

Imágenes de: Lucy Estefanía Tapia Rodríguez

Fabricación y caracterización de pozos cuánticos para el estudio de la interacción luz-materia

Fabrication and characterization of quantum wells for the study of light-matter interaction

Lucy Estefanía Tapia-Rodríguez*, Liliana Estela Guevara-Macias, Alfonso Lastras-Martínez, Luis Felipe Lastras-Martínez

RESUMEN

Los pozos cuánticos representan la base de una gran variedad de dispositivos electrónicos, entre ellos los ledes, láseres, fotodetectores y moduladores. Las propiedades optoelectrónicas de estos sistemas dependen de su composición química y del espesor de las capas crecidas. Por dicha razón, es necesario tener un control preciso durante su crecimiento. El presente trabajo tuvo como objetivo inducir el crecimiento epitaxial de pozos cuánticos intrínsecos (sin ningún dopaje) asimétricos acoplados y desacoplados de AlGaAs/GaAs/AlGaAs, así como, establecer su caracterización mediante técnicas de espectroscopía óptica, como lo son la reflectancia diferencial, también conocida como espectroscopía de reflectancia anisotrópica (RAS) y la fotoluminiscencia (PL). Se realizó un estudio experimental de las interacciones entre niveles de energía en los pozos cuánticos asimétricos acoplados. Este tipo de estructuras son especialmente interesantes por permitir la formación y observación, no solo de excitones directos, dentro del mismo pozo, sino también, de excitones y triones indirectos, que se forman entre electrones de un pozo y huecos de otro pozo vecino (Transiciones intra-QW). Se hicieron crecer tres pozos intrínsecos, basados en arseniuro de galio (GaAs): un pozo individual (desacoplado) y un par de pozos asimétricos acoplados, a través de epitaxia por haces moleculares (MBE). Se observó el efecto del rompimiento de simetría (de D_{2d} a C_{2v}) en las propiedades espintrónicas de la estructura, a través de PL y RAS, a una temperatura de ~ 30 K. Se lograron establecer las técnicas y métodos necesarios para el crecimiento de pozos cuánticos intrínsecos, que constituyen la base para la creación de dispositivos y estructuras más complejas. El uso de técnicas espectroscópicas permitió demostrar la presencia de anisotropías ópticas, que repercuten en el comportamiento del espín de los excitones en pozos cuánticos.

PALABRAS CLAVE: pozo cuántico, espectroscopía, excitones.

ABSTRACT

Quantum Wells are the basis for a great variety of electronic devices such as leds, lasers, photodetectors and modulators. Their optoelectronic properties depend on their chemical composition and the thickness of each layer. Therefore, a precise control during their growth is needed. This work has the objective of presenting the epitaxial growth of coupled and uncoupled asymmetric AlGaAs/GaAs/AlGaAs quantum wells and their characterization using optical techniques such as reflectance anisotropy spectroscopy (RAS) and photoluminescence (PL). An experimental study of the different interactions between the confined levels of energy in coupled quantum wells was carried on. This kind of structures is of special interest because they allow the formation and observation not only of direct excitons and trions inside a single quantum well, but of indirect excitons and trions, which are only formed by electrons of one quantum well and holes of the neighbor quantum well (Intra-QW transitions). Three intrinsic quantum wells based on gallium arsenide (GaAs) were grown by molecular beam epitaxy (MBE), one single QW and a pair of coupled asymmetric QWs. The effect of breaking symmetry (from D_{2d} a C_{2v}) on the spintronic properties of the structure was observed by RAS and PL measurements at ~ 30 K. The main techniques and methods for the growth of intrinsic quantum wells were established, which are the basis for the creation of devices with more complex structures. The use of spectroscopic techniques for the study of quantum wells allowed the demonstration of the presence of optical anisotropies that influence the behavior of exciton's spins at quantum wells.

KEYWORDS: quantum well, spectroscopy, excitons.

*Correspondencia: Lucyestefaniatapia@gmail.com/Fecha de recepción: 10 de agosto de 2022/Fecha de aceptación: 16 de enero de 2023/ Fecha de publicación: 31 de enero de 2023.

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Investigación en Comunicación Óptica, Avenida Karakorom núm. 1470, Lomas cuarta sección, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, C. P. 78210.

INTRODUCCIÓN

Los materiales semiconductores tienen gran importancia por sus aplicaciones en la vida cotidiana. Múltiples dispositivos y sistemas utilizan este tipo de materiales (Hu y col., 2010); las tarjetas de memoria de las computadoras, celdas solares (Guerra y col., 2018), pantallas, láseres (Henini, 1993) y el diodo emisor de luz conocido como LED (Tapia y Santiago-García, 2022), son algunos ejemplos.

Los materiales semiconductores y aislantes tienen una característica fundamental llamada banda prohibida (banda gap), que corresponde a la diferencia energética entre la banda de conducción y la banda de valencia. Para incrementar el número de electrones en la banda de conducción y aumentar con ello su conductividad, es necesario transferir al material una energía mayor a la de su banda prohibida (Mishurnyi y Lastras-Martínez, 2009). En los aislantes, esta banda es tan grande que un electrón no podría “escapar” fácilmente de la banda de valencia a la de conducción de electricidad (Moebs y col., 2021). En el caso de la mayoría de los semiconductores, la banda mide alrededor de 1 eV o 2 eV (dependiendo del material), siendo la energía mínima necesaria para que un electrón sea excitado a la banda de conducción, convirtiendo al material en un conductor (Downs y Vandervelde, 2013). Una de las formas de transferir energía al material es por medio de luz. La energía de la luz está asociada a su color (o longitud de onda). A mayor longitud de onda menor energía y viceversa. Es así que, la luz puede ser absorbida y posteriormente emitida por el material, al iluminar con luz de energía mayor o igual a la de la banda prohibida (Figura 1) (Mishurnyi y Lastras-Martínez, 2009).

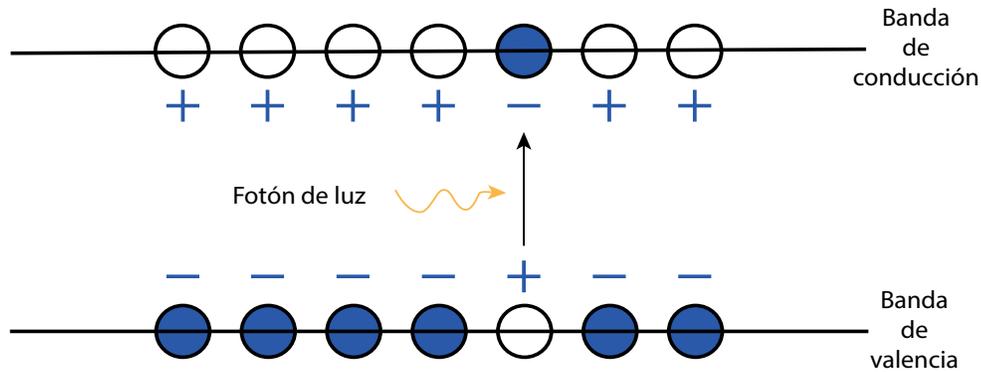
Los pozos cuánticos son estructuras semiconductoras formadas por dos materiales de distinta banda prohibida (banda gap) (Miller y Kleinman, 1985). Los pozos cuánticos basados en arseniuro de galio (GaAs) y arseniuro de galio aluminio (AlGaAs), donde el GaAs es el material de banda menor y el AlGaAs el de banda mayor (Figura 2A), son estructuras de gran

interés debido a sus múltiples aplicaciones en optoelectrónica. Los láseres, ledes y fotodetectores, que funcionan en el infrarrojo y rojo, contienen este tipo de estructuras de pozos cuánticos de GaAs en su interior, y la longitud de onda a la que trabajan depende del grosor de cada material y de la concentración de aluminio (Al) en las barreras (Tsao, 2002). Las dos propiedades tienen además un muy fuerte impacto al estudiar la interacción de luz con la materia. Por tales razones, el control del crecimiento de cada capa debe darse a nivel nanométrico (Biermann y col., 2021).

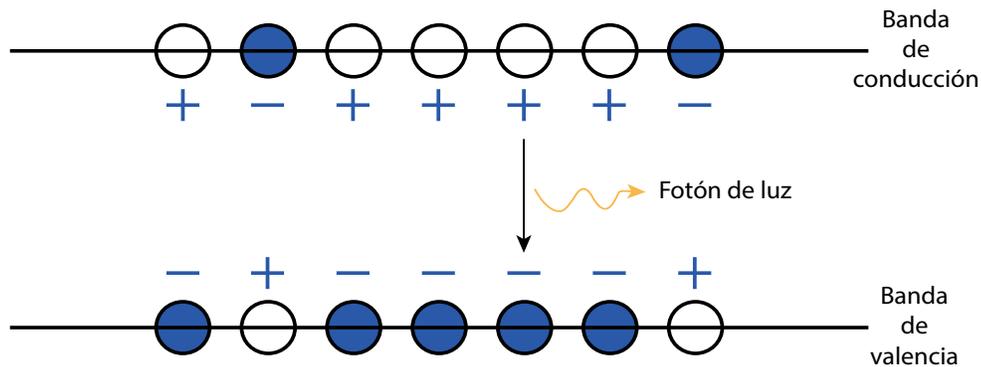
Los pozos cuánticos pueden analizarse en forma individual o por pares (dobles). Estos últimos se consideran simétricos cuando son del mismo tamaño, independientemente de la simetría del cristal y del acople entre ellos. Adicionalmente, los pozos cuánticos dobles (DQW, por sus siglas en inglés: double quantum well) acoplados (Figura 2B) son de particular interés, no solo por sus aplicaciones tecnológicas, sino por sus posibilidades para la investigación en ciencia básica. Esto es debido a que, son la estructura más simple posible para el estudio de excitones y triones directos e indirectos (Esser y col., 2000; Wilkes y Muljarov, 2017; Witham y col., 2018).

