

## CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE TRANSISTORES BASADOS EN NITRUROS

Los transistores más rápidos se consiguen gracias al crecimiento de diferentes semiconductores apilados. Entre los semiconductores es posible confinar una elevada concentración de electrones de alta movilidad, dando lugar a transistores con gran velocidad de respuesta. Cuando se emplea el sistema AlGaIn/GaN, los enlaces interatómicos poseen un elevado carácter iónico. Estos iones generan intensos campos eléctricos internos, que inducen entre el AlGaIn y el GaN una concentración de electrones de  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , un orden de magnitud superior a la alcanzada con otras estructuras típicas (AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs, GaInP/InGaAs/GaAs, etc.). En este artículo se expone un análisis de los aspectos fundamentales relacionados con la distribución de los electrones bajo la puerta de los transistores basados en nitruros.

*The fastest transistors are possible thanks to piling different semiconductors up. Between semiconductors a considerable electron concentration can be confined, with a high mobility, giving as a result transistors for applications where the velocity response is critical. When the AlGaIn/GaN system is used, the inter-atomic bonding has a non negligible ionic character. The resulting ions produce intensive internal electric fields, which deliver electron concentrations between the AlGaAs and GaN of  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , ten times higher than other typical structures (AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs, GaInP/InGaAs/GaAs, etc.). In this paper we report the fundamental aspects in relation with the distribution of the electrons under the gate of transistors based on nitrides.*

Benito González Pérez

Francisco Gámiz Pérez

José María Tirado  
Martín

Javier García García

### INTRODUCCIÓN

Los transistores más rápidos en la actualidad son los *HFETs* (*Heterostructure Field Effect Transistors*). Ello es posible gracias al crecimiento de semiconductores con diferentes *gap* de energía, mediante técnicas como la *MBE* (*Molecular Beam Epitaxial*) o la *MOCVD* (*Metal-Organic Chemical Vapor Deposition*). En la interfase entre dos semiconductores con *gap* diferente es posible confinar una elevada concentración de electrones. Los electrones, al ser separados de sus átomos donadores, aumentan significativamente su movilidad y, por tanto, la rapidez del dispositivo. Por ello, los *HFETs* son transistores apropiados en aplicaciones donde se requiere

alta velocidad (microondas, optoelectrónica).

Cuando se emplea el sistema AlGaIn/GaN para formar la discontinuidad del *gap*, los enlaces interatómicos del cristal poseen un elevado carácter iónico. Estos iones generan intensos campos eléctricos de dos formas: por vibración térmica (efecto que se conoce como polarización espontánea) y por tensión mecánica en la interfase, como consecuencia de que dichos semiconductores poseen una constante de red diferente (efecto conocido como polarización piezoeléctrica).

Los campos eléctricos originados por las polarizaciones espontánea y piezoeléctrica son perpendiculares a la interfase y consiguen confinar

**Los transistores basados en nitruros poseen una concentración de electrones superior, gracias a los intensos campos eléctricos internos**

en ella una concentración de electrones típica de  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , un orden de magnitud superior a la alcanzada con otras heteroestructuras (AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs, GaInP/InGaAs/GaAs, etc.). Además, debido a su gran estabilidad térmica, los *HFETs* basados en AlGaN/GaN prometen ser transistores candidatos en aplicaciones donde se requiere, conjuntamente, velocidad y potencia elevadas, por ejemplo, en etapas de amplificación para terminales móviles.

Mediante simulaciones numéricas es posible conocer el funcionamiento de los dispositivos desde un punto de vista físico. Además, permiten establecer interdependencias entre las propiedades geométricas o materiales y la respuesta eléctrica. De esta forma, la simulación permite optimizar dispositivos en aplicaciones específicas, reduciendo costes y tiempo de producción.

Nuestro interés, pues, consiste en simular *HFETs* basados en AlGaN/GaN. Para ello se necesita disponer de resultados experimentales que den validez a las simulaciones. Así, el primer objetivo del trabajo consiste en caracterizar eléctricamente *HFETs* de AlGaN/GaN, de los que se tenga buen conocimiento de su estructura, composición material y geometría. En estos transistores se ha medido a temperatura ambiente la capacidad de puerta, con la que se puede conocer la distribución de los electrones en el interior del dispositivo.

