

Una Revisión del Futuro del Nitruro de Aluminio en la Electrónica

A Review of the Future of Aluminum Nitride in Electronics

Jhon Daza^{1*}, Carlos Flórez², Gabriel Torrente^{3**}

^{1,2,3} Universidad ECCI

* jhonf.dazao@ecc.edu.co

** gtorrentep@ecc.edu.co

RESUMEN

Este artículo es una revisión del avance y actualidad del nitruro de aluminio (AlN) en la electrónica, de tal manera se muestran las principales características del AlN, haciendo énfasis en sus propiedades estructurales, morfológicas y físicas. Se realizó una revisión acerca del material del AlN, haciendo énfasis en las técnicas de Magnetron Sputtering y Ablación Láser, y se evaluó el efecto de los parámetros de dicho material como, presión de gas ambiente (N₂), temperatura de sustrato o tiempo de deposición en la producción del AlN. Adicionalmente se estudió las posibles aplicaciones del AlN y su futuro en la microelectrónica. Se concluye de esta revisión que el AlN pudiera ser el futuro de la optoelectrónica y óptico-acústicos en ambientes extremos, así como también, el AlN pudiera ser el nuevo material de las placas electrónicas en los futuros procesadores de alta potencia.

Palabras clave: Ablación láser (PDL), Difracción de rayos X (DRX), Magnetron sputtering, Nitruro de aluminio (AlN) Técnicas de síntesis.

Recibido: 7 de febrero de 2022
Received: February 7th, 2022

Aceptado: 24 de junio de 2022
Accepted: June 24th, 2022

ABSTRACT

This work is a review of the principles, progress, and current events of aluminum nitride (AlN) in electronics, in such a way that the main characteristics of AlN are shown, emphasizing its structural, morphological, and physical properties. A review of the AlN synthesized was carried out, emphasizing Magnetron Sputtering and Laser Ablation techniques, and the effect of synthesized parameters such as ambient gas pressure, substrate temperature, or deposition time on the AlN production. Additionally, the possible applications of AlN and its future in microelectronics were studied. The conclusion of this work is that the AlN could be the future of optoelectronics and optical-acoustics in extreme environments, as well as, the AlN could be the new material of the electronic boards on the future high-power processors.

Keywords: Aluminum nitride (AlN), Laser ablation (PDL), Magnetron sputtering, Synthesis techniques, X-ray diffraction (XRD).

1. INTRODUCCIÓN

Este artículo es una revisión sobre el nitruro de aluminio (AlN). El AlN es una cerámica avanzada que promete ser el futuro de las aplicaciones electrónicas, principalmente en LED's y detectores ultravioletas, debido a que presenta una notable estabilidad química y térmica, y por otro lado se comporta de buena manera en ambientes extremos de altas temperaturas [1] [2].

La estructura que tiene el nitruro de aluminio es de tipo wurtzita, siendo la fase cristalina más estable para el AlN [3]. Es uno de los materiales con la banda de energía (gap de energía) más ancha a temperatura ambiente ($E_g = 6.2$ eV), por este motivo se le confiere propiedades luminiscentes. [4] [5]. Debido a que presenta un alto nivel de gap con a temperatura ambiente lo convierte en nitruro metálico para aplicaciones, tales como: Dispositivos optoelectrónicos [1], Sensores acústicos [2], Sensores de gas [4] [5], Diodos led [6] [7], y Placas electrónicas [8].

En la figura 1 se observa la red cristalina, mostrando que cada átomo de aluminio se encuentra ligado a cuatro átomos de nitrógeno y así en viceversa, se forma un tetraedro que posee tres enlaces Al-N (i) siendo $i = 1, 2, 3$. Su separación está dada a 120° en un plano perpendicular con enlace Al-N (0) [7].

- El plano (002) está representado por el rojo.
- El plano (101) está representado por el azul.
- El plano (102) está representado por el verde.
- El plano (103) está representado por el gris.

Los átomos de amarillo corresponden al aluminio y los verdes al nitrógeno [9].

NITRURO DE ALUMINIO

El AlN es un cerámico de color blanco muy brillante y con estructura cristalina wurtzita [10]. El AlN es un buen conductor térmico y un buen aislante eléctrico, lo cual lo hace una cerámica muy interesante para aplicaciones electrónicas. En la tabla 1 se aprecian sus propiedades.

El nitruro de aluminio es una cerámica técnica, es decir que se utiliza para aplicaciones tecnológicas, con un uso extensivo en la electrónica, la conductividad térmica del AlN sinterizado es de aproximadamente 170 - 180 W/mK por lo que es mucho más alto que otras cerámicas técnicas [11].

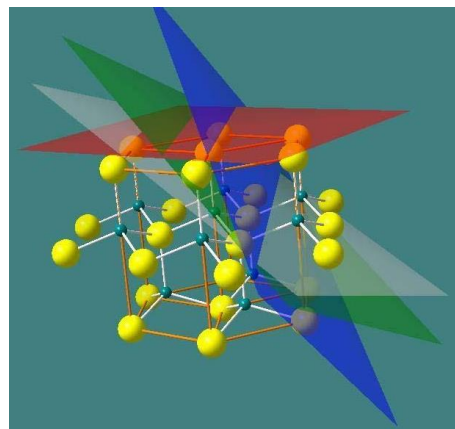


Figura 1. Red cristalina del nitruro de aluminio AlN [9].

Se caracteriza por ser un excelente aislante eléctrico, pudiendo llegar a metalizarse de ser necesario, es por eso que también se usa como disipador de calor. La ventaja de este material es que puede presentarse en formas grandes y también en sustratos finos.

Tabla 1. Propiedades del AlN [12].

