

## Propiedades de transporte en el transistor $\delta$ -FET

O. Oubram<sup>a</sup>, L. Cisneros-Villalobos<sup>a</sup>, L. M. Gaggero-Sager<sup>b</sup> y M. Abatal<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos,  
Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México.

e-mail: oubram@uaem.mx; luis.cisneros@uaem.mx

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de Morelos,  
Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, 62209, Cuernavaca, Morelos, México.

<sup>c</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Carmen,  
24180, Ciudad del Carmen, Campeche, México;

e-mail: mabatal@pampano.unacar.mx

Received 14 August 2013; accepted 11 September 2013

El transporte electrónico en el transistor  $\delta$ -FET ha sido estudiado en GaAs. Se utiliza un modelo teórico del transporte basado en la estructura electrónica para calcular su movilidad y conductividad. Los resultados muestran que las propiedades eléctricas del  $\delta$ -FET dependen de los parámetros intrínsecos del dispositivo (la posición del pozo delta dopado y la densidad del bulto) y de la magnitud del potencial de contacto. Tales resultados son útiles en aplicaciones con dispositivos insensibles a la temperatura.

*Descriptores:* Transporte; movilidad; conductividad; transistor;  $\delta$ -FET.

Electron transport in the  $\delta$ -FET transistor has been studied in GaAs. A theoretical model of transport based on the electronic structure is used to calculate mobility and conductivity. Results show that the electrical properties of  $\delta$ -FET depend on device intrinsic parameters (position of delta-doped quantum well, background density) and the magnitude of the voltage contact. Such results are useful in applications in temperature-insensitive devices.

*Keywords:* Transport; mobility; conductivity; transistor;  $\delta$ -FET.

PACS: 73.63.-b; 72.80.Ey; 85.30.Tv; 73.20.-r

### 1. Introducción

En los últimos años el interés en el uso de los pozos  $\delta$ -dopados en estructuras de semiconductores se ha incrementado debido a su gran potencial en la tecnología de dispositivos electrónicos y fotónicos [1-5], y también como tema de investigación básica. Por consecuencia, muchas de las estructuras novedosas basadas en las estructuras  $\delta$ -dopados [3-9] se pueden realizar experimentalmente utilizando técnicas de crecimiento epitaxial como epitaxia de haces moleculares (MBE). Gracias a las técnicas de crecimiento se puede localizar impurezas en una capa delta atómica, esto permite un aumento de confinamiento cuántico de los portadores [2,10]. En general, con la técnica del dopado deltaico se puede obtener un perfil muy agudo y una alta densidad de carga, que da lugar a una amplia gama de aplicaciones tales como dispositivos basados a GaAs, Si o SiGe [7,10-12]. Este confinamiento cuántico juega un papel importante en las propiedades de dispositivos fotónicos y electrónicos, especialmente, para moduladores, detectores de infrarrojos y láseres [7,9]; además produce una gran mejoría en el desempeño de dispositivos optoelectrónicos de alta frecuencia [5,13], y crea una mayor transconductancia en el transistor a efecto de campo (FET) con pozo  $\delta$ -dopado [2]  $\delta$ -FET (por sus siglas en inglés), así como una alta movilidad electrónica debida a la proximidad del canal de conducción en la puerta [2].

El sistema en el cual estamos interesados es el  $\delta$ -FET en GaAs propuesto inicialmente por Schubert, Ploog y colaboradores [1,2]. Ellos hicieron un transistor de efecto de cam-

po con un canal de conducción que está formado por el crecimiento de una capa delta dopada en Si, el pozo cuántico está situado entre las terminales, fuente y drenaje de un transistor de efecto de campo convencional, véase la Fig. 1. La presencia de este pozo cuántico tipo n produce una localización bidimensional del gas electrónico que participa directamente en el canal de conducción.

