

## Propiedades estructurales y ópticas de compuestos (AlN, GaN, InN)

### Structural and optical properties of compounds (AlN, GaN, InN)

Pérez T. Jaime A<sup>1</sup>.

**Resumen.** Se presenta una revisión del estado de arte de los nitruros del grupo III, centrándose en sus propiedades estructurales y vibracionales. Igualmente, una aproximación a la relación de flujos de átomos de elemento **III** (Al, In y Ga) y **V** (N) por medio de interacciones espín-órbita ( $\Delta_{so}$ ) y campo cristalino ( $\Delta_{cc}$ ) en las sub-bandas de valencia. En el apartado óptico se relaciona la energía de la brecha prohibida y el parámetro de red con las energías de los modos vibracionales. Actualmente, es de interés los nitruros del grupo III-Ves, debido a sus ventajas únicas en dos áreas de aplicación fundamentales: diodos emisores de luz y electrónica de alta potencia y alta temperatura. Un ejemplo son los láseres de nitruro y diodos emisores de luz (LED) que han logrado tiempos de vida comercialmente atractivos, alrededor de 10000 horas.

**Palabras clave:** *Nitruro de Aluminio (AlN), Nitruro de Galio (GaN), Nitruro de Indio (InN), Semiconductor, Propiedades Ópticas, Propiedades Estructurales, Banda de energía.*

**Abstract.** The purpose of this review article is to understand the technological advances and manufacturing of the nitrides of group III-V review structural and vibrational properties. In the section related optical energy gap prohibited and the lattice parameter with the energies of the vibrational modes. Currently the interest in nitrides of group III-V is due to its unique advantages in two key application areas: light-emitting diodes and high power electronics and high temperature. The Optoelectronics market is at 20 billion dollars currently per year, and is further expand rapidly in the next decade. Then we will describe the progress, perspectives, and Challenges in the Developments of new electronic and Optoelectronic devices based on nitrides of group III - V.

<sup>1</sup> Ingeniería Física, Grupo Plasma Láser y Aplicaciones, Universidad Tecnológica de Pereira.  
Correo: jaimeandres.perez@gmail.com

**Key words:** *Aluminum Nitride (AlN), gallium nitride (GaN), Indium nitride (InN), Semiconductor, structural and optical properties, energy bands.*

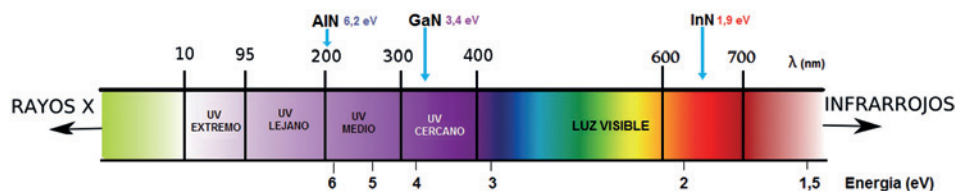
## 1. INTRODUCCIÓN

Los Nitruros del grupo III (GaN, AlN e InN) y sus aleaciones, han sido considerados durante muchos años como semiconductores ideales para la fabricación de dispositivos optoelectrónicos, que funcionen en el límite azul-ultravioleta (UV). El principal atractivo de estos materiales reside en el hecho de que todos poseen una brecha de energía directa que cubren un amplio espectro de energías, desde los 1.9 eV (rojo) del InN, pasando por 3.4 eV (UVA) del GaN, hasta los 6.2 eV (UVC) del AlN (Anderson *et al.*, 1986; Amano *et al.*, 1989).

Los primeros trabajos que se encuentran en la literatura, relacionados con la síntesis de GaN (Anderson *et al.*, 1986; Amano *et al.*, 1989), AlN (Maruska, *et al.*, 1969) e InN (Iwata, 1996) datan de los años 30. Estos materiales pioneros se presentaban en forma de polvo. Es al final de los 60 cuando Maruska *et al.* (1969), obtiene la primera película delgada cristalina de GaN, por medio de técnicas de epitaxia en fase vapor de hidruros. Las principales aplicaciones de estos materiales están relacionadas con dispositivos emisores/detectores de radiación en el rango azul-ultravioleta. Hoy, la mayoría de los dispositivos optoelectrónicos que existen en el mercado funcionan en longitudes de onda, desde el infra-rojo (IR) hasta el verde.

La posibilidad de fabricar diodos electroluminiscentes (LED) que emitan en el azul, supone disponer de dispositivos semiconductores capaces de emitir y detectar los tres colores primarios del espectro visible (RGB). La gran ventaja de los LEDs, frente a las lámparas incandescentes convencionales, estriba en el tiempo de vida, hasta 10 veces mayor, y en un consumo muy inferior. Otra posibilidad es la utilización del GaN y sus aleaciones para la emisión de luz blanca, bien por excitación de fósforos, o por combinación RGB. El almacenamiento óptico de datos es otra aplicación directa para emisoresláser de ultravioleta.