Propiedad	Valor
Densidad	3'3 g/cm ³
Constantes de red	$a = 3'1117 \text{ \AA}$ $c = 4'9792 \text{ \AA}$
Coefficiente de expansión térmica	$\Delta a/a = 4'2 \cdot 10^{-6}/K$, $\Delta c/c = 5'3 \cdot 10^{-6}/K$
Conductividad térmica teórica	3'2 W/cm·K
Conductividad térmica	2'0 W/cm·K
Coefficiente de dilatación térmica	$4'6 \cdot 10^{-6} / ^\circ C$
Potencial de deformación	9'5 eV
Índice de refracción	2'15 (a 3 eV)
Constante elástica (módulo de Young)	$c_{11} = 345 \text{ GPa}$ $c_{33} = 411 \text{ GPa}$
Constante dieléctrica relativa	$\epsilon_\infty = 4'77$ $\epsilon_0 = 8'5$
Punto de fusión	> 2.000°C
Campo de ruptura	6 – 15 MV/cm
Masa efectiva del electrón	0'48·m ₀
Velocidad de saturación electrónica	1'4·10 ⁷ cm/s

Características del AlN

El AlN presenta buena conductividad térmica, pero como

buen a cerámica es un buen aislante eléctrico. La forma de sintetizar el AlN es con la nitruración directa del aluminio, o también por reducción carbo-térmica de óxidos de aluminio [13].

Como el AlN es un nuevo tipo de material, el cual cuenta con una baja constante dieléctrica y no es tóxico, hacen que sea un material ideal para los sustratos y paquetes electrónicos en todo tipo de dispositivos [14].

Hay una variedad de métodos para poder determinar la estructura del AlN, como la difracción de rayos x, con este se puede determinar la calidad de las películas cristalinas del AlN. Los datos que se proporcionan son orientación cristalina [15]. También se le hacen estudios de vibración, la cual es una técnica no destructiva, esta técnica permite identificar los enlaces, estimar la concentración que se tiene y su estructura [7].

El nitruro de aluminio en la electrónica

El AlN ha sido de gran uso en la industria electrónica gracias a la conductividad térmica que tiene, la cual es mucho más alta que otros cerámicos, también como es un aislante eléctrico puede llegar a metalizarse fácilmente, esto lo hace un buen disipador de calor [16].

El AlN se puede mecanizar gracias a sus propiedades mecánicas y conductividad térmica relativamente alta. Además, también tiene buena resistencia a la corrosión y puede llegar a utilizarse para fabricar piezas de gran tamaño [17].

El AlN permite el ahorro de espacio y hace que se pueda disminuir el tamaño en los microchip, disipadores y dispositivos como lo son los Smartphone y las memorias. El AlN es utilizado en la fabricación de disipadores de calor en los transistores bipolares y procesadores de circuitos integrados.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TECNICAS EN SÍNTESIS DEL NITRURO DE ALUMINIO (AlN)

En la historia existen grandes precedentes en el estudio del AlN. Long et al. [18] en 1959 fue uno de los primeros en reportar la síntesis del AlN por plasma. El plasma se formó por medio de un arco eléctrico entre electrodos de aluminio en atmósfera de nitrógeno. Por esta técnica Long logró sintetizar AlN 75% puro.

En 1975 Cantellup et al. [19] [20] realizó la síntesis de AlN 85% puro por nitruración de polvo de aluminio en un plasma de radiofrecuencia. Esta técnica fue mejorada en 1977 por

Zyatkevich et al. [21] [22] obteniendo AlN 94% puro.

En 1993 Bilodeau et al. [23] en su estudio titulado “A study of the nucleation and growth of ultrafine AlN powder in a plasma reactor” comprobó que el tamaño de las partículas de AlN sintetizadas en un reactor de plasma no depende del tiempo de residencia en las zonas calientes del reactor.

Pathak et al. [24] en 1999 mediante el proceso de carbonitruración de Al₂O₃ sintetizó AlN utilizando C(s) y N₂ (g). En 2001 Kim et al. [25] fue el pionero en utilizar un reactor de cámara de expansión para sintetizar el AlN.

Más recientemente con los avances en la tecnología existen distintas técnicas para la síntesis de películas delgadas de AlN por deposición, como, por ejemplo:

- Depósito por vapor químico (CVD: chemical vapor deposition) [26] [27] [28].
- Depósito asistido por haz de iones (ion beam assisted deposition) [29] [30].
- Epitaxia de haces moleculares (MBE: molecular beam epitaxy) [31] [32].
- Erosión iónica reactiva (reactive magnetron sputtering), y deposición por láser pulsado (PLD). [33].

En el siguiente apartado, se analizarán las dos últimas técnicas mencionadas, debido a que en la actualidad estas ofrecen facilidades en la obtención del material conservando la estequiometría, y además son procesos económicos.

Síntesis de películas delgadas de AlN por el método de Sputtering

El proceso de Sputtering está basado en la deposición por pulverización física mediante el uso de una cámara con prevacío y por donde transita una corriente eléctrica por dos electrodos donde ocurre el bombardeo de un material (blanco de sputtering). Por el efecto de diferencia de potencial entre los átomos se produce una descarga eléctrica en forma de plasma [33].

En el momento en el que la energía de los iones de gas residual se encuentra agrandada, la interacción de los electrodos en la superficie del material blanco genera que los átomos arranquen parte del material, debido al intercambio en el momento cinético. Los átomos resultantes salen del cátodo para llegar a la superficie del sustrato donde se forma la película [34] [35]. De esta forma se depositan películas delgadas de metales puros o aleaciones utilizando descargas de gases nobles. La técnica bajo el principio de “Magnetron Sputtering” se caracteriza por

hacer uso de los campos magnéticos transversales, los cuales se forman gracias a los campos eléctricos en la superficie del material blanco, como se evidencia en la figura 2 [19].

