

PELÍCULAS DELGADAS DE NITRURO DE ALUMINIO (AlN)

Thin film aluminum nitride (AlN)

RESUMEN

Este documento pretende hacer una revisión de las principales características estructurales y morfológicas del nitruro de aluminio –AlN– específicamente cuando este es depositado por Magnetron Sputtering ó por medio de Ablación Láser (PLD). Igualmente como influyen los parámetros de crecimiento como presión de gas ambiente (N_2), temperatura de sustrato o tiempo de deposición en la calidad y orientación cristalina de las películas delgadas de AlN.

PALABRAS CLAVES: *Nitruro de Aluminio (AlN), Magnetron Sputtering, Ablación Láser, Difracción de Rayos X.*

ABSTRACT

This article on Aluminum Nitride (AlN) and their structural and morphology properties. The properties of ionic and electronic conduction of these compounds and their potential applications ranging from coatings to optoelectronics. Also when it is deposited by magnetron sputtering or by laser ablation (PLD).

KEYWORDS: *Sputtering, Aluminum nitride (AlN), Laser Ablation (PLD)*

1. INTRODUCCIÓN

Existe un amplio interés en el nitruro de aluminio hexagonal por su aplicación en LED's y detectores en el azul y ultravioleta, debido a su notable estabilidad térmica y química, también es conveniente para su aplicación en ambientes extremos de altas temperaturas. [1-3]. El nitruro de aluminio cristaliza en el sistema hexagonal, con una estructura de tipo wurtzita (caracterizada por sus constantes de red a y c) experimentalmente se encuentra que la fase wurtzita es la estructura cristalina más estable para el AlN. Es el material de banda más ancha a temperatura ambiente ($E_g = 6.2$ eV) siendo considerado un semiconductor del grupo III-V lo que le confiere propiedades luminiscentes. [4 -5]. Su alto gap a temperatura ambiente convierten a este nitruro metálico en un excelente candidato para aplicaciones como dispositivos optoelectrónicos, sensores acústicos [1,2], sensores de gas [4,5], diodos led [6,7] entre otras aplicaciones. Su red cristalina muestra como cada átomo de aluminio está ligado a cuatro átomos de nitrógeno y viceversa, formando un tetraedro distorsionado con tres enlaces Al-N(i) ($i = 1,2,3$) separados 120° y situados en un plano perpendicular al enlace Al-N(0) en la dirección del eje c , como se observa en la figura 1 [7]. Es de nuestro interés conocer la influencia de las condiciones de crecimiento (temperatura sustrato, presión de gas depósito, tiempo depósito y demás) al utilizar técnicas diferentes como PLD y Sputtering. Prestamos mayor interés en las grandes ventajas que tiene aplicar la técnica de ablación láser (PLD) en el crecimiento de estas películas por ser una técnica altamente energética.

Fecha de Recepción: 10 de Mayo de 2010

Fecha de Aceptación: 8 de Junio de 2011

JAIME ANDRÉS PÉREZ TABORDA

Estudiante Ingeniería Física

Grupo Plasma Láser y Aplicaciones

Universidad Tecnológica de Pereira

jaimeandres.perez@gmail.com

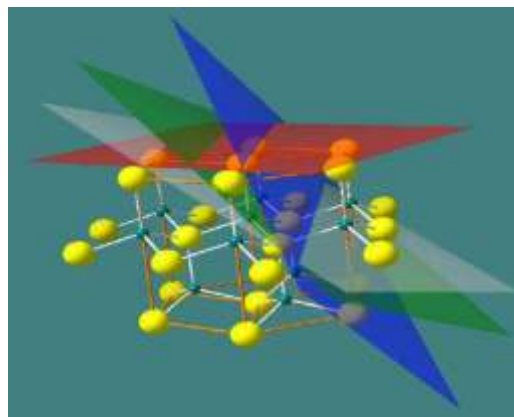


Figura 1. Red cristalina del nitruro de aluminio. El plano (002) se representa en rojo, el (101) en azul, el (102) en verde y el (103) en gris. Los átomos de amarillo corresponden al aluminio y los verdes al nitrógeno. [8]

2. TÉCNICAS DE CRECIMIENTO

En 1959 Long fue el primero en sintetizar AlN utilizando tecnología de plasma. El AlN se formó por efecto del arco eléctrico producido por electrodos de aluminio en atmósfera de nitrógeno. En 1975 Cantellup sintetizó AlN 85% puro por nitruración de polvo de aluminio en un plasma de radiofrecuencia [9-10]. En 1977, esta técnica fue mejorada por Zyatkevich, obteniendo AlN 94% puro [11-12]. En 1993 Bilodeau comprobó que el tamaño de las partículas de AlN obtenidas en un reactor de plasma térmico no dependen del tiempo de residencia en las zonas calientes del reactor [13]. En 1999 Pathak sintetizó AlN por carbonitruración de Al_2O_3 , utilizando C(s) y $N_2(g)$ [14].