El tamaño mínimo del haz de un sistema de lectura óptica es proporcional a la longitud de onda  $\lambda$ , y el área de grabación a  $\lambda^2$ . De esta forma, al disminuir la longitud de onda, se aumenta la densidad de grabación de datos, según una ley  $1/\lambda^2$ , a la vez que se reduce el espaciado entre datos, incrementándose la velocidad de lectura del disco óptico (Anders *et al.*, 1996; Angerer *et al.*, 1997).



**Figura 1.** Espectro electromagnético, indicando la posición y su banda de energía para los Nitruros del grupo III

Hoy, la densidad de información que se obtiene en un sistema óptico con  $\lambda = 780\text{nm}$  es del orden de  $80 \text{ Mbit}/\text{cm}^2$ . Utilizando un láser de emisión azul o UV, se podría incrementar esa densidad en un factor cuatro o cinco. Otras aplicaciones interesantes de los Nitruros, consisten en la fabricación de detectores de radiación en el rango ultravioleta. Las aplicaciones en este campo pasan por sistemas de comunicaciones espaciales, detectores de ozono e incendios, respuesta biológica de la piel humana, contaminantes, entre otras.

## 2. PROPIEDADES DE LOS NITRUROS CON EL GRUPO III

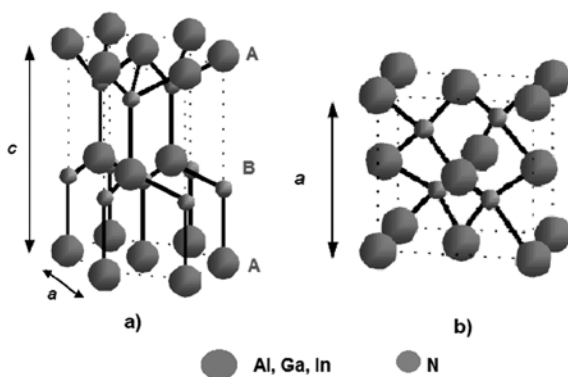
En los últimos 10 años, los Nitruros han pasado de ser unos materiales sobre los que apenas existían publicaciones en las revistas científicas internacionales, a uno de los temas más estudiados. El anuncio por Nakamura *et al.* (1994) de la consecución de un diodo LED azul con intensidad de más de 1 candela, y la aparición en el mercado, por primera vez en 1994, de un LED azul basado en GaN, de la compañía japonesa Nichia, propició una creciente divulgación de artículos y ponencias en congresos, sin precedente en el ámbito científico.

Aun así, y aunque existe un gran número de grupos de investigación que trabajan en este sistema de materiales, se dispone de mucha menos información sobre los Nitruros y algunas de sus propiedades, si se compara con otros sistemas de semiconductores, como por ejemplo los arseniuros. Existen varios trabajos que detallan las propiedades del GaN y los compuestos relacionados ( Mohammad *et al.*, 1995; EMIS, 1994) pero hay que considerar que debido a la rapidez con que hoy se progresa en este campo, desde el punto de vista aplicado, y a la inexistencia de material cristalinamente puro en volumen, no se tienen valores suficientemente exactos sobre algunos parámetros fundamentales para ser aceptados por toda la comunidad científica, existiendo algunas discrepancias (Strite y Morkoc, 1992).

## 2.1 Propiedades estructurales

Los nitruros del grupo III pueden cristalizar según tres tipos de estructura: *wurtzita* (hexagonal compacta) también denominada ( $\alpha$ -AlN,  $\alpha$ -GaN,  $\alpha$ -InN); *zinc-blenda* (cúbico) o esferalita, denominada ( $\beta$ -AlN,  $\beta$ -GaN,  $\beta$ -InN) y *rocksalt* (con estructura de cloruro sódico). Las dos primeras son las más comunes, siendo la estructura de *wurtzita* la más estable a temperatura ambiente, mientras que la *zinc-blenda* es metaestable (Akasaki y Amano, 1997; Vetchten, 1973). La estructura *zinc-blenda* cúbica se obtiene al crecer epitaxialmente sobre sustratos con estructura cristalina cúbica similar, como es el caso de *GaAs*, *Si* y *MgO* en la dirección (100) o como inclusiones cúbicas dentro de la estructura wurtzita.

La figura 2 muestra una representación de la celda unidad hexagonal de la estructura wurtzita, definida con dos parámetros de red característicos  $a$  y  $c$ , siendo  $a$  el lado del hexágono y  $c$  la altura del prisma hexagonal.



