

## Cálculos preliminares de pozos cuánticos dobles sometidos a láser intenso y presión hidrostática

Belén Eugenia Maldonado-Villa <sup>1</sup>, Jimena Pérez-González <sup>1</sup>, Karla Arely Rodríguez-Magdaleno <sup>1</sup>,  
José Guadalupe Rojas-Briseño <sup>1,2</sup>, Juan Carlos Martínez-Orozco <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas,  
Calzada Solidaridad esquina con paseo a la Bufa S/N, C.P. 98060, Zacatecas, Zac., México.

<sup>2</sup> Unidad Académica de Ciencia y Tecnología de la Luz y la Materia,  
Universidad Autónoma de Zacatecas,  
Carr. Zacatecas-Guadalajara Km. 6, Ejido La Escondida, 98160 Zacatecas, Zac., México.

[belen.maldonado@fisica.uaz.edu.mx](mailto:belen.maldonado@fisica.uaz.edu.mx)

**Resumen:** En este trabajo presentamos el estudio teórico de las propiedades electrónicas (niveles de energía y funciones de onda) para un pozo de potencial rectangular doble asimétrico de la heteroestructura semiconductor  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  sometida al efecto de interacciones externas. Las dimensiones del sistema cuántico semiconductor de interés están en la escala nanométrica, de anchos de 6 y 8 nm para los pozos de la izquierda y derecha, separados por una barrera de 2 nm. Las alturas de las barreras están determinadas por la concentración de aluminio del  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , y que en este estudio en particular usamos  $x = 0.25, 0.15$  y  $0.30$  para las barreras de la izquierda, central y de la derecha, respectivamente (Figura 1). Los efectos externos que consideramos en este trabajo son: el efecto de la presión hidrostática sobre el sistema, en un rango de 0 a 40 kbar y la radiación de láser intenso no resonante a través del parámetro de revestimiento  $\alpha_0$  (que tiene unidades de distancia) que en nuestro modelo de estudio no puede ser mayor que la mitad del ancho más angosto del sistema, que en este caso es el de la barra central. Todos estos estudios se hacen dentro de la aproximación de masa efectiva considerando bandas parabólicas. Podemos concluir que el efecto de considerar la presión hidrostática, manteniendo todos los demás parámetros fijos, es que disminuyen tanto los altos de las barras de potencial, así como los auto valores de energía y para el caso del efecto de láser intenso se encuentra que el potencial *visto* por los electrones disminuye en general el ancho efectivo de los pozos cuánticos, lo cual produce que los auto valores de energía incrementen ligeramente.

**Palabras clave:** Pozos cuánticos, láser intenso, presión hidrostática.

**Abstract:** In this work we present the theoretical study of the electronic properties (energy levels and wave functions) for an asymmetric double rectangular potential quantum well of the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  heterostructure when it is subjected to the effect of external interactions. The dimensions of the semiconductor quantum system of interest are on the nanometric scale, with widths of 6 and 8 nm for the left and right wells, separated by a 2 nm barrier. The heights of the barriers are determined by the aluminum concentration of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , and that in this particular study we use  $x = 0.25, 0.15$ , and  $0.30$  for the left, central, and right barriers, respectively. The external interactions that we consider in this paper are: The hydrostatic pressure ( $P$ ) effect on the system, in a range from 0 to 40 kbar and the intense non-resonant laser effect through the laser dressing parameter  $\alpha_0$  that has units of distance and in our model, it cannot be greater than the semi-distance of the narrowest width of the system, which in this case is that of the central barrier. All these studies are done by working on the effective mass approximation considering parabolic bands. We can conclude that the effect of considering the hydrostatic pressure, keeping all the other parameters fixed, is that both the heights of the potential bars decrease, as well as the self energy values and for the case of the intense laser effect it is found that the potential *seen* by the electrons is as if the potential wells are narrower at the bottom of the potential, which causes the eigenvalues of energy to increase slightly.