Para simular la distribución de los electrones en el interior del *HFET* se requiere de un programa informático que resuelva numéricamente las ecuaciones de Schrödinger y Poisson, fijada una tensión en la puerta del transistor. Este programa había sido desarrollado y utilizado con éxito en la simulación de *HFETs* de AlGaAs/GaAs (que cristaliza en el sistema cúbico). En este trabajo lo

hemos adaptado a las nuevas particularidades de la heteroestructura AlGaN/GaN (que cristaliza en el sistema hexagonal).

Para ello, previamente, se ha realizado una búsqueda bibliográfica exhaustiva que nos permite conocer con precisión el funcionamiento del sistema AlGaN/GaN. De especial importancia son las polarizaciones espontáneas y piezoeléctricas, así como los posibles centros de carga que se generen en la barrera de AlGaN. Además, se ha recopilado las constantes materiales del AlGaN/GaN necesarias en la simulación (masas efectivas e índices de parabolicidad de las distintas subbandas de energía, constantes elásticas, parámetros de red, altura de la barrera Schottky, etc.).

Es entonces cuando se está en disposición de abordar las modificaciones necesarias del código fuente del simulador, incluyendo todas aquellas consideraciones particulares encontradas del sistema AlGaN/GaN. Finalmente, las simulaciones se validan con los resultados experimentales, mostrando los *HFETs* el comportamiento esperado.

### **Caracterización eléctrica de *HFETs* basados en AlGaN/GaN**

El ISOM (Instituto de Sistemas Ópticos y Microtecnología), en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid, dispone de *HFETs* con estructura de capas  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , entre los que han sido seleccionados algunos para su caracterización eléctrica.

El procesado tecnológico de los transistores caracterizados se había llevado a cabo previamente en dicho instituto, sobre tres tipos distintos de heteroestructuras que denominaremos A, B y C, cuya

A	B	C
$\text{Al}_{0,18}\text{Ga}_{0,82}\text{N} - 67 \text{ nm}$	$\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{N} - 19 \text{ nm}$	$\text{Al}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{N} - 24 \text{ nm}$
GaN - 3 $\mu\text{m}$	GaN - 3 $\mu\text{m}$	GaN - 3,126 $\mu\text{m}$
Zafiro	Zafiro	Zafiro

secuencia de capas materiales se indica en la tabla superior.

Debido a su estabilidad térmica, estos transistores prometen ser candidatos en aplicaciones donde se requiera velocidad y potencia.

En todos los casos las capas se crecieron sin dopaje intencional. La dirección de crecimiento es la [0001], según la cual los semiconductores cristalizan en el sistema hexagonal (zafiro).

Durante el procesado tecnológico se emplearon dos tipos de máscaras. Una con transistores en forma de T (figura 1), se aplicó a las tres heteroestructuras consideradas:  $L_F$  representa la separación entre la puerta y la fuente,  $L_D$  la separación entre la puerta y el drenador,  $L$  es la longitud de puerta y  $W$  su anchura. Los transistores resultantes los denominaremos "AT<sub>1</sub>", "BT<sub>1</sub>" y "CT<sub>1</sub>", según la heteroestructura A, B o C empleada.

La segunda máscara contempló transistores en forma de T y U, como se aprecia en la figura 2, donde se indica también la geometría. Esta máscara se aplicó exclusivamente a la heteroestructura C. Así, los transistores resultantes los denominaremos "CT<sub>2</sub>" y "CU<sub>2</sub>", dependiendo de la forma del transistor elegida.

Con la máscara uno,  $L_F$ ,  $L_D$  y  $W$  son valores constantes en todos sus transistores e iguales a 4, 10 y 150  $\mu\text{m}$  respectivamente, mientras que la longitud de puerta puede ser 2, 4, 8 y 16  $\mu\text{m}$ . Para distinguir los transistores con diferentes longitudes de puerta, los nombraremos incluyendo su valor en el subíndice. Por ejemplo, AT<sub>1,4</sub> representa el transistor con la estructura de capas A, en forma de T, realizado con la máscara uno y con una longitud de puerta de 4  $\mu\text{m}$ .

**Debido a su estabilidad térmica, estos transistores prometen ser candidatos en aplicaciones donde se requiera velocidad y potencia**

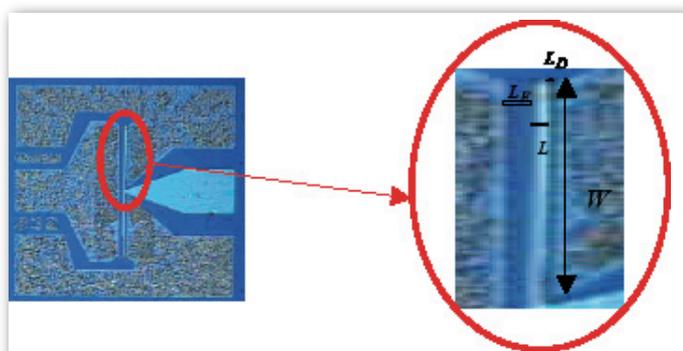


Figura 1. Máscara uno: transistores en forma de T.