Esta aplicación ha dado lugar al uso de blancos elementales con gases reactivos, en el que pueden ser depositados óxidos y nitruros de metales en atmósferas reactivas de oxígeno y/o nitrógeno. Permitiendo el crecimiento de las películas delgadas policristalinas de AlN a temperatura ambiente (desde superficies de mm² hasta m²) funcionales en aplicaciones industriales [36] [37].

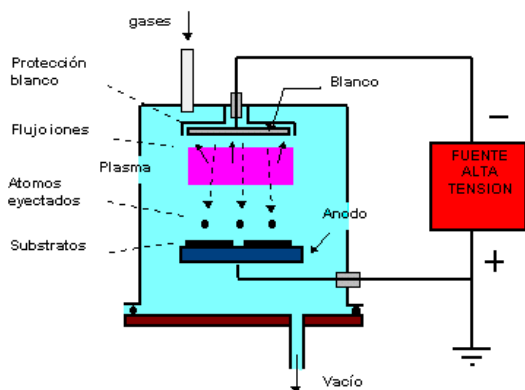


Figura 2. Proceso de deposición por Magnetron sputtering [19].

En el proceso de pulverización iónica se generan propiedades ópticas, electrónicas y estructurales, donde es posible alterar algunas por medio de la modificación de las condiciones experimentales [38].

El AlN presenta una alta afinidad hacia el oxígeno, las superficies de las películas pueden contener una capa de óxido que modifica las propiedades físicas, alterar la estructura electrónica y produce variación en los picos de luminiscencia [39].

La luminiscencia es un proceso que consiste en el uso de un espectro de emisión con una banda dominante centrada, en el AlN la emisión se atribuye a una recombinación de procesos relacionados con los dominios de oxígeno en la red cristalina [40].

La síntesis de películas delgadas policristalinas de AlN por Magnetron Sputtering fue estudiada en el Tecnológico de Monterrey Campus Ciudad de México. Ellos depositaron las muestras por sputtering de radio frecuencia empleando un blanco de 150 mm de aluminio, bajo una mezcla pura de 99.9995% de nitrógeno (N₂) y argón (Ar) sobre obleas de silicio (Si). Ellos estudiaron la piezoelectricidad en el AlN

y como es afectada por defectos estructurales. Analizaron dos muestras que presentaron diferencias con respecto a la respuesta piezoeléctrica y la desorientación cristalina. Se muestra en la Tabla 2 los resultados preliminares de la primera revisión de las muestras [41].

Tabla 2. Resultados obtenidos en un primer análisis [41].

Muestra	Textura	FWH r-c (°)	Respuesta piezoeléctrica
1	mixta	muy ancha	nula
2	00-2	3.0	muy buena

En el difractograma de la figura 3 se muestra los rayos x obtenidos en la Tecnológico de Monterrey para la muestra 1. Observando que: [41].

- El sustrato es de baja resistividad de Si (001).
- Presenta un r-c con una superficie en su mayoría plana, sin orientación preferencial concreta y muy policristalina.
- No se obtiene respuesta piezoeléctrica.
- Por su textura es un policristal casi ideal.

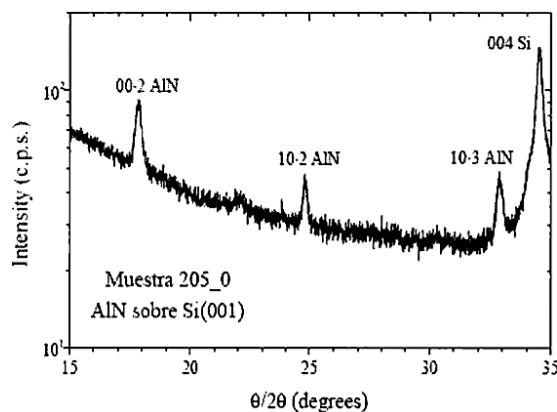


Figura 3. Rayos X muestra 1 [41].

En el difractograma de rayos x que se muestra en figura 4 es el análisis de la muestra 2, en este se observa que: [41].

- El sustrato es Pt cubico con orientación <111> de Si (001).
- El material que se depositó presenta una orientación de 00-1 perfecta y un r-c buena (FWHM=3°).
- Se obtiene respuesta piezoeléctrica.
- Las características del sustrato permiten obtener AlN de 00-2, debido a que la superficie simétrica triple enlaza con la simetría hexagonal del blanco.

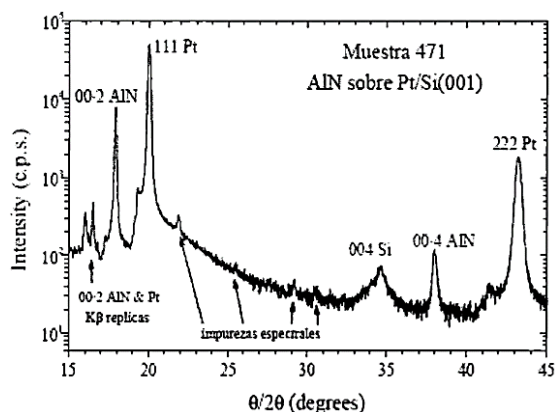


Figura 4. Rayos X muestra 2 [41].

Microscopia SEM de películas delgadas de AlN sintetizadas por el método de Sputtering

Los recubrimientos de AlN en la muestra 1 las analizaron en el microscopio electrónico de barrido (SEM), con el fin de poder realizar el barrido de las películas. Se trabajó con una carga de 5 kV, con la cual observaron mayor rugosidad y proporción en la carga [41].