**Keyword:** Quantum wells, intense laser field, Hydrostatic pressure.

### 1. Introducción

A lo largo de los años, la Física del Estado Sólido se ha ocupado del estudio de la descripción atómica y de las propiedades que presentan los sólidos, los cuales están constituidos por una gran cantidad de átomos, tanto desde el punto de vista microscópico como macroscópico. Se ven involucradas diversas disciplinas de la física como la mecánica cuántica, la física

estadística, la cristalografía y el electromagnetismo, solo por mencionar algunas. A esta reunión, o conjunto de átomos se le conoce como empaquetamiento y posee fuerzas de interacción entre ellos, ya sean Coulombianas o del tipo Van der Waals, cuyos efectos efectivos son responsables de las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas y ópticas de los materiales

sólidos, cristalinos o amorfos, en nuestro caso semiconductores cristalinos.

Dichas propiedades se han estado aprovechando para la construcción de dispositivos optoelectrónicos en la aplicación de avances tecnológicos novedosos y de vanguardia, que son el tipo de estudios que motivan nuestra investigación, entre los que figuran los transistores, diodos, amplificadores, láseres y celdas solares, solo por mencionar unos ejemplos.

Las uniones entre semiconductores diferentes han atraído durante mucho tiempo la atención de los investigadores en física y electrónica de estado sólido, por lo que se tuvo que elegir un término adecuado para la unión de dos semiconductores distintos de manera que la composición química del sistema en conjunto cambie con la posición, orientada normalmente a lo largo de un eje (pozos cuánticos), dos ejes (hilos cuánticos) o los tres ejes (puntos cuánticos). A este tipo de sistemas se le asignó el nombre de Heteroestructura y su forma más simple es lo que se conoce como Heterounión; la mayoría de los dispositivos como transistores, diodos emisores de luz, fotodetectores y celdas solares contienen combinaciones múltiples de heterouniones [1].

Hablando de las celdas solares, que es un tema por demás interesante, ya que éstas contribuyen a las famosas energías renovables dado que aportan una importante fuente de energía convirtiendo la luz solar en electricidad por medio de lo que se conoce como efecto fotovoltaico. Las celdas solares han sido utilizadas en industrias, casas e inclusive en los satélites que rodean al planeta Tierra; son un dispositivo construido a partir de materiales semiconductores, fundamentalmente, debido a que conviene que conduzcan energía eléctrica sólo bajo ciertas condiciones y usualmente se fabrican de silicio (Si) o arseniuro de galio (GaAs) por sus características químicas y conductividades, pero más importante por sus propiedades ópticas [2]. Estos dispositivos tienen como ventajas: reducir las emisiones de dióxido de carbono de todos los aparatos y equipos que hagan uso de la energía solar como su fuente principal y también hacen accesible la electricidad para personas que habitan en zonas rurales de difícil acceso donde la energía convencional no llega.

En este sentido, los estudios de propiedades optoelectrónicas de heteroestructuras, desde el punto de vista de la ciencia básica, se vuelve de suma importancia dado que, aunque estas heteroestructuras son utilizadas en una infinidad de sistemas electrónicos a nosotros no interesa su posible aplicación en sistemas como celdas solares, por lo que en este trabajo presentamos resultados preliminares de la estructura electrónica de un pozo doble, al menos si para la banda de conducción, que puede contribuir como un mecanismo para la formación de bandas intermedias en celdas solares, que es una propuesta hecha por Antonio Luque y Antonio Martí en 1997 [3], y que posteriormente en coautoría con C. Stanley [4] hacen una excelente discusión al respecto del entendimiento de este mecanismo, que involucran estudios como el presente.

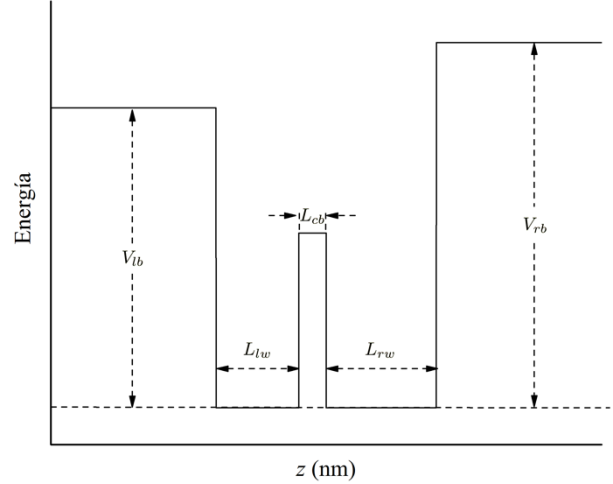


Fig. 1. Perfil de potencial para un pozo rectangular doble asimétrico  $V_c(z, \alpha_0, P)$ . Se especifican los anchos y los altos de las barreras.

