirá la suficiente energía térmica disponible de tal forma que todos los sitios libres en la superficie sean cubiertos y se logre una completa cobertura superficial y un crecimiento controlado, característico de la técnica por ALD.

MICROSCOPIA DE FUERZA ATÓMICA

La superficie de las películas depositadas se caracterizó por medio de microscopía de fuerza atómica (AFM) utilizando un equipo Solver NEXT SPM en modo de contacto. Para la determinación de la Ventana óptima de temperatura de crecimiento se obtuvieron barridos de áreas de $50 \times 50 \mu\text{m}$ y $10 \times 10 \mu\text{m}$. Para el estudio de la cobertura superficial

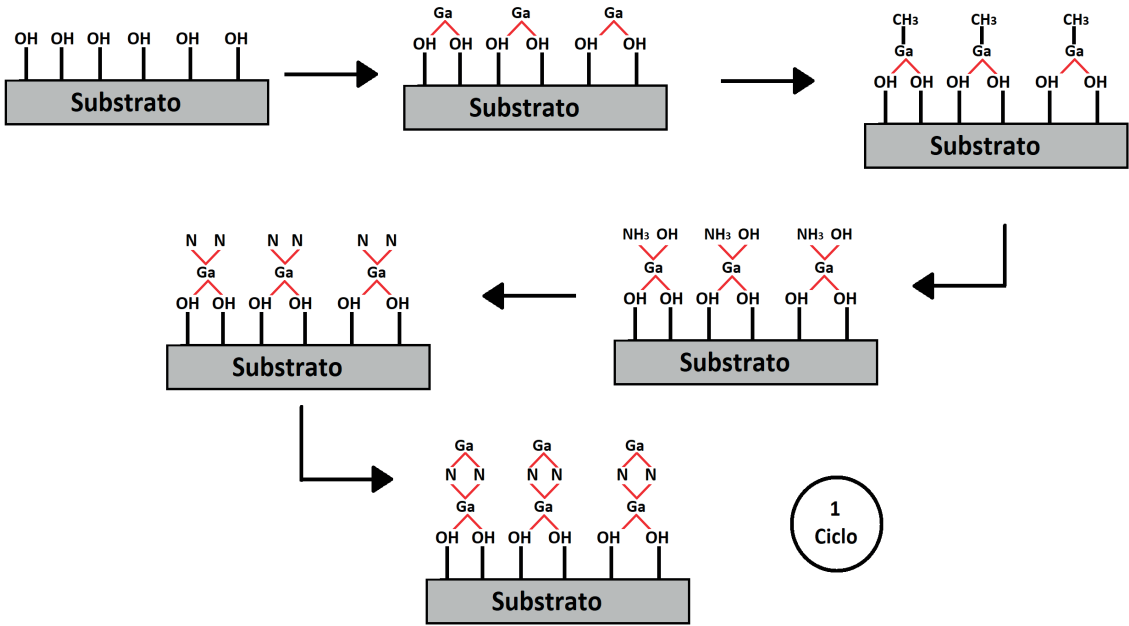


Figura 1. Ciclo de crecimiento de GaN por el método de depósito de capas atómicas.

Figure 1. Cycle for the growth of GaN by Atomic Layer Deposition.