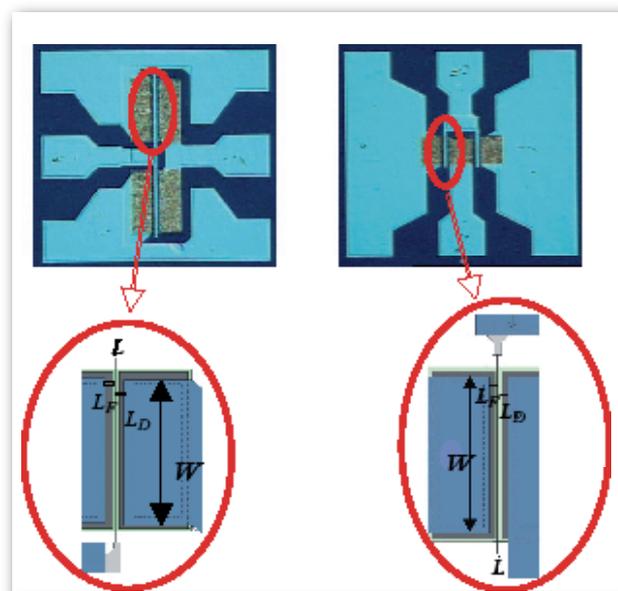


Figura 2. Máscara dos: transistores en forma de T y U.

**Transistores basados en nitruros, con diferentes geometrías y estructura de capas, fueron procesados y caracterizados a temperatura ambiente**

En la máscara dos,  $L_F$  y  $L_D$  toman valores constantes, tanto en los transistores con forma de T como de U, e iguales a 4 y 10  $\mu\text{m}$  respectivamente. Sin embargo, la anchura de la puerta ( $W$ ) puede tomar dos valores posibles: 75 y 150  $\mu\text{m}$ . La longitud de puerta ( $L$ ) puede ser 2 y 5  $\mu\text{m}$ . Por tanto, estos transistores los denominaremos añadiendo dos subíndices:  $L$  y  $W$ . Por ejemplo,  $\text{CU}_{2,5-75}$  representa el transistor con la estructura de capas C, en forma de U, fabricado con la máscara dos, con una longitud de puerta de 5  $\mu\text{m}$  y una anchura de puerta de 75  $\mu\text{m}$ .

Así se han caracterizado los transistores  $\text{AT}_{1,2}, \text{AT}_{1,4}, \text{AT}_{1,8}, \text{AT}_{1,16}, \text{BT}_{1,2}, \text{BT}_{1,4}, \text{BT}_{1,8}, \text{BT}_{1,16}, \text{CT}_{1,2}, \text{CT}_{1,4}, \text{CT}_{1,8}, \text{CT}_{1,16}, \text{CT}_{2,2-75}, \text{CT}_{2,2-150}, \text{CT}_{2,5-75}, \text{CT}_{2,5-150}, \text{CU}_{2,2-75}, \text{CU}_{2,2-150}, \text{CU}_{2,5-75}$  y  $\text{CU}_{2,5-150}$ .

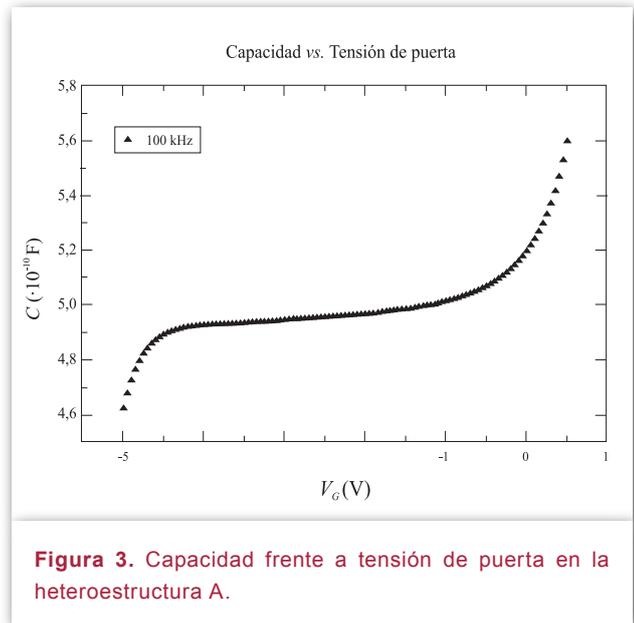
La caracterización eléctrica de los transistores se realizó en el I.S.O.M., mediante un analizador de parámetros de semiconductores HP4145B, un analizador de impedancias HP4192A-LF y una estación de puntas KARL-SUSS. Todas las medidas se llevaron a cabo a temperatura ambiente.