- Se evidencia superficie rugosa y heterogénea.
- Se logra visualizar huecos con textura suave.
- Los granos se visualizan de diferentes tamaños, encontrándose una parte entre 80 a 160 nm y otros notándose en 200 a 300 nm.

Analizaron las muestras con un grado de inclinación de 75°, en este tipo de vista se puede observar claramente la separación que ocurrió entre el sustrato de Silicio y la lámina de AlN. Adicional, se logra evidenciar el crecimiento en los granos de AlN el cual ocurre de tipo columnar y se extiende en forma vertical [41].

La muestra 2 la trabajaron con una carga que inicio desde el rango de 5 kV. Realizaron un barrido a diferentes aumentos con el fin de poder obtener y visualizar una mejor imagen de la estructura de la muestra y de tal forma determinar el tamaño de los granos. A través de la micrografía en vista planar de la superficie del AlN policristalina, observaron: [41].

- La estructura del material a nivel granular.
- Las muestras poseen una organización molecular homogénea. Sin embargo, se visualiza algunas zonas oscuras que indican que existe vacío en esa región.
- Comparten un patrón de ordenamiento.

- Los granos del material poseen dos tipos de tamaño que van desde 35 hasta 45 nm y en algunas zonas se logran notar granos con tamaño de 50 a 60 nm.

Nuevamente realizan el análisis con en un grado de inclinación de 75°, este tipo de vista permite ver las películas de AlN depositadas sobre el sustrato de Silicio. Se evidencia que el crecimiento de los granos de AlN es de tipo columnar y se extienden de manera vertical por la superficie. [41]

Se muestran los resultados de los espesores tomados a las muestras en la tabla 3. [41]

Tabla 3. Espesores muestras AlN. [41]

Muestra	Micras	Espesor real (Corr.) (nm)	Película	Espesor promedio real (Corr.) (nm)
1	1	676	AlN	480 +/- 15 28 +/- 40 980 +/- 30
	1	321	Pt	
	1	494	AlN	
	1	262	Pt	
	2	469	AlN	
	2	241	Pt	
	2	891	SiO ₂	
2	0.5	968	AlN	980 +/- 60
	1	1044	AlN	
	2	920	AlN	

Se evidencia que las diferentes técnicas de caracterización se complementan y permiten obtener más información acerca de las propiedades específicas en las películas de AlN.

Los resultados obtenidos permitieron determinar que bajo especificaciones definidas se logra un mejor crecimiento de las películas policristalinas y así obtener mejores resultados y buen comportamiento del material en aplicaciones en dispositivos electrónicos de ondas acústicas.

Películas delgadas de AlN por deposición por láser pulsado (PLD)

La deposición por láser pulsado (PLD) es una técnica que consiste en la evaporización ultra-rápida del material (llamado blanco) por medio de pulsaciones de láseres cortos e intensos de alta potencia, que ocasionan que el material evaporado forme una pluma de plasma. El material blanco evaporado en el plasma bombardea el sustrato (en

condiciones previamente definidas) creando una capa delgada homogénea [42] [43].

En cada haz de láser se genera la ablación de una capa (en nanómetros) con el fin de formar la pluma en el plasma siendo un proceso muy rápido (nanosegundos o femtosegundos). El láser es del orden de los mega Joule y longitudes de onda ultravioleta [44].

En la figura 5 se muestra la representación del esquema de PLD. La ablación en los metales blancos empieza a partir de un efecto fotoeléctrico multifotónico, bajo una densidad de carga positiva y con altos niveles de metal, provocando la expulsión de iones con energía por el orden de centenares de eV [43].

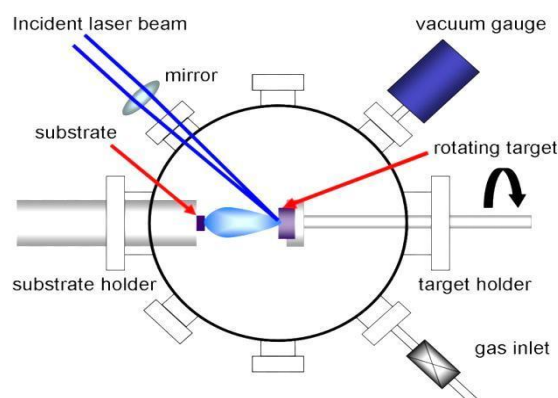


Figura 5. Proceso de deposición por láser pulsado de películas delgadas [39].

Ventajas del PLD

- Permite la reproducibilidad de las propiedades en las películas fabricadas [45].
- Control de los parámetros que fueron establecidos, permitiendo la obtención de películas delgadas de alta calidad a bajas temperaturas de trabajo [46].
- Conservación de la estequiometría de acuerdo con los elementos precursores [47].

La síntesis de películas policristalinas de AlN empleando PLD se estudió en la Universidad Militar Nueva Granada en Bogotá D.C en el año 2010. En este estudio se buscó conocer si el AlN presenta deficiencias estructurales dependiendo de los mecanismos de transporte de cargas durante su síntesis. Ellos analizaron diferentes muestras sintetizadas con diferentes presiones de deposición. [48].

La deposición se realizó en una cámara de vacío que cuenta con una bomba mecánica seca con velocidad de evacuación de 140 l/s (pre-vacío) y una bomba turbomolecular con

velocidad de bombeo de 280 l/s (alto vacío) que alcanza una presión residual de 10⁻⁶ mTorr. En la tabla 4 se visualizan las condiciones iniciales de deposición de las muestras por medio de la técnica de PDL. [48].