En este artículo, hemos estudiado la estructura electrónica y el fenómeno del transporte para un transistor  $n$ -dopado

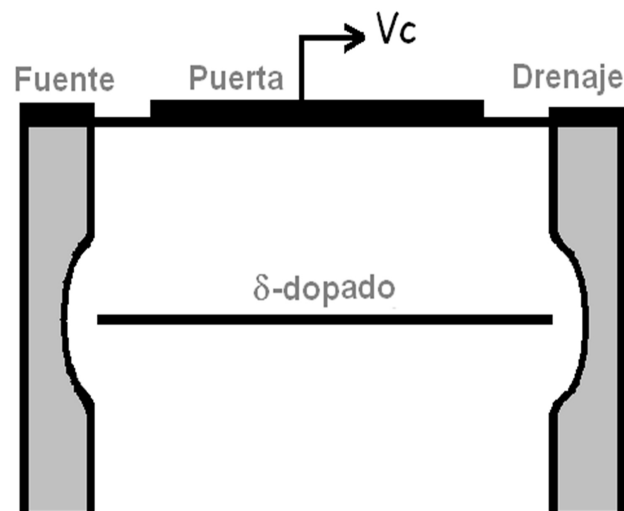


FIGURA 1. Sección transversal de un  $\delta$ -FET en GaAs.

$\delta$ -FET en GaAs. Hemos caracterizado las diferentes zonas de movilidad y conductividad de interés en la microelectrónica debajo del potencial de contacto. Además, hemos estudiado el efecto de la posición sobre la movilidad y la conductividad para diferentes distancias, así mismo como el efecto de la densidad del bulto en el transporte. Se puede mencionar que en nuestro conocimiento, es el primer trabajo de transporte (movilidad y conductividad) con dependencia en a los parámetros intrínsecos del  $\delta$ -FET. Los resultados obtenidos, pueden ser útiles para simplificar el diseño de circuitos para amplificadores de baja temperatura, y dispositivos para la tecnología espacial y de las comunicaciones por satélite.

## 2. Bases teóricas

El transistor  $\delta$ -FET es un transistor FET convencional con un pozo delta dopado como canal de conducción [1-2,14]. La técnica del  $\delta$ -dopaje permite obtener una capa muy angosta dopada de alta densidad. El potencial de este sistema está formado: en un inicio por el contacto metal-semiconductor (barrera Schottky), luego por el pozo cuántico del tipo n-delta dopado (Fig. 1). La presencia o no del confinamiento del gas electrónico depende de los parámetros utilizados en la construcción del sistema. El perfil del potencial que describe la banda de conducción del semiconductor en el  $\delta$ -FET tiene la forma [14]:

$$V(z) = \frac{2\pi e^2}{\epsilon_r} N_d (z+d-l)^2 \theta(-d+l-z) - \frac{\alpha_n^2}{(\alpha_n |z| + z_{0n})^4} \theta(z-l_p), \quad (1)$$

donde  $N_d$  es la densidad de impurezas del fondo,  $\epsilon_r$  es la constante de la permitividad eléctrica del GaAs,  $d$  es la distancia donde la puerta está posicionada,  $l_p$  es el ancho de la región de empobrecimiento,  $V(l_p) = 0$  (ver Fig. 1) y  $l$  es la distancia de apantallamiento del campo eléctrico, con

$$l = \sqrt{\frac{\epsilon_r V_c}{4\pi e^2 N_d}}, \quad (2)$$

y  $V_c$  es el potencial de contacto. Hemos supuesto que el nivel de Fermi  $E_f$  está pegado a la banda de conducción.  $\theta$  es la función escalón unitario.  $\alpha_n = 2/(15\pi)$  y  $z_{0n} = (\alpha_n^3/\pi N_{2d})^{1/5}$ ,  $N_{2d}$  es la densidad de la impurezas en el pozo cuántico del n-delta-dopado. Con la expresión (1) y la ecuación de Schrödinger:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{d^2}{dz^2} + V(z) \right] F_i(z) = E_i F_i(z), \quad (3)$$

calculamos los autovalores y autofunciones para la sección siguiente.  $F_i(E_i(z))$  es la  $i$ -ésima autofunción (autovalor) para el n-delta dopado, respectivamente.

## 3. Propiedades de transporte

Basado en la aproximación de Thomas Fermi para este  $\delta$ -FET, estudiamos las propiedades del transporte electrónico

del sistema. Sólo tomamos en cuenta el mecanismo de dispersión de las impurezas ionizadas, porque es mecanismo más importante a baja temperatura. El potencial de dispersión coulombiano debido a las impurezas ionizadas se considera que tiene una distribución aleatoria en la capa dopada. Por último, tenemos la relación de la movilidad relativa [15]:

$$\mu_{rel} = \frac{\mu^{V_c}}{\mu^{V_c=0}} = \frac{\sum_1^{ne} \int |F_i^{V_c=0}(z)|^2 (E_f^{V_c=0} - E_i^{V_c=0}) |z| dz}{\sum_1^{ne} \int |F_i^{V_c}(z)|^2 (E_f^{V_c} - E_i^{V_c}) |z| dz}. \quad (4)$$