En el 2001 Kim fue el primero en reportar la síntesis de AlN en un reactor con cámara de expansión, en donde ocurría la síntesis de AlN [15]. Hay diversas técnicas para la fabricación de películas delgadas de nitruro de aluminio: depósito por vapor químico (CVD: chemical vapor deposition), [16-18] epitaxia de haces moleculares (MBE: molecular beam epitaxy), [19-20] depósito asistido por haz de iones (ion beam assisted deposition), [21-22] erosión iónica reactiva (reactive magnetron Sputtering), o deposición por láser pulsado (PLD). Siendo de mayor interés estas dos últimas técnicas. El magnetron Sputtering es una técnica relativamente económica que ofrece múltiples beneficios como plasma del material ablacionado, conservación de la estequiometría entre otras.

2.1 PELÍCULAS DELGADAS DE NITRURO DE ALUMINIO OBTENIDAS POR SPUTTERING

Para el proceso de Sputtering se necesita de una cámara a la que se le ha hecho vacío y en donde se hace pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos. A baja presión y por efecto de la diferencia de potencial los átomos del gas residual se ionizan y se establece una pequeña corriente eléctrica. Los iones del gas residual chocan contra los electrodos arrancando parte del material que forma una nube más o menos densa a su alrededor y que se deposita en las superficies circundantes [23-24]. Una de las técnicas de deposición de materiales basada en el principio de Sputtering antes mencionado, es la de Magnetron Sputtering. Esta se caracteriza por utilizar campos magnéticos transversales a los campos eléctricos en la superficie del blanco (ver **Figura2**). La aplicación de este campo magnético transversal da lugar a cambios importantes en el proceso básico de Sputtering [25]. Los electrones secundarios generados en el blanco no bombardean el sustrato debido a que son atrapados en trayectorias cicloidales cerca del blanco, así disminuye la temperatura a la que se calienta el sustrato y disminuye el daño por radiación. [26, 27] Por medio de esta técnica se han crecido películas policristalinas de AlN a baja temperatura (ambiente) orientadas en el eje «c», en una región amplia de sustrato (del orden de cm^2 e incluso m^2 para aplicaciones industriales) [28,29].

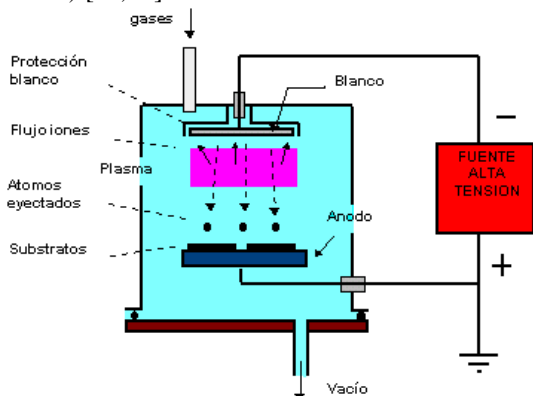


Figura2. Esquema experimental de deposición por Magnetron Sputtering. [9]

Durante este proceso de pulverización iónica, las moléculas de un gas reactivo (argón, oxígeno, nitrógeno) se combinan con los átomos erosionados provenientes de un blanco metálico (para DC) o cerámico (para RF) para formar un compuesto en la superficie de un sustrato. Las propiedades estructurales, ópticas y electrónicas, se pueden modificar dependiendo de las condiciones experimentales de depósito. Debido a la afinidad del AlN por el oxígeno, es posible que la superficie de las películas contenga una capa de óxido que modifique las propiedades físicas y, en consecuencia, la estructura electrónica, lo que produce corrimientos en los picos de luminiscencia. [30] La luminiscencia es un proceso que se caracteriza por un espectro de emisión con una banda dominante centrada en 400 nm, aproximadamente. Esta emisión se atribuye a una recombinación de procesos relacionados con los dominios de oxígeno en la red de AlN. [31-32] La alúmina Al_2O_3 es típica de todos los aluminos siendo la forma natural en la que el Al se protege ante la presencia del O_2 .