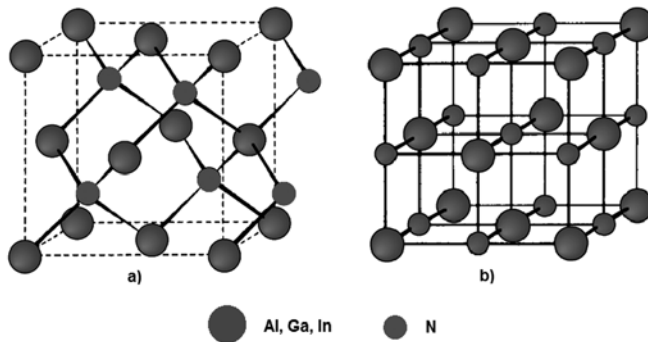
**Figura 2.** Estructura wurtzita y zinc-blenda de los Nitruros del grupo III (eje vertical en la dirección [0001]) **a)** estructura wurtzita ( $\alpha$ -AlN,  $\alpha$ -GaN,  $\alpha$ -InN); **b)** estructura zinc-blenda ( $\beta$ -AlN,  $\beta$ -GaN,  $\beta$ -InN) para un eje vertical en la dirección [111] [18].

La estructura wurtzita consiste en dos redes del tipo hexagonal compacta (HCP) cada una con uno de los dos tipos de átomos, interconectados a lo largo de la dirección del eje principal de simetría del prisma hexagonal, con una separación de  $5/8 c$ . Las estructuras wurtzita y zinc-blenda son similares, en el sentido de que cada átomo metálico (III) está coordinado con cuatro no metálicos (N) y viceversa. De hecho, sólo difieren en la secuencia de apilamiento de los planos diatómicos N-Metal. En la estructura wurtzita la secuencia en la dirección  $\langle 0001 \rangle$  es *ABABAB*, mientras que en la zinc-blenda el apilamiento es tipo *ABCABC* en la dirección  $\langle 111 \rangle$ .

Esta similitud hace posible que aparezcan inclusiones de tipo zincblenda en capas con estructura de wurtzita, especialmente en zonas en las que haya defectos de apilamiento (Karpinski, 1984; Lei, 1993). La principal característica de los nitruros, desde el punto de vista químico, es la alta energía de enlace entre el Nitrógeno y el elemento del grupo III, que es máxima en el AlN y disminuye progresivamente en el GaN y el InN. El carácter fuertemente covalente del enlace colabora, además, en que la estabilidad térmica y mecánica de los nitruros sea muy elevada. Los parámetros de red de los tres binarios (GaN, AlN, InN) para las diferentes estructuras se exponen en la tabla 1 (Johnson *et al.*, 1999; Gil *et al.*, 1998).

	Parámetros de red (Å)	EG (300K) (eV)
$\beta$ -AlN	a = 4.38	5.11 (teórico)
$\alpha$ -AlN	a = 3.112 c = 4.982	6.2
$\beta$ -GaN	a = 4.52	3.2
$\alpha$ -GaN	a = 3.189 c = 5.185	3.39
$\beta$ -InN	a = 4.98	2.2 (teórico)
$\alpha$ -InN	a = 3.548 c = 5.705	1.89, 0.9

**Tabla 1.** Parámetros de red y energía de gap de los nitruros del grupo III a temperatura ambiente (Angerer *et al.*, 1997; Naranjo, 2003).



**Figura3.** La estructura *rocksalt* puede inducirse en AlN, aplicando altas presiones (mayores a 25 kbar) pasando de una estructura zinc-blenda en 3a a una estructura *rocksalt* en 3b (Johnson *et al.*, 1999).

## 2.2 Propiedades vibracionales

Las vibraciones de la red (fonones) observables en los nitruros con estructura wurtzita, mediante espectroscopía Raman, se encuentran relacionadas en la tabla 2.

Modo de Vibración (cm-1)	AlN	GaN	InN
E2 – Baja Frecuencia	215	137	85
E2 – Alta Frecuencia	652	592	485
A1 – TO	640	546	449
E1 – LO	883	732	587
E1 – TO	668	555	457
E1 – LO	922	741	596
Referencia	[26]	[27]	[27]

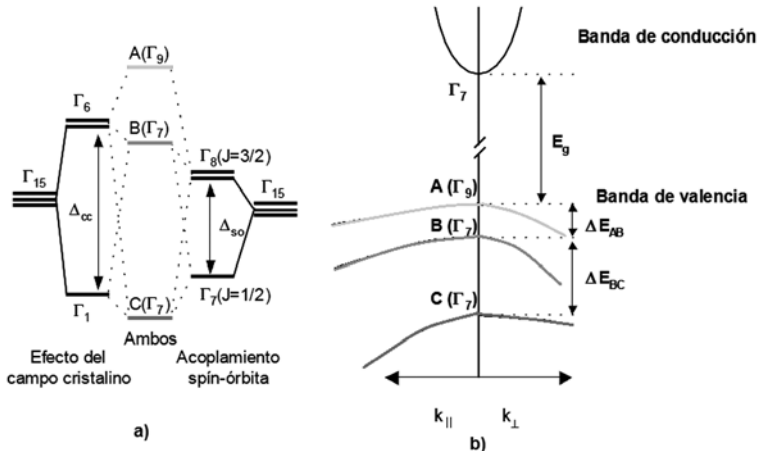
**Tabla 2.** Energías de los modos vibracionales de los nitruros en estructura wurtzita. *LO*: Longitudinal Óptico; *TO*: Transversal Óptico.