La diferencia fundamental entre los DQW desacoplados y acoplados, es que en el caso de los desacoplados se trata de 2 pozos cuánticos separados por una barrera gruesa, mientras que, en los pozos acoplados la división entre ellos es una barrera lo suficientemente delgada para permitir el tunelamiento cuántico de electrones (de 5 nm o menor). Este tunelamiento implica un cambio en las funciones de onda de los electrones y huecos confinados, y un cambio en los niveles de energía (Sivalertporn, 2016; Ozturk y col., 2018), además de mostrar un rompimiento en la simetría, en el caso de GaAs, pasando de D_{2d} a C_{2v} . Por consiguiente, en los DQW acoplados es posible no solamente observar excitones y triones directos, que se forman por electrones y huecos del mismo pozo, si no también, indirectos, que se forman por electrones de un pozo y huecos del pozo cuántico

A) Absorción de luz



B) Emisión de luz

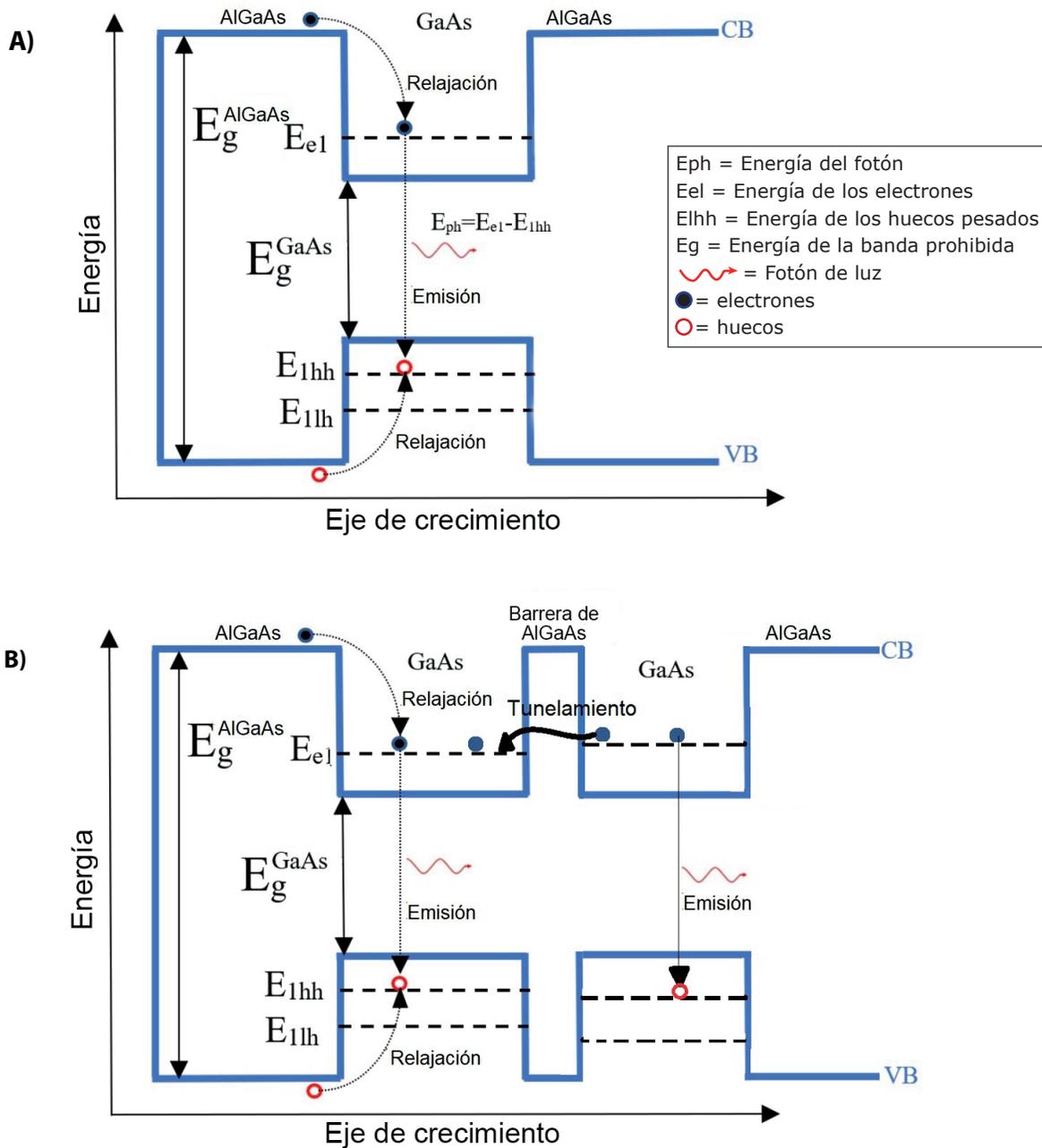


■ Figura 1. Proceso de absorción y emisión de luz en un semiconductor. Los electrones (de carga negativa) se muestran en azul y los huecos (de carga positiva) en blanco. A: el proceso de absorción se lleva a cabo cuando un electrón de la banda de valencia es excitado a la banda de conducción absorbiendo la energía de un fotón y dejando un hueco en la banda de valencia. Si este proceso ocurre en repetidas ocasiones, se obtendrán mayor cantidad de electrones en la banda de conducción, como se observa en la imagen B, la emisión de luz sucede cuando uno de estos electrones decae de la banda de conducción a la banda de valencia.

Figure 1. Light absorption and emission process in a semiconductor. Electrons (negatively charged) are shown in blue and holes (positively charged) in white. A: The absorption process takes place when an electron from the valence band is excited to the conduction band, absorbing the energy of a photon and leaving a hole in the valence band. If this process occurs repeatedly, a greater number of electrons will be obtained in the conduction band, as shown in image B, the emission of light occurs when one of these electrons' decays from the conduction band to the valence band.

siguiente (Sivalertporn y col., 2012). Además, la estructura de bandas de los pozos cuánticos acoplados muestra fenómenos ópticos dependientes de la polarización (Ruiz-Cigarrillo y col.,

2021), haciendo posible su estudio a través de fotoluminiscencia (PL, por sus siglas en inglés: photoluminescence) resuelta en polarización (Bravo-Velázquez y col., 2022) y de reflectancia



■ Figura 2. Diagrama de emisión de un pozo cuántico (QW) individual, desacoplado (A) y de dos QW acoplados (B). A) Los electrones son previamente excitados de la banda de valencia (VB) a la banda de conducción (CB), posteriormente pasan por un proceso de relajación y caen al pozo, cuando baja al nivel de energía de huecos pesados pierde energía en forma de luz emitiendo un fotón. B) El mismo proceso sucede al haber dos pozos. Al estar acoplados, existe tunelamiento cuántico entre uno y otro. Cada pozo emitirá luz de acuerdo con sus niveles de energía, los cuales se ven afectados por la presencia del pozo vecino.

Figure 2. Emission diagram of a single uncoupled quantum well (QW) (A) and two coupled QWs (B). A) The electrons are previously excited from the valence band (VB) to the conduction band (CB), later they go through a relaxation process and fall into the well, when it goes down to the energy level of heavy holes it loses energy in form of light emitting a photon. B) The same process happens when there are two wells. Being coupled, there is quantum tunneling between one and the other. Each well will emit light according to its energy levels, which are affected by the presence of the neighboring well.

diferencial (RAS, por sus siglas en inglés: anisotropy reflectance spectroscopy).

Los pozos cuánticos son además, un elemento fundamental en el estudio de radiación-materia, en particular para sistemas donde se observan polaritones-excitónicos. Los polaritones excitónicos son quasipartículas formadas por la unión entre excitones y fotones. Uno de los sistemas más estudiados, donde se observan este tipo de polaritones, es en las microcavidades basadas en GaAs, las cuales consisten en dos espejos (DBR, por sus siglas en inglés: distributed bragg reflector) que encierran en su interior pozos cuánticos de GaAs (Weisbuch y col., 1992).

Recientemente, se ha planteado la creación de dipolaritones, sustituyendo los pozos cuánticos simples en el interior de una microcavidad por pozos cuánticos acoplados (Rosenberg y col., 2018). Los dipolaritones muestran interacciones mucho más fuertes, ofreciendo una gran ventaja en aplicaciones de dispositivos cuánticos, entre ellas, en la generación de Terahertz (Kyriienko y col., 2013; Seedhouse y col., 2019) y transistores (Serafin y col., 2020).