Presentamos la densidad electrónica relativa como:

$$n_{rel} = \frac{n^{V_c}}{n^{V_c=0}}, \quad (5)$$

y la relación de conductividad:

$$\sigma_{rel} = n_{rel} \mu_{rel}. \quad (6)$$

## 4. Resultados y discusión

La Fig. 2 reporta los resultados del cálculo del perfil de potencial y de las subbandas de energía con sus funciones envolventes utilizando el modelo de Thomas Fermi,  $N_{2d} = 7.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ,  $V_c = 500 \text{ meV}$ , impurezas del fondo es  $N_d = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , a  $T = 0 \text{ K}$ . En este caso, el n-delta dopado del pozo cuántico está localizado a  $300 \text{ \AA}$  a partir de la intercara. En esta figura, se observa el perfil del potencial confinado (curva segmentada) y se presenta las autofunciones y los autovalores (curva continua), con el nivel de Fermi está pegado al fondo de la banda de conducción

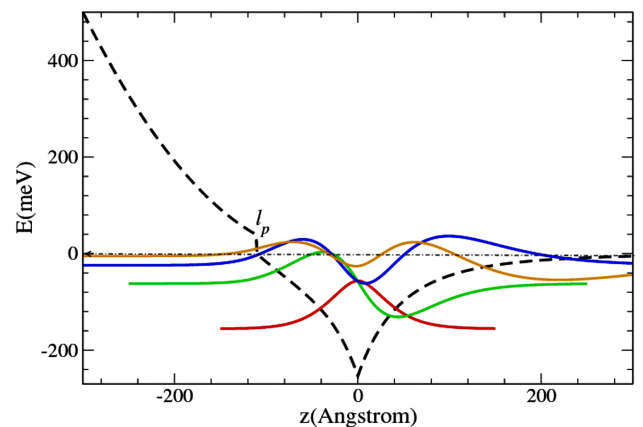


FIGURA 2. Perfil de banda de conducción y las funciones de onda para un  $\delta$ -FET en GaAs. El potencial de contacto está fijados en  $V_c = 500 \text{ meV}$ . Esta gráfica corresponde a un valor de densidad bidimensional del pozo delta en  $N_{2d} = 7.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  y una distancia entre el pozo y el metal de  $d = 300 \text{ \AA}$ .

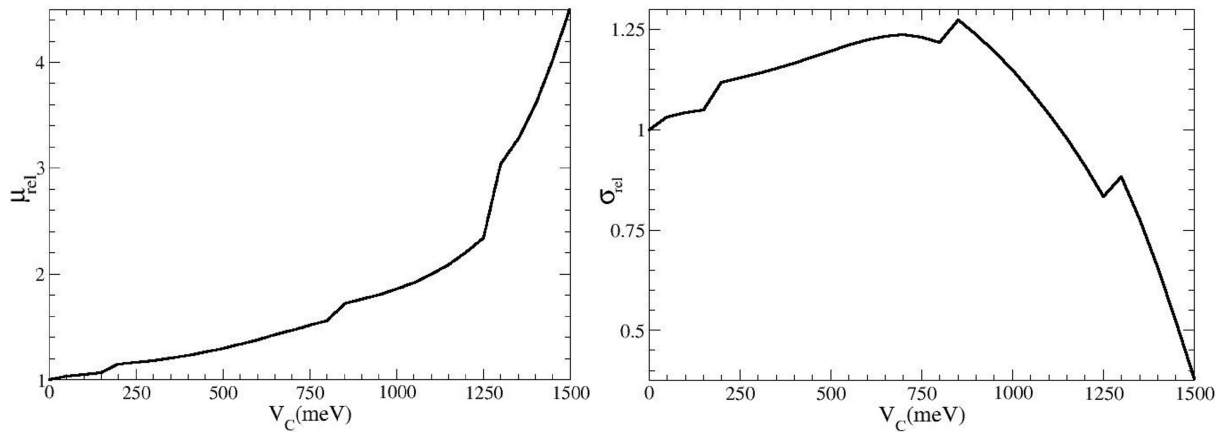


FIGURA 3. Evolución de la movilidad (izquierda) y la conductividad (derecha) conforme al potencial de contacto  $V_C$  para el caso del  $\delta$ -FET en GaAs. Esta gráfica corresponde a un valor de concentración bidimensional de impurezas de  $N_{2d} = 7.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  y fijamos la distancia entre pozo y el contacto de metal a  $d = 300 \text{ \AA}$ .

para el GaAs. Las autofunciones y los autovalores obtenidos con este modelo representan el punto de partida para los cálculos del fenómeno de transporte.