2.2 CRECIMIENTO DE PELÍCULAS DE (AlN) POR ABLACIÓN LÁSER

La técnica de deposición por láser pulsado, PLD (en inglés Pulsed Láser Deposition) se basa en la evaporación ultra-rápida (del orden de nanosegundos o femtosegundos) del material de interés (llamado blanco) por medio de un haz láser pulsado de alta potencia. El material evaporado forma un plasma producto de la recombinación de las especies presentes en la ablación y en el gas de trabajo. La forma que toma el plasma es conocida como pluma, la cual se deposita sobre un sustrato en donde se conserva con gran fiabilidad la estequiometría del compuesto evaporado [33]. Las ventajas del PLD frente a otras técnicas de deposición radican en la reproducibilidad de las propiedades de las películas fabricadas, la posibilidad de controlar los parámetros que rigen el proceso (obteniendo películas de alta calidad para temperaturas de trabajo relativamente bajas), y la conservación de la estequiometría de las películas respecto a los elementos precursores. [34-36] Las películas delgadas fabricadas mediante PLD se ven influenciadas por diversos factores: desde la velocidad de deposición de las partículas en el sustrato hasta la temperatura del mismo, pasando por el coeficiente de adsorción, la presencia de especies eléctricamente cargadas, la distancia blanco sustrato, la rata de giro del sustrato y del blanco entre otras. [34-37] Como resultado se generan películas delgadas de metales, (Gammino et al., 2000) semiconductores y aislantes de alta calidad, películas con múltiples capas las cuales poseen distintas fases, superconductores, etc. Una descripción detallada de esta técnica se encuentra en la referencia [35], en la **figura 3** se muestra un esquema de PLD. La ablación en metales, comienza con un efecto fotoeléctrico multifotónico que deja una densidad de carga positiva elevada en el metal, provocando una expulsión de iones y otros fragmentos con energías de varios centenares de eV. [33,37].

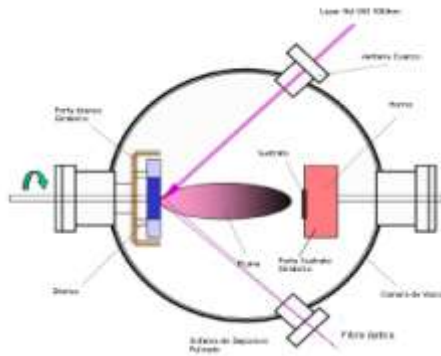


Figura3. Esquema experimental de deposición por láser pulsado para películas delgadas [35].

La interacción de electrones, iones y neutrones con la radiación láser desencadena nuevos mecanismos, modificando los grados de ionización y, consecuentemente, acelerando aún más a todas las especies cargadas. Por ejemplo, la ablación de Aluminio en atmósfera de N_2 es eficaz para producir películas de AlN que tienen una gran importancia en el diseño de circuitos electrónicos. [36-38] El plasma, subproducto importantísimo de la ablación, puede ser analizado por medio de los espectros de emisión (LIBS) la cual permite caracterizar las densidades electrónicas y temperaturas del plasma además de ser una técnica utilizada para el análisis químico. También es posible analizar los iones producidos por ablación láser recogiendo su espectro de masas en tiempo de vuelo (T.O.F) [38-40]. Autores como (Chenglu Lin et al) han utilizado un sistema PLD basado en un láser excimero de KrF, Lamda Physik de 248 nm y con una energía de 600 mJ/pulso, una presión de depósito de $6,67 \times 10^{-5}$ Pa y una temperatura ambiente para el sustrato. Para estas condiciones se logra crecer películas de AlN policristalinas con espesores de 100nm en promedio para 1h de deposición [41]. Es importante anotar, que hasta el momento no se ha reportado AlN puramente epitaxial. Autores como (R.D. Vispute et al) han crecido AlN altamente orientado, pero en últimas policristalino. Para esto han utilizando zafiro como sustrato y con condiciones de crecimiento de 2 y 10 Pa en la presión de N_2 y 900°C como temperatura del sustrato. La densidad de energía del láser fue 2 J por cm^2 .

3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

Para el caso del nitruro de aluminio (AlN) – hexagonal-con propiedades piezoeléctricas, se desea que este tenga una buena calidad cristalina y preferiblemente con una intensa orientación cristalográfica (002). Esto se estudia desde el punto de vista estructural (difracción de rayos X – DRX), (Espectrofotometría de infrarrojos por transformada de Fourier – FTIR) y (morfológico con microscopía electrónica de barrido – SEM). De esta manera se obtienen los parámetros de depósito del AlN más adecuados para conseguir un material con las propiedades cristalinas y piezoeléctricas óptimas.

3.1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL

3.1.1. Difracción de rayos X: En esta técnica la energía de radiación de los rayos X se transfiere a un electrón que se encuentre en las capas más internas del átomo. El fotoelectrón removido transporta cierta energía cinética E_c . Esta energía corresponde a la energía inicial del fotón de rayos X ($h\nu$) menos la barrera de potencial que el electrón debe vencer para poder salir de la muestra, comúnmente conocido como energía de enlace (E_e) y la función de trabajo (Φ). [42]

$$E_c = h\nu - E_e - \Phi \quad (1)$$

El hecho de poseer una longitud de onda del orden de los Å, rango habitual para las distancias interatómicas en los sólidos, convierte a los rayos X en una excelente sonda para estudiar la estructura cristalina de muchos materiales. En la interacción entre un haz de rayos X y un sólido cristalino, además del proceso de absorción, tiene lugar un fenómeno de difracción. En éste último se cumple la ley de Bragg [42,43]