El objetivo de este trabajo fue presentar la fabricación de pozos cuánticos simples (QW) desacoplados y de pozos cuánticos dobles (DQWs) acoplados, mediante epitaxia por haces moleculares (MBE), así como, su caracterización post-crecimiento a través de técnicas ópticas, como fotoluminiscencia (PL) y reflectancia diferencial anisotrópica (RAS), estableciendo los pasos fundamentales para la fabricación posterior de estructuras más complejas, como lo son las microcavidades.

MATERIALES Y MÉTODOS

El procedimiento descrito en el presente estudio, desde la fabricación hasta la caracterización, se realizó en el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP). Se fabricaron y analizaron 2 muestras, la primera con un solo pozo y barreras de $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ y la segunda con 2 pozos acoplados, separados

por barreras de $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$, ambas caracterizadas por fotoluminiscencia (PL) y reflectancia diferencial anisotrópica (RAS).

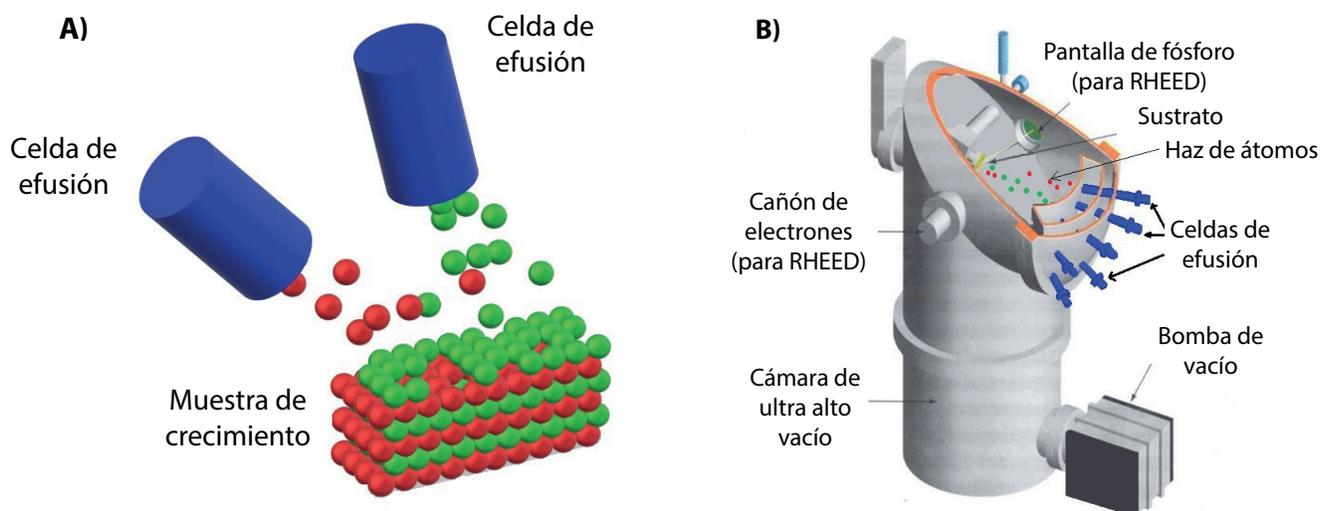
Crecimiento de los pozos cuánticos

En física de semiconductores, se conoce como crecimiento epitaxial a la deposición controlada de capas delgadas de un material sobre un sustrato, siguiendo la misma estructura cristalina y logrando de esta manera que el material “crezca” en grosor (Figura 3A).

Los pozos cuánticos se hicieron crecer por MBE, con un sistema Riber 32 (Riber, Francia). Este tipo de epitaxia es ampliamente utilizado para el crecimiento de semiconductores, debido a que permite un alto nivel de control en la rugosidad de las capas, especialmente al combinarlo con difracción de electrones reflejados de alta energía (RHEED, por sus siglas en inglés: reflection high-energy electron diffraction) para el monitoreo en tiempo real, como fue en el caso reportado en el presente trabajo.

El sistema de MBE Riber 32 consiste en una cámara a ultra alto vacío, en la cual se coloca el sustrato de GaAs sobre el que se harán crecer los pozos. A esta cámara se encuentran conectadas las celdas de efusión, que contienen cada uno de los materiales a depositar. Al abrir una de estas celdas el material sale en forma de haz molecular y se deposita sobre el sustrato, como se muestra en la Figura 3B. Para tener un control preciso de los tiempos que cada celda se mantiene abierta, y por lo tanto, del grosor de las capas; se utilizó un programa de labview (desarrollado por National Instruments) versión 2016, que controla los obturadores de cada celda.

La velocidad de crecimiento se calculó utilizando la técnica RHEED (Staib Instruments, Alemania), la cual se usa para el monitoreo de los crecimientos epitaxiales, desde la creación del primer sistema de MBE, en los años 60. El sistema RHEED enfoca un haz de electrones sobre el sustrato, los cuales son difractados de acuerdo con la rugosidad de la muestra y



■ Figura 3. Sistema de epitaxia por haces moleculares (MBE). A) Diagrama del crecimiento epitaxial, se observan dos celdas de efusión abiertas, depositando dos materiales sobre un sustrato. B) Diagrama de la cámara de crecimiento, se observa el crecimiento epitaxial en el interior (Mishurnyi y Lastras-Martínez, 2009).

Figure 3. Molecular Beam Epitaxy System (MBE). A) Diagram of epitaxial growth, two open effusion cells are observed, depositing two materials on a substrate. B) Diagram of the growth chamber, epitaxial growth is observed inside (Mishurnyi y Lastras-Martínez, 2009).

reflejados hacia una pantalla de fósforo. Como se observa en la Figura 4, dependiendo del grosor de la capa que se haya depositado, RHEED mostrará distintas intensidades. Una oscilación completa corresponderá a una capa crecida. De esta manera, es posible calcular los tiempos que se mantendrá abierta cada celda para lograr el grosor del material o número de monocapas deseado (Ohring, 2002).

La concentración de Al en cada capa se calculó utilizando la misma información de RHEED. Una vez conocida la velocidad de crecimiento del GaAs y del AlGaAs, la concentración de Al por abrir las tres celdas de efusión está dada por:

$$x = \frac{\gamma_{AlGaAs} - \gamma_{GaAs}}{\gamma_{AlGaAs}}$$

Donde:

x = concentración del Al en el compuesto ternario.

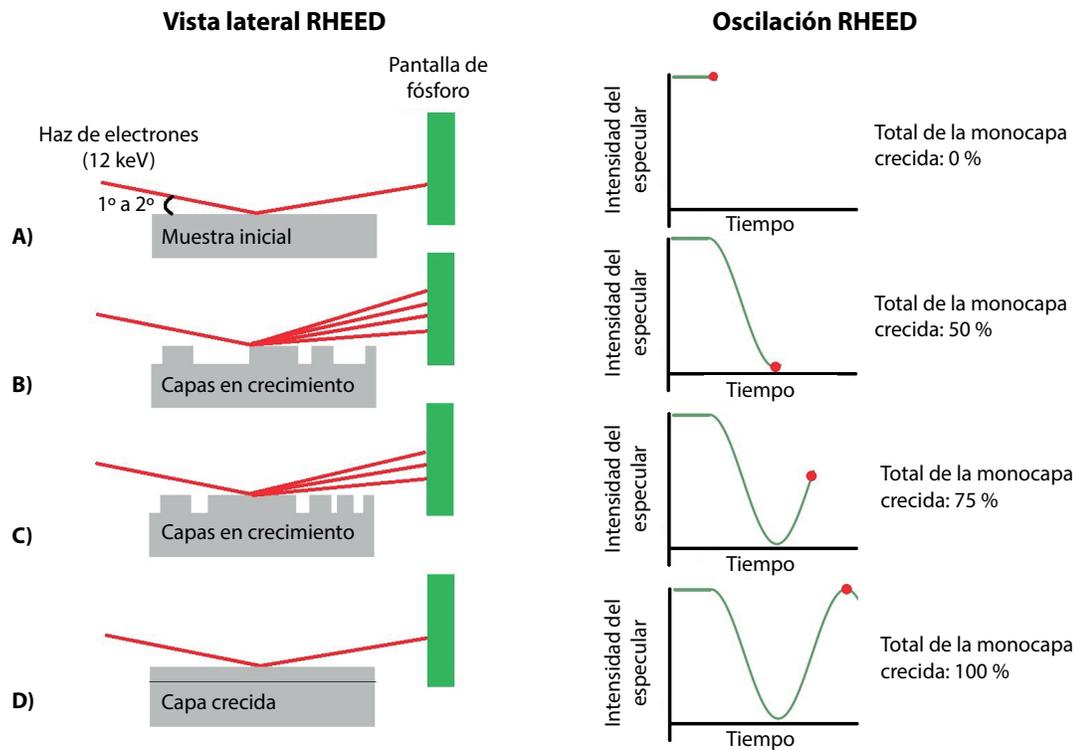
γ_{AlGaAs} = velocidad de deposición del AlGaAs.

γ_{GaAs} = velocidad de deposición del GaAs.

Después de crecer los pozos cuánticos se procede a su caracterización, a través de PL y RAS.