La Fig. 3 (izquierda) contiene la curva de la evolución de la movilidad relativa en función del potencial de contacto  $V_C$ , vemos que la movilidad tiene dos diferentes comportamientos. El primer comportamiento es dominante entre 0 meV y 1200 meV donde la movilidad está aumentando de una forma suave y casi lineal, de 1 a 2.06. El segundo comportamiento es en el rango de los potenciales altos, de 1200 meV a 1500 meV, donde la movilidad está aumentando fuertemente de 2.06 a 4.52. En otras palabras, este dispositivo se caracteriza por su gran movilidad (alta frecuencia) en los potenciales altos. En estos potenciales, los portadores actúan libremente con menos probabilidad de colisión con las impurezas. Por último, se observan claramente tres regiones de transición en [150, 200], [600, 650] y [1200, 1250] (todo en meV), esto se debe al cambio del número de subbandas en el canal de conducción.

La Fig. 3 (derecha) da la conductividad relativa en función de  $V_C$ . Se muestra una variación en el comportamiento de la conductividad, pudiendo caracterizar dos zonas en meV, la primera zona es del tipo lineal, de [200, 600] y [1250, 1500]. La segunda zona es del tipo parabólico, y está en el intervalo de [650, 1200]. Las unidades son meV.

La conductividad relativa tiene un crecimiento leve cuando  $V_C$  está en [0, 650], debido al crecimiento lento de la movilidad (de 1 a 1.57), en otras palabras, la interacción de las impurezas y los electrones libres es fuerte y la variación de la densidad electrónica en el delta dopado es prácticamente constante. Por el contrario, cuando  $V_C \geq 650$  meV en (Fig. 3 derecha) se muestra una disminución de la conductividad, la razón es porque el canal de conducción comienza a cerrarse debido a la disminución intensa de confinamiento electrónica en el pozo delta dopado. También, corresponden a la desaparición de los diferentes canales de conducción que forman las subbandas del pozo delta dopado. El  $\delta$ -FET ofrece

diferentes zonas de interés en la microelectrónica sobre todo cuando la pendiente de la conductividad es negativa (Fig. 3 derecha). Cuando  $V_C$  está en [650, 1200] o [1250, 1500] (en meV) el dispositivo se comporta como una Resistencia Diferencial Negativa (NDR). Esta NDR es útil para la generación de sistemas oscilatorios. Por otro lado, cuando la conductividad es lineal, la transductancia es estable y el dispositivo permite una amplificación estable sin ruido. Esta propiedad es posible cuando el potencial de contacto está definido en [200, 600] o [1250, 1500]. En conclusión, para esta clase de sistemas es muy importante identificar los diferentes rangos de potenciales para sus diferentes propiedades electrónicas.

En la Fig. 4 presentamos el comportamiento que obedece la movilidad Fig. 4 (izquierda) y la conductividad Fig. 4 (derecha), ambos casos en función del potencial de contacto para diferentes valores de densidad del fondo.

Observamos que las pendientes de la movilidad y el número de las transiciones de cada curva disminuyen con el aumento de la densidad de las impurezas del fondo. Por otro lado, se observa que la zona óhmica en la Fig. 4 (derecha) depende también de la densidad de impurezas. También se puede ver que la zona óhmica es más larga por densidad de las impurezas más altas, este comportamiento lineal que obedece la conductividad provee una valiosa propiedad de este dispositivo para lograr una estabilidad en la amplificación electrónica.