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2)$$

donde d es la distancia interplanar, θ es el ángulo de Bragg, n un número entero y λ es la longitud de onda. Es conveniente señalar que esta expresión fue formulada por Bragg imponiendo la condición de reflexión especular en su deducción. Sin embargo, más tarde Von Laue desarrolló un formalismo alternativo con el que se obtiene una expresión tridimensional que en su forma escalar coincide con la ecuación (2) y en cuya deducción no es necesario introducir la premisa *ad hoc* de reflexión especular. Por tanto, a partir de la medida de los ángulos de difracción se puede obtener información sobre los planos formados por los diferentes átomos que constituyen el material en cuestión. El tamaño de grano promedio es usualmente determinado tomando el ensanchamiento de las reflexiones Bragg en DRX. Para esto se utiliza la formula Scherrer, procedimiento en donde se obtiene un valor aproximado a partir del ancho del pico de su altura media (FWHM), sin embargo existen otro tipo de métodos que pueden ofrecer resultados más precisos como en el que se utiliza el ancho integral del pico o el método Warren-Averbach.

$$Gs = \frac{0.9 \lambda}{(FWHM) \cos \theta} \quad (3)$$

La **figura 4** muestra un difractograma de varias películas de AlN depositadas por la técnica de la pulverización reactiva (*Sputtering*). De acuerdo con los resultados presentados por otros autores, puede comprobarse que a bajas presiones la textura para la dirección (002) es muy grande (es decir, el pico correspondiente a la reflexión de los planos (002) la cual predomina claramente sobre todos los demás), lo cual demuestra que se ha suministrado suficiente energía al sustrato durante el crecimiento de la película como para que ésta se encuentre completamente orientada según la dirección (002). A medida que aumenta la presión empiezan a aparecer las reflexiones debidas a los planos (103) y (102), inclinados $31'6''$ y $42'7''$ respectivamente respecto

a los planos (002), mientras que simultáneamente decrece el pico debido a la reflexión (002). Esto indica que la energía proporcionada al sustrato ya no es suficiente como para producir películas orientadas con el eje c perpendicular a la superficie del sustrato. [42-46] La reflexión correspondiente a los planos (101), inclinados $61'6''$ respecto a los planos (002), prácticamente no es visible en los difractogramas que aparecen en la **figura 4**. En resumen, puede decirse que con el fin de obtener películas con orientación preferente según el eje c (es decir, con dicho eje perpendicular a la superficie del sustrato, orientación 002) cuando el sustrato se encuentra aislado eléctricamente en principio la presión de trabajo deberá ser baja, para que las partículas responsables del suministro de energía y el sustrato sufra menos colisiones antes de llegar a él y de esta forma su aporte energético sea mayor. [45-49] Para las películas delgadas de AlN obtenidas por PLD, autores como C. Cibert et al. han obtenido orientaciones altamente definidas en (002). Utilizando un láser excímero (Tuiláser TFS M100) con una longitud de onda de 248 nm, 24 ns en la duración de los pulsos una energía de 180 mJ por pulso y una tasa de repetición de 10Hz reporta otro parámetro a tener en cuenta, la temperatura del sustrato, la cual influye enormemente en la estructura del AlN. -C. Cibert et al ha reportado que para las películas de AlN con espesores promedios de 400 a 450 nm el pico que se exhibe alrededor de 36° corresponde a la orientación (002) la cual es altamente afectada por el incremento de la temperatura del sustrato. [50,51] Estos cambios son atribuibles a procesos de difusión y al incremento de nanocristales en las películas. Se observa igualmente que desde una temperatura de 400°C se hace presente la orientación (004) en $\theta \sim 76^\circ$ la cual se desarrolla aun mas en 800°C mostrando nuevamente la importancia de la temperatura de sustrato en el crecimiento de películas delgadas de AlN. Autores como Mohri et al, han depositado películas a diferentes presiones de N_2 por medio de PLD.

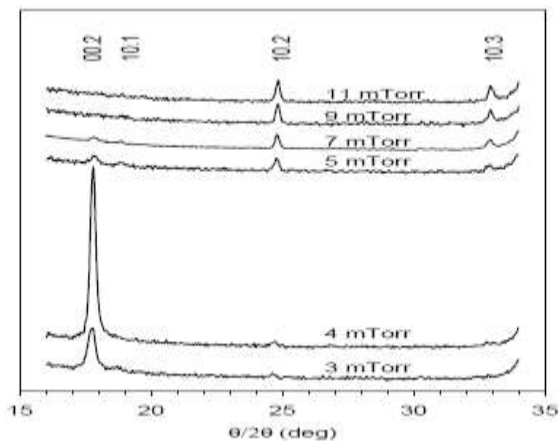


Figura4. Difractograma de rayos X de películas de AlN depositadas por la técnica de la pulverización reactiva (*Sputtering*) a diferentes presiones de depósito para una concentración de nitrógeno del 30% y una tensión de cátodo de 1.700 V. [47]