Tabla 3. Condiciones de deposición PVD de la muestra. [48]

Blanco de aluminio			
Variable	M 1	M 2	UM
Pureza	4		N
Diámetro	2.54		cm
Espesor	0.31		cm
Frecuencia	2.2		Hz
Deposición de Nitrógeno			
Variable	M 1	M 2	UM
Pureza	5		N
Presión	3	4	mTorr

Cada depósito se realizó con 9.000 pulsos del láser Nd: YAG de $\lambda = 1.064$ nm, la energía de los pulsos fue de 500 mJ de duración de 7 ns que impactaron en un ángulo de 45° por 15 min. La distancia blanco-sustrato fue de 5.4 cm, utilizaron como sustratos portaobjetos de vidrio a base de Si₃N₄ (100) y Si (100) que previamente fueron limpiados en ultrasonido. La fluencia del láser fue a través de una lente de vidrio a una distancia focal de 24.5 cm, manteniéndose constante en 7 J/cm² [48].

Difracción de Rayos X de películas delgadas de AlN por deposición por láser pulsado (PLD)

En la figura 6 se muestra el difractograma obtenido de una película de AlN a una presión de nitrógeno de 4 mTorr sobre un sustrato de Si₃N₄, fluencia del láser 7 J/cm² y a temperatura ambiente [48], se observa que la película es de tipo policristalina, presenta fases hexagonales y cúbicas con formaciones de alúmina Al₂O₃ [49], la fase hexagonal (002) es de tipo de estructura wurtzita en las películas de AlN [50]. Además, se caracterizó por ser la fase más estable gracias a los compuestos producidos debido al acortamiento de la distancia en los planos, de esta forma se generó apilamiento en la fase zinc-blende [51].

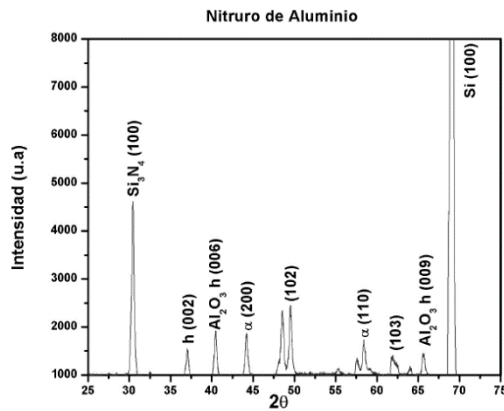


Figura 6. Rayos X de muestra de AlN [48].

Microscopia SEM de películas delgadas de AlN sintetizadas por deposición por láser pulsado (PLD)

El análisis morfológico y estructural, realizado en la Universidad Militar Nueva Granada, como se evidencia en la figura 7, mostró que los cambios del AlN a nivel morfológico dependen de la variación del sustrato y la presión del depósito. En condiciones de fluencia del láser de 7 J/cm² y con temperatura ambiente, observaron que: [48].

- 3 mTorr sobre sustrato de Si.
- 4 mTorr sobre sustrato de Si₃N₄.
- 4 mTorr sobre porta-muestra de vidrio.
- 4 mTorr sobre sustrato de Si₃N₄, en la inserción la imagen EDX correspondiente.

Es evidente que en pequeñas variaciones de presión se ve afectada la calidad superficial de la película. En la figura 7.a se observa que bajo una presión de 3 mTorr en el sustrato de Si, la superficie de la película se logra ver homogénea, pero con bajos niveles de nitrógeno debido a la presión baja en el depósito [48].

En la figura 7 además se alcanzan a observar partículas de formas irregulares que se atribuye al proceso de exfoliación. La figura 7.d corresponde al parámetro de presión 4 mTorr sobre sustrato de Si₃N₄, donde se observa el crecimiento de la película de tipo columnar, favoreciendo la formación de cráteres. También es importante mencionar que en la micrografía 7.b y 7.c se aprecian gotas de ebullición, llamadas droplets (originales de la técnica de PLD), que se ocasionan por el desprendimiento de macropartículas que al momento de impactar con el sustrato generan todo tipo de imperfecciones sobre la superficie de la película [48].

En la figura de la micrografía 7.d se muestra la composición química de la película crecida a una presión de 4 mTorr sobre sustrato de Si₃N₄. En una región de la película se

observa alto contenido de Al (60%), ocasionando gotas de ebullición, fenómeno que ocurre por los altos niveles de aluminio y la ausencia total de nitrógeno. [48].

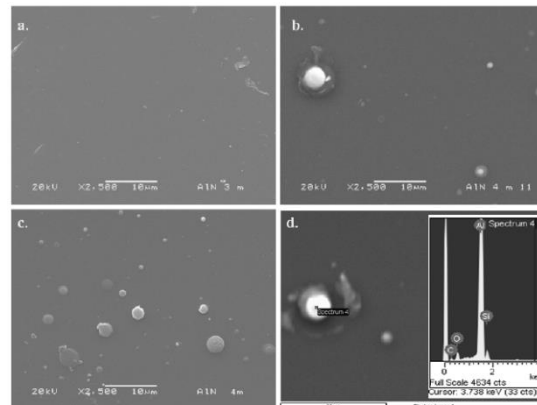


Figura 7. Imágenes de micrografía SEM en películas de AlN delgadas depositadas por PLD [48].

Para mantener una óptima calidad superficial y una buena orientación en la película se debe controlar la presión del nitrógeno y el sustrato utilizado. Si la presión de N₂ es baja, se aumentará el camino libre de las partículas que componen el plasma, en otras palabras, significaría mayor energía cinética en las partículas que finalmente se adhieran al sustrato. Como muestra de ello en la micrografía 7.c se evidencia sobre la porta-muestra de vidrio, con presión crecida por el orden de los 4 mTorr, que se obtiene una calidad estructural deteriorada en la película, debido a posibles impurezas presentes en el sustrato. [48].