La energía del fonón óptico longitudinal (LO) es la que puede intervenir con mayor probabilidad en los procesos radiativos que involucren tres partículas. El valor de la energía de dicho fonón para el GaN está en torno a 90 meV ( 92 meV, (Grossner *et al.*, 2000) ; 86 meV, (Nipko *et al.*, 1998). Para el caso del InN, los estudios teóricos indican que la energía del fonón óptico longitudinal ha de ser menor que la del GaN, obteniéndose valores de 74 meV ( Tütüncü *et al.*, 2000), 73 meV (Grossner *et al.*, 2000) y 86 meV (Landolt, 1971).

Los resultados experimentales apoyan los cálculos teóricos antes citados. Así, Yang *et al.* obtiene un valor de 75 meV para la energía del fonón en InN hexagonal, a partir de medidas Raman y de fotoluminiscencia (Yang *et al.*, 2000). En algunos espectros de fotoluminiscencia, los valores que se obtienen son mayores, en torno a 84 meV, debido posiblemente a la existencia de múltiples emisiones en la capa de InGaN (Smith *et al.*, 1997; Pecharroman *et al.*, 2002).

### 2.3 Estructura de bandas

La principal diferencia entre los nitruros de tipo wurtzita y otros semiconductores, como el GaAs, es la rotura de la degeneración de la banda de valencia, debido a la interacción de los huecos con el campo cristalino. Por un lado, la simetría hexagonal y el carácter ligeramente iónico del enlace, hacen que se genere una asimetría en el campo local en el que están los electrones de valencia, cuya dirección es la del eje del prisma hexagonal (denominado *z*) (Gil *et al.*, 1998). Puesto que en los nitruros la banda de valencia está casi totalmente compuesta de estados tipo p, la interacción con el campo cristalino genera valores distintos de energía para el estado tipo *p<sub>z</sub>*, respecto a la de los estados *p<sub>x</sub>* y *p<sub>y</sub>*. Si se añade el efecto de acoplamiento espín-órbita, resultan tres sub-bandas de valencia. La figura 4 muestra esquemáticamente el efecto de las interacciones espín-órbita ( $\Delta_{so}$ ) y campo cristalino ( $\Delta_{cc}$ ) en las sub-bandas de valencia (Wei y Zunger, 1996; Yeo *et al.*, 1998).



**Figura 4.** a) Efecto de las interacciones de espín-órbita y del campo cristalino sobre el máximo de la banda de valencia. b.) Esquema del diagrama de bandas del GaN en la dirección paralela y perpendicular al eje c (Gil *et al.*,1998).

La figura 4b muestra el diagrama de bandas de los nitruros con estructura wurtzita, en torno al punto  $\Gamma$  de la red recíproca. Existen tres bandas de valencia debido a los desdoblamientos de la banda de valencia por las interacciones de spin-órbita y del campo cristalino (Gil *et al.*,1998). Las energías correspondientes a las sub-bandas de valencia A ( $\Gamma_9$ ), B ( $\Gamma_7$ ) y C ( $\Gamma_7$ ) mostradas en la figura 4 vienen dadas, en relación con la intensidad de la interacción con el campo cristalino y el espín-órbita, por las expresiones (Porowski, 1999; Gil *et al.*,1998):

$$E(A(\Gamma_9)) = \frac{1}{2}(\Delta_{SO} + \Delta_{cc}) \quad (1)$$

$$E(B(\Gamma_7)) = +\frac{1}{2}\left[(\Delta_{SO} + \Delta_{cc})^2 - \frac{8}{3}(\Delta_{SO} \cdot \Delta_{cc})\right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$E(C(\Gamma_7)) = -\frac{1}{2}\left[(\Delta_{SO} + \Delta_{cc})^2 - \frac{8}{3}(\Delta_{SO} \cdot \Delta_{cc})\right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