Obtención de la primera muestra

La muestra se obtuvo con solo un pozo de 11.87 nm, con barreras de 15% de Al ($Al_{0.15}Ga_{0.85}As$). Las velocidades fueron calculadas a partir de mediciones RHEED realizadas antes del crecimiento como calibración. La calibración consistió en la deposición de capas de GaAs y de AlGaAs, sobre un sustrato de GaAs, para obtener las velocidades de crecimiento, dependiendo de las temperaturas aplicadas a cada celda. En la Tabla 1 se observan los principales resultados del proceso de calibración. Tanto la calibración como la fabricación de ambas muestras se realizaron en un ambiente controlado de flujo de arsénico (As), a una sobre presión de 5×10^{-6} mmHg. La calibración permitió obtener las siguientes condiciones de proceso: temperatura del manipulador 600 °C, celda de Ga a 830 °C y celda de Al a 982 °C, la velocidad de crecimiento de GaAs fue de 0.3 mL/s y la



■ Figura 4. Representación del crecimiento de una monocapa y del uso de RHEED para su monitoreo. Un haz de electrones con una intensidad de 12 keV es enfocado de manera rasante (1° a 2° de inclinación) sobre la muestra, donde es reflejado y difractado hacia una pantalla de fósforo. La columna de la izquierda muestra una vista lateral de como el haz de electrones es difractado por la fracción de la monocapa y a la derecha se muestra la correspondencia en la oscilación RHEED.

Figure 4. Representation of the growth of a monolayer and the use of RHEED for its monitoring. An electron beam with an intensity of 12 keV is focused grazing (1° to 2° inclination) onto the sample, where it is reflected and diffracted onto a phosphor screen. The left column shows a side view of how the electron beam is diffracted by the monolayer fraction and the right column shows the correspondence in the RHEED oscillation.

velocidad de crecimiento del ternario AlGaAs de 0.355 mL/s. Posteriormente se aplicó la ecuación para obtener la concentración de Al (mencionada anteriormente), dando como resultado una concentración de Al de 15.49 %, por lo que, estos fueron los parámetros seleccionados para la fabricación posterior de la muestra. Tomando en cuenta dichas velocidades de crecimiento (0.3 mL/s para el pozo de GaAs y 0.355 mL/s para las barreras), el tiempo de deposición de material fue de: 52 min para las barreras de AlGaAs, mientras que, para el pozo se abrió la celda de Ga durante 2.3 min. En la Tabla 2 se observan los tiempos utilizados para la fabricación de la estructura completa.

Obtención de la segunda muestra

La muestra se obtuvo con dos pozos acoplados de 11.87 nm y 13.79 nm cada uno, separados por barreras de $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$. Las temperaturas usadas durante el crecimiento fueron similares a las de la primera muestra: manipulador 600°C y celda de Ga a 830°C , únicamente se cambió la temperatura de la celda de Al a 1055°C , dando como resultado las mismas velocidades de crecimiento para los pozos de GaAs, sin embargo, se depositó durante tiempo variable, para lograr los espesores deseados. En el caso del primer pozo (que es igual al de la primera muestra) se depositó GaAs durante 2.3 min y para el segundo pozo se de-

■ **Tabla 1. Resultados de la calibración de temperaturas del sistema de epitaxia por haces moleculares.**
Table 1. Temperature calibration results for the molecular beam epitaxy system.

Temperatura de las celdas	Material depositado	Velocidad de crecimiento	Concentración de aluminio
Celda Ga: 830 °C	GaAs	0.3 mL/s	0 %
Celda Ga: 830 °C Celda Al: 950 °C	AlGaAs	0.33 mL/s	9 %
Celda Ga: 830 °C Celda Al: 980 °C	AlGaAs	0.35 mL/s	14.2 %
Celda Ga: 830 °C Celda Al: 982 °C	AlGaAs	0.355 mL/s	15.49 %
Celda Ga: 830 °C Celda Al: 1 000 °C	AlGaAs	0.4 mL/s	25 %
Celda Ga: 830 °C Celda Al: 1 040 °C	AlGaAs	0.51 mL/s	41.1 %
Celda Ga: 830 °C Celda Al: 1 055 °C	AlGaAs	0.599 mL/s	49.9 %

■ **Tabla 2. Parámetros del crecimiento de la muestra 1.**
Table 2. Growth parameters for sample 1.

Material depositado	Grosor (nm)	Velocidad de crecimiento	Tiempo (s)
GaAs	10	0.3 mL/s	117.93
Al _{0.15} Ga _{0.85} As	300	0.355 mL/s	2 989.03
GaAs	11.87 nm (42 mL)	0.3 mL/s	139.98
Al _{0.15} Ga _{0.85} As	300	0.355 mL/s	2 989.03
GaAs (buffer)	200	0.3 mL/s	2 358.02
GaAs (001)	Sustrato	Sustrato	Sustrato

positó durante 2.71 min. En el caso de las barreras, la velocidad de crecimiento esperada, de acuerdo con la calibración (Tabla 1), fue de 0.599 mL/s, por lo que la deposición de AlGaAs para lograr capas de 300 nm de grosor fue de 29.5 min para cada una.

Fotoluminiscencia (PL)

Esta técnica de análisis permite conocer el grosor y concentración de las capas crecidas, a

través de la luz que emite la muestra. Como se ilustra en la Figura 1, un electrón de la banda de valencia puede ser promovido a la banda de conducción, al excitar la muestra eléctricamente o a través de luz. Posteriormente, los electrones que se encuentren en la banda de conducción buscarán relajarse, liberando energía en forma de luz y regresando a la banda de valencia. La luz tendrá la energía de este decaimiento, es decir, de la banda prohi-

bida y por lo tanto, su color (longitud de onda) variará de acuerdo al tamaño de dicha energía.

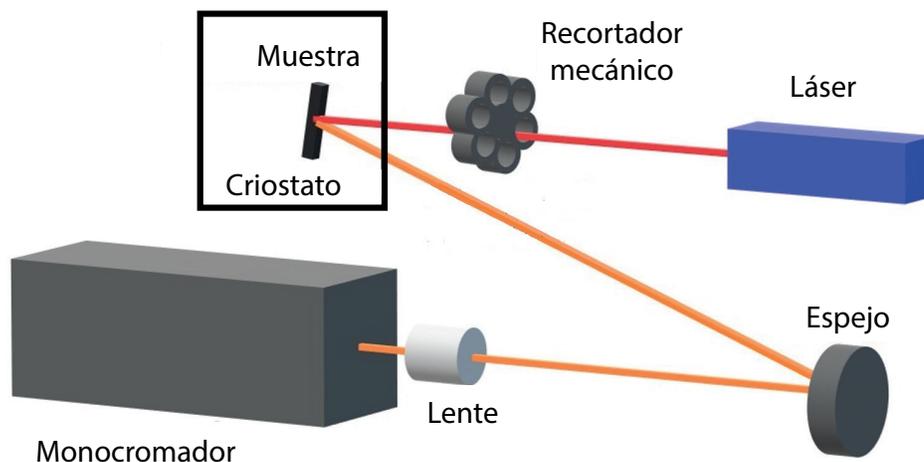
Al tratarse de pozos cuánticos, la energía es cuantizada en diferentes niveles, los cuales dependen directamente del tamaño del pozo, y como se observa en la Figura 2, los electrones excitados con luz de energía mayor a la banda prohibida caerán, en su mayoría, del nivel más bajo de energía del pozo, al nivel de huecos pesados del lado de la banda de valencia, recombinándose con los huecos y liberando energía en forma de fotones. La longitud de onda de la luz emitida o energía de los fotones emitidos (E_{ph}) es equivalente a la energía de decaimiento del nivel de los electrones (E_{el}) a los de los huecos pesados (E_{hh}) despreciando la energía del excitón, como se muestra en la Figura 2A. Como estos niveles dependen del grosor del pozo y de la altura de las barreras, pueden ser calculados resolviendo la ecuación unidimensional de Shrödinger (Harrison y Valavanis, 2016; Hamaguchi, 2017), de manera que, los resultados de fotoluminiscencia proporcionan información de las dimensiones del pozo.

El arreglo óptico utilizado para medir PL (Figura 5) consistió en un láser de 638 nm (Diodo láser L638P200, Thorlabs, USA) que se hizo incidir sobre la muestra. El láser fue modulado por un recortador mecánico, del que se

obtuvo una frecuencia, que se referenció a un amplificador lock-in (Princeton, USA). De esta manera, se discriminaron las frecuencias ajenas a la frecuencia de modulación (por ejemplo, de la luz ambiental). La muestra se colocó dentro de un criostato de temperatura controlable (Advanced Research Systems, Closed cycle cryocooler, Pensilvania, USA), que permitió bajar la temperatura hasta 12 K. La luz emitida por la muestra se dirigió hacia un monocromador (Acton monochromator, Princeton Instruments, USA) pasando por un espejo y siendo finalmente enfocada en la entrada del monocromador, que separa la luz según su longitud de onda. El control del monocromador y la adquisición de los espectros se realizaron a través del programa LabVIEW, desarrollado por National Instruments versión 2016. Se midió la PL en 3 puntos distintos de la muestra, a una temperatura de 12 K y se reportaron los tres análisis.