## 2. Metodología y materiales de trabajo

En este estudio trabajamos en la aproximación de masa efectiva en la banda de conducción, lo cual implica considerar la banda parabólica alrededor de punto de máxima simetría en la primera zona de Brillouin, el punto  $\Gamma$ . El Hamiltoniano a resolver es, en este caso:

$$\left[ -\frac{\hbar^2}{2m_e^*(P)} \frac{d^2}{dz^2} + \langle V_c(z, \alpha_0, P) \rangle \right], \quad (1)$$

donde  $\hbar$  representa la constante de Planck reducida,  $m_e^*(P)$  es la masa efectiva del electrón (la cual depende, en general, de la presión hidrostática  $P$ ),  $e$  es la carga eléctrica del electrón y finalmente  $V_c(z, \alpha_0, P)$  lo que representa es el potencial de confinamiento, con  $z$  como la coordenada de dirección de crecimiento, que en general depende del parámetro de revestimiento del láser  $\alpha_0$ , dado por:

$$V_c(z, \alpha_0, P) = \begin{cases} V_{ib} & -L/2 < z < -L_{lw} - L_{cb}/2 \\ 0 & -L_{lw} - L_{cb}/2 < z < -L_{cb}/2 \\ V_{cb} & -L_{cb}/2 < z < L_{cb}/2 \\ 0 & L_{cb}/2 < z < L_{cb}/2 + L_{rw} \\ V_{rb} & L_{cb}/2 + L_{rw} < z < L/2. \end{cases} \quad (2)$$

Obviamente la altura de las barreras depende de la concentración de aluminio y del alineamiento relativo de las bandas, que se conoce como el *band-offset*, que depende también de la presión hidrostática ( $P$ ). En las siguientes subsecciones se presentan las expresiones para el efecto del láser intenso, que se expresa en términos del parámetro de revestimiento  $\alpha_0$ , así como las que corresponden al efecto de la presión hidrostática  $P$ .

### 2.1 Efecto de láser intenso

El estudio de la acción de un campo láser intenso de alta frecuencia (ILF, por sus siglas en inglés), sobre una

heteroestructura, se hace asumiendo un campo de radiación electromagnética no resonante, que actúa de manera perpendicular sobre la dirección de crecimiento ( $z$ ).

El efecto principal es la modificación del potencial “visto” por los electrones confinados en el pozo de potencial como lo postula claramente F. M. S. Lima *et al.* [5]. Entramos a una situación en la que el potencial de confinamiento ahora se ve *revestido* por el efecto del láser intenso. Para este análisis se debe introducir  $\alpha_0$  (conocido como parámetro de revestimiento del láser), de manera tal que  $V_c(z) \rightarrow V_c[z + \alpha(t)]$ :

$$\alpha(t) = \alpha_0 \sin \Omega t \quad ; \quad \alpha_0 = eA_0/m_e^* \Omega, \quad (3)$$

$e$  representa la carga del electrón,  $m_e^*$  es la masa efectiva del semiconductor,  $A_0$  la intensidad del campo óptico y  $\Omega$  etiqueta la frecuencia no resonante del campo láser.

Ahora, la forma de abordar nuestro potencial de confinamiento será, tomando en consideración el límite de alta frecuencia donde el electrón está sujeto un potencial promediado en el tiempo [6]. De tal forma que  $V_c[z + \alpha(t)] = \langle V_c(z, \alpha_0, P) \rangle$ , donde el potencial promedio:

$$\langle V_c(z, \alpha_0, P) \rangle = \int_0^{2\pi/\Omega} V_c(z + \alpha_0 \sin \Omega t) dt. \quad (4)$$

Se ha tomado la solución analítica de esta integral para valores del parámetro de revestimiento en un rango que va de cero a la mitad del ancho mas angosto del sistema, en este caso tenemos que  $\alpha_0 \leq L_{cb}/2$ , donde  $L_{cb}$  representa el ancho de la barrera central tomado como 2 nm.