La magnitud de las interacciones ( $\Delta_{cc}$ ) y ( $\Delta_{so}$ ) no pueden ser medidas directamente, pero sí se puede medir la diferencia entre sub-bandas de valencia, es decir,  $\Delta E_{AB}$  y  $\Delta E_{BC}$ , y de ellas obtener los valores de  $\Delta_{cc}$  y  $\Delta_{so}$ , ya que:

$$\Delta E_{AB} = E(A(\Gamma_9)) - E(B(\Gamma_7)) \quad (5)$$

$$\Delta E_{BC} = E(B(\Gamma_7)) - E(C(\Gamma_7)) \tag{6}$$

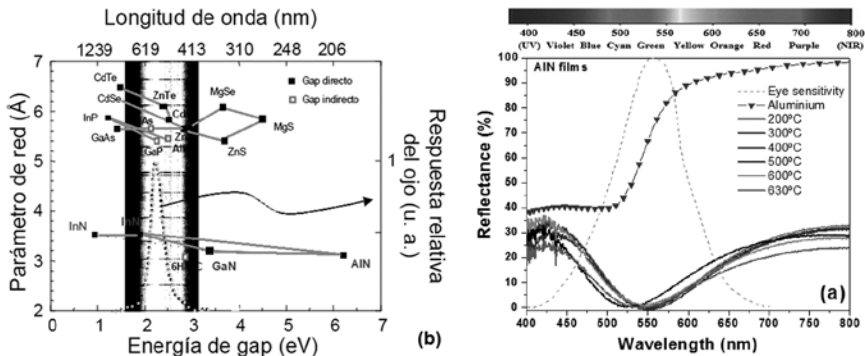
La tabla 3 muestra los valores de las interacciones del campo cristalino y spin-órbita en las sub bandas de valencia, calculadas por diversos autores:

	AlN	GaN	InN	Referencia
$\Delta_{CC}$ (meV)	- 104	30	57	[36]
	- 217	42	41	[35]
		21	17	[37]
$\Delta_{SO}$ (meV)	11	11	11	[36]
	19	13	1	[35]
		11	3	[37]

**Tabla 3.** Valores de la energía del desdoblamiento debido al campo cristalino ( $\Delta_{CC}$ ) y a la interacción espín-órbita ( $\Delta_{SO}$ ) de la banda de valencia en los nitruros.

### 3. PROPIEDADES ÓPTICAS

El GaN, al igual que el resto de los Nitruros del grupo III, posee una brecha de energía directa, propiedad que le confiere una alta eficiencia en procesos radiativos (emisión de luz) y, por tanto, ser una base ideal para dispositivos optoelectrónicos. Para comprender las propiedades ópticas del GaN, es imprescindible primero analizar su estructura de bandas. La figura 5 muestra las energías de gap y los parámetros de red de los principales semiconductores con energía de gap en el rango visible o cercano (entre 3.09 eV y 1.77 eV) junto con la curva de la respuesta espectral del ojo humano, centrada en el amarillo (línea de puntos).



**Figura 5.** (a) Dependencia de la reflectancia óptica con la temperatura para películas de AlN, depositadas sobre Si (100) (Peréz *et al.*, 2011). (b) Energía de gap y parámetro de red de las familias de semiconductores con gap en el visible (Nakamuray y Fasol, 1997; Edmond y Dmitriy, 1994).



La falta de un eje de simetría en la celda unidad de la estructura wurtzita provoca la aparición de campos cristalinos internos, que rompen la degeneración existente entre las sub-bandas de huecos pesados y ligeros de la banda de valencia. (Nakamuray y Fasol, 1997; Eckey *et al.*, 1998). Dentro de las propiedades ópticas de los nitruros del grupo III se han reportado algunos valores de índices de refracción para GaN (tabla 4) AlN (tabla 5) e InN (tabla 6) en un amplio rango de longitudes de onda (Eliseer *et al.*, 2000; Pankove *et al.*, 1970).

n del GaN	$\lambda$ (nm)	Referencia
2. 03	777	[50]
2. 397	546. 1	[51]
2. 67	367	[52]
2. 33	1240	[53]
2. 1 – 2. 4	800 – 2000	[54]
2. 5	>365	[55]
2. 42 – 2. 48	497 – 956	[56]
2. 79	365	[57]
2. 32 – 2. 55	400 - 1000	[58]

**Tabla 4.** Índices de refracción del GaN en función de la longitud de onda.

Uno de los principales problemas en el crecimiento epitaxial de los Nitruros del grupo III, reside en la inexistencia de un sustrato de alta calidad cristalina que ofrezca un buen acoplo, tanto en parámetro de red como en coeficiente de expansión térmica con la capa epitaxial, y que sea estable térmicamente.

n del AlN	$\lambda$ (nm)	Referencia
1. 98	250	[59]
2. 17 – 2. 34	250	
1. 89	300	
2. 04 – 2. 18	300	
2. 08	300	[60]
2. 2	400 - 600	[61]