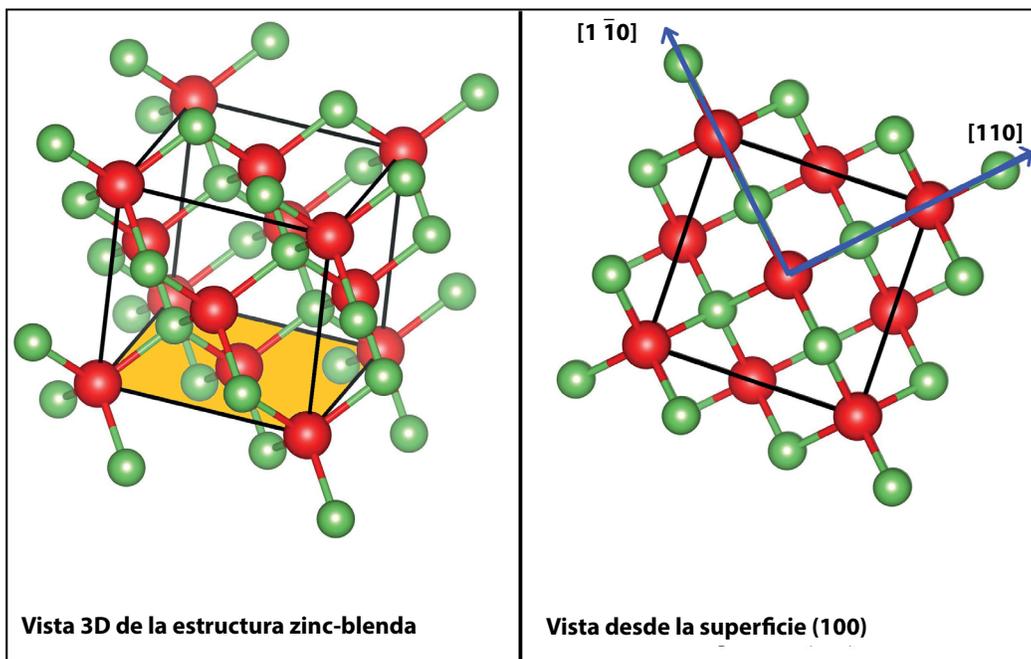
Reflectancia diferencial o anisotrópica (RAS)

La RAS mide la diferencia entre la luz reflejada por la muestra en una dirección y la luz que se refleja al enviarle luz polarizada a 90° . Los átomos en el GaAs se encuentran acomodados en una simetría cúbica (zinc-blenda), lo que significa que, al enviar luz polarizada y medir su reflectancia, la señal será igual que al rotar esta luz 90° (Figura 6). Si la luz se



■ Figura 5. Arreglo óptico utilizado para la medición de fotoluminiscencia.

Figure 5. Optical array used for photoluminescence measurement.



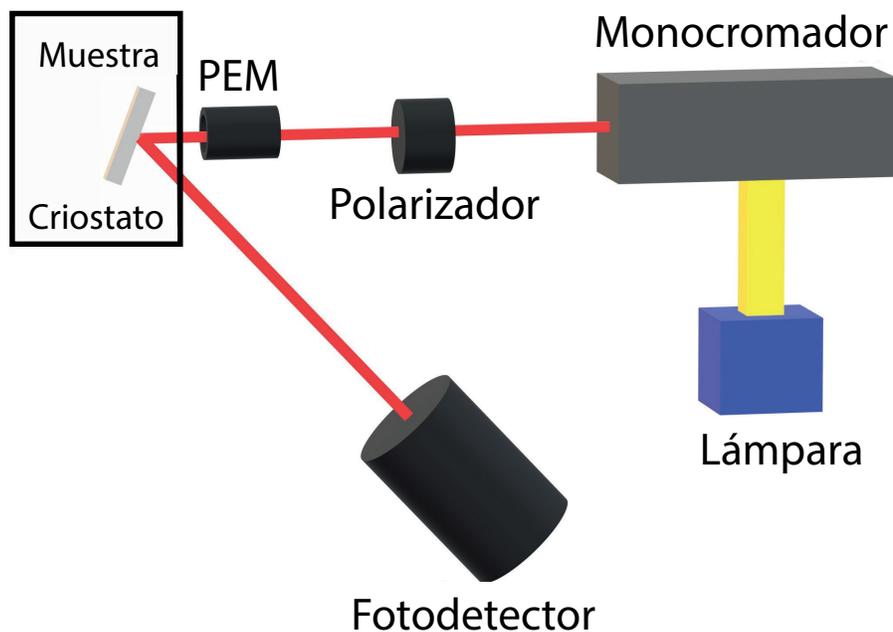
- Figura 6. Estructura zinc-blenda. Se muestra la celda unitaria delimitada por las rectas negras. Lado izquierdo: Vista 3D de la estructura del GaAs (zinc-blenda), en amarillo se marca el plano (001), la dirección de crecimiento es perpendicular a este plano. Lado derecho: Estructura vista desde el plano (001). En azul se muestran las dos direcciones (equivalentes para la estructura) desde las que se mide RAS. Cualquier tipo de anisotropía superficial, incluyendo el crecimiento de pozos cuánticos hará que estas dos direcciones dejen de ser equivalentes.

Figure 6. Zinc-blende structure. The unit cell delimited by the black lines is shown. Left side: 3D view of the GaAs (zinc-blende) structure, the plane (001) is marked in yellow, the growth direction is perpendicular to this plane. Right side: Structure seen from the plan (001). Shown in blue are the two directions (equivalent for structure) from which RAS is measured. Any kind of surface anisotropy, including quantum well growth, will make these two directions no longer equivalent.

alinea con los ejes cristalográficos y se tuviera una muestra perfectamente cúbica, como en la Figura 6, la diferencia entre ambas reflectancias y por lo tanto la señal de RAS, sería cero; al no ser así, permite observar cualquier cambio en la simetría del cristal (Weightman y col., 2005). En el caso reportado en el presente estudio, la dirección de crecimiento fue $[001]$ y la luz fue enfocada en la muestra con una polarización que se alineó a sus ejes cristalográficos $[1 \bar{1}0]$ y $[110]$. Estos ejes se observan en la Figura 6, de acuerdo con la información existente sobre ejes cristalográficos y la notación de índices de Miller (Sands, 1993). Al crecer pozos cuánticos, la simetría zinc-blenda cambia a una simetría D_{2d} . Al enviar la luz polarizada alineada a los ejes de si-

metría, es posible observar dicho cambio, si además existe otro rompimiento en la simetría, como el que sucede al tener pozos cuánticos acoplados (D_{2d} a C_{2v}), se espera que la señal de RAS sea mayor.

La configuración para medir RAS se ilustra en la Figura 7. Consiste en una lámpara de tungsteno (Hamamatsu Photonics K.K., flash lamp, Japón) que se dirigió a un monocromador (Princeton Instruments, Acton, New Jersey, USA), el cual permitió seleccionar la longitud de onda que se reflejó en la muestra. Esta longitud de onda se hace variar de 800 nm a 830 nm, para formar los espectros. La luz del monocromador se dirigió hacia un polarizador para obtener luz polarizada a 45° del plano de inciden-



■ Figura 7. Arreglo óptico para la medición de reflectancia diferencial (RAS).
Figure 7. Optical array for differential reflectance (RAS) measurement.