Se ha reportado el valor del potencial de confinamiento para pozos simples de ancho  $L_i$ , bajo el efecto del láser intenso [7]. Para abordar el sistema de pozos dobles, se tomará en cuenta lo correspondiente al ancho de cada pozo  $L_{lw}$  y  $L_{rw}$ , además del ancho de la barrera central  $L_{cb}$ . De manera tal que el potencial de confinamiento  $\langle V(z, \alpha_0) \rangle$  para cada región espacial en  $z$ :

$$\begin{aligned} & \frac{V_{lb}}{\pi} \arccos\left(\frac{L_{lw} + L_{cb}/2 + z}{\alpha_0}\right) & z \leq -L_{cb}/2 - L_{lw} - \alpha_0 \\ & 0 & -L_{cb}/2 - L_{lw} - \alpha_0 < z < -L_{cb}/2 - L_{lw} + \alpha_0 \\ & \frac{V_{cb}}{\pi} \arccos\left(\frac{-L_{cb}/2 - z}{\alpha_0}\right) & -L_{cb}/2 - L_{lw} + \alpha_0 < z \leq -L_{cb}/2 - \alpha_0 \\ & \frac{V_{cb}}{\pi} \arccos\left(\frac{-L_{cb}/2 + z}{\alpha_0}\right) & -L_{cb}/2 - \alpha_0 < z < -L_{cb}/2 + \alpha_0 \\ & 0 & -L_{cb}/2 + \alpha_0 \leq z \leq L_{cb}/2 - \alpha_0 \\ & \frac{V_{rb}}{\pi} \arccos\left(\frac{L_{rw} + L_{cb}/2 - z}{\alpha_0}\right) & L_{cb}/2 - \alpha_0 < z < L_{cb}/2 + \alpha_0 \\ & \frac{V_{rb}}{\pi} \arccos\left(\frac{L_{rw} + L_{cb}/2 - z}{\alpha_0}\right) & L_{cb}/2 + \alpha_0 < z \leq L_{cb}/2 + L_{rw} - \alpha_0 \\ & 0 & L_{cb}/2 + L_{rw} - \alpha_0 < z < L_{cb}/2 + L_{rw} + \alpha_0 \\ & \frac{V_{rb}}{\pi} \arccos\left(\frac{L_{rw} + L_{cb}/2 - z}{\alpha_0}\right) & L_{cb}/2 + L_{rw} + \alpha_0 \leq z \end{aligned} \quad (5)$$

Esto completa lo referente a la teoría de efecto de láser intenso para un pozo rectangular doble, con un parámetro de revestimiento de láser no mayor a la mitad ancho de la barrera mas angosta. En la siguiente sección presentamos las expresiones relacionadas al efecto de presión hidrostática.

## 2.2 Efecto de presión hidrostática

En caso particular de considera la presión hidrostática sobre el sistema, tanto las masas como las alturas de potencial de la heteroestructura dependen de la magnitud de la presión hidrostática. Para el caso de la altura de las barreras en cada región, esta está dada en función de la presión hidrostática y de la concentración de aluminio en el sistema [8]:

$$V_i = Q_c [1.155x_i + 0.37x_i^2 - 1.3 \times 10^{-3}x_i P] \quad (6)$$

donde  $Q_c = 0.650$  es el *band-offset* para el caso de la banda de conducción,  $i = lb, cb$  y  $rb$ , representa una etiqueta para la altura de las barreras izquierda, central y derecha, respectivamente, las cuales dependen de la concentración de aluminio  $x_i$  en cada región, como se esquematiza en la figura 1 y  $P$  es la presión hidrostática aplicada sobre el sistema.

El efecto de la presión hidrostática en el sistema, además de afectar la altura de las barreras de potencial, como se describió previamente, implica también, dado que cambia la curvatura de la banda de conducción alrededor del punto de máxima simetría en la primera zona de Brillouin ( $\Gamma$ ), que la masa efectiva del electrón depende de la siguiente forma con  $P$ :

$$\frac{m_e^*(P)}{m_0} = \left[1 + \frac{15020}{1519 + 10.7P} + \frac{7510}{1519 + 10.7P + 341}\right]^{-1}, \quad (7)$$

siendo  $m_0$  el valor de la masa del electrón en el vacío. Además del potencial y las masas efectivas se tienen también que los anchos del pozo dependen de la presión hidrostática dados por:

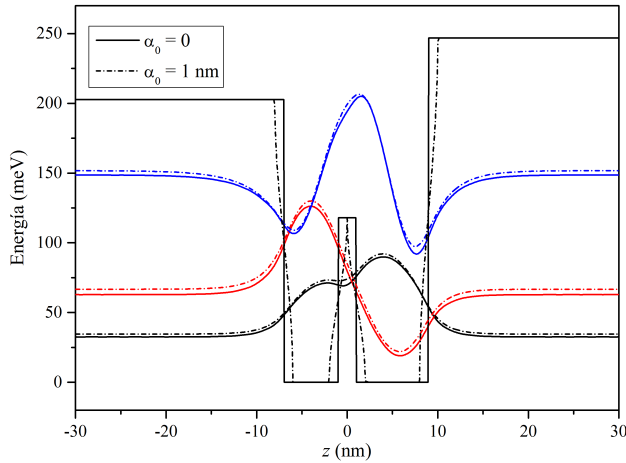
$$L_i(P) = L_{i0}[1 - (S_{11} + 2S_{12})P] \quad (8)$$

donde  $L_{i0}$  representa los anchos iniciales del pozo de la izquierda, la barrera central y el pozo de la derecha, mientras que  $L_i$  representa estos anchos cuando el sistema está sometido a la presión hidrostática, y las  $S_{11} = 1.16 \times 10^{-3} \text{ kbar}^{-1}$  y  $S_{12} = -0.370 \times 10^{-3} \text{ kbar}^{-1}$  son las constantes elásticas de flexibilidad del GaAs [9].

Esto completa lo referente a la teoría del efecto de la presión hidrostática sobre el sistema, en nuestro estudio nos limitamos a la región en la que se tiene una transición directa entre la banda de valencia y de conducción que es para presiones menores de 40 kbar.

## 3. Resultados y Discusión

Aquí presentaremos los principales resultados de la estructura electrónica de los sistemas de pozos cuánticos dobles de AlGaAs/GaAs [10] como función del efecto de láser intenso y de la presión hidrostática. Los parámetros iniciales son:  $L_{lw} = 6 \text{ nm}$ ,  $L_{rw} = 8 \text{ nm}$  y  $L_{cb} = 2 \text{ nm}$ , considerando concentraciones de aluminio de  $x = 0.25, 0.15$  y  $0.30$ , respectivamente.



**Fig. 2** Dependencia del potencial de confinamiento y funciones de onda para el estado base (negro), primer (rojo) y segundo (azul) estado excitado, a través del parámetro de revestimiento  $\alpha_0$ . Se observa como el láser intenso deforma el potencial “visto” por los electrones.

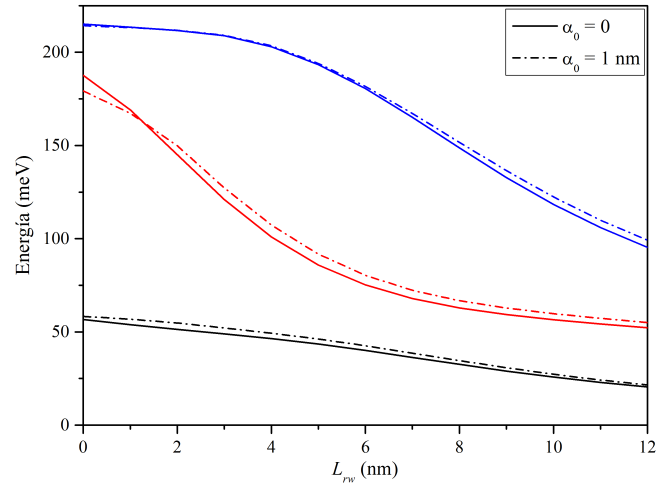
### 3.1 Considerando el efecto láser intenso

En este apartado presentamos los resultados del efecto del láser intenso sobre el sistema, el primer estudio presentado es como se “ve” modificado el perfil de potencial debido al efecto del láser recordando que en nuestro modelo el valor del parámetro de revestimiento no puede exceder 1 nm, es este caso.