**Tabla 5.** Índices de refracción del AlN en función de la longitud de onda.

n del InN	$\lambda$ (nm)	Referencia	
3. 1	620	[62]	
3. 12	660		
3. 12	740		
3. 04	780		
2. 93	820		
2. 9	880		
2. 78	910		
2. 56	1000		
2. 39	1120		
2. 12	1480		
1. 63	1600		
2. 85	-		[63]
2. 9	-		[64]

**Tabla 6.** Índices de refracción del GaN en función de la longitud de onda

Las altas temperaturas de fusión (2800 K) ( Barski *et al.*, 1996) y presiones de vapor de nitrógeno necesarias (por encima de 45 kbar) son los principales obstáculos para obtener monocristales de compuestos III-N suficientemente grandes, que pudieran servir como sustratos para realizar una homoepitaxia. Sin embargo, se han conseguido cristales de GaN a 20 kbar de presión de N<sub>2</sub> de hasta 1cm<sup>2</sup> (Wei y Zunger, 1996), con valores del ancho de altura media (full width at half maximum, FWHM) en medidas de rayos-X entre 18 y 25 arcsec y densidades de dislocaciones por debajo de 10<sup>2</sup>cm<sup>-2</sup> cuando se dopa con Mg (Landolt, 1971). Por todo ello, la manera más común de crecer capas de Nitruros del grupo III en los últimos 10 años, ha sido heteroepitaxialmente sobre una serie de sustratos que no se acoplan perfectamente a los materiales crecidos, siendo los más utilizados AlN, GaN, InN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO, Si (111) y AsGa (111) (Damilano *et al.*, 1999; Dewship *et al.*, 1998). De allí la importancia de estudiar a fondo estos tipos de compuestos, pues no existe todavía un conocimiento profundo de los mecanismos de transporte de carga, al igual que se hace necesario un estudio fundamental de los sustratos utilizados para crecimientos homoepitaxiales o epitaxiales de gran calidad cristalina ( Riascos et al., 2009).

### 3. CONCLUSIONES

La finalidad de este documento es examinar la bibliografía publicadas sobre los nitruros del grupo III-V, y situarla en perspectiva con los trabajos que se vienen realizando en el país, en el campo de las películas delgadas; además, contar con un actualizado y referenciado documento que permita conocer las propiedades estructurales y ópticas de los compuestos (AlN, GaN, InN). De acuerdo con los trabajos publicados en la


literatura y tratados en el documento, se espera que los fenómenos de localización excitónica, propios de las aleaciones III-N, aumenten la eficiencia cuántica interna de los dispositivos UV-LED a temperatura ambiente, lo que dependerá, en últimas, del estudio de las propiedades del material en función de los parámetros de crecimiento; eficiencia vital cuando se calcula que solo Estados Unidos podría ahorrarse hasta 2,5 millones de KW /hora con dichos dispositivos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Amano, H. Kito, M. Hiramatsu, K. and Akasaki, I. (1989). P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI). *Japanese Journal of Applied Physics*. 28. 2112-2114.
- Amano, H. Tsunemori, A. and Akasaki, I. (1990). Stimulated Emission Near Ultraviolet at Room Temperature from a GaN Film Grown on Sapphire by MOVPE Using an AlN Buffer Layer. *Japanese Journal of Applied Physics*. 29. 205 – 206.
- Anderson, D.A. and Apsley, N. (1986). The Hall effect in III-V semiconductor assessment. *Semiconductor Science and Technology*. 1. 187-202.
- Angerer, H. Brunner, D. Freudenberg, F. Ambacher, O. Stutzmann, M. Höppler, R. Metzger, T. Bom, E. Dollinger, G. Bergmaier, A. Karsch, S. and Kómer, H.J. (1997). Determination of the Al mole fraction and the band gap bowing of epitaxial Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N films. *American Institute of Physics*. 71. 1504 – 1507.
- Bhuiyan, A.G. Hashimoto, A. and Yamamoto, A. J. (2003) *Journal of Applied Physics*. 94. Indium nitride (InN): A review on growth, characterization, and properties. 2779 – 2709.
- Darakchieva, V. Paskov, P. P. Valcheva, E. Paskova, T. Monemar, B. and Schubert, M. (2004). Deformation potentials of the E1(TO) and E2 modes of InN. *Applied Physics Letters*. 84, 3636-3638.
- Dingle, R. and Illegems, M. (1971). Absorption, Reflectance, and Luminescence of GaN Epitaxial Layers. *Physical Review B*. 4. 1211–1218.
- Dutta, P.S. Bulk Growth of Crystals of III–V (2011). Compound Semiconductors *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*. 3. 36-80.
- E. Deleporte, C. Guénaud, M. Voos, B. Beamont, and P. Gibart. (2001). Strain state in GaN epilayers from optical experiments. *Journal of Applied Physics*. 89, 1116 – 1120.
- Edgar, J. H. (1994) *Properties of Group III Nitrides Electronic Materials Information Service (EMIS) Data reviews Series*. London: Institution of Electrical Engineers.
- Edgar, J.H. (1994). Properties of Group III Nitrides - Electronic Materials Information Service (EMIS), London.

