

Análisis de ensanchamientos inhomogéneos en pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs

Zambrano S. E., Bertel R.

Centro de Investigaciones, Universidad de la Guajira, Guajira-Colombia

Prías-Barragán J. J.^{1,*}

Laboratorio de Optoelectrónica, Universidad del Quindío, A. A. 2639, Armenia-Colombia

Fonthal G., Ariza-Calderón H.

¹ Programa de Tecnología en Electrónica, Universidad del Quindío, Armenia-Colombia

(Recibido: 8 de octubre de 2012; Aceptado: 3 de agosto de 2013)

En este trabajo presentamos el análisis de los ensanchamientos inhomogéneos de espectros de Fotorreflectancia (FR) y Fotoluminiscencia (FL) en pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs. La muestra fue crecida por medio de la técnica de Deposición de Vapor Químico Metal Orgánico (MOCVD) con anchos de pozos que van desde 6.5 hasta 10.5 nm. Las mediciones de FR se realizaron en el rango de temperaturas comprendido entre 220 y 300 K, mientras que las mediciones de FL se hicieron en el rango de temperaturas comprendido desde 11 hasta 200 K. Se hizo un análisis comparativo de las formas de línea de los espectros experimentales de FR y FL, encontrándose ensanchamientos inhomogéneos, los cuales se atribuyen a tensiones locales en la interfase pozo-barrera. De los respectivos análisis de los espectros de FR y FL, se logró obtener la dependencia con la temperatura de los parámetros de ensanchamiento de los espectros de FR y FL, lográndose identificar efectos de la interacción excitón-fonón en las transiciones ópticas estudiadas por ambas técnicas de caracterización óptica.

Palabras claves: Pozos Cuánticos; Fotoluminiscencia; Fotorreflectancia; InGaAs/InAlAs; Ensanchamiento Inhomogéneo

In this work we present the analysis of the inhomogeneous broadening of Photoreflectance (PR) and Photoluminescence (PL) spectra in InGaAs/InAlAs quantum wells. The sample was grown by means of Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) with well widths in the range from 6.5 to 10.5 nm. PR measurements were performed in the temperature range between 220 and 300 K while the PL measurements were made in the temperature range from 11 to 300 K. Comparative analysis of line shapes of the PR and PL experimental spectra reveals an inhomogeneous broadening in both measurements, which is attributed to local stresses in the well-barrier interface. From the analysis of the PR and PL spectra, we obtained the temperature dependence of the broadening parameters, allowing the identification of effects of exciton-phonon interaction in optical transitions studied by both optical techniques.

Keywords: Quantum Wells; Photoluminescence; Photoreflectance; InGaAs/InAlAs; Inhomogeneous Broadening

1. Introducción

La alta movilidad de los electrones y la baja resistividad térmica de la aleación ternaria InGaAs/InAlAs/InP la convierten en uno de los materiales más importantes en la fabricación de dispositivos de alta velocidad como transistores, detectores, interruptores y moduladores ópticos, tal como ha sido publicado por Colinge y Colinge [1].

Los pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs también han sido utilizados en la construcción de transistores de heterojuntura, dispositivos integrados y de conmutación fotónica, de acuerdo a lo reportado por Kim *et al* [2]. Ofrecen ventajas como el bajo ruido y una rápida respuesta. Estos materiales constituyen un gran potencial en la fabricación de láseres, pero factores como: las variaciones aleatorias en la composición química de la aleación, las rugosidades de la interfase pozo-barrera en pozos cuánticos (*QWs*) y las variaciones en el espesor (ancho) de los pozos en superredes, pueden causar variaciones en el potencial de confinamiento y alteraciones,

bastante apreciables, en el perfil y el ancho del haz del láser, manifestándose con la pérdida de su intensidad y coherencia. Cuando estos pozos cuánticos son excitados con fuentes de luz a baja temperatura, pueden responder bajo formas de líneas espectrales, las cuales se pueden ensanchar de manera homogénea o inhomogénea, debido a la densidad de defectos en su estructura o a las fluctuaciones de tamaño y formas de la nanoestructura, manifestándose a través de una distribución en los niveles de energía de la señal luminiscente.