Se observa en la figura 2 la modificación que experimenta el perfil de potencial de confinamiento a causa del efecto de la radiación láser intenso no resonante caracterizada por el parámetro de revestimiento  $\alpha_0 = 1$  nm. Esta deformación del potencial afecta el nivel energético de las funciones de onda para nuestra heteroestructura, de manera tal, que aumenta ligeramente en el orden de algunos cuantos meV. Siendo el incremento (la diferencia de energías con y sin efecto de láser intenso) para el estado base de 2.02 meV, para el primer estado excitado 3.87 meV y para el segundo estado excitado 3.05 meV, en todos los casos los niveles de energía aumentan. En general, se observa que la forma de las funciones de onda no se ve modificada de manera importante, al menos el estado base y el primer estado son prácticamente iguales mientras que en el segundo estado excitado (línea azul) hay una región donde la función prácticamente esta empalmada en ambos casos.

De manera general podemos ver en la figura 3, que independientemente de tener o no, la acción del efecto del láser intenso (ILF). Los niveles energéticos para los primeros tres estados de energía tienden a disminuir conforme se toma un valor cada vez más grande para el ancho del pozo de la derecha  $L_{rw}$ . De manera más específica para cada estado, encontramos un hecho interesante cuando el ancho  $L_{rw}$  toma valores menores que 1.26 nm, puesto que el efecto del láser intenso en este caso disminuye ligeramente el valor energético del primer estado excitado.

El segundo estado excitado pareciera no sufrir cambio en el nivel energético ante la acción del láser para valores angostos de



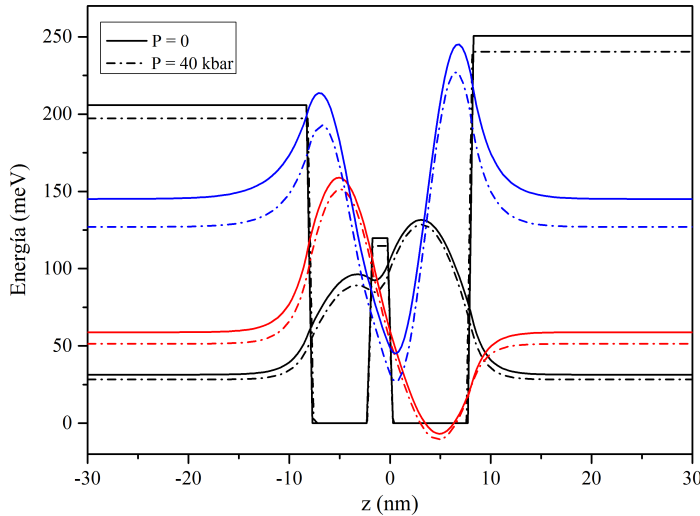
**Fig. 3.** Dependencia de las energías como función del ancho del pozo de la derecha ( $L_{rw}$ ) para el estado base (negro), primer (rojo) y segundo (azul) estado excitado. Se ha fijado el valor del parámetro de revestimiento  $\alpha_0$  en 0 y 1 nm.

$L_{rw}$ , inferiores a 1.62 nm, la explicación para este hecho es que el tercer estado se encuentra fuera del pozo ya que el valor del potencial de la barrera de la izquierda es de 205.84 meV, lo que implica que el tercer estado entra a pozo para anchos de pozo derecho mayores a 4 nm. Mientras que para el estado base, la tendencia general es disminuir su valor energético, aunque disminuye ligeramente conforme  $L_{rw}$  incrementa su valor.

### 3.2 Efecto de presión hidrostática

En esta sección presentamos los resultados del efecto de la presión hidrostática sobre el sistema. El estudio presentado es que se modifica el perfil de potencial, debido al efecto de la presión hidrostática que afecta, como discutimos en la sección anterior, no solo el alto y ancho de las barreras, sino también los valores de las masas efectivas en cada región. En el presente estudio nos restringimos a valores de presión hidrostática, y de concentración de aluminio que están en la región de *gap* directo del semiconductor:  $x \leq 0.4$  y  $0 < P < 40$  kbar [11].