- Fornari, R. (2001). Gallium Nitride, Bulk, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*. 2. 3435-3440.
- Fujii, T. Gao, Y. Sharma, R. Hu, E. L. DenBaars, S. P. and Nakamura, S. (2004) Increase in the extraction efficiency of GaN-based light-emitting diodes via surface roughening. *Applied Physics Letters*. 84, 855-857.
- Gil, B. (1998). *Group III Nitride Semiconductor Compounds, Physics and Applications*. New York. Oxford University Press.
- Hardy, M.T. Feezell, D. Steven P. and Nakamura S. (2011). Group III-nitride lasers: a materials perspective Review Article. *Materials Today*. 14. 408-415.
- Huh, C. Lee, K. S. Kang, E. J. and Park, S. J. (2003). Improved light-output and electrical performance of InGaN based light-emitting diode by microroughening of the p-GaN surface. *Journal of Applied Physics*. 93, 9383-9385.
- Iwata, K. Asahi, H. Asami, K. and Gonda, S. (2000). Gas source MBE growth of GaN rich side of GaN<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> using ion-removed ECR radical cell. *Journal of Crystal Growth*. 176. 150-155.
- Johnson, M.A.L. Fujita, S. Rowland, W.H. Bowers, K.A. Hughes, W.C. He, Y.W. El-Masry, N.A. Cook, J.W. Schetzina, J. Ren, J.F. and Edmond, J.A. (1996). Investigation of two-dimensional growth of AlN(0 0 0 1) on Si(1 1 1) by plasma-assisted molecular beam epitaxy. *Journal of Crystal Growth*. 200. 45 – 54
- Johnson, M.A.L. Yu, Z. Brown, J.D. Koeck F.A., El-Masry, N.A. Kong, H.S. Edmond, J.A. Cook, J.W. and Schetzina, J.F. (2000). J. Strong blue emission from As doped GaN grown by molecular beam epitaxy. *Applied Physics Letters*. 77. 2506 – 2509.
- Karpinski, J. Jun, J. and Porowski, S. J. (1984). High pressure vapor growth of GaN. *Journal of Crystal Growth* 56. 77-82.
- Khan, A. and Balakrishnan, K. (2011). III-Nitride-Based Short-Wavelength Ultraviolet Light Sources *Comprehensive Semiconductor Science and Technology* 6.1-27.
- Lefebvre, P. and Gayral, B. Optical properties of GaN/AlN quantum dots. (2008). *Comptes-Rendus Physique*. 9. 816-829
- Lei, T. Ludwig, K.F. and Moustakas, T.D. (1993). Heteroepitaxy, polymorphism, and faulting in GaN thin films on silicon and sapphire substrates *Journal of Applied Physics*. 74. 4430 – 4437.
- Lin, T. Y. (2003). Converse piezoelectric effect and photoelastic effect in InGaN/GaN multiple quantum wells. *Applied Physics Letters*. 82, 880-882.
- Maruska, H. P. and Tietjen, J. J. (1969). The preparation and properties of vapor deposited single crystalline GaN. *Applied Physics Letters*. 15. 327-329.
- Mireles, F. Ulloa, S.E (1998). Acceptor binding energies in GaN and AlN. *Physical Review B*. 58, 3879–3887.