El ensanchamiento inhomogéneo se presenta en un espectro óptico a valores bajos de temperatura y se puede identificar porque es un ensanchamiento independiente de la temperatura; mientras que el ensanchamiento homogéneo, depende de la temperatura en un amplio rango de valores. Para el caso de los pozos de InGaAs/InAlAs, su naturaleza aún no está muy bien entendida, así como su relación con la alta movilidad de portadores, la cual favorece las aplicaciones de estos materiales en dispositivos de conmutación óptica.

* jjprias@uniquindio.edu.co

Tabla 1. Valores de parámetros obtenidos de la simulación y el ajuste de $\Gamma(T)$ empleando la Ec. (3), para diferentes espesores de pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs.

Ancho del Pozo [nm]	Γ_o [meV]	Γ_{ep} [meV]	$\hbar v_{L0}$ [meV]
10.5	26.13	56.41	33.22
7.5	3.54	20.98	33.22

Por lo tanto, con el fin de contribuir al entendimiento del problema en mención, en este trabajo presentamos un análisis de los ensanchamientos inhomogéneos en pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs, empleando espectros experimentales de FR y FL y su variación con la temperatura. Estas técnicas de caracterización no requieren tratamientos previos en las muestras comparadas con otras técnicas de caracterización donde a las muestras se les deben depositar contactos eléctricos, tal como la técnica de electrorreflectancia. Las técnicas de FR y FL resultan de gran utilidad en la caracterización de materiales semiconductores, debido a que permiten determinar con una alta resolución la energía de los puntos críticos de estructuras electrónicas de bandas y las transiciones fotoluminiscentes de materiales semiconductores, respectivamente. Su aplicación incluye el estudio tanto de materiales en bloque como de películas delgadas y multicapas, tal como ha sido publicado previamente por Prías-Barragán *et al* [3].

2. Metodología

Las muestras de pozos cuánticos (QWs) de InGaAs/InAlAs fueron crecidas por la técnica de deposición química de vapor metal orgánico (MOCVD) en el Instituto de Optoelectrónica de la Universidad de Campiñas, Rio Janeiro, Brasil, tal como ha sido reportado por Racedo [4]. La muestra 267 tiene tres pozos cuánticos de $In_{0.518}Ga_{0.482}As$ con espesores de 6.5, 7.5 y 10.5 nm, separados por barreras de $In_{0.482}Al_{0.518}As$, cuyos espesores son de 70 a 90 nm. Además, la muestra tiene una capa superficial de InGaAs de 200 nm de espesor para hacer los contactos del dispositivo, pero para nuestro trabajo sirvió de referencia y comparación, como material en volumen. Empleando la técnica de FR en el infrarrojo cercano, se hizo el análisis de los espectros de pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs, los cuales se obtuvieron usando como haz modulador la línea 325 nm de un láser de HeCd de 35 mW, cortado mecánicamente a una frecuencia fija de 255 Hz; se utilizó un monocromador TRIAX 320 con una resolución de 0.4 nm, una rejilla de difracción de 300 líneas/mm, una lámpara QTH de 180 W y un fotodetector de PbS. Las mediciones de FR se realizaron en el rango de temperaturas comprendido desde 220 hasta 300 K mediante la utilización de un sistema criogénico, las mediciones a valores bajos de temperatura no fueron posibles debido a la disminución de la relación señal a ruido en el sistema de medida. Las mediciones de fotoluminiscencia (FL) fueron