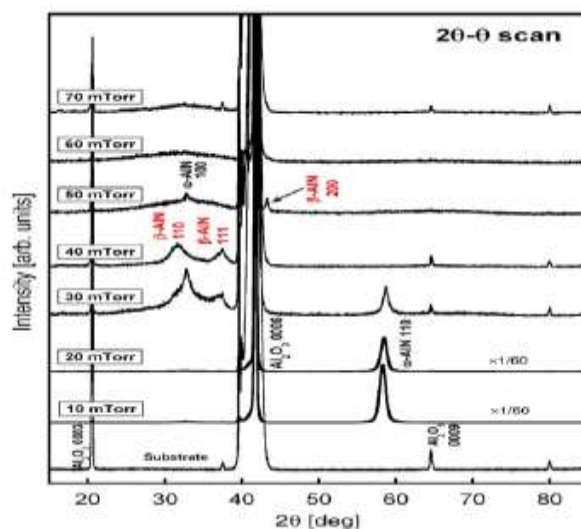


Figura 5. Difractograma de rayos X para películas delgadas de AlN depositadas por ablación láser a diferentes presiones de gas ambiente. [51]

En este caso se acudió a un haz de láser Excimer ArF ($\lambda = 193 \text{ nm}$, y un ancho de pulso de 20 ns) y una energía de 100 mJ, se enfoco a través de una lente esférica con un ángulo de incidencia de 45° . El área de irradiación en el blanco es aproximadamente de 2 mm^2 . La fluencia y la irradiancia fueron de 10 J/cm^2 y $1,5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, respectivamente. La tasa de repetición de los pulsos fue de 10 Hz. [51] Como se observa en la **figura 5**, las películas depositadas a 10 mTorr muestran una clara fase cubica α ALN-110 la misma que se sostiene para una presión de depósito de 20 mTorr. Al aumentar la presión de depósito de N_2 a 50 mTorr se observa para un ángulo de 32° la fase correspondiente a α ALN-100, la cual desaparece a incrementar la presión de depósito. Esto demuestra claramente lo importante que es la presión de depósito en el momento de crecer películas AlN altamente orientadas, pues tenemos varias fases presentes con tan solo aumentar 10 mTorr de presión. [51]

3.1.2 Espectrofotometría de Infrarrojos por Transformada De Fourier (FTIR):

Es una técnica no destructiva ampliamente utilizada en la caracterización de materiales en forma de película delgada, se basa en la absorción de fotones por los modos de vibración de los átomos enlazados en un sólido, al hacer incidir sobre él un rayo de luz con una longitud de onda concreta en el rango del infrarrojo medio. [52] Puesto que el nitruro de aluminio con estructura *wurtzita* tiene cuatro átomos en la celda unitaria, existen nueve modos ópticos y tres modos acústicos para $k \approx 0$ (en el centro de la zona de Brillouin). De entre todos estos modos, sólo los modos A1 y E1 pueden activarse por la radiación infrarroja. La existencia de los dos modos se debe a la excitación por parte de la señal incidente de los modos ópticos E1(TO) y A1(TO). Los picos correspondientes a los modos E1(TO) y A1(TO), en las medidas de reflexión aparece el correspondiente al modo A1(LO) en una zona cercana a los 895 cm^{-1} , así como el correspondiente al modo

E1(LO) en torno a los 905 cm^{-1} . [48-52]. Típicamente se observa un pico de absorción alrededor de 670 cm^{-1} que corresponde al modo óptico transversal del modo fonónico (E1 (TO) del AlN. [48-52] Acorde con reportes anteriores autores como -An et al. el- muestran como el aumento de la amplitud del pico de absorción indica una mejora del grado de cristalización de los depósitos cuando la temperatura aumenta, el pico de absorción es mucho más visible y profundo. Los modos transversales ópticos E1(TO) (~ 672 cm^{-1}) y A1(TO) (~ 611 cm^{-1}) corresponden al nitruro de aluminio hexagonal, [48] relacionando los dos tipos de enlace entre el nitrógeno y el aluminio presentes en la molécula. El pico correspondiente al modo A1(LO) del AlN aparece en una zona cercana a 895 cm^{-1} , y se ha observado que además aparece un segundo pico debido al modo E1(LO) alrededor de 905 cm^{-1} . [48-53]