La Fig. 5 (izquierda) muestra la evolución de la movilidad para diferentes valores de la distancia entre el pozo y la compuerta. Se observa que cuando el pozo aislado se aleja de la compuerta la movilidad y el número de las transiciones disminuyen. Cuando el pozo aislado está bastante lejos a  $d = 600 \text{ \AA}$  la movilidad relativa es casi invariable. A partir de esta distancia ( $d = 600 \text{ \AA}$ ) el canal no siente el efecto del potencial de contacto. Por otra parte, en la Fig. 5 (derecha) se presenta el resultado del cálculo de la conductividad relativa para diferentes valores de la distancia entre el pozo y el contacto metal/semiconductor. Se observa que la zona óhmi-

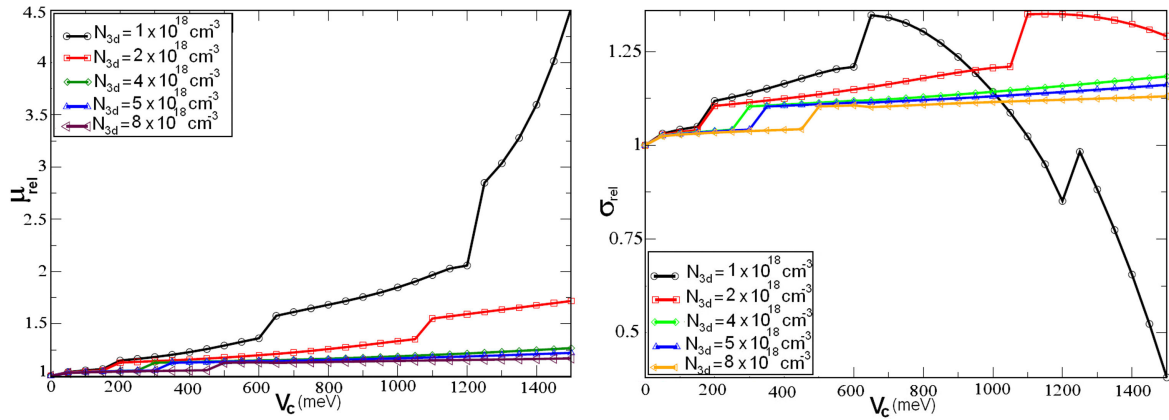


FIGURA 4. Comportamiento de la movilidad (izquierda) y de la conductividad (derecha) como función del potencial de contacto para el caso del  $\delta$ -FET en GaAs; presentamos dicho comportamiento para cinco valores de densidad del fondo (background),  $N_d = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,  $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ . La distancia a la que está colocado el pozo con respecto del contacto metal-semiconductor es de  $300 \text{ \AA}$ . La densidad bidimensional de impurezas tiene un valor de  $N_{2d} = 7.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ .

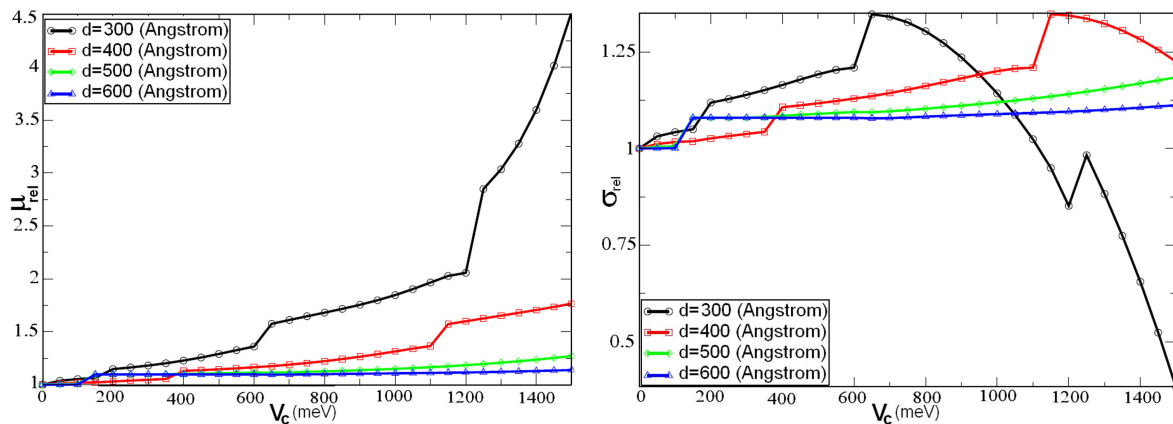


FIGURA 5. Evolución de la movilidad relativa (izquierda) y de la conductividad relativa (derecha) conforme variamos el potencial de contacto  $V_C$  para el caso de  $\delta$ -FET en GaAs. Presentamos dicha evolución para diferentes distancias entre el pozo y el contacto metal-semiconductor,  $d = 300 \text{ \AA}$ ,  $400 \text{ \AA}$ ,  $500 \text{ \AA}$ . En este caso fijamos la densidad bidimensional a  $N_{2d} = 7.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  y la densidad del fondo (background) a  $N_d = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