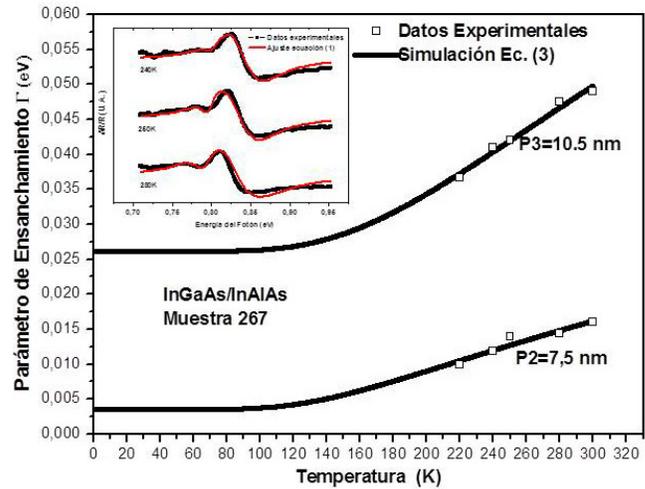


Figura 1. Dependencia con la temperatura de los parámetros de ensanchamiento, obtenidos mediante el análisis de los espectros de FR del recuadro. Los espectros de FR para 220 K y 300 K tuvieron un comportamiento similar al observado en los espectros de FR del recuadro.

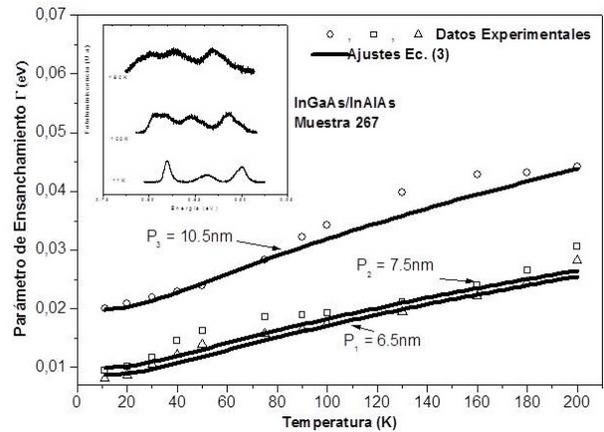


Figura 2. Dependencia con la temperatura de los parámetros de ensanchamiento, obtenidos mediante el análisis de los espectros de FL del recuadro.

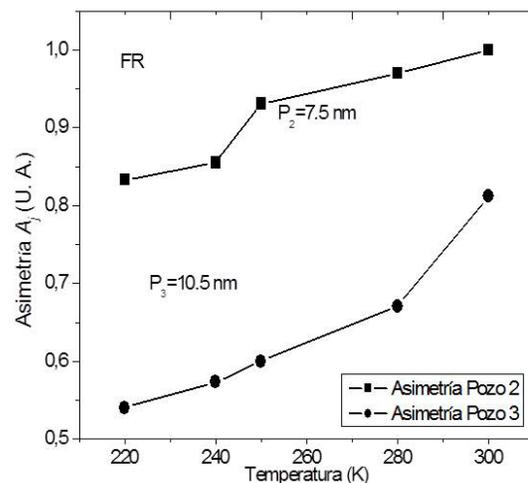


Figura 3. Dependencia con la temperatura del parámetro de asimetría de los espectros de FR, calculados a partir de los ajustes a los datos experimentales mediante la Ec. (1).

realizadas en los rangos de temperatura comprendidos desde 11 hasta 200 K, usando como fuente de excitación la línea 488 nm de un láser de Ar. El sistema cuenta con un circuito cerrado de He líquido y un dedo frío cuya temperatura se controla con dos sensores de Silicio y un calefactor de 50 W que permite variar la temperatura de la muestra. La deconvolución espectral de la FL se llevó a cabo en un mon cromador SPEX 500M con una resolución de 0.1 Å y una distancia focal de 0.50 m y colectada a través de un fotodiodo de InGaAs, cuya señal eléctrica fue amplificada en un lock-in modelo SR830DSP de la empresa Stanford Research.