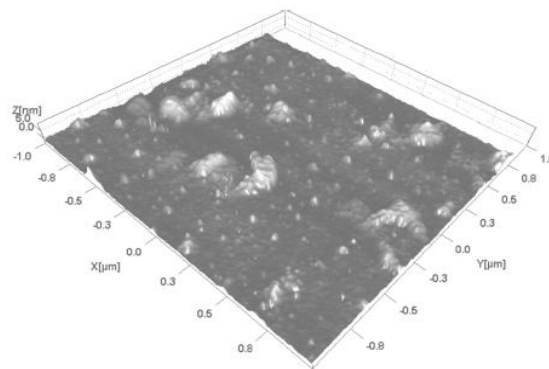


Figura 8. Microimagen de una película de AlN crecida sobre un sustrato de Si₃N₄ [48].

En la revisión de la muestra sobre Si₃N₄ con presión de 4 mTorr, fluencia del láser de 7 J/cm², a temperatura ambiente en la figura 8, se evidencia que la rugosidad fue de 3.6 nm y el tamaño de grano promedio es de 62.9 nm [48].

El Profesor Pérez et al. [48] de la Universidad de Nueva Granada concluyeron que la técnica PDL se caracteriza por ser un método altamente energético y aun así se logró conseguir buena calidad morfológica en las películas.

Adicionalmente concluyeron que si se quiere conseguir cristalinidad en las películas de AlN se debe calentar el sustrato previamente. En esta ocasión, la velocidad alta de las especies en el plasma (Al, N₂) produce una temperatura recomendable, debido a la transferencia de energía durante el choque con el sustrato. Adicional, el bajo espesor resultante contribuye a las aplicaciones y propiedades estructurales de las películas de AlN [48].

En la figura 9 muestran la medición en el perfilómetro, se mide una muestra de AlN bajo condiciones de presión de 4 mTorr en un sustrato de Si₃N₄, preparado en una máscara de vidrio, la altura del escalón es de ~ 50 nm [48].

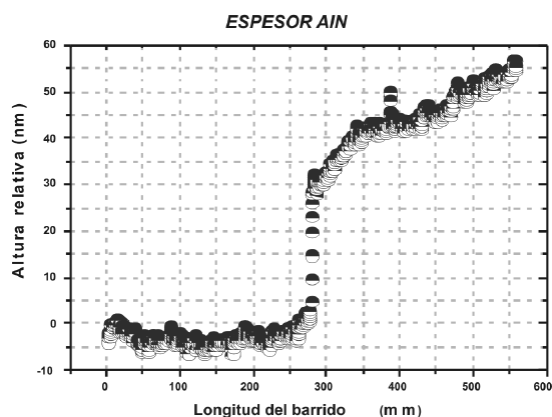


Figura 9. Medida de una muestra de AlN crecida en el perfilómetro [48].

En este caso, el plasma se produce por láser con duración de pulsos de nanosegundos y su calentamiento se da en capas superiores durante algunos microsegundos. En cuanto al incremento de temperatura, se puede decir que actúa de manera casi lineal por medio de la energía cinética media en las partículas incidentes [48].

En este análisis estudiaron los iones con mayores niveles de energías que superaran los 100 eV, los cuales producen en la superficie del sustrato una capa fina (~ decenas de Å), se difunden en lo profundo del sustrato con vacancias individuales recombinándose en un tiempo de ~10⁻⁸ s sin afectar en gran medida la cristalinidad [52]. Además, el máximo de elevación de temperatura en la superficie del sustrato es proporcional a 1/d², siendo d la distancia entre blanco y el sustrato [51] [53].

Mediante PDL lograron obtener películas delgadas de AlN,

donde se observó una nanoestructura policristalina bajo condiciones de baja presión de gas a temperatura ambiente. El grano posee una baja rugosidad presentando tamaños al nivel de los nanómetros. Para futuras aplicaciones en el sector electrónico es clave que se obtenga espesores en las películas por el orden de los nanómetros, ya que así se incrementara su uso en dispositivos optoelectrónicos, los cuales están en auge en la actualidad. Adicional evidenciaron la presencia de gotas de ebullición (droplets) y se presentó en la superficie un crecimiento de tipo columnar [48].

Mediante la síntesis por deposición de láser pulsado se logra el crecimiento de películas delgadas de AlN de nanoestructura policristalina, obteniendo buenos resultados a medida que la presión del gas de trabajo era más baja. [48] Esta técnica resultó beneficiosa para este tipo de recubrimiento y se espera que para el sector industrial sea provechosa, debido a la energía en gran magnitud que poseen las partículas que se colocan sobre el sustrato, aun presentando una separación grande entre el blando del sustrato. Adicional, su calidad morfológica fue mejor por medio de sustrato a base de Si (100) y Si₃N₄ (100). [48].

3. CONCLUSIÓN

El desarrollo de este artículo significó investigar, entender y adquirir nuevos conocimientos a nivel de materiales de ingeniería con aplicaciones para la industria, comprendiendo que las propiedades pueden manipularse ingenierilmente con las diferentes técnicas de síntesis y determinarse a partir de análisis con equipos de laboratorio, con el fin de encontrar nuevos métodos de aplicación y contribuir a la mejora de la calidad de vida, como por ejemplo, en el caso del AlN, la mejora de los dispositivos electrónicos.

Se espera que los avances en la tecnología, específicamente en la electrónica, tengan como bases materiales cerámicos de nitruro de aluminio, debido a que posee alta conductividad térmica y presenta es un aislante eléctrico. Adicionalmente el AlN, gracias a sus propiedades iónica y electrónicas, lo hace potencialmente aplicable en la optoelectrónica, específicamente en la operación de las frecuencias ultravioleta y en condiciones extremas de temperatura.