ca crece debido al aumento de la distancia  $d$ . Cuando la distancia es  $d = 300 \text{ \AA}$ , la zona óhmica está localizada en el intervalo  $[200, 600]$ , cuando la distancia es  $400 \text{ \AA}$ , la zona óhmica está localizada en  $[400, 1100]$  (todo en meV) y cuando la distancia al pozo es mayor a  $400 \text{ \AA}$  la zona óhmica está muy estable en todo el intervalo. Entonces mientras el pozo aislado se aleja del contacto metálico, la zona óhmica crece, y en contraste la conductividad relativa decrece drásticamente. En otras palabras, si la distancia entre el pozo y el intercara es alrededor de  $600 \text{ \AA}$  el canal de conducción del transistor  $\delta$ -FET se comporta como si fuera un canal de conducción de un pozo aislado.

Finalmente a partir de los resultados del cálculo mostrados en las Figs. 3, 4 y 5 se concluye que el potencial de contacto, la densidad de impurezas y la distancia entre pozo y el contacto metal determinan perfectamente la naturaleza de la zona óhmica, esta zona tiene un gran interés en el mundo de la microelectrónica y necesita siempre ser localizadas.

## 5. Conclusión

En el presente trabajo hemos estudiado el fenómeno del transporte electrónico (movilidad y conductividad) a partir de la estructura electrónica, debido a la dispersión de impurezas ionizadas en el transistor  $\delta$ -FET. Nuestros resultados muestran que este dispositivo tiene una gran movilidad con los altos potenciales de contacto. Además, se observó que la zona óhmica del  $\delta$ -FET depende de la magnitud del potencial de contacto, de la densidad del bulto y de la posición del pozo delta de la intercara. Por otra parte, se observó que la conductividad de este dispositivo ofrece una zona de resistencia diferencial negativa por potenciales altos y medios de contacto.

Gracias a las interesantes propiedades eléctricas y de transporte del  $\delta$ -FET, este dispositivo puede ser muy interesante en la industria de la microelectrónica también, puede ser útil en circuitos para baja temperatura y para la tecnología espacial.

1. K. Ploog, M. Hauser y A. Fischer, *Appl. Phys. A* **45** (1988) 233.
2. E. F. Schubert, A. Fischer y K. Ploog, *IEEE Trans. Electron Devices* **33** (1986) 625.
3. E. Ozturk y Y. Ozdemir, *Opt. Commun.* **294** (2013) 361.
4. G. Chicot, T. N. Tran Thi, A. Fiori, F. Jomard, E. Gheeraert, E. Bustarret, y J. Pernot, *Appl. Phys. Lett.* **101** (2012) 162101.
5. R. S. Balmer, I. Friel, S. Hepplestone, J. Isberg, M. J. Uren, M. L. Markham, y R. Lang, *J. Appl. Phys.* **113** (2013) 033702.
6. O. Oubram, L. M. Gaggero-Sager, A. Bassam, y G. A. Luna Acosta, *PIER* **110** (2010) 59.
7. O. Oubram, O. Navarro, L.M. Gaggero-Sager, J. C. Martínez-Orozco, y I. Rodríguez-Vargas, *Sol. Stat. Sci.* **14** (2012) 440.
8. O. Oubram, L. M. Gaggero-Sager, O. Navarro, y M. Ouadou, *PIER* **118** (2011) 37.
9. J. G. Rojas-Briseño, J. C. Martínez-Orozco, I. Rodríguez-Vargas, M. E. Mora-Ramos, y C. A. Duque, *Physica B* **424** (2013) 13.
10. L. M. Gaggero-Sager, J. C. M Peko, y R. Pérez-Alvarez, *Rev. Mex. Fis.* **47** (2001) 153.
11. D. h. Luo *et al.* *Nano. Res. Lett.* **6** (2011) 139.
12. S. J. Wang, S. L. Wu, F. Y. Yuh, y C. Y. Cheng, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33** (1994) 2429.
13. K. Ng. Kwok, *IEEE Trans. Electron Device* **43** (1996) 1760.
14. L. M. Gaggero-Sager, y R. Pérez-Alvarez, *J. Appl. Phys.* **78** (1995) 4566.
15. I. Rodríguez-Vargas, L. M. Gaggero-Sager, y V. R. Velasco, *Surf. Sci.* **537** (2003) 75.