3. Teoría

Cuando un semiconductor es excitado a través de un campo eléctrico, por medio de radiación electromagnética, se ejerce una fuerza sobre los portadores de carga, acelerándolos y en el recorrido sufren colisiones instantáneas con diferentes centros dispersivos que tienden a frenarlos, tal como ha sido reportado por Romero [5]. En un semiconductor con impurezas, los centros de dispersión son fundamentalmente de dos tipos: el primero, los iones, que pueden ser tanto del mismo material como de las impurezas y el segundo, las oscilaciones de la red cristalina del semiconductor o fonones tal como ha sido publicado por Kittell [6], ya que éstas interactúan con los portadores en movimiento, modificando su momento lineal. Estos procesos dispersivos, pueden provocar en los espectros de FR y FL ensanchamientos los cuales pueden ser inhomogéneos cuando el proceso dispersivo es independiente de la temperatura y homogéneo cuando depende de la temperatura.

Por otro lado, el mecanismo de la técnica de FR es la modulación del campo eléctrico en la interfase pozo barrera a través de la recombinación de portadores minoritarios en trampas. Reportes anteriores sugieren que los espectros de FR obtenidos en este trabajo pueden ser analizados mediante una forma funcional Lorentziana asimétrica de tercera derivada para un punto crítico dos dimensional, tal como ha sido propuesto por Zambrano *et al* [7], basándose en una modificación fenomenológica plausible del modelo propuesto por Aspnes [8, 9], la cual está dada por:

$$\frac{\Delta R}{R} = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^p C_j \exp(i\theta_j) (iA_j - 1) (E - E_{pcj} + i\Gamma_j)^{-m_j} \right] \quad (1)$$

Siendo C_j la amplitud de la oscilación j , θ_j el ángulo de fase, Γ_j el parámetro fenomenológico de ensanchamiento, E_{pcj} la energía de la transición o punto crítico de la j -ésima transición, A_j es el factor de asimetría, puede tomar valores iguales o mayores a cero y es un parámetro adimensional, influenciado principalmente por las diferencias entre los coeficientes de dilatación térmica de los materiales que conforman el pozo y la barrera, p es el número de contribuciones exhibidas por el espectro y m_j es el tipo de transición óptica. Cuando $m = 2.0$ se trata de una transición

excitónica (1D); $m = 3.0$ una transición de un excitón en un punto crítico dos dimensional (2D); y $m = 2.5$ una transición de un electrón en un punto crítico tres dimensional (3D).

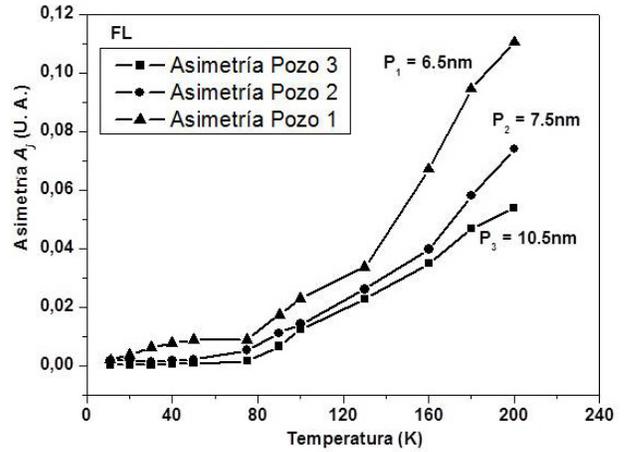


Figura 4. Dependencia con la temperatura del parámetro de asimetría de los espectros de FL, calculados a partir de los ajustes a los datos experimentales mediante la Ec. (2).