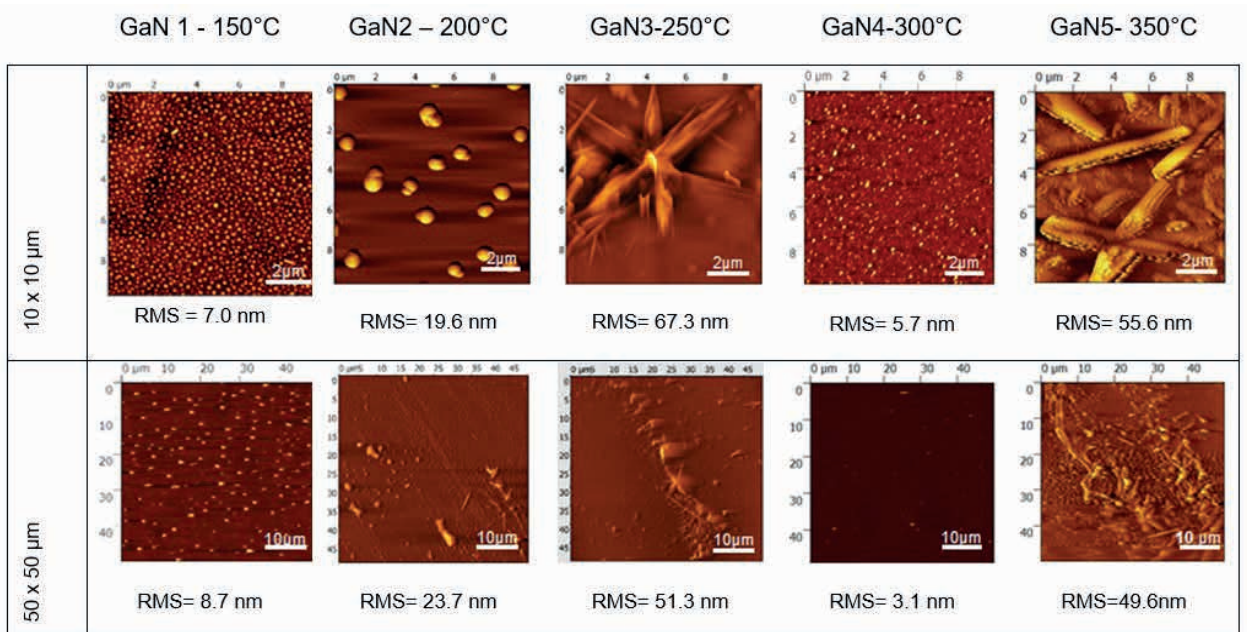


Figura 2. Microscopia de fuerza atómica para depósito de nitruro de galio con temperaturas entre 150 y 350°C.

Figure 2. Atomic Force Microscopy for GaN deposition between 150 and 400°C.

de la película crecida a 325°C, se obtuvieron barridos de áreas de 20 x 20 μm y 5 x 5 μm . Todas las imágenes fueron tratadas con el software de análisis GWYDDION.

ESPECTROMETRÍA FOTO ELECTRÓNICA DE RAYOS X (XPS)

La caracterización del entorno químico de la película de nitruro de galio con 100 ciclos de espesor se llevó a cabo el análisis de XPS utilizando un espectrómetro Perkin Elmer X-PHI 5600 con un ánodo monocromático de aluminio (Al K α) con una energía de 1486.6 eV a 285W. Todos los espectros se obtuvieron con una alta resolución en pasos de 0.25eV para las regiones de galio 2p (Ga2p), nitrógeno 1s (N1s) y Oxígeno 1s (O 1s). La muestra se montó en un porta muestras estándar utilizando cinta conductora. Los espectros fueron ajustados por medio del software CASA XPS.

MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE TRANSMISIÓN

Para corroborar la completa cobertura superficial y el crecimiento de la película en el régimen de ALD de acuerdo con los parámetros seleccionados se midió el espesor de la muestra correspondiente a 100 ciclos de crecimiento. La medición del espesor se realizó con un microscopio JEOL-JEM 2010 con una resolución de 1.9Å. La muestra se colocó en un substrato convencional y previo a las mediciones se recubrió con una capa de oro de 2.5nm para evitar que se cargara eléctricamente y facilitar la medición.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE ALTA RESOLUCIÓN (XRDHR)

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un difractor de alta resolución marca Philips que contiene una fuente que opera de 30 a 40 KV con un ánodo de cobre, así como un monocromador Bartels constituido

por cuatro cristales de muy alta calidad de Ge y una mecánica fina en el goniómetro que proporciona la resolución angular entre el detector y la muestra de 2.5×10^{-4} grados. Logrando así mediciones de alta calidad para películas delgadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DETERMINACIÓN DE LA VENTANA OPTIMA DE TEMPERATURA

La determinación de la temperatura de la cámara de crecimiento se obtuvo a partir del estudio de películas de 100 ciclos de nitruro de galio depositadas entre 150°C y 350°C. Los resultados obtenidos de la morfología superficial por microscopía de fuerza atómica se presentan en la figura 2.