De esta revisión se pudo determinar que la tecnología de síntesis que se emplee para la producción de AlN afecta la pureza, morfología de crecimiento, la estructura cristalográfica y los defectos en la estructura cristalina de esta cerámica, entre otros. Por lo tanto, el proceso de síntesis del AlN dependerá de la aplicación ingenieril a la

cual va a estar destinado. Posiblemente la síntesis por plasma térmico y laser pulsado pudiera ser una posibilidad para la producción de los nuevos substratos electrónicos de AlN y técnicas como Sputtering para la síntesis de los dispositivos optoelectrónicos y piezoeléctricos de AlN.

Es importante considerar el uso de técnicas de caracterización que demuestren los cambios morfológicos que presenta la superficie de las películas a diferentes condiciones y así considerar su impacto en la formación, mediante el método de rayos x se logró conocer sus cualidades, siendo un gran complemento las micrografías en el microscopio para establecer su estructura química.

4. AGRADECIMIENTOS

Al tutor Gabriel Torrente por compartir su experiencia y conocimiento para la realización y culminación del entregable de opción de grado.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. A. Dubois, «Aluminium nitride and lead zirconatetitanate films for ultrasonic applications: Integration, properties and devices,» Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza, 1999.
- [2] H. Harima, J. Phys, *Condens. Matter* 14, pp. 967 - 993, 2002.
- [3] G. F. Iriarte, «AlN Thin Film Electroacoustic Devices,» Acta Universitatis Upsaliensis, 2003.
- [4] Vurghaftman, J. R. Meyer and L. R. Ram-Mohan, J. Appl., *Physics* 89, pp. 5815 - 5875, 2001.
- [5] A.S. Gudovskikh, J. Alvarez, J.P. Kleider, V.P. Afanasjev, *Sensors Actuators A-Phys* 113, pp. 355 - 359, 2004.
- [6] J. Emsley, The elements. Claredon Press. Tercera edición., Oxford, UK, 1988.
- [7] T. Ikeda, «Fundamentals of Piezoelectricit,» Oxford University Press, 1996.
- [8] G. Torrente, «DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN REACTOR DE PLASMA TÉRMICO PARA SÍNTESIS DE NITRURO DE ALUMINIO,» *Revista de la Facultad de Ingeniería*, vol. 21(2), pp. 75-83, 2006.
- [9] L. Vergara, «Películas delgadas de nitruro de aluminio depositadas por pulverización y su aplicación a dispositivos de ondas acústicas,» Universidad Politécnica de Madrid, 2005.
- [10] B. Salazar, «Synthesis of an Aluminum Nitride on an Aluminum Substrate,» *Higher Education Monterrey*, vol. 2, n° 1, pp. 7-9, 202.
- [11] Goodfellow, «Componentes de cerámica,» Division de ceramicas, Londres, 2020.
- [12] A. Cajal, «Aluminum nitrate: formulas, properties, uses and risks,» Lifeder, 2 Abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.lifeder.com/nitrato-de-aluminio/>. [Último acceso: 01 Julio 2021].
- [13] C. R. Lukely Works, «Ceramic Substrates and Components Ltd,» Scs, Reino Unido, 2005.
- [14] Satnano, «Research and Application of Aluminum Nitride Ceramic and Aluminum Nitride,» Xiaqiao Industry, Dongcheng Dist., Dongguan, Guangdong, Tokio, 2019.
- [15] H. R. F. J. J. Taborda, «Structural and morphological analysis of aluminum nitride films of obtained by pulsed laser deposition,» *Dialnet*, vol. 20, n° 2, pp. 0124-8170, 2010.
- [16] S. E. Monsalve, «Síntesis y caracterización de películas delgadas de nitruro de aluminio hidrogenado,» Centrum, Lima, 2017.
- [17] Goodfelloow, «Glass ceramic components,» Londres, 2008.
- [18] Lu, Z., Pfender, E., «Synthesis of AlN powder in a triple torch plasma reactor,» *9th International Symposium on Plasma Chemistry (Italy)*, pp. 675 - 680, 1989.
- [19] O. Sánchez Garrido, «ICMM. Surface & Coatings Technology,» *Departamento de Física e ingeniería de superficies*, pp. 140 - 144, 2004.
- [20] J. Emsley, The elements, Oxford, UK: Claredon Press. Tercera edición, 1988.
- [21] J. Chaudhuri, L. Nyakiti, R.G. Lee, Z. Gu, J.H. Edgar, J.G. Wen, *Mater Charac* 58, pp. 672 - 679, 2006.
- [22] J. Olivares, S. González-Castilla, M. Clement, A. Sanz Hervás, L. Vergara, J. Sangrador, E. Iborra, *Diam Relat Mater* 16, Vols. %1 de %24 - 7, pp. 1421 - 1424, 2007.
- [23] Bilodeau, J., Proulx, P., Moura, F., Munz R, «A study of the nucleation and growth of ultrafine AlN powder in a plasma reactor,» *11th International Symposium on Plasma Chemistry (England)*, pp. 356 - 680, 1993.
- [24] K.H. Chiu, J.H. Chen, H.R. Chen, R.S. Huang, *Thin Solid Films* 515, pp. 4819 - 4825, 2007.
- [25] K. Jang, K. Lee, J. Kim, S. Hwang, J. Lee, S.K. Dhungel, S. Jung, J. Yi, *Mat Sci Semicon Proc* 9, pp. 1137 - 1141, 2006.