4.1. CARACTERIZACIÓN MORFOLOGICA

4.1.1 Microscopía Electrónica De Barrido (SEM): En esta microscopía, se barre la superficie de la muestra que se quiere analizar con un haz de electrones muy energéticos, colimado y focalizado previamente por un conjunto de lentes electrostáticas. Como consecuencia de la interacción del haz con la muestra se producen diversos fenómenos, entre los cuales se encuentra la emisión de electrones retrodispersados y electrones secundarios, que son los que generalmente se analizan con este tipo de microscopios [54-56]. La intensidad de estas emisiones depende del ángulo de incidencia del haz sobre la muestra y, por consiguiente, de la topografía de ésta. [56-59]. Sin embargo, la energía de los electrones secundarios es baja, por lo que éstos provienen únicamente de la parte de la muestra más cercana a la superficie. [57-59] Utilizando un blanco de AlN -Kitahara T. et al- ha depositado con un láser Excimer de KrF a una tasa de repetición de 100 Hz, y un ancho de pulso de 15 ns con una fluencia del láser de 2.8 J/cm^2 películas de AlN. El mismo autor ha reportado que para fluencias superiores a 5 J/cm^2 aumenta la producción de gotas de ebullición o droplets. Estas salpicaduras son propias de la técnica de PLD y son ocasionadas por el desprendimiento de macropartículas que al impactar con el sustrato generan este tipo de imperfecciones en las películas. [58-60] Los cambios en la morfología del AlN frente a la presión de depósito son muy evidente en el trabajo presentado por -G. Shukla T. et al- quienes utilizando un Nd:YAG en su segundo armónico con 400 mJ / pulso y un ancho de pulso de 8 ns a temperatura ambiente, crecieron durante 60 minutos películas con buena calidad cristalina (favoreciendo la orientación 002 para las presiones 10^{-1} y 5×10^{-2} Torr) y películas con orientaciones preferentes (101) cuando la presión de trabajo fue de 100 y 10 mTorr. [60] Se observa para la presión de 10^{-1} Torr el comienzo de un crecimiento columnar, lo que favorece la formación de cráteres (o formación de islas) que se pueden observar al disminuir la presión de N_2 . -ver Figura 6- La fase wurtzita del AlN es más estable debido a su estrechos pues se presenta

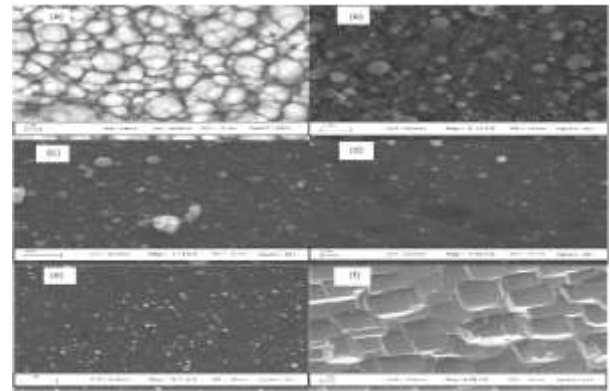


Figura 6. Imágenes SEM de películas delgadas de AlN depositadas por PLD a varias presiones: (a) 100 Torr; (b) 50 Torr; (c) 10 Torr; (d) 1 Torr; (e) 10^{-1} Torr; (f) 5×10^{-2} Torr. [61]

un apilamiento de la fase zincblenda donde la orientación (002) tiene la menor energía [60-61]. Como resultado, las islas que corresponden a esta menor energía superficial favorece al proceso de nucleación traduciéndose esto en un crecimiento con orientación paralela a la superficie a lo largo de (002). A mayores presiones, el aumento de número de las colisiones en el plasma lo que puede dar lugar a una variación en el crecimiento del AlN y afectando enormemente la dirección de las películas y aumento el tamaño de grano y el espesor. [61]

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. Dubois, Aluminium nitride and lead zirconate-titanate thin films for ultrasonic applications: Integration, properties and devices, Tesis doctoral, Département des Matériaux, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suiza), 1999.
- [2] H. Harima, J. Phys.: Condens. Matter 14 (2002), pp. R967-R993.
- [3] G. F. Iriarte, AlN Thin Film Electroacoustic Devices, Acta Universitatis Upsaliensis, Uppsala Universitet, 2003.
- [4] Vurghaftman, J. R. Meyer and L. R. Ram-Mohan, J. Appl. Physics 89 (2001), pp.5815- 5875
- [5] A.S. Gudovskikh, J. Alvarez, J.P. Kleider, V.P. Afanasjev, V.V. Luchinin, A.P. Sazanov, E.I. Terukov, Sensors Actuators A-Phys 113 (2004): 355-359 pp
- [6] J. Emsley. The elements. Clarendon Press. Tercera edición. 1988. Oxford, UK
- [7] T. Ikeda, *Fundamentals of Piezoelectricity*, Oxford University Press, Nueva York, 1996.
- [8] L. Vergara, Películas delgadas de nitruro de aluminio depositadas por pulverización y su aplicación a dispositivos de ondas acústicas. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, (2005) p 12-56.
- [9] O. Sánchez Garrido. Departamento de Física e ingeniería de superficies, ICMM. Surface & Coatings Technology, 180-181C, 140-144 (2004).
- [10] J. Emsley. The elements. Clarendon Press. Tercera edición. 1988. Oxford, UK.
- [11] J. Chaudhuri, L. Nyakiti, R.G. Lee, Z. Gu, J.H. Edgar, J.G. Wen, Mater Charac 58 (2006) 8-9: 672-679p.
- [12] J. Olivares, S. González-Castilla, M. Clement, A. Sanz-Hervás, L. Vergara, J. Sangrador, E. Iborra, Diam Relat Mater 16 (2007) 4-7: 1421-1424 pp.
- [13] J.P. Kar, G. Bose, S. Tuli, Vacuum 81 (2006): 494-498