En la serie de imágenes obtenidas por Microscopía de Fuerza Atómica podemos observar de manera detallada cómo es el proceso de crecimiento de Nitruro de Galio por el método de capas atómicas. En primera instancia se observa que, para temperaturas inferiores a la ventana óptima la energía de formación disponible no es la suficiente para que los diferentes precursores se descompongan de manera correcta y logren una química adsorción con el substrato, tal es el caso de la muestra etiquetada como GaN1 donde se muestran el depósito de aglomerados de GaN, sin embargo, estos no se difunden en ninguna dirección. A medida que se aumenta la temperatura de crecimiento (y nos acercamos más a la ventana de temperaturas óptimas) se observan cambios en la morfología superficial de las películas obtenidas. Para la muestra GaN2 podemos ver que inicia la coalescencia de los aglomerados que se formaban a más baja temperatura, dando lugar a los centros de nucleación responsables del crecimiento de GaN, lo cual afecta directamente el valor de la rugosidad, que aumenta respecto a la muestra GaN1, dentro de la misma película existen zonas donde los conglomerados se

unen formando franjas en una orientación determinada.

Para la muestra GaN3 observamos que la energía presente es tal que permite que los centros de nucleación comiencen a difundir en direcciones preferenciales, de igual forma se observa la formación de barras de material depositado. Este tipo de formaciones se ve reflejado nuevamente en un aumento de la rugosidad respecto a la muestra anterior. Sin embargo, la temperatura todavía no es la suficiente como para permitir la química adsorción del material de forma óptima a lo largo de todo el sustrato, por lo que se pueden ver zonas donde el crecimiento es menor o no existe tal. En el límite inferior de la ventana de temperatura, que se encuentra en 300°C aproximadamente, y que corresponde a la muestra GaN4, se observa un crecimiento más uniforme de la película sobre todo el sustrato, tal que el valor de la rugosidad disminuye. No obstante, aún tenemos la presencia de gotas de Galio debido a que la temperatura del precursor todavía no es la suficiente para que el precursor se descomponga por completo y reaccione de forma total con la superficie de crecimiento. Por otra parte, si la temperatura de crecimiento se encuentra por encima de la ventana óptima, como es el caso de la muestra GaN5, la estructura de la película pasa de ser uniforme a un crecimiento con formaciones de diferente tipo y nuevamente se observa que existen espacios donde no existe depósito, dando lugar a un aumento en el valor de la rugosidad debido a las formaciones correspondientes. A partir del análisis anterior se fijó la temperatura de crecimiento a 325°C.

AFM: MORFOLOGÍA SUPERFICIAL

Es necesario considerar que debido a las características del crecimiento ALD y la variación entre las constantes de red del nitruro de galio y el óxido de silicio las primeras capas del crecimiento pueden

estar sometidas a estrés. La rugosidad media superficial (RMS) es una medida que nos permite caracterizar la homogeneidad de una superficie y con ello se puede determinar la calidad de la película obtenida. Se llevó a cabo el análisis de la morfología superficial de la película de nitruro de galio de 100 ciclos (GaN100C) para garantizar que se está logrando una completa cobertura superficial y por lo tanto un crecimiento de tipo ALD con los parámetros de temperatura y los precursores propuestos. La rugosidad media superficial (RMS) se obtuvo del escaneo de Microscopía de fuerza atómica en áreas de 1 x 1 μm utilizando GWYDDION. Los resultados se muestran en la figura 3. Las imágenes de AFM muestran que la cobertura superficial es completa, lo cual se ve reflejado en el valor de la RMS (2.0nm).