Para el caso de la técnica de FL, el mecanismo consiste en detectar la emisión de radiación proveniente de una muestra debida a la fotoexcitación de portadores de carga eléctrica en el material. Reportes anteriores sugieren que los espectros de FL obtenidos en este trabajo, podrían ser analizados mediante una forma funcional de Lorentziana asimétrica, tal como ha sido propuesto por Bertel *et al* [10], de manera fenomenológica, la cual está dada por:

$$I_{PL} = \sum_j^n A_j \left[\frac{(1 + B_j x_j)^2 + B_j^2}{1 + x_j^2} \right] \quad (2)$$

Donde I_{PL} es la intensidad de la señal de FL, n es el número total de contribuciones en el espectro de FL, A_j es la intensidad independiente de la energía de excitación de cada transición, B_j es el factor de asimetría, asociado a efectos inhomogeneos producidos por tensiones locales en la interface pozo-barrera, puede tomar valores iguales o mayores a cero y es un parámetro adimensional. E_j es la energía del pico máximo, $x = 2(E - E_j)/\Gamma_j$, siendo E_j la energía de la j -ésima transición y Γ_j el parámetro de ensanchamiento para cada transición. Se conoce que Γ se relaciona con el amortiguamiento de la vibración de la red y que a partir del modelo de oscilador armónico de Einstein, tal como ha sido reportado por J. J. Prías-Barragán *et al* [3], se puede obtener que $\Gamma(T)$ está dada por:

$$\Gamma^2 = \Gamma_o^2 + \Gamma_{ep}^2 (\exp(\hbar\gamma_{LO} / kT) - 1)^{-2} \quad (3)$$

Siendo el primer término Γ_o el ensanchamiento intrínseco independiente de la temperatura, el cual obedece a procesos dispersivos inhomogéneos, debido a las imperfecciones o deformaciones de la red cristalina; el segundo término se

encuentra asociado a procesos dispersivos homogéneos que dependen de la temperatura, en donde $\hbar\gamma_{LO}$ es la energía del fonón participante y Γ_{ep} es la medida del acople electrón-fonón o excitón-fonón, tal como ha sido reportado por J. J. Prías-Barragán *et al* [3].

Por otro lado, en la literatura especializada se conoce que a temperaturas altas (80 K – 300 K), en el caso de pozos cuánticos de GaAs/AlGaAs e InGaSb/GaSb, el ensanchamiento de la función dieléctrica se ha atribuido a la fuerte interacción excitón-fonón, a impurezas y a defectos, y que en ese caso se asumen perfiles Gaussianos en los modelos de FR, tal como ha sido reportado por Jan Misiewicz *et al* [11]. Sin embargo, en este trabajo la asimetría exhibida por los espectros de FR y FL, no permitieron el uso de perfiles Gaussianos y por lo tanto, se asumieron perfiles Lorentzianos como un camino alternativo, debido a que desde el punto de vista básico, es bien conocido que la variación del ensanchamiento de los espectros de FR con la temperatura obedece la expresión (3), denominada la relación de Bose-Einstein, en donde se han considerado procesos de indistinguibilidad de las partículas interactuantes, mientras que el perfil Gaussiano involucra condiciones de distinguibilidad de las partículas interactuantes, lo cual contradice principios de la mecánica estadística.

Asimismo, el perfil Gaussiano implica procesos de ensanchamiento de la función dieléctrica considerando el movimiento aleatorio de las partículas interactuantes y que se cumpla la condición $\Gamma=(E_{pc})^{1/2}$, lo cual no aplica para el caso de los pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs estudiados en este trabajo, puesto que el ensanchamiento de la función dieléctrica no se debe a la fuerte interacción excitón-fonón, si no a la interacción excitón-fonón, a impurezas y a defectos. Por consiguiente, asumimos en este trabajo perfiles Lorentzianos en los modelos de FR, de manera similar a lo conocido en la teoría del ensanchamiento de las líneas espectrales, cuando aparecen efectos de colisión de partículas.