- [14] K.H. Chiu, J.H. Chen, H.R. Chen, R.S. Huang, *Thin Solid Films* 515 (2007) 4819-4825 pp.
- [15] K. Jang, K. Lee, J. Kim, S. Hwang, J. Lee, S.K. Dhungel, S. Jung, J. Yi, *Mat Sci Semicon Proc* 9 (2006): 1137-1141
- [16] 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 (2006): 513-518 pp.
- [17] T.P. Drüsedau, T. Neubert, A.N. Panckow, *Surf Coat Tech*, 163-164(2003): 164-168 pp.
- [18] V.M. Pantojas, W. Otaño-Rivera, J.N. Caraballo, *Thin Solid Films* 492 (2005): 118- 123 p.
- [19] J.X. Zhang, H. Cheng, Y.Z. Chen, A. Uddin, S. Yuan, S.J. Geng, S. Zhang, *Surf Coat Tech* 198 (2005): 68-73 pp.
- [20] A.S. Gudovskikh, J. Alvarez, J.P. Kleider, V.P. CIENCIA UANL / VOL. XI, No. 3, JULIO - SEPTIEMBRE 2008 271 Afanasjev, V.V. Luchinin, A.P. Sazanov, E.I. Terukov, *Sensors Actuators A-Phys* 113 (2004): 355-359 p
- [21] L. Trinkler, B. Berzina, A. Auzina, M. Benabdesselam, P. Iacconi, *Nucl Instrum B*, 580 (2007): 354-357 pp.
- [22] Ayumu Sato, Kyoko Azumada, Toshiyuki Atsumori and Kazuhiko Hara, *J Crys Growth*, 298 (2007): 379-382 pp.
- [23] Hitoshi Uchida, Masato Yamashita, Satoshi Hanaki and Takashi Fujimoto, *Vacuum*, 80(2006) 11-12: 1356-1361 p.
- [24] Naoyuki Takahashi, Yoriko Matsumoto and Takato Nakamura, *J Phys Chem Solids*, 67 (2006) 4: 665-668 pp.
- [25] J.R. Creighton, G.T. Wang, M.E. Coltrin, *J Crystal Growth* 298 (2007): 2-7 pp.
- [26] Q.X. Guo, T. Tanaka, M. Nishio, H. Ogawa, *Vacuum* 80 (2006): 716-718 pp.
- [27] B.H. Hwang, Ch.S. Chen, H.Y. Lu, T.Ch. Hsu, *Mat Sci and Eng A* 325 (2002): 380- 388 pp.
- [28] V.A. Lavrenko, J. Desmaison, A.D. Panasyuk, M. Deismaison-Brut, *J. Eur. Ceram. Soc.* 23 (2003) 357
- [29] G.A. Slack, L.J. Schowalter, D. Moreli, J.A. Freitas Jr., *J Crys Growth* 246 (2002) 287
- [30] A.S. Gudovskikh, J. Alvarez, J.P. Kleider, V.P. Afanasjev, V.V. Luchinin, A.P. Sazanov, E.I. Terukov, *Sensors Actuators A-Phys* 113 (2004): 355-359 pp
- [31] Konuma, M.; *Film Deposition by plasma techniques*, pp 107-125, Springer-Verlag, Berlin, Germany (1992).
- [32] Margarone, D. y otros catorce autores; *Studies of craters' dimension for long-pulse laser ablation of metal targets at various experimental conditions*, *Appl. Surf. Sci.*: 254(9), 2797-2803 (2008).
- [33] Torrisi, L., Gammino, S., Andò y L. Làska; *Tantalum ions produced by 1064 nm pulsed laser irradiation*, *J. Appl. Phys.*: 91(7), 4685-4692 (2002).
- [34] H.Riascos, "Síntesis de películas delgadas de nitruro de carbono por ablación Láser", Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira (2007)
- [35] J.A.Pérez, H.Riascos, *Películas Nanoestructuradas de Oxido De Zinc (Zno)*, *Sci. Tech.* No 39,(2008) 416: 421 pp
- [36] Aragón, C.; F. Peñalba y J.A. Aguilera; *Curves of growth of neutral atom and ion lines emitted by a laser induced plasma*, *Spectrochim. Acta, Part B: Atom.*: 60, 879-887 (2005).
- [37] Choi, Y.-K., H.-S. Im y K.-W. Jung; *Temporal evolution of laser-ablated Co⁺ ions probed by time-of-flight mass spectrometry*, *Appl. Surf. Sci.*: 150 (1-4), 152-160 (1999).
- [38] Eciija, P., *Fundamental processes in nanosecond pulsed-laser ablation of metals in vacuum*, *Phys. Rev. A:* 77(3) 032904/1-032904/8 (2008).