**Resultados de las medidas**

Con el analizador de impedancias se midieron las curvas capacitivas de puerta, para distintas tensiones en ésta. En el caso de los transistores con heteroestructuras A y B, las medidas capacitivas se llevaron a cabo directamente sobre las muestras, antes del procesado tecnológico, mediante puntas de mercurio a una frecuencia de 100 kHz. El área de las puntas de mercurio empleadas fue de  $4,243 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ . En los transistores con la heteroestructura C, el procesado tecnológico incluyó la fabricación de diodos Schottky circulares para poder medir las capacidades, empleando la estación de puntas. A fin de reducir el efecto de las

capacidades parásitas se empleó un área suficientemente grande, fijando el diámetro en 200  $\mu\text{m}$ . La frecuencia en las medidas fue de 70 kHz.

En la figura 3 se indican los valores obtenidos en el caso de los transistores con heteroestructura A. La capacidad aumenta inicialmente con la tensión de puerta hasta que se forma el canal bidimensional de electrones en el GaN. Luego, mientras no se produzca el llenado del canal, permanece aproximadamente constante durante un cierto intervalo, para posteriormente volver a aumentar debido al retroceso de la zona de vaciamiento en la barrera de AlGaIn. En todos los transistores medidos se observaron resultados análogos.



**Figura 3.** Capacidad frente a tensión de puerta en la heteroestructura A.

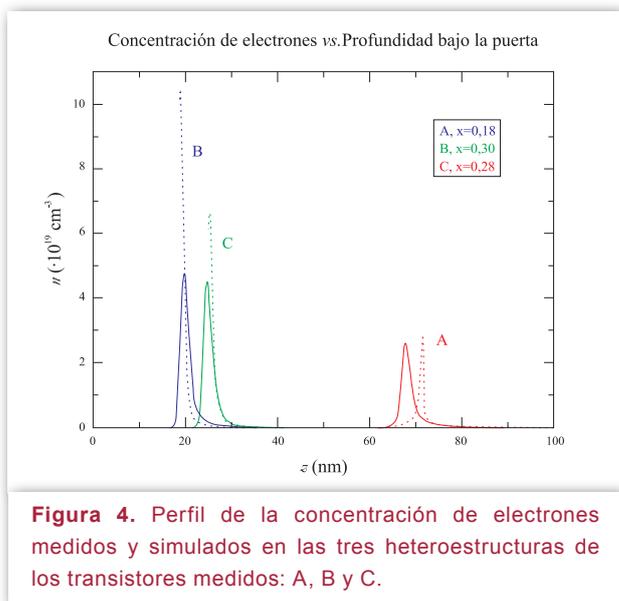
El perfil de la concentración de electrones bajo el terminal de puerta puede determinarse a partir de la siguiente expresión [1], [2]:

$$n = \frac{C^3}{q\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{dV_G}{dC}$$

donde  $C$  es la capacidad de puerta medida por unidad de área,  $q$  es la carga del electrón en valor

absoluto,  $V_G$  es la tensión aplicada a la puerta,  $\epsilon_0$  la constante dieléctrica del vacío y  $\epsilon_r$  la constante dieléctrica relativa de la barrera de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , dependiente de la fracción molar de aluminio,  $x$ .

En la figura 4 se observan con puntos los perfiles obtenidos con este método para las tres estructuras consideradas.



**Figura 4.** Perfil de la concentración de electrones medidos y simulados en las tres heteroestructuras de los transistores medidos: A, B y C.