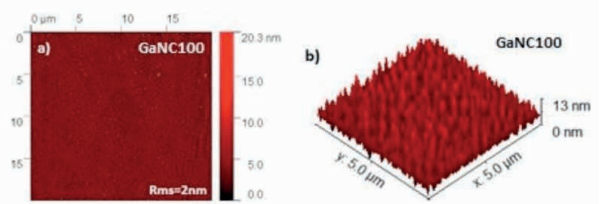


Figura 3. Microscopía de fuerza atómica para depósito de nitruro de galio a 325°C. Se observa la cobertura superficial completa en una vista superior (fig. 3a) y lateral en 3 dimensiones (fig.3b)

Figure 3. Atomic Force Microscopy for GaN grown by ALD at 325°C.

ESPESOR DE LA PELÍCULA

Durante el crecimiento se colocó una mascarilla en forma de bisel (figura 4 a) para medir el espesor de la película por microscopía de fuerza atómica (figura 4 c). Si consideramos un crecimiento de 100 ciclos y suponiendo las condiciones adecuadas para formar planos de Nitrógeno y Galio bien definidos se tendría un espesor de 11.3 nm, el cual coincide con el espesor medido (11.1nm, fig.4c), en primera aproximación, de la película de GaN como se

puede observar en la figura 4.

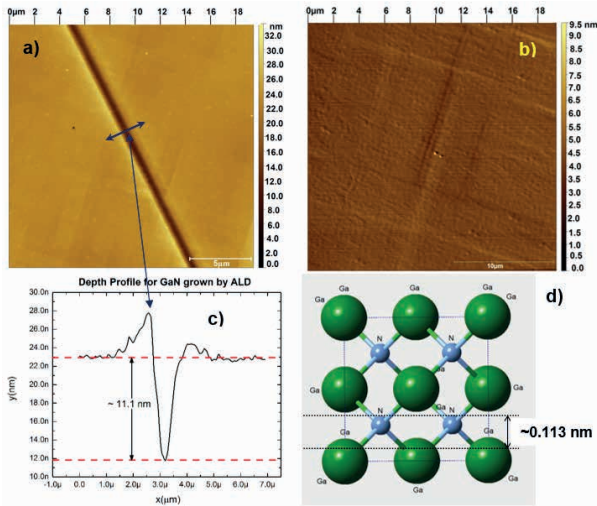


Figura 4. Perfil de Profundidad por medio de AFM para la película de GaN de 100 ciclos para determinar el espesor mediante una primera aproximación.

Figure 4. Depth profile for GaN by AFM.

Además de la aproximación del espesor mediante el perfil de profundidad de AFM se obtuvo una imagen transversal por medio de TEM para determinar el espesor de la película depositada. La imagen se presenta en la figura 5. El espesor determinado fue de 10nm, en la parte izquierda de la imagen se observa el sustrato, después el crecimiento de GaN y finalmente la capa de oro de 2.5nm. Para el tratamiento de la imagen se utilizó el programa Gatan Microscopy Suite 2.1.

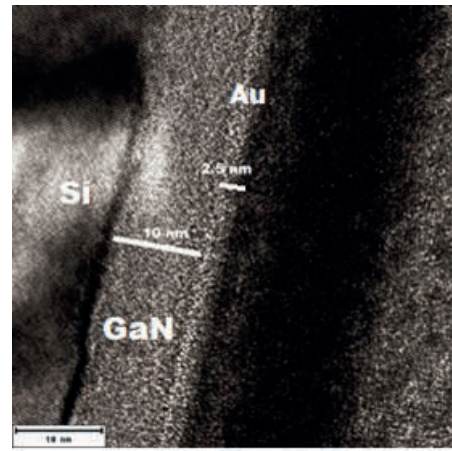


Figura 5. Microscopia electrónica de transmisión para la película de nitruro de galio de 100 ciclos.

Figure 5. TEM image obtained for GaNC100 growth by ALD.

XPS: COMPOSICIÓN QUÍMICA

Los espectros obtenidos se muestran en la figura 6, para las películas de GaN los niveles electrónicos Ga2p y N1s fueron medidos. La señal de Galio 2p se ajusta haciendo uso de 1 solo pico gaussiano (Figura. 6a) este pico de mayor intensidad está relacionado con los enlaces de Ga-N (1117.9eV) (Oh H.K.,2019).