4. Resultados y Discusión

En las Figuras 1 y 2 se presentan las dependencias con la temperatura de los parámetros de ensanchamiento $\Gamma(T)$ de los espectros de FR y FL, respectivamente; cuyos valores fueron obtenidos a partir del ajuste de los espectros experimentales, empleando las expresiones (1) y (2), tal como se puede observar en los respectivos recuadros. Se encontró que cuando crece la temperatura, los parámetros de ensanchamiento también se incrementan, tal como era de esperarse y cuando el espesor del pozo cuántico de InGaAs/InAlAs aumenta, los parámetros de ensanchamiento tanto de los espectros de FR como de FL también incrementan de valor. Por tratarse de espectros de FR y FL cuyas formas de líneas presentaron una alta asimetría, se encontró que los parámetros de ensanchamiento obedecen a comportamientos inhomogéneos para valores de temperatura inferiores a 20 K según espectros de FL y 80 K según espectros de FR;

mientras que el comportamiento homogéneo se presentó para las temperaturas comprendidas desde 20 hasta 300 K y desde 80 hasta 300 K, para los espectros de FL y FR, respectivamente. La diferencia entre las temperaturas iniciales en el ensanchamiento homogéneo de los espectros de FL y FR, podrían atribuirse a que a bajas temperaturas el modelo teórico tiene una muy buena correspondencia con los datos experimentales, pero aproximadamente en 80K, se activa un proceso térmico que hace crecer aún más el ancho espectral de lo que se espera con la participación fonónica. Dicho proceso podría estar asociado al aumento de tensiones por efecto de la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica de los dos materiales, pozo y barrera.

En la Figura 1 se puede observar que los valores de $\Gamma(T)$ para el caso de los espectros de FR, pueden ser descritos teóricamente, mediante una simulación de la Ec. (3). Mientras que en el caso de $\Gamma(T)$ obtenida del análisis de los espectros de FL, (tal como aparece en la Figura 2) se realizó el ajuste logrando una buena concordancia entre la teoría y el experimento, considerando efectos de interacción excitón-fonón. Estos resultados fueron publicados previamente por R. Bertel *et al* [10]. De los respectivos análisis empleando la Ec. (3), se obtuvieron los valores de los parámetros presentados en la *Tabla 1*. Se puede observar que para el espesor de pozo de 10.5 nm, el ensanchamiento inhomogéneo Γ_o presentó el valor aproximado de 26 meV, este ensanchamiento inhomogéneo para el caso de los pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs, se puede atribuir a efectos de tensiones locales en la interfase pozo-barrera, pues el desacople entre los parámetros de red es de 0.01 nm, tal como ha sido reportado por Gilles Dambrine *et al* [12]. Asimismo, se encontró que a medida que el espesor del pozo aumenta, el parámetro de ensanchamiento inhomogéneo también aumenta, debido al relajamiento de las tensiones localizadas en la interfase pozo-barrera.

En las Figuras 3 y 4 se presentan las dependencias con la temperatura de los parámetros de asimetría obtenidos mediante el ajuste de los espectros experimentales de FR y FL empleando las Ecs. (1) y (2), respectivamente. Se encontró que a medida que se incrementa la temperatura, la asimetría aumenta y cuando el espesor del pozo se incrementa, la asimetría de los espectros de FR y FL disminuye. Se puede observar en la Figura 4 que para valores de temperatura inferiores a 80 K los valores de la asimetría presentan variaciones muy pequeñas con la temperatura, mientras que para valores de temperatura en el rango comprendido desde 80 hasta 300 K, la variación es mayor. Asimismo, se puede observar que para valores de temperatura inferiores a 20 K, los valores de asimetría en los tres pozos parecen tender a un mismo valor y a partir de este valor conseguiría hacerse independiente del espesor del pozo, dilucidar las implicaciones físicas de este aspecto, requiere de mediciones de FR y FL a temperaturas más bajas que las consideradas en este trabajo. En reportes previos de Zambrano *et al* [7] y Bertel *et al* [10, 13] se abordó el problema de las asimetrías exhibidas por los