- Mohammad, S.N. Salvador A. and Morkoc, H. (1995). Emerging gallium nitride based devices. *Proceedings of the IEEE* 83, 1306 – 1355.
- Morkoç, H. (2001). *Aluminum, Gallium, and Indium Nitrides*. Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition) 121-126.
- Mukai, T. Yamada, and M. Nakamura, S. (1998). Current and Temperature Dependences of Electroluminescence of InGaN-Based UV/Blue/Green Light-Emitting Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*. 37, L1358-L1361.
- Nakamura, S. and Fasol, G. (1997). *The Blue Laser Diode*. Springer. Berlin.
- Nakamura, S. Mukai, and T. Senoh, M. (1994). Candela-class high-brightness InGaN/AlGaIn double-heterostructure blue-light-emitting diodes. *American Institute of Physics*. 64. 1687 – 1690.
- Nakamura, S. Senoh, M. Iwasa, N. and Nagahama, S. (1995). High-Brightness InGaN Blue, Green and Yellow Light-Emitting Diodes with Quantum Well Structures. *Japanese Journal of Applied Physics*. 34. 797- 799.
- Naranjo, F. B. (2003). *Crecimiento, fabricación y caracterización de diodos electroluminiscentes basados en pozos cuánticos de InGaIn*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
- Oder, T. N. Kim, H. S. Lin, J. Y. and Jiang, H. X. (2004). III-nitride blue and ultraviolet photonic crystal light emitting diodes. *Applied Physics Letters*. 84, 466-468.
- Palmer, D. W. Electronic Energy Levels in Group-III Nitrides. (2011). *Comprehensive Semiconductor Science and Technology* 4. 390-447.
- Pérez, Jaime Andrés (2011). Películas delgadas Nanoestructuradas de AlN obtenidas mediante la técnica de deposición por láser pulsado. Trabajo de grado Ingeniería Física. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia.
- Pérez, J. A et al. (2011). Optical Properties Dependence with Gas Pressure in AlN Films Deposited by Pulsed Laser Ablation. *Journal of Physics: Conference Series* 274. 1-9.
- R. Pecharrmán-Gallego, P. R. Edwards, R. W. Martin, and I. M. Watson. (2005) Optical and microstructural studies of InGaIn/GaIn single-quantum-well structures. *Materials Science and Engineering: B* 97 3508- 3513.
- Ramos, R. and M. E. Velasco, V. R. AlN, GaIn and InN (0 0 1) surface electronic band structure. (2006). *Surface Science*. 600. 2868-2873.
- Riascos, H. Pérez, J. A. Ospina, R. and Tirado-Mejía, L. (2009). *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*. S1 (3). 1065-1069.
- Riblet, P. Hirayama, H. Kinoshita, A. Hirata, A. Sugano, and T. Aoyagi, Y. (1999) Determination of photoluminescence mechanism in InGaIn quantum wells. *Applied Physics Letters*. 75. 2241-2243.
- Saarinen, K. Laine, T. Kuisma, S. Nissilä, J. Hautojärvi, P. Dobrzynski, L. Baranowski, J. M.

- Pakula, K., Stepniewski, R., Wojdak, M., Wyszomolek, A., Suski, T., Leszczynski, M., Grzegory, and I. Porowski, S. (1997). Selective excitation and thermal quenching of the yellow luminescence of GaN. *Applied Physics Letters*. 75. 3273-3275.
- Sala, F.S., Di Carlo, A., Lugli, P., Bernardini, F., Fiorentini, V., and Scholz, R. (1999). Free-carrier-screening of polarization fields in wurtzite GaN/InGaN laser structures. *Applied Physics Letters*. 74, 2002-2004.
- Schmitz, J., Niederhausen, J., Penner, J., Lorenz, K., Alves, E., and Vianden, R. (2009). Stable In-defect complexes in GaN and AlN. *Physica B: Condensed Matter*. 404 4866-4869.
- Schubert, E. F., Wang, Y.-H., Cho, A. Y., Tu, L.-W., and Zyzdzik, G. J. (1992). Resonant cavity light-emitting diodes. *Applied Physics Letters*. 60, 921-923.
- Shi, S. C., Chen, C. F., Chattopadhyay, S., Chen, K. H., Ke, B. W., and Berzina, B. (2006). Luminescence properties of wurtzite AlN nanotips. *Applied Physics Letters*. 89, 163127-163139.
- Skromme, B. J., Palle, K. C., Poweleit, C. D., Yamane, H., Aoki, M., and DiSalvo, F. J. (2002). Optical spectroscopy of bulk GaN crystals grown from a Na-Ga melt. *Applied Physics Letters* 81. 3765 – 3768.
- Srivastava, G.P. The anharmonic phonon decay rate in group-III nitrides. (2002). *Journal of Physics: Condensed Matter*. 21. 316-317.
- Strite, S. and Morkoc, H. (1992). GaN, AlN, and InN: A review. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 10. 1237- 1267.
- Talwar, D.N., Sofranko, D., Mooney, and C. Tallo, S. (2002). Elastic, structural, bonding, and defect properties of zinc-blende BN, AlN, GaN, InN. *Materials Science and Engineering: B*. 90 269-277.
- Trampert, A., Brandt, O., and Ploog, K. H. (1998). *Crystal structure of group III Nitrides*. Semiconductors and Semimetals. 50 Academic, San Diego.
- Wang, T., Nakagawa, D., Wang, J., Sugahara, T., and Sakai, S. (1998). Photoluminescence investigation of InGaN/GaN single quantum well and multiple quantum wells. *Applied Physics Letters*. 73, 3571-3573.
- Yang, H.C., Kuo, P.F., Lin, T.Y., Chen, Y.F., Chen, K.H., Chen, and L.C. Chyi, J.-I. (2000) Strong luminescence from strain relaxed InGaN/GaN nanotips for highly efficient light emitters. *Optics Express* 75. 9357- 9365. 

Referencia	Fecha de recepción	Fecha de aprobación
Pérez T. Jaime A. Propiedades estructurales y ópticas de compuestos (AlN, GaN, InN) Revista Tumbaga (2011), 6, 201-214	Día/mes/año 19/10/2010	Día/mes/año 19/07/2011