En el eje vertical se representa la concentración de electrones y en el horizontal la profundidad en la estructura, medida desde el contacto de puerta. En cada una de las estructuras se aprecia claramente cómo se localiza una gran concentración de electrones en una región muy estrecha. El pico de la concentración se sitúa en la intercara AlGaN/GaN correspondiente, dando lugar a gases de electrones bidimensionales. Es de destacar la magnitud de dichas concentraciones, un orden superior a la obtenida con heteroestructuras convencionales (AlGaAs/GaAs, AlGaAs/InGaAs/GaAs, etc.), motivo por el cual los *HFETs* basados en nitruros son potenciales candidatos para aplicaciones de alta potencia. Por otro lado, a medida que aumenta la fracción molar de aluminio en la barrera de  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ,

hay una mayor concentración de electrones. Esto se debe principalmente a dos efectos: un incremento de la discontinuidad de la banda de conducción en la intercara AlGaN/GaN, que da lugar a que el pozo cuántico donde se acumulan los electrones sea más profundo, y un aumento de los campos piezoeléctricos, origen de tan elevada concentración.

### Resultados de las simulaciones

Para simular autoconsistentemente las ecuaciones de Schrödinger y Poisson se necesita conocer las constantes materiales propias del GaN y el  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , así como sus campos de polarización espontánea y los que resultan de formar la heterounión: los campos piezoeléctricos. Por ello, se ha realizado una búsqueda bibliográfica exhaustiva, actualizada, del estado del arte de las heteroestructuras basadas en nitruros y de los *HFETs* basados en ellas [3], [4], [5] [6] y [7]. El principal inconveniente encontrado es, por la novedad del tema, la dispersión de los valores publicados por los distintos autores, siendo adoptados los predominantes o, en su defecto, la media de los encontrados.

ElGRIDE (Grupo de Investigación en Dispositivos Electrónicos), adscrito al Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada, dispone de un programa de simulación numérica que resuelve autoconsistentemente las ecuaciones de Schrödinger y Poisson. Este programa se realizó, en un principio, para simular la heteroestructura AlGaAs/GaAs, por lo que hubo de ser adaptado para abordar heteroestructuras basadas en nitruros.

En primer lugar se introdujeron los parámetros necesarios para poder considerar todas las propiedades materiales encontradas en

**Mediante la capacidad medida del transistor, a distintas tensiones, se obtiene el perfil de la concentración de electrones bajo la puerta del transistor**

Conocidas las polarizaciones en cada material, se determina la densidad equivalente de carga en cada superficie de la estructura

los nitruros. También se permitió la simulación de estructuras con tres capas semiconductoras diferentes, para realizar estudios en pozos cuánticos trapezoidales. De especial relevancia son los campos piezoeléctricos que se producen en los nitruros, origen de la gran concentración de electrones del canal. Esto se consideró modelando las cargas de polarización superficiales equivalentes que se generan en cada capa e incluyéndolas en el programa mediante condiciones de contorno en la resolución de la ecuación de Poisson (no existen densidades de carga de polarización en volumen, ya que las polarizaciones son uniformes en cada capa). Por último, se introdujo en la ecuación de Schrödinger un término que da cuenta de la influencia de la tensión de la estructura en las funciones de onda.

En general, la densidad superficial de carga de polarización ( $\sigma$ ), viene dada por:

$$\sigma = (P_E + P_p) \cdot a_n$$

donde  $P_E$  es la polarización espontánea y  $P_p$  la polarización piezoeléctrica;  $a_n$  es un vector unitario, perpendicular a la superficie de cada capa y con sentido alejándose de ella.

En las estructuras estudiadas, la última capa en crecer está formada por átomos de galio, por lo que la polarización espontánea, que existe

en todos los semiconductores que forman la estructura, siempre apunta hacia abajo, en contra de la dirección de crecimiento. Sin embargo, la polarización piezoeléctrica, que sólo se produce en las capas tensadas, es perpendicular a la dirección de crecimiento y su sentido es el del crecimiento de las capas, o el opuesto si se produce compresión o expansión de los átomos respectivamente. Si la estructura está formada por dos capas (barrera y sustrato), la capa tensada es la barrera. Y si la estructura está formada por tres (barrera, pozo y sustrato), la única capa tensada es el pozo, ya que asumiremos que la barrera y el sustrato son del mismo material.