En el caso del Nitrógeno 1s (figura 6b), se puede observar que el ajuste se realizó alrededor de 2 picos principales ubicados en 400 y 399 eV, para el ajuste se utilizaron 4 señales ubicadas en 398.5, 399, 400 y 401 eV, las cuales se encuentran reportadas como enlaces Ga-N y N-H (Oh H.K., 2019), las referencias incluyen muestras crecidas por otras técnicas como CVD y MBE (Tan A.K.,2022).

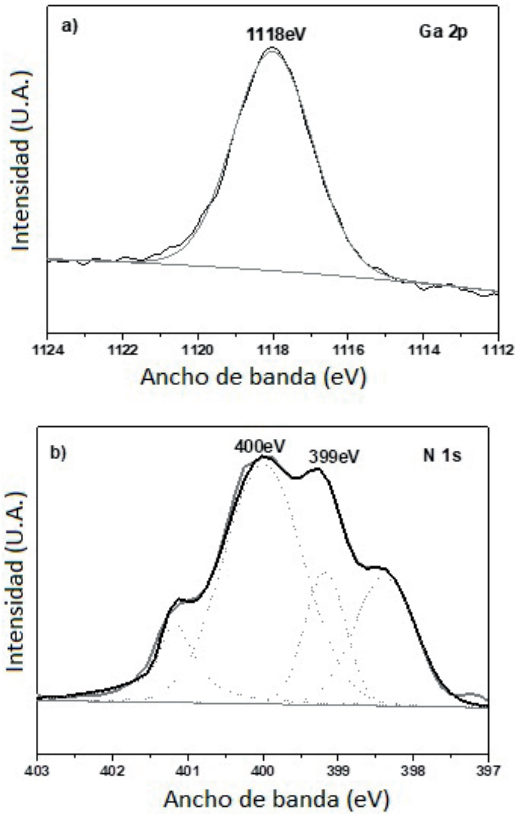


Figura 6. Espectros obtenidos por la técnica de XPS para la película de GaN-ALD. En la figura 6a se muestra un pico gaussiano que ajusta la señal relacionada con enlaces Ga-N. El espectro 6b se ajusta a 2 picos relacionados con enlaces Ga-N y N-H.

Figure 6. Spectra obtained by the XPS technique for the GaN-ALD film. A Gaussian peak fitting the signal related to Ga-N bonds is shown in Fig. 6a. Spectrum 6b fits 2 peaks related to Ga-N and N-H bonds.

DIFRACCIÓN DE RAYOS X DE ALTA RESOLUCIÓN (XRDHR)

En la figura 7 se presenta el patrón de difracción de Rayos X para la película obtenida. Para la película de GaN crecida a 325°C se tiene un pico principal en 2θ alrededor de 35.5° , que se atribuye a α -GaN (0002), además se distinguen 2 señales secundarias en 34.2° y 39.8° , mismas que se relacionan con GaN y se encuentran reportadas en la literatura desde los primeros estudios del material (Yu

G.,1997) hasta publicaciones de la actualidad (Abdullaev O. et al.,2019).

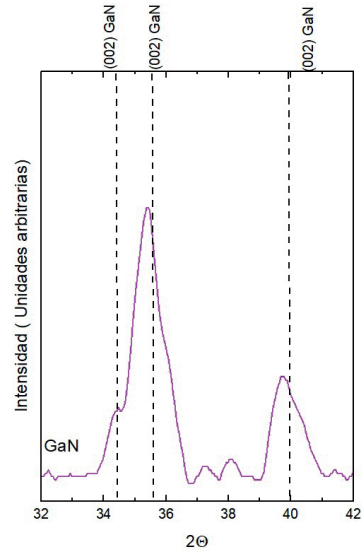


Figura 7. Espectro de difracción de Rayos X para la película de GaN.

Figure 6. Spectra obtained by the X Ray Diffraction technique for the GaN-ALD film.