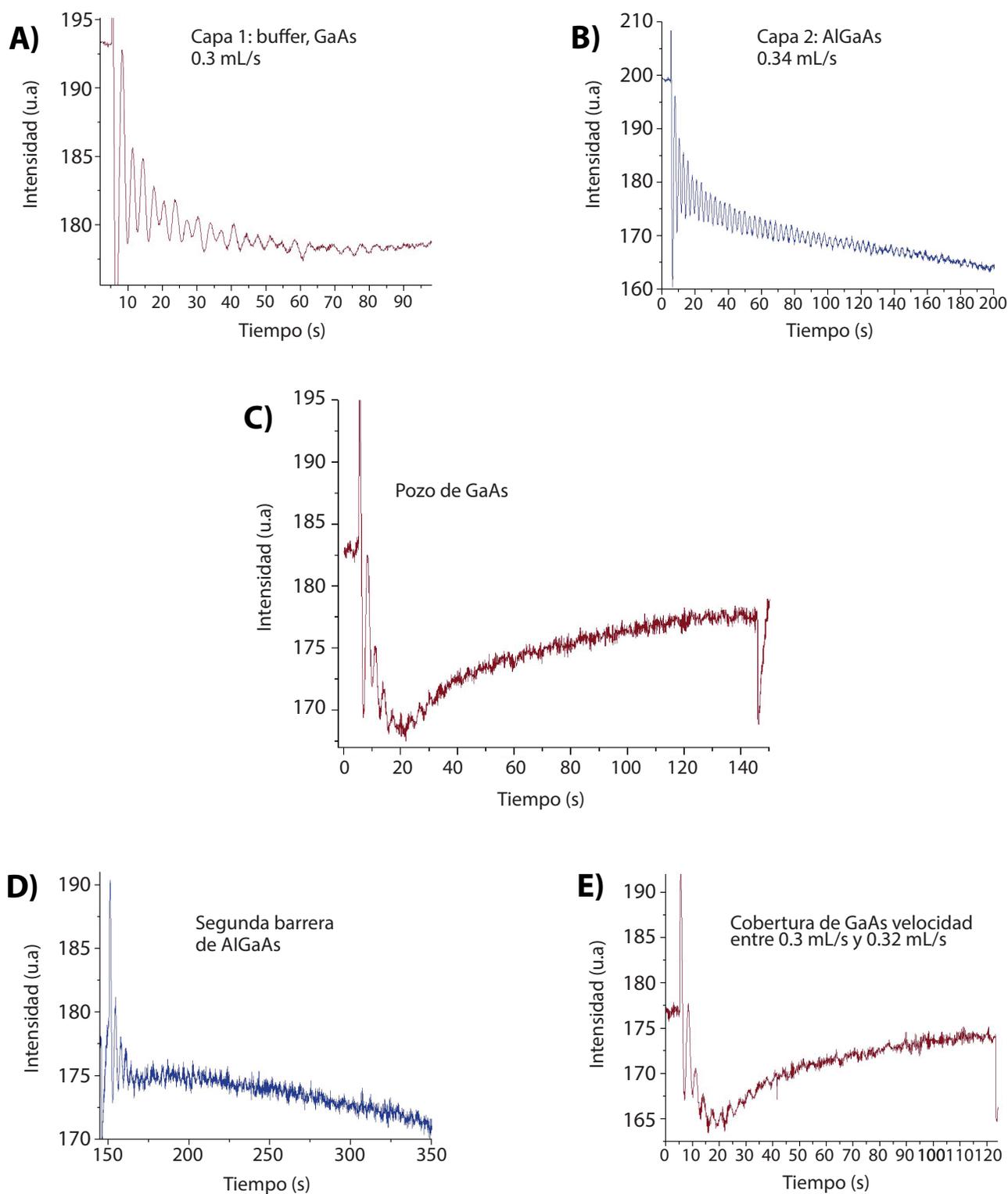
cia, que se hizo pasar por un modulador fotoelástico (PEM-90, HINDS Instruments, USA) ajustado a un retardo de $\lambda/2$. Finalmente, la luz llegó a la muestra, que también se encontraba rotada a 45° del plano de incidencia y que, además, se encontraba dentro de un criostato a 35 K (Advanced Research Systems, Closed cycle cryocooler, Pensilvania, USA). La luz reflejada de la muestra se colectó en un fotodetector, del cual se extrajo y se analizó la información en una computadora. Existe información detallada sobre el espectrómetro y la teoría de la RAS en la caracterización de semiconductores en la literatura (Lastras-Martínez y col., 1993).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la muestra 1 (1 solo pozo, desacoplado, y barreras de $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$)

Las oscilaciones RHEED, obtenidas durante el crecimiento, se observan en la Figura 8, junto con el tiempo de deposición (eje X). Estos gráficos se utilizan para corroborar las velocidades de crecimiento previamente obtenidas en la calibración. Como se mencionó en la sección de Materiales y métodos, se debe ob-

servar que cada oscilación RHEED correspondía a la capa de material depositado. La rugosidad superficial varía dependiendo de las capas inferiores ya depositadas, por lo que, las oscilaciones RHEED son más claras al inicio del crecimiento, cuando no hay nada depositado debajo (Figuras 8A y 8B, donde muestran menor ruido), mientras que, una vez que inicia la deposición sobre AlGaAs , el ruido en RHEED aumenta, provocando que las oscilaciones en las gráficas C, D, y E, de la Figura 8, se vean menos claras. Este hecho corresponde con lo reportado en la literatura (Etienne, 1993; Braun y col., 1997) y por esta razón, el cálculo de la velocidad de deposición es más preciso al realizarse con la primera capa crecida, es decir, la capa buffer, que es donde se distinguen las oscilaciones con menor ruido. La fiabilidad de este método para calcular velocidades y concentraciones ya ha sido descrita (Harvey y col., 2003). La forma de las oscilaciones también corresponde con lo ya reportado (Braun, 1999), mostrando que, las diferencias, en la forma general de las oscilaciones, entre las imágenes de la deposición de GaAs (Figuras 8A, 8C y 8E), comparado con la de-



■ Figura 8. Resultados de oscilaciones RHEED para la muestra 1. Las mediciones corresponden a: A) Primeros 100 s de la capa buffer de GaAs; B) Primeros 140 s de la capa de $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$; C) Pozo completo de GaAs; D) Primeros 200 s de la segunda capa de $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$; y E) Cobertura final de GaAs.

Figure 8. RHEED oscillation results for sample 1. The measurements correspond to: A) First 100 s of the GaAs buffer layer; B) First 140 s of the $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ layer; C) Complete GaAs well; D) First 200 s of the second layer of $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$; and E) Final coverage of GaAs.

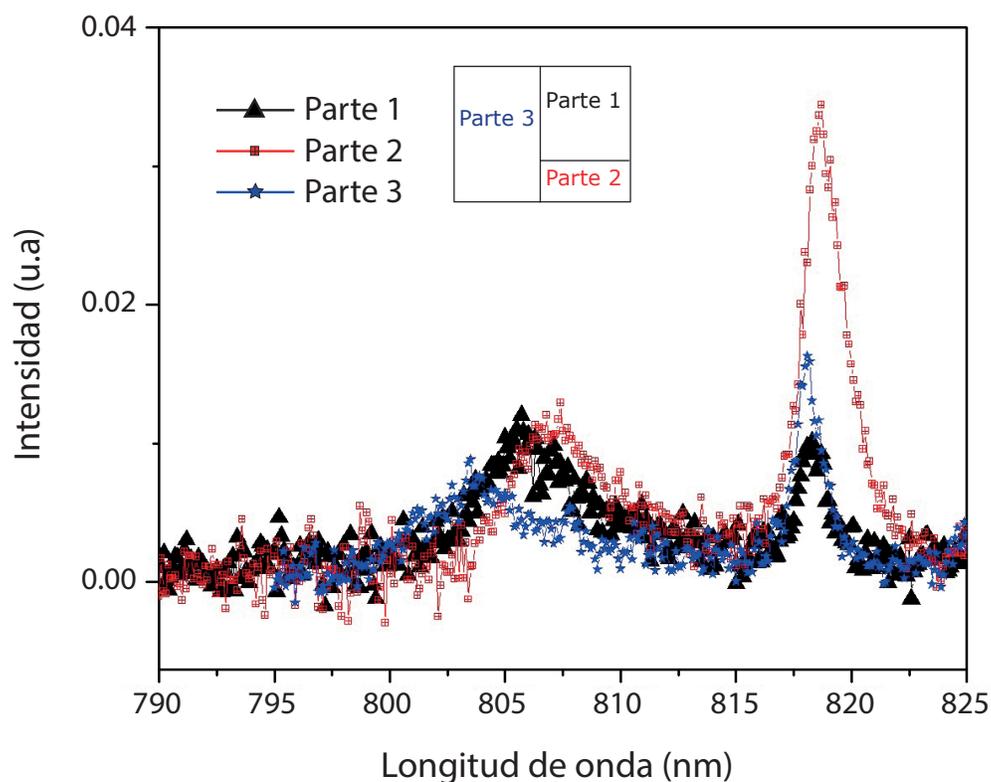
posición de AlGaAs (Figuras 8B y 8D), corresponden a la segregación de Ga esperada (Braun y col., 1997).

La PL de los 3 puntos analizados se observa en la Figura 9. Se presentaron dos picos en los tres análisis realizados. El más alto correspondió al sustrato de GaAs, mientras que el pico que se encuentra alrededor de 806 nm correspondió a la emisión del pozo cuántico crecido, el cual, solamente cambió alrededor de 2.5 nm (correspondiente a 5 meV en energía) de un extremo de la muestra al otro, lo cual significa que la uniformidad en el grosor no fue un problema mayor dentro de este crecimiento. En el presente estudio, el crecimiento fue monitoreado *in situ* únicamente a través de RHEED, por lo que se propone que, se debería utilizar en combinación con la técnica de reflectancia, lo que permitiría mejorar la uniformidad final (Biermann y col., 2021).

Los resultados de RAS se muestran en la Figura 10. La línea vertical indica la longitud de onda de la emisión del pozo, mientras que el pico que inicia alrededor de 820 nm corresponde al GaAs del sustrato. Este análisis corrobora la existencia del pozo y su emisión alrededor de 806 nm, como se observó previamente en PL. Al tratarse de un pozo individual, la señal obtenida en RAS indica el cambio de la simetría zinc-blenda (T_d) hacia la D_{2d} . Esta transformación es la que permite visualizar la señal del pozo en RAS.