Hemos considerado dos heteroestructuras genéricas: la  $Al_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$ , de pozo simple (la estructura  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  de nuestros transistores sería caso particular) y la  $Al_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N/Al_xGa_{1-x}N$ , de pozo trapezoidal, donde  $x$  representa la composición material de indio. En ellas los vectores de polarización son como indica la figura 5, donde también se muestran las densidades equivalentes de carga de polarización;  $\sigma_m$  es la densidad de polarización bajo el metal de puerta,  $\sigma_i$  es la densidad en la intercara para la estructura con dos capas,  $\sigma_{i-sup}$  y  $\sigma_{i-inf}$  son las densidades equivalentes en la intercara superior e inferior, respectivamente, de la segunda capa en la estructura

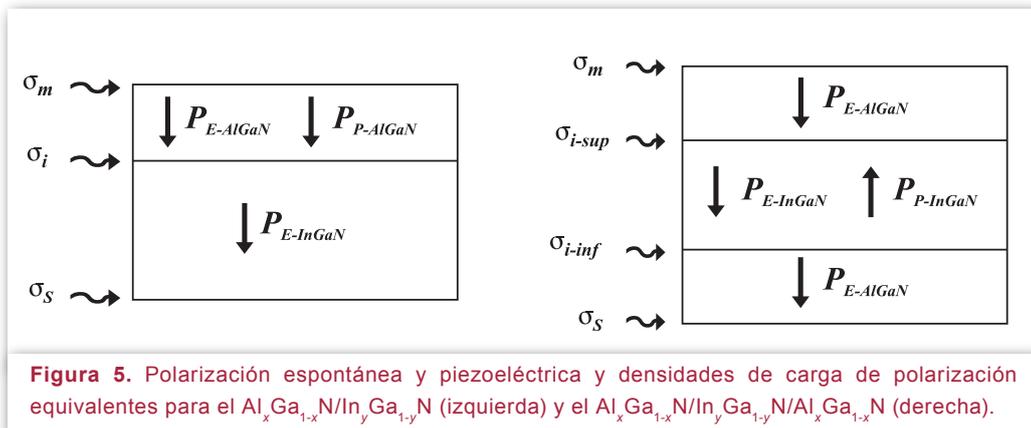


Figura 5. Polarización espontánea y piezoeléctrica y densidades de carga de polarización equivalentes para el  $Al_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$  (izquierda) y el  $Al_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N/Al_xGa_{1-x}N$  (derecha).

formada por tres, y  $\sigma_s$  es la densidad de carga en el fondo del sustrato. Nótese que el sentido de la polarización piezoeléctrica es opuesto en dichas estructuras. Como la constante de red del  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  es inferior a la del  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ , en la barrera del  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  habrá tensión por expansión, y en el pozo del  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  tensión por compresión.

A partir de la figura 5 se determinan las polarizaciones, con su correspondiente signo, que han de tenerse en cuenta para obtener la densidad equivalente de carga en cada superficie. Obviamente se ha de cumplir que la suma de las cargas de polarización en toda la heteroestructura es nula.

La polarización espontánea es propia de cada semiconductor y depende exclusivamente de la composición material. Mientras que la polarización piezoeléctrica, en general, viene dada por:

$$P_p = 2 \cdot \frac{a - a_0}{a} \cdot \left( e_{31} - e_{33} \cdot \frac{C_{13}}{C_{33}} \right)$$

siendo  $a$  la constante de red del material tensado y  $a_0$  la del relajado, en dirección perpendicular a la del crecimiento, dependientes de la temperatura de funcionamiento y la composición material. El resto de términos corresponden al material tensado:  $e_{31}$  y  $e_{33}$  son los coeficientes piezoeléctricos y  $C_{13}$  y  $C_{33}$  las constantes elásticas, dependientes de la composición material. Así, para la estructura  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ,  $a$  es la constante de red del  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  y  $a_0$  la del  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ , siendo al contrario en la estructura  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ .

Como ejemplo, la figura 6 muestra la dependencia de las densidades de carga de polarización con la fracción molar de aluminio para la estructura de los transistores medi-

dos, la  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ . Con líneas verticales se indica el rango en el que se encuentra la fracción molar de aluminio en la barrera de dichos transistores. La densidad de carga de polarización en la intercara,  $\sigma_i$ , es positiva. Esto hace que, para neutralizarlas, sean atraídos una gran cantidad de electrones hacia ella, electrones que quedan atrapados en el pozo cuántico de la intercara, dando origen al canal de conducción.

Cabe destacar que ni la densidad de carga en el sustrato, ni la existente bajo el metal de puerta, influyen en el resultado de la simulación. Con respecto a la del sustrato, esto se debe a que las cargas de polarización están situadas en el fondo, muy lejos del pozo cuántico (al menos a  $300 \mu\text{m}$ ). Sin embargo, no está claro el motivo por el que no tienen efecto las cargas de polarización bajo el metal. Una posible explicación es que predomine el efecto Schottky de la unión metal-semiconductor sobre dichas cargas, siendo éstas de alguna forma apanalladas.