CONCLUSIONES

Se logro el crecimiento de nitruro de galio sobre substratos de Silicio (100) por medio del método de depósito de capas atómicas mediante la propuesta de hidróxido de amonio (NH_4OH) como un nuevo precursor de nitrógeno y trimetil galio $\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$. La ventana de temperatura de crecimiento se ubica entre 300°C y 350°C , para este trabajo se eligió una temperatura de 325°C . Las imágenes obtenidas por microscopia de fuerza atómica confirman la cobertura superficial del sustrato con los parámetros de crecimiento. El perfil de profundidad y la medición de TEM suponen una película ordenada con un crecimiento cristalino. Los resultados de XPS y Rayos X confirman el depósito de nitruro de galio y la calidad de este. Estos resultados son importantes y abren camino para la producción de materiales III-N por el método de capas atómicas con una nueva alternativa al plasma y amoniaco como precursores.

AGRADECIMIENTOS

M. M. M. Contreras-Turrubiarres agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de la beca 446129, y de CeMIE-SOL a través del proyecto 22, así como la hospitalidad del laboratorio de Física de Superficies de la universidad de Texas en el paso (UTEP) y del Dr. Carlos Díaz-Moreno. Jorge Alberto López Gallardo agradece el apoyo de la US Army Research Office a través de la subvención No. 12284027.

REFERENCIAS

- Abdullaev, O., Mezheny, M., Chelny, A., Savchuk, A., Ahmerov, Y., Rabinovich, O., ... & Aluyev, A. (2019, September). MOCVD growth GaN on sapphire. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 617, 1, p. 012015. IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/617/1/012015/meta>
- Banerjee, S., Aarnink, A. A., Gravesteijn, D. J., & Kovalgin, A. Y. (2019). Thermal atomic layer deposition of polycrystalline gallium nitride. *The Journal of Physical Chemistry C*, 123(37), 23214-23225. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b05946>
- Cai, J., Han, X., Wang, X., & Meng, X. (2020). Atomic layer deposition of two-dimensional layered materials: processes, growth mechanisms, and characteristics. *Matter*, 2(3), 587-630. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.12.026>
- Doerr C. and Chen L. (2018), Silicon Photonics in Optical Coherent Systems, *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 12, 2291-2301, <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2866391>.
- Gungor, N., & Alevli, M. (2018). Role of film thickness on the structural and optical properties of GaN on Si (100) grown by hollow-cathode plasma-assisted atomic layer deposition. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 36(2), 021514. <https://doi.org/10.1116/1.5003154>
- Gupta, G.; Banerjee, S.; Dutta, S.; Aarnink, A. A. I.; Schmitz, J.; Kovalgin, A. Y.; Hueting, R. J. E. (2018) Charge Carrier Transport and Electroluminescence in Atomic Layer Deposited Poly-GaN/c-Si Heterojunction Diodes. *J. Appl. Phys.*, 124, 084503 <https://doi.org/10.1063/1.5041089>
- Jabbar, H.D., Fakhri, M.A. & Abdul Razzaq, M.J. (2022) Synthesis Gallium Nitride on Porous Silicon Nano-Structure for Optoelectronics Devices. *Silicon* (1). <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01999-8>
- Jumaah, O. D., & Jaluria, Y. (2021). Experimental Study of the Effect of Precursor Composition on the Microstructure of Gallium Nitride Thin Films Grown by the MOCVD Process. *Journal of Heat Transfer*, 143(10). <https://doi.org/10.1115/1.4051672>
- Kour, R., Arya, S., Verma, S., Singh, A., Mahajan, P. & Khosla, A. (2019, 7 noviembre). Review—Recent Advances and Challenges in Indium Gallium Nitride (In_xGa_{1-x}N) Materials for Solid State Lighting. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 9(1), 015011. <https://doi.org/10.1149/2.0292001jss>
- Liu, S., He, Y., Li, Y., Tao, J., & Zheng, (2022) X. Low-Temperature Growth of Crystalline Gan Thin Films on Quartz Substrates with Sharp Interfaces. *SSRN 4126099*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4126099>
- Nallabala, N. K. R., Godavarthi, S., Kummara, V. K., Kesarla, M. K., Yuvaraj, C., Kumar, S., Vattikuti, S. P. (2021). High performance, self-powered and thermally stable 200–750 nm spectral responsive gallium nitride (GaN) based broadband photodetectors. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 225, 111033. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111033>
- Oh H.K., Dojun K. and Anderson T. (2009), Atomic layer deposition of GaN using GaCl₃ and NH₃, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 27, 923-928 <https://doi.org/10.1116/1.3106619>