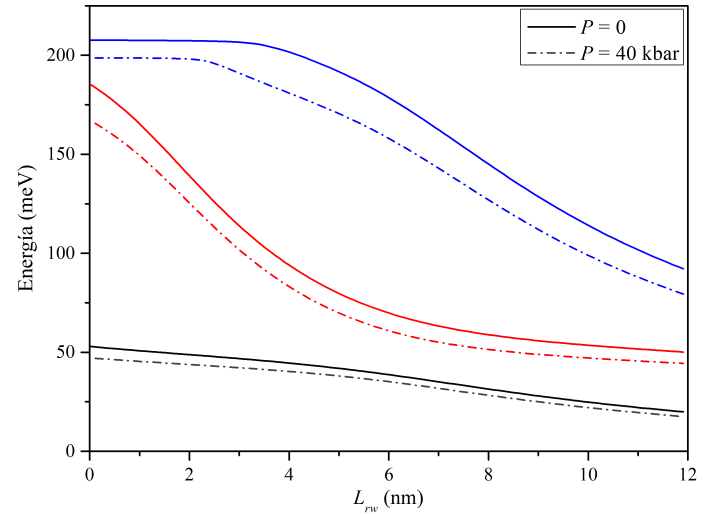
En la Tabla 1 se muestran los cambios producidos por la presión hidrostática en las masas efectivas, los anchos de los pozos y la barrera central, así como en la altura de las barreras en cada región de la heteroestructura. Puede observarse que las masas efectivas correspondientes a los materiales GaAs y AlGaAs aumentan su magnitud al incrementar la presión, notando también que la concentración tiene un rol importante ya que al ser mayor la concentración, mayor será la masa efectiva y esto se verá reflejado en la estructura del sistema. Mientras que para los anchos del sistema y la altura de las barreras ocurre lo contrario; se observa que los anchos de los pozos y de la barrera central disminuyen conforme la presión hidrostática aumenta notando que para anchos mayores el cambio es más significativo que para anchos menores. La presión hidrostática influye un poco más en la altura de las barreras ya que puede observarse que éstas disminuyen en un 4% cuando la presión cambia de 0 a 40 kbar.



**Fig. 4.** Dependencia del potencial de confinamiento y funciones de onda para el estado base (negro), primer (rojo) y segundo (azul) estado excitado, con y sin presión hidrostática.

**Tabla 1.** Dependencia de las masas efectivas, anchos del sistema y potencial de las barreras, como función de la presión hidrostática.

Parámetro	P = 0	P = 20 kbar	P = 40 kbar
$m_{GaAs}^*$	0.067 $m_0$	0.075 $m_0$	0.083 $m_0$
$m_{AlGaAs}(=0.25)^*$	0.088 $m_0$	0.096 $m_0$	0.104 $m_0$
$m_{AlGaAs}(x=0.15)^*$	0.079 $m_0$	0.088 $m_0$	0.096 $m_0$
$m_{AlGaAs}(x=0.3)^*$	0.092 $m_0$	0.100 $m_0$	0.108 $m_0$
$L_{lw}$	6.00 nm	5.95 nm	5.90 nm
$L_{cb}$	2.00 nm	1.98 nm	1.97 nm
$L_{rw}$	8.00 nm	7.93 nm	7.87 nm
$V_{lb}(x=0.25)$	205.84 meV	201.54 meV	197.25 meV
$V_{cb}(x=0.15)$	119.84 meV	117.26 meV	114.69 meV
$V_{rb}(x=0.3)$	250.66 meV	245.52 meV	240.37 meV



**Fig. 5.** Dependencia de las energías como función del ancho del pozo de la derecha ( $L_{rw}$ ); estado base (negro), primer (rojo) y segundo (azul) estado excitado, con y sin presión hidrostática.

Como puede observarse en la figura 4, la presión hidrostática produce cambios pequeños pero significativos (líneas segmentadas) que pueden ser esenciales para la construcción de dispositivos electrónicos. Nótese que las funciones de onda para el estado base, el primer y segundo estado excitado, independientemente de la presión, no cambian su forma; sin embargo, sí se ven afectados ya que los niveles de energía para estos estados disminuyen al aumentar la magnitud de la presión dado por la disminución en las alturas de las barreras, de hecho, las energías cambian de manera más significativa para los estados excitados, respecto de lo que se modifica el estado base.