Por último, se introdujo en la ecuación de Schrödinger un término que da cuenta de la influencia

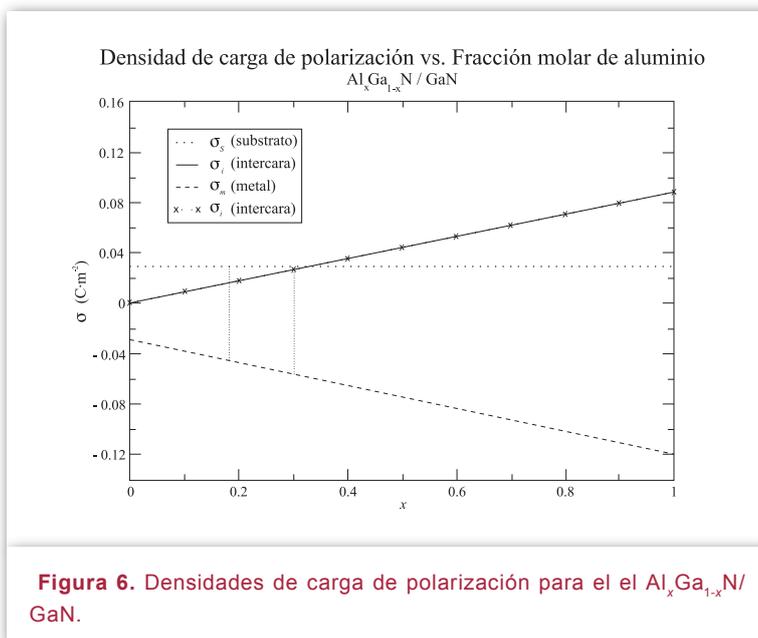


Figura 6. Densidades de carga de polarización para el  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ .

La distribución de electrones en el transistor se obtiene resolviendo las ecuaciones de Poisson y Schrödinger, incluyendo las densidades equivalentes de carga de polarización

de la tensión de la estructura en las funciones de onda. Este término se suma al miembro del Hamiltoniano del sistema y viene dado por:

$$2a_g \cdot \frac{a - a_0}{a} \left( 1 - \frac{C_{13}}{C_{33}} \right) \cdot \psi$$

siendo  $\psi$  la función de onda y  $a_g$  el potencial de deformación del *gap*.

En la figura 4 se muestran con líneas continuas los perfiles de electrones obtenidos con el simulador, una vez introducidos todos los efectos y parámetros estudiados, para las tres heteroestructuras de los transistores medidos: A, B y C. El aumento observado del pico de la concentración de electrones con la fracción molar de aluminio (A  $\rightarrow$  C  $\rightarrow$  B:  $x = 0,18 \rightarrow 0,28 \rightarrow 0,3$ ) se refleja en la simulación. No obstante, el valor del pico es subestimado en las estructuras B y C, siendo atribuido al elevado dopaje residual que puede existir en las barreras de AlGaIn, que no está siendo considerado. La localización predicha del pico es, como cabía de esperar, la intercara entre la barrera y el sustrato. En el caso de la estructura A, las medidas indican que se localiza 3 nm más profundo de lo previsto. Creemos que en este caso la intercara real no se sitúa en los 67 nm nominales, sino en torno a 70 nm desde la puerta.

### CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha conseguido simular correctamente la distribución de los electrones bajo la puerta de los transistores basados en nitruros. Los resultados simulados han sido corroborados por medidas experimentales para el sistema  $Al_xGa_{1-x}N/GaN$  en tres estructuras diferentes. Ello ha sido posible gracias a un estudio exhaustivo de los materiales basados en nitruros, teniendo especial relevancia los mecanismos responsables de la elevada concentración

de electrones en el canal: la polarización espontánea y piezoeléctrica. La ecuación de Schrödinger, incluyendo las particularidades de estos materiales, fue resuelta junto con la de Poisson, que está sujeta a las condiciones de contorno resultantes de los campos eléctricos originados por el carácter iónico de los nitruros.

Además, se han obtenido resultados que permiten la simulación de sistemas más generales: el  $Al_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$  y el  $Al_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N/Al_xGa_{1-x}N$ , permitiendo así poder valorar la capacidad de estas estructuras para su aplicación en electrónica de alta potencia y velocidad en futuros estudios.

### BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ambacher, O., Smart, J., Shealy, J. R., Weimann, N.G., Chu, K., Murphy, M., Schaff, W.J., Eastman, L. F., Dimitrov, R., Wittmer, L., Stutzmann, M., Rieger, W. y Hilsenbeck, J. (1999): *Two-dimensional Electron Gases Induced by Spontaneous and Piezoelectric Polarization Charges in N- and Ga-face AlGaIn/GaN Heterostructures*. Journal of Applied Physics, vol. 85 - nº 6, pp. 3222-3233.
- [2] Hsu, L. y Walukiewicz, W. (1998): *Effects of Piezoelectric Field on Defect Formation, Charge Transfer, and Electron Transport at GaN/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N Interfaces*. Applied Physics Letters, vol. 73 - nº 3, pp. 339-341.
- [3] Khan, M.A., Kuznia, J.N., Olson, D.T., Scaf, W.J., Burm, J.W. y Shur, M.S. (1994): *Microwave Performance of a 0.25  $\mu$ m Gate AlGaIn/GaN Heterostructure Field Effect Transistor*. Applied Physics Letters, vol. 65, nº 9, pp. 1121-2.
- [4] Fan, W.J., Li, M.F., Chong, T.C. y Xia, J.B. (1996): *Electronic*

*Properties of Zinc-Blende GaN, AlN, and their Alloys Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N.* Journal of Applied Physics, vol. 79, nº 1, pp. 188-94.

[5] Kim, K., Lambrecht, W.R.L. y Segall, B. (1996): *Elastic Constants and Related Properties of Tetrahedrally Bonded BN, AlN, GaN and InN.* Review B, vol. 53, nº 24, pp. 310-26.

[6] Martin, G., Botchkarev, A., Rockett, A. y Morkoc, H. (1996): *Valence-Band Discontinuities of Wurtzite GaN, AlN, and InN Heterojunctions Measured by X-Ray Photoemission Spectroscopy.* Applied Physics Letters, vol. 68, nº 18, pp. 2541-3.

[7] Bernardini, F., Fiorentini, V. y Vanderbilt, D. (1997). *Spontaneous Polarization and Piezoelectric Constants of III-V Nitrides.* Physical Review B, vol. 56, nº 16, pp. R10 024-7.

## BIOGRAFÍA

### BENITO GONZÁLEZ PÉREZ

Se licenció en Ciencias Físicas por la Universidad de Santiago de Compostela en 1992 y se doctoró en la ULPGC en 2001, donde es Profesor Titular de Universidad desde 2003. Investiga sobre el modelado, simulación y caracterización de dispositivos electrónicos. Campus Universitario de Tafira, Edificio de Electrónica y Telecomunicación-A. Las Palmas de Gran Canaria. benito@iuma.ulpgc.es 928 452 875

### FRANCISCO GÁMIZ PÉREZ

Se licenció en Ciencias Físicas en 1991 y se doctoró en 1994 en la Universidad de Granada, donde es Catedrático de Universidad desde 2005. Investiga sobre mecanismos de dispersión en semiconductores, dispositivos SOI, SiGe, etc.

Departamento de Electrónica y Tecnología de los Computadores. Universidad de Granada. fgamiz@ugr.es 958 246 145

### JOSÉ MARÍA TIRADO MARTÍN

Ingeniero de Telecomunicación en 2000 en la UPM y Doctor por la Universidad de Castilla-La Mancha en 2006, donde es Profesor Ayudante desde 2003. Investiga sobre caracterización y modelado de transistores de efecto de campo basados en GaN.

Avda. Carlos III s/n, EUITI Toledo, Fábrica de Armas. JoseMaria.Tirado@uclm.es 925 268 800/5730

### JAVIER GARCÍA GARCÍA

Se licenció en Ciencias Físicas por la Universidad de Santiago de Compostela en 1993 y se doctoró en la ULPGC en 2001, donde es Profesor Titular de Universidad desde 2003.

Investiga sobre inductores y varactores integrados, y medidas *on-wafer* de RFICs. Campus universitario de Tafira, Edificio de Electrónica y Telecomunicación-A. Las Palmas de Gran Canaria. jgarcia@iuma.ulpgc.es 928 458 045

Patrocinador de esta investigación:

**UNIÓN ELÉCTRICA DE CANARIAS S.A.  
(UNELCO-ENDESA)**