espectros de FR y FL, encontrándose que la asimetría se debía a las diferencias entre los coeficientes de dilatación térmica de los pozos y las barreras, los cuales podrían provocar campos eléctricos localizados, que conseguirían aumentar con la temperatura, por la presencia de los átomos de Ga en los pozos y los átomos de Al en la barrera, pues estos átomos al estar enlazados a los átomos de InAs pueden hacer vibrar de manera diferente la red cristalina de ambos materiales y provocar las asimetrías exhibidas. En este trabajo confirmamos que el efecto de la temperatura en las asimetrías se presenta de manera significativa para valores de temperatura superiores a 80 K. Asimismo, comparando los diferentes valores de las asimetrías obtenidos de manera indirecta por las técnicas de FR y FL, respectivamente; se puede observar que las asimetrías en el caso de la FR toma valores en un orden de magnitud mayor que en el caso de la asimetría obtenida por FL, esto podría atribuirse a que los procesos de emisión fotoluminiscente en las muestras estudiadas juegan un papel importante en la fuerte atenuación de los valores de asimetría.

5. Conclusiones

Se determinaron las dependencias con la temperatura de los parámetros de ensanchamiento y de asimetría, a partir del análisis de espectros de FR y FL. Se encontró que a medida que la temperatura aumenta, el ensanchamiento de los espectros de FR y FL se incrementa, lográndose identificar, que el principal proceso dispersivo en los pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs, se debe a la interacción entre los excitones y los fonones y la presencia de ensanchamientos inhomogéneos para valores de temperatura inferiores a 20 K. Asimismo, se encontró que a mayor espesor del pozo cuántico, mayor es el valor del ensanchamiento inhomogéneo y menor es la asimetría exhibida por los espectros de FR y FL.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado mediante el apoyo financiero de las Universidades de la Guajira y del Quindío. Un agradecimiento muy especial al Dr. Francisco Racedo de la Universidad del Atlántico, por facilitar las muestras para este trabajo.

Referencias

- [1] J. P. Colinge and C. A. Colinge, *Physics of Semiconductor Device*, (U.S.A: Kluwer Academic Publishers, 2002).
- [2] T. W. Kim, D. U. Lee, J. Y. Lee and M. D. Kim, *J. Appl. Phys.* **89**, 2503 (2001).
- [3] J. J. Prías-Barragán, J. I. Marín-Hurtado, D. G. Espinosa, G. Fonthal and H. Ariza-Calderón, *Rev. Col. Fis.* **34**, 351 (2002).
- [4] F. J. Racedo, *Crecimiento Epitaxial Selectivo de Estructuras Semiconductoras III-V*. Rio de Janeiro, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica. (Pontificia Universidade Católica, Rio de Janeiro Brasil 2000).
- [5] P. G. Romero. *Teoría Cinética Elemental en los Procesos de Transporte. Física de Semiconductores*. (Departamento de Ingeniería Eléctrica CINVESTAV, México, Capítulo 6, 2002)
- [6] C. Kittell, *Introducción a la Física del Estado Sólido*. (Barcelona: Ed. Reverté S.A, 1981)
- [7] S. E. Zambrano, G. Fonthal, J. J. Prías-Barragán, D. G. Espinosa, F. Racedo, R. Bertel and H. Ariza-Calderón, *Rev. Col. Fis.* **40**, 271 (2008).
- [8] D. E. Aspnes, *Surf. Sci.* **37**, 418 (1973).
- [9] D. E. Aspnes. *Handbook of semiconductors*, editado por T.S Moss (North Holland, New York, 1980).
- [10] R. Bertel, G. Fonthal, M. De los Rios, F. Racedo, S. E. Zambrano and H. Ariza-Calderón, *Rev. Col. Fis.* **39**, 151 (2007).
- [11] Jan Misiewicz, Piotr Sitarek, Grzegorz Sek, Robert Kudrawiec, *Materials Science.* **21**, 263 (2003).
- [12] Gilles Dambrine, Thierry Parenty, Sylvain Bollaert, Henri Happy, A. Cappy, Javier Mateos, Tapani Nahri, Jean Claude Orliac, Marc Trier, Pierre Baudet and Patrice Landry, *11th GaAs Symposium – Munich 473* (2003).
- [13] R. Bertel, G. Fonthal, M. De los Rios, F. Racedo, S. E. Zambrano and H. Ariza, *Rev. Col. Fis.* **41**, 368 (2009).