En la figura 5, obsérvese que conforme aumenta el ancho del pozo de la derecha en un rango de 0-12 nm, los niveles de energía disminuyen, aunque no de la misma forma, y esto sigue la misma tendencia sea cual sea el valor de la presión hidrostática. Para el estado base (línea negra) notemos que la energía decae ligeramente mientras que para el primer estado excitado (línea roja) se genera un cambio brusco haciendo que este nivel de energía decaiga rápidamente; para el segundo estado excitado (línea azul) notamos que la energía permanece estable hasta  $L_{rw} = 3$  nm y luego decae siguiendo una tendencia casi lineal, que es cuando el nivel es atrapado, como ya se discutió en la figura 3.

#### 4. Conclusiones

Podemos concluir entonces, que cuando la heteroestructura de un pozo doble asimétrico, de perfil rectangular, compuesta por  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  se somete al efecto del láser intenso no resonante se modifica el perfil de potencial “visto” por los electrones y afecta los niveles energéticos de las funciones de onda para los primeros tres estados ligados, mientras que al considerar el efecto de la presión hidrostática, los niveles energéticos disminuyen al aumentar la magnitud de la presión y que la diferencia de energía entre cada par de 0-40 kbar incrementa conforme aumenten los estados de energía. Estos cambios, pueden

ser importantes para el cálculo de propiedades ópticas en este tipo de materiales semiconductores, que son los temas de investigación que actualmente están en desarrollo.

## 5. Reconocimientos y Agradecimientos

Los autores del trabajo agradecen al proyecto de ciencia básica con número A1-S-8842 titulado “Estudio de propiedades optoelectrónicas básicas en pozos, puntos y anillos cuánticos de materiales III-V y II-VI y sus heteroestructuras” que es financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través del “Fondo sectorial de investigación para la educación” en su convocatoria de investigación Científica Básica 2017-2018. Belén Eugenia Maldonado Villa y Jimena Pérez González agradecen además al CONACyT por el apoyo a través de la convocatoria de becas nacionales.

## Referencias

- [1] P. Harrison, A. Valavanis. *Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures*, Fourth Edition, John Wiley & Sons Ltd (2016).
- [2] Xiaodong Wang, Zhiming M. Wang (Editors). *High-Efficiency Solar Cells, Springer series in materials science 190*, Springer (2014).
- [3] A. Luque, A. Martí. *Increasing the efficiency of ideal solar cells by photon induced transitions at intermediate levels. Phys. Rev. Lett.* **78**, (1997) 5014.
- [4] A. Luque, A. Martí and C. Stanley, Understanding intermediate-band solar cells. *Nat. Photon.*, **6**, (2012) 146.
- [5] F. M. S. Lima, M. A. Amato, O. A. C. Nunes, et al. *Unexpected transition from single to double quantum well potential induced by intense laser field in a semiconductor quantum well. J. Appl. Phys.*, **105**, (2009) 123111.
- [6] E. C. Niculescu, L. M. Burileanu, A. Radu. *Density of impurity states of shadow donors in a quantum well under intense laser field. Superlattices. Microstruct.* **44**, (2008) 173.
- [7] C. A. Duque, M. E. Mora-Ramos, E. Kasapoglu, et al. *Combined effects of intense laser field on exciton states in GaAs quantum wells: Transition from the single to double quantum well. Phys. Status. Solidi B.* **1**, (2012) 118.
- [8] D. A. Ospina, M. E. Mora-Ramos, C. A. Duque, *Effects of Hydrostatic Pressure and Electric Field on the Electron-Related Optical Properties in GaAs Multiple Quantum Well. J. Nanosc. Nanotech.* **17**, (2017) 1247.
- [9] P. Lefebvre, B. Gil, H. Mathieu. Effect of hydrostatic pressure on GaAs- $Al_xGa_{1-x}As$  microstructures. *Phys. Rev. B*, **35**, 5630 (1987).
- [10] K. A. Rodríguez-Magdaleno, J. C. Martínez-Orozco, I. Rodríguez-Vargas, et al. *High-pressure effects on the intersubband optical absorption coefficient and relative refractive index change in an asymmetric double-doped GaAs quantum well. Physica Status Solidi (B)*, **252**, (2015) 683.
- [11] H. O. Oyo, C. A. Duque, N. Porrás-Montenegro, Uniaxial stress dependence of the binding energy of shallow donor impurities in GaAs-(Ga,Al)As quantum dots. *J. Appl. Phys.*, **90**, (2001) 819.