- [39] Gammino, S., *Preliminary tests for the electron cyclotron resonance ion source coupled to a laser ion source for charge state enhancement experiment*, *Rev. Sci. Instrum.*: 71(2, Pt.II), 1119-1121 (2000).
- [40] Giardini, G; *AlN thin film deposition by pulsed laser ablation of Al in NH₃*, *Thin Solid Films:* 295(1-2), 77-82 (1997).
- [41] B.D. Cullity, S.R. Stock, "Elements of X-ray diffraction", Prentice Hall, Nueva Jersey (2001).
- [42] M. Rodríguez-Gallego, "La difracción de los rayos X", Alambra Universidad. Madrid (1982).
- [43] A. Zeuner, H. Alves, D.M. Hofmann, B.K. Meyer, M. Heuken, J. Bläsing, A. Krost, *Appl. Phys. Lett.* 80 (2002). 2078.
- [44] F. Engelmark, G. F. Iriarte, I. V. Katardjiev, M. Ottosson, P. Muralt and S. Berg, *Vac. Sci. Technol. A* 19 (5) (2001), pp. 2664-2669.
- [45] X. H. Xu, H. S. Wu, C. J. Zhang and Z. H. Jin, *Thin Solid Films* 388 (2001), pp. 62-67.
- [46] W. J. Liu, S. J. Wu, C. M. Chen, Y. C. Lai and C. H. Chuang, *Journal of Crystal Growth* 276 (2005), pp. 525-533.
- [47] L. Vergara, Iborra, E.; Sanz-Hervas, A.; Clement, M.; Olivares, J.; Sangrador, J Assessment of the piezoelectric response of sputtered AlN films by x-ray diffraction, *Ultrasonics Symposium*, 2005 IEEE Volume 3, Issue , 18-21 Sept. 2005 Page(s): 1808 – 1811
- [48] L. Vergara, *Películas delgadas de nitruro de aluminio depositadas por pulverización y su aplicación a dispositivos de ondas acústicas*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, (2005) p 115-136.
- [49] C. Cibert et al. Pulsed laser deposition of aluminum nitride thin films for FBAR applications / *Applied Surface Science* 253 (2007) 8151-8154
- [50] S. Mohri, Tsuyoshi Yoshitake, et. Al. Growth of metastable cubic AlN by reactive pulsed laser deposition *Diamond & Related Materials* 17 (2008) 1796-1799
- [51] A. T. Collins, E. C. Lightowers and P. J. Dean, *Phys. Rev.* **158** (1967), pp. 833-838.
- [52] X. B. Zhang, T. Taliercio, S. Kolliakos and P. Lefebvre, *J. Phys.: Condens. Matter* **13** (2001), pp. 7053-7074.
- [53] T. R. Yang, M. M. Dvoynenko, Y. F. Cheng and Z. C. Feng, *Physica B* **324** (2002), pp. 268-278.
- [54] Z. An, C. Men, J. Yu, P.K. Chu, C. Lin, *J. Appl. Phys.* 94 (3) (2003) 1934- 1940.
- [55] Kelly, R.; *On the dual role of the Knudsen layer and unstable, adiabatic expansion in pulse sputtering phenomena*; *J. Chem. Phys.*: 92(8), 5047-5056 (1990).
- [56] J.H. Edgard (Ed.), *Properties of group III nitrides*, INSREC, London, 1994.
- [57] T. Prokofyeva, M. Seon, J. Vanbuskirk, M. Holtz, S. A. Nikishin, N. N. Faleev, H. Temkin and S. Zollner, *Phys. Rev. B* **63** (2001), 125313.
- [58] A. Link, K. Bitzer, R. Sauer, C. Kirchner, V. Schwegler, M. Kamp, D. G. Ebling and K. W. Benz, *J. Appl. Phys.* **86** (1999), pp. 6256-6260
- [59] S. Wolf and R. N. Tauber, *Silicon Processing for the VLSI Era: Volume I-Process Technology*, Lattice Press, California, 1986.
- [60] T. Kitahara et al, Fabrication of particle free epitaxial AlN thin films by reactive PLD combined with an electron beam and a rotating crucible, *Vacuum* 82 (2008) 109-112
- [61] G. Shukla, A. Khare , Dependence of N₂ pressure on the crystal structure and surface quality of AlN thin films deposited via pulsed laser deposition technique at room temperature, *Applied Surface Science*, 2000.