- [26] J.X. Zhang, H. Cheng, Y.Z. Chen, A. Uddin, S. Yuan, S.J. Geng, S. Zhang, *Surf Coat Tech* 198 , pp. 68 - 73, 2005.
- [27] A.S. Gudovskikh, J. Alvarez, J.P. Kleider, V.P. CIENCIA UANL / VOL. XI, p. 271, Julio - Septiembre 2008.
- [28] Afanasjev, V.V. Luchinin, A.P. Sazanov, E.I., *Sensors Actuators A-Phys* 113, pp. 355 - 359, 2004.
- [29] G.M. Prinz, A. Ladenburger, M. Feneberg, M. Schirra, S.B. Thapa, M. Bickermann, B.M. Epelbaum, F. Scholz, K. Thonke, R. Sauer, *Superlattices Microst* 40 , pp. 513 - 518, 2006.
- [30] V.M. Pantojas, W. Otaño-Rivera, J.N. Caraballo, *Thin Solid Films* 492, pp. 118 - 123, 2005.
- [31] L. Trinkler, B. Berzina, A. Auzina, M. Benabdesselam, P. Iacconi, *Nucl Instrum B*, pp. 354 - 357, 2007.
- [32] Ayumu Sato, Kyoko Azumada, Toshiyuki Atsumori and Kazuhiko Hara, *J Crys Growth*, pp. 379 - 382, 2007.
- [33] J. Taborda, «PELÍCULAS DELGADAS DE NITRURO DE ALUMINIO (AlN),» *Scientia Et Technica [en línea]*, pp. 218 - 223, 2011.
- [34] H. Uchida, M. Yamashita, S. Hanaki, T. Fujimoto, , *Vacuum*, pp. 1356 - 1361, 2006.
- [35] N. Takahashi, Y. Matsumoto, T. Nakamura, *J Phys Chem Solids*, vol. 4, pp. 665 - 668, 2006.
- [36] V.A. Lavrenko, J. Desmaison, A.D. Panasyuk, M. Deismaison-Brut, J. Eur, *Ceram*, p. 357, 2003.
- [37] G.A. Slack, L.J. Schowalter, D. Moreli, J.A. Freitas Jr, *J Crys Growth* 246 , p. 287, 2002.
- [38] L. Angarita, C. Palacio, «Síntesis de películas delgadas por la técnica de magnetron sputtering a partir de blancos de renio y boro,» Universidad EAFIT, Medellín, Col, 2017.
- [39] J.A. Pérez, H. Riascos, «Películas Nanoestructuradas de Óxido De Zinc (Zno),» *Sci. Tech*, n° No 39, pp. 416 - 421 , 2008.
- [40] R. Lopez, M. Acevedes, «Estudio de cátodo-luminiscencia de materiales dieléctricos con exceso de silicio,» Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Mexico D.F, 2010.
- [41] D. Ponce, E. Martinez, R. Castro, A. Ponce, «Estudio estructural e películas delgadas de nitruro de aluminio (AlN) policristalino,» Tecnológico de Monterrey, Mexico D.F, 2006.
- [42] «Coherent,» 2021. [En línea]. Available: <https://es.coherent.com/applications/scientific/ablation-processes>. [Último acceso: 2021 07 01].
- [43] C. Aragón, F. Peñalba, J.A. Aguilera, «Curves of growth of neutral atom and ion lines emitted by a láser induced plasma,» *Spectrochim*, vol. Part B: Atom, n° 60, pp. 879 - 887, 2005.
- [44] Choi, Y.-K., H.-S. Im y K.-W. Jung, «Temporal evolution of láser-ablated coins probed by time-of-flight mass spectrometry,» *Appl. Surf. Sci*, n° 150 (1-4), pp. 152 - 160, 1999.
- [45] P. Eciija, «Fundamental processes in nanosecond pulsed láser,» n° Rev. A: 77(3) 032904/1-032904/8, 2008.
- [46] S. Gammino, «Preliminary tests for the electron cyclotron resonance ion source coupled to a láser ion source for charge state enhancement experiment,» *Rev. Sci. Instrum.:* 71(2, Pt.II), pp. 1119 - 1121, 2000.
- [47] G. Giardini, «AlN thin film deposition by pulsed láser ablation of Al in NH₃,» *Thin Solid Films:* 295(1-2), pp. 77 - 82, 1997.
- [48] J. Perez, H. Riascos, F. Jimenez, J. Caicedo, «Análisis estructural y morfológico de películas de nitruro de aluminio obtenidas por deposición de láser pulsado,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, pp. 107 - 115, 30 Noviembre 2010.
- [49] H. Yoshiyama, S. Tanaka, Y. Mikami, S. Ohshio, J. Nishiura, H. Kawakami, H. Kobayashi, *J. Cryst, Growth* 86, pp. 56 - 61, 1988.
- [50] N. Fujimura, T. Nishihara, S. Goto, J. Xu, T. Ito, *J. Cryst, Growth* 130 , p. 269, 1993.
- [51] S. Bakalova, A. Szekeres, A. Cziraki, C.P. Lungu, S. Grigorescu, G. Socol, E. Axente, I.N. Mihailescu, *Appl. Surf. Sci.*, pp. 8215 - 8218.
- [52] C.D. Wagner, W.M. Riggs, L.E. Davis, J.F. Moulder, G.E. Muilenberg , «Handbook of X-ray Photoelectron Spectroscopy,» *Physical Electronics*, 1979.
- [53] X. Xu, *J. Appl, Phys*. 77, pp. 6715 - 6719, 1995.
- [54] B. Ruiz, «Síntesis del nitruro de aluminio sobre un sustrato de aluminio 7022-T6 por medio de nitruración iónica,» *Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey*, Abril 2002.
- [55] G. Rosas, «Inecol,» Instituto de ecología, A.C, [En línea]. Available: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic>. [Último acceso: 07 Julio 2021].