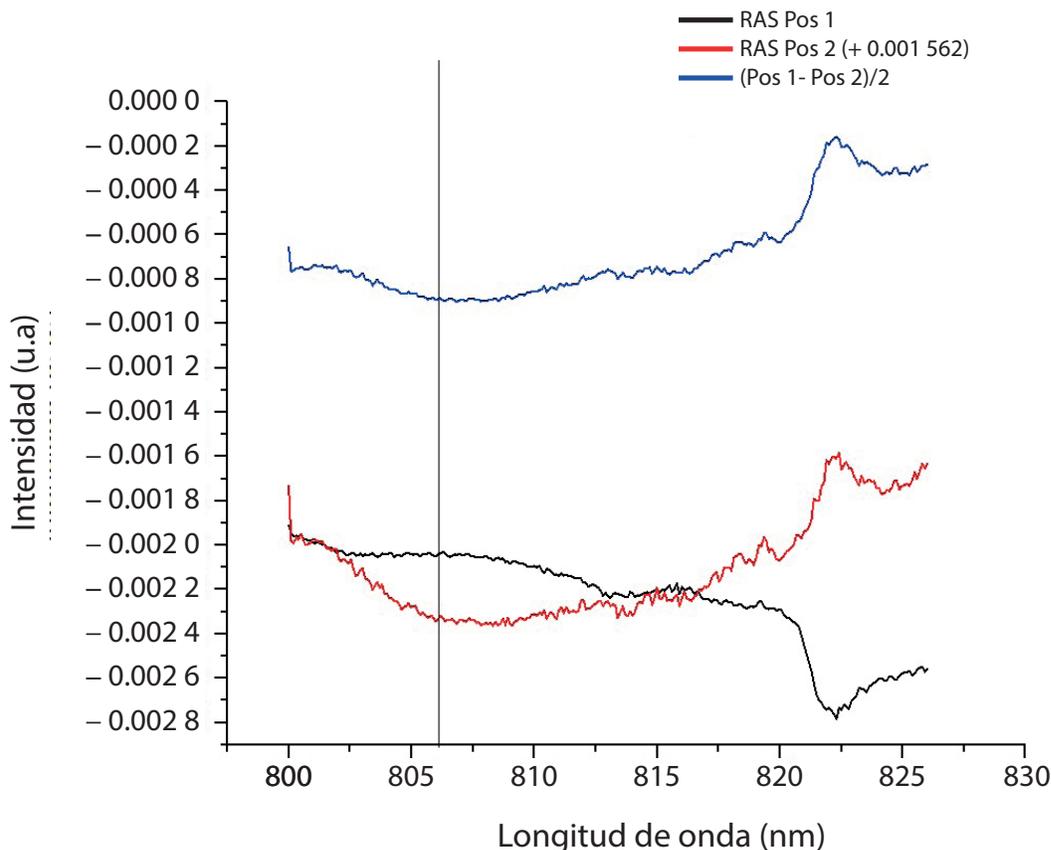
Caracterización de la muestra 2 (2 pozos acoplados, separados por barreras de $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$)

Se hicieron crecer 2 pozos acoplados, separados por una barrera de 5 nm de grosor. La estructura fabricada se muestra en la Figura 11. Al igual que en el crecimiento anterior, las velocidades de deposición obtenidas en la cali-



■ Figura 9. Resultados de fotoluminiscencia de la muestra 1. Se indica la forma en que se realizó la división de la muestra en 3 segmentos y su respectivo análisis.

Figure 9. Results of photoluminescence for sample 1. The way in which the division of the sample was carried out in 3 segments and their respective analysis is indicated.



■ Figura 10. Resultados de las mediciones de reflectancia diferencial en la muestra 1 (pozo individual; desacoplado). En negro y rojo se muestran los resultados de RAS de las dos direcciones ortogonales. En azul se muestra el valor resultante de la resta de las dos direcciones (RAS Pos 1 - RAS Pos 2) dividida entre dos. La línea vertical muestra la longitud de onda en la que se espera ver el pozo (de acuerdo a PL).

Figure 10. Results of differential reflectance measurements in sample 1 (individual well; uncoupled). In black and red the RAS results of the two orthogonal directions are shown. In blue, the subtraction of the two directions (RAS Pos 1 - RAS Pos 2) divided by two is shown. The vertical line shows the wavelength at which the well is expected to be seen (according to PL).

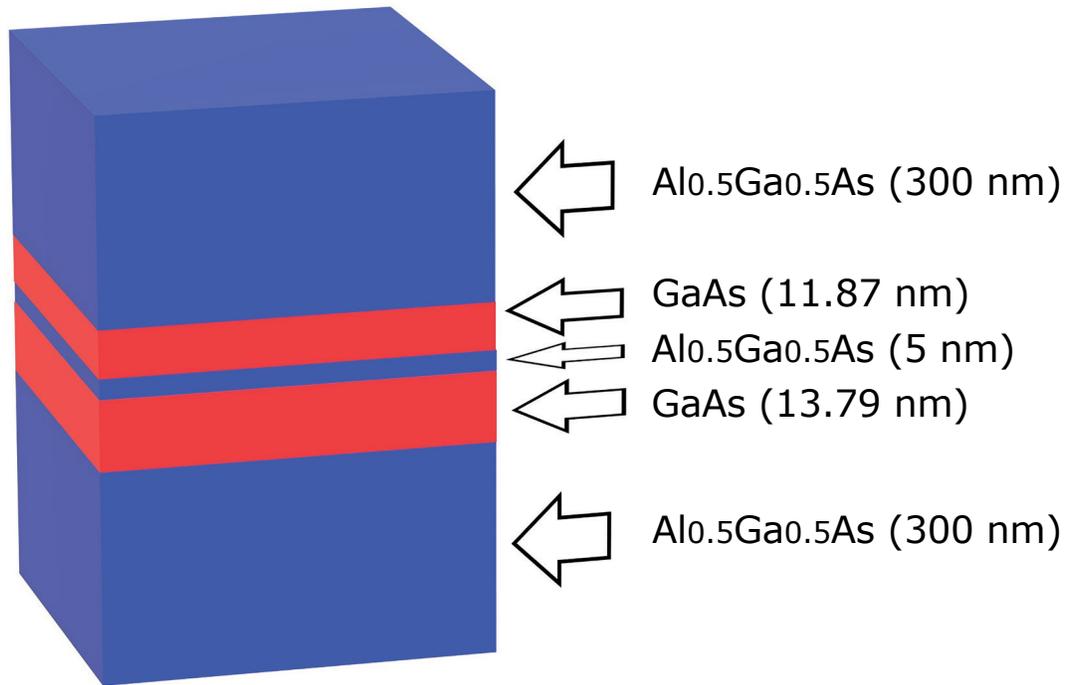
bración (0.3 mL/s para GaAs y 0.599 mL/s para AlGaAs) fueron corroboradas con las oscilaciones RHEED.

Los resultados de PL se muestran en la Figura 12. Se esperaba poder visualizar la existencia de tres picos, dos picos de emisión (en este caso se observa claramente solo un pico en 809 nm) y un segundo pico que corresponde al GaAs y que se observa en 819 nm.

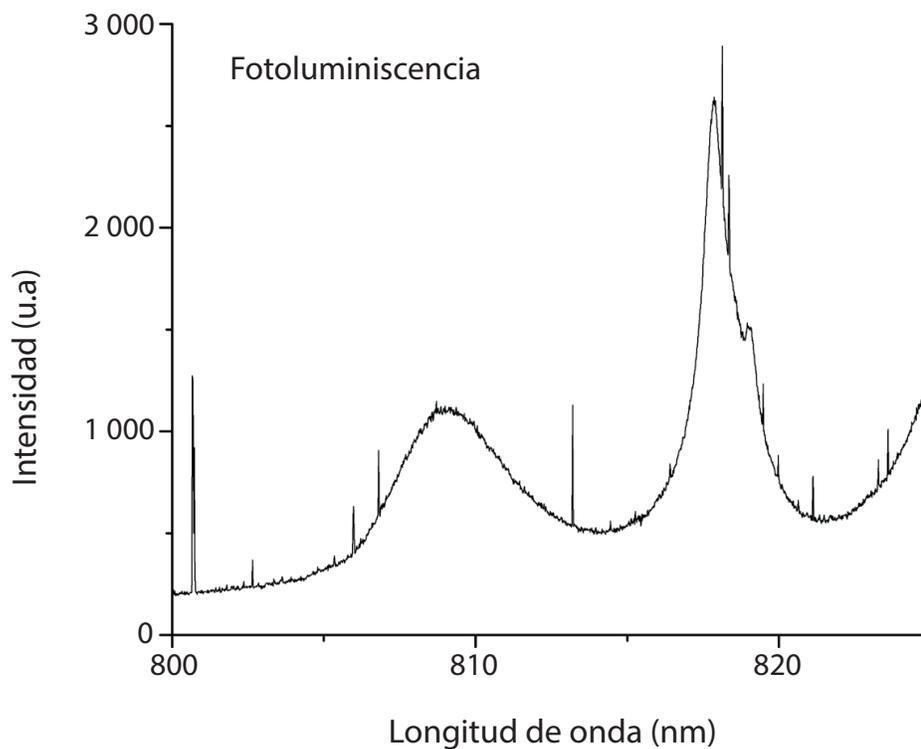
El análisis RAS se muestra en la Figura 13. Los cambios en las pendientes, señaladas por las líneas verticales, corresponden al pozo (verde) y al sustrato de GaAs (naranja). Es impor-

tante mencionar que, la señal no es tan clara (crestas y valles de mayor tamaño), como en la muestra 1 (Figura 10), lo que sugiere la existencia de algún defecto en el crecimiento.