- Oviroh, P. O., Akbarzadeh, R., Pan, D., Coetzee, R. A. M., & Jen, T. C. (2019). New development of atomic layer deposition: processes, methods and applications. *Science and technology of advanced materials*, 20(1), 465-496. <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1599694>
- Pal, Y., Raja, M. A., Madhumitha, M., Nikita, A., & Neethu, A. (2021). Fabrication and characterization of gallium nitride thin film deposited on a sapphire substrate for photoelectrochemical water splitting applications. *Optik*, 226, 165410. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165410>
- Qiu, P., Wei, H., An, Y., Wu, Q., Du, W., Jiang, Z., & Zheng, X. (2020). Plasma-enhanced atomic layer deposition of gallium nitride thin films on fluorine-doped tin oxide glass substrate for future photovoltaic application. *Ceramics International*, 46(5), 5765-5772. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.026>
- Ravanbakhsh, H., & Shekari, L. (2022). Transistors based on gallium nitride (GaN), growth techniques, and nanostructures. *Journal of Theoretical and Applied Physics*, (1), <https://doi.org/10.30495/jtap.162236>
- Tan, A. K., Hamzah, N. A., Ahmad, M. A., Ng, S. S., & Hassan, Z. (2022). Recent advances and challenges in the MOCVD growth of indium gallium nitride: A brief review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 143, 106545. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2022.106545>
- Urban A., Müller M., Karbaum C., Schmidt G., Veit P., Malindretos J., Bertram F., Christen J., and Rizzi A. (2015), Optical Emission of Individual GaN Nanocolumns Analyzed with High Spatial Resolution, *Nano Letters* 15 (8), 5105-5109. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b01278>
- Wilkins S., Paskova T., Ivanisevic A. (2015). Comparison of the Stability of Functionalized GaN and GaP. *Chemphyschem: A European journal of chemical physics and physical chemistry*. 16 (8). <https://doi.org/10.1002/cphc.201500105>
- Yimeng S., Yangfeng L., Yingfeng H., Huiyun W., Peng Q., Xiaotao H., Zhaole S., Yang J., Mingzeng P., Xinh Z. (2022), Two-Step Deposition of an Ultrathin GaN Film on a Monolayer MoS₂ Template. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 14 (14) , 16866-16875. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c00824>
- Yu G., Wang, G., Ishikawa, Hiroyasu, Umeno, Masayoshi, Soga, Tetsuo, Egawa, T., Watanabe J. & Jimbo, T. (1997). Optical properties of wurtzite structure GaN on sapphire around fundamental absorption edge (0.78–4.77 eV) by spectroscopic ellipsometry and the optical transmission method. *Applied Physics Letters*. 70. 3209-. [10.1063/1.119157](https://doi.org/10.1063/1.119157).
- Zhang, Q., Yin, X., & Zhao, S. (2021). Recent Progress on Aluminum Gallium Nitride Deep Ultraviolet Lasers by Molecular Beam Epitaxy. *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 15(7), 2100090. <https://doi.org/10.1002/pssr.202100090>
- Zheng, Y., Sun, C., Xiong, B., Wang, L., Hao, Z., Wang, J., Han, Y., Li, H., Yu, J., Luo, Y. (2021), Integrated Gallium Nitride Nonlinear Photonics. *Laser & Photonics Reviews*, 16, 2100071. <https://doi.org/10.1002/lpor.202100071>
- Zuhairi A., Shuhaimi O., Nayan A., Azman N., Kamarudzaman A., Alobaidi A., Ghanim O., Abdullah M., Zhu, Y. (2022) Non-Polar Gallium Nitride for Photodetection Applications: A Systematic Review. *Coatings*, 12, 275. <https://doi.org/10.3390/coatings12020275>