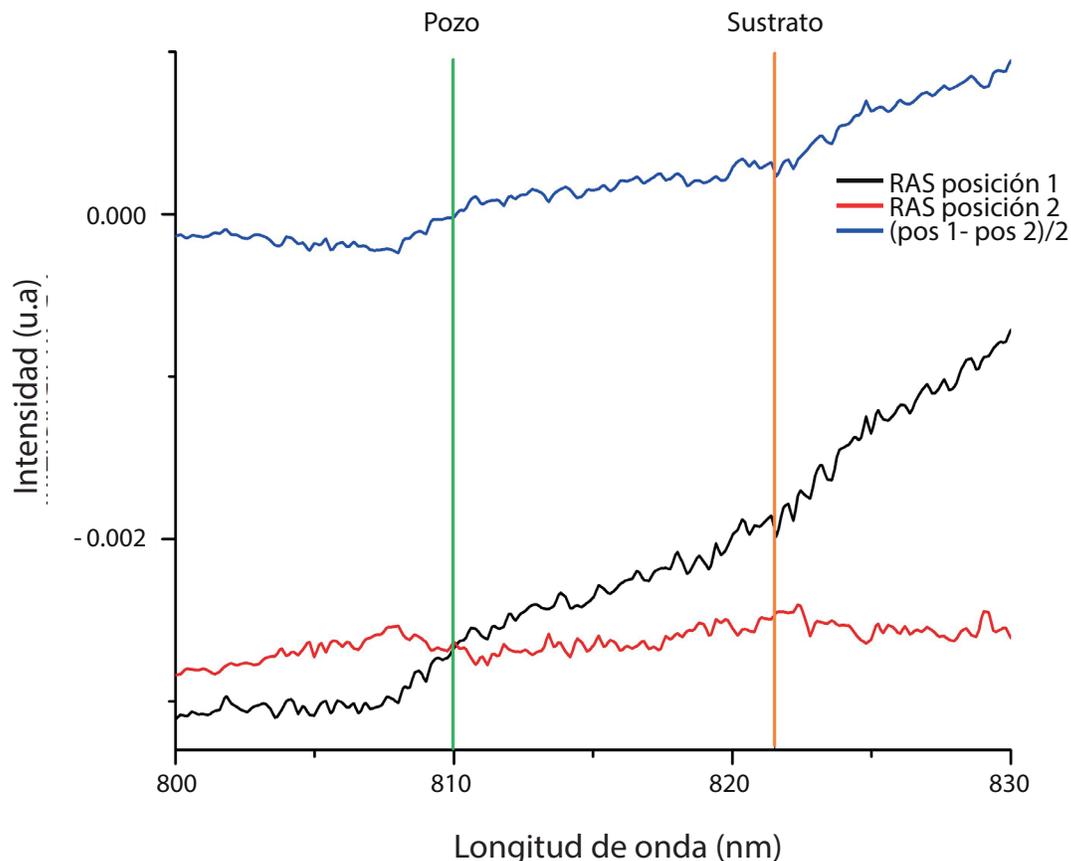
La causa por la que la señal de PL y RAS no hayan sido tan claras para la muestra 2 podría deberse a que, quizá, uno de los pozos no estaba emitiendo, lo que indicaría que no se formó correctamente durante el crecimiento. Sin embargo, al comparar ambos resultados, se observa que sí se logró la formación de los dos pozos cuánticos. En el caso de PL, parece ser que el segundo pozo sí se encontraba emitiendo, pero muy cerca de la longitud de



■ Figura 11. Estructura de la muestra 2. Se hicieron crecer dos pozos acoplados de GaAs (rojo), divididos por una barrera de Al_{0.5}Ga_{0.5}As de aproximadamente 5 nm de grosor.
Figure 11. Sample 2 structure. Two coupled GaAs (red) wells were grown, divided by an Al_{0.5}Ga_{0.5}As barrier approximately 5 nm thick.



■ Figura 12. Resultados de fotoluminiscencia a 30 K para la muestra 2 (pozos acoplados).
Figure 12. Results of photoluminescence at 30 K for sample 2 (coupled wells).



■ Figura 13. Resultados de las mediciones de reflectancia diferencial en la muestra 2 (pozos acoplados). En negro y rojo se muestran los resultados de RAS de las dos direcciones ortogonales. En azul se muestra el valor resultante de la resta de las dos direcciones (RAS Pos 1 - RAS Pos 2) dividida entre dos.

Figure 13. Results of differential reflectance measurements on sample 2 (coupled wells). In black and red the RAS results of the two orthogonal directions are shown. In blue, the subtraction of the two directions (RAS Pos 1 - RAS Pos 2) divided by two is shown.

onda a la que emite el GaAs de la capa buffer (Chen y col., 1988), por lo que ambos picos se encuentran tan juntos que aparentan ser uno solo. Es por ello, que el pico en 809 nm, en PL, se muestra asimétrico (Figura 12). Por otro lado, los resultados de RAS pueden ser comparados con aquellos obtenidos por Bravo-Velázquez y col. (2022), con pozos dopados en los que se observa que, la señal reportada para la muestra 2 es menor que la de la referencia. Se especula que lo anterior puede deberse a problemas de defectos en el crecimiento. El crecimiento de los pozos puede mejorarse, es decir, es posible reducir la presencia de posibles defectos debido a la rugosidad, como los presentes en este estudio. Al respecto, Biermann y col. (2021) demostraron que, es posi-

ble hacer crecer estructuras de alta calidad, usando un monitoreo apoyado en reflectancia, combinado con cambios en la temperatura del manipulador durante el crecimiento (Morkoc, 1982), haciendo crecer el pozo de GaAs a 580 °C y las barreras de AlGaAs a 600 °C. Por otra parte, la señal de anisotropía (medida con RAS) fue mayor en los pozos acoplados que en los desacoplados, de acuerdo a lo reportado (Sivalertporn y col., 2012; Ruiz-Cigarrillo y col., 2021; Bravo-Velázquez y col., 2022), lo que indica el rompimiento de simetría esperado al crecer pozos acoplados.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta permitió obtener de manera satisfactoria, el crecimiento epitaxial

de un pozo cuántico individual (desacoplado) y un par de pozos cuánticos acoplados, así como, su caracterización, utilizando las técnicas ópticas de fotoluminiscencia (PL) y espectroscopía de reflectancia anisotrópica (RAS), que permitieron confirmar experimentalmente la presencia de excitones directos, tanto en pozos cuánticos acoplados, como desacoplados, así como, la observación del rompimiento de simetría presente en pozos acoplados y desacoplados, en la que RAS fue particularmente de gran utilidad. Se estableció la importancia del monitoreo *in situ* con difracción de electrones reflejados de alta energía (RHEED) para controlar la velocidad de crecimiento de ca-

da capa y se plantea la posibilidad de utilizarlo en forma combinada con RAS para hacer crecer pozos del ancho deseado. Se sugiere combinar RHEED con otras técnicas ópticas de monitoreo, para mejorar los resultados en cuanto a rugosidad superficial. A futuro, es necesario establecer la factibilidad de hacer crecer pozos acoplados con barreras de distintas concentraciones de aluminio, así como, variar el grosor de los pozos, buscando observar con mayor claridad los dos picos de emisión en PL. Se debe explorar el variar la temperatura del manipulador durante el crecimiento para establecer si permite reducir eficientemente los efectos de rugosidad en las interfaces.

REFERENCIAS

- Biermann, K., Helgers, P., Crespo-Poveda, A., Kuznetsov, A., Tahraoui, A., Röben, B., ..., and Grahn, H. (2021). *In situ* control of molecular beam epitaxial growth by spectral reflectivity analysis. *Journal of Crystal Growth*. 557(124):125993.
- Braun, W. (1999). *Applied RHEED reflection high energy electron diffraction during crystal growth*. Springer Tracts in Modern Physics 154. New York: Springer-Verlag W. Braun. 216 Pp.
- Braun, W., Trampert, A., Däweritz, L., and Ploog K. H. (1997). Nonuniform segregation of Ga at AlAs/GaAs heterointerfaces. *Physical Review B*. 55(3):1689-1695.
- Bravo-Velázquez, C. A., Lastras-Martínez, L. F., Ruiz-Cigarrillo, O., Flores-Rangel, G., Tapia-Rodríguez, L. E., Biermann, K., and Santos, P. V. (2022). Photoluminescence of double quantum wells: Asymmetry and excitation laser wavelength effects. *Physical Status Solidi B*. 259(4): 2100612.
- Chen, Y., Cingolani, R., Andreani, L. C., and Bassani, F. (1988). Photoluminescence in quantum well and bulk GaAs: a direct comparative study. *Il Nuovo Cimento D*. 10(7): 847-859.
- Downs, C. and Vandervelde, T. (2013). Progress in infrared photodetectors since 2000. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 13(4): 5054-5098.
- Esser, A., Runge, E., Zimmermann, R., and Langbein, W. (2000). Photoluminescence and radiative lifetime of trions in GaAs quantum wells. *Physical Review B*. 62(12): 8232-8239.
- Etienne, B. (1993). RHEED-based measurements of atomic segregation at GaAs/AlAs interfaces. *Journal of Crystal Growth*. 127(1-4): 1056-1058.
- Guerra, N., Guevara, M., Palacios, C., and Crupi, F. (2018). Operation and physics of photovoltaic solar cells: An overview. *Revista de I+D Tecnológico*. 14(2): 84-95.
- Hamaguchi, C. (2017). *Basic semiconductor physics*. Switzerland: Springer Nature. 426 Pp.
- Harrison, P. and Valavanis, A. (2016). *Numerical solutions. In: Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures*. United Kingdom: John Wiley and Sons. 624 Pp.
- Harvey, T. E., Bertness, K. A., Hickernell, R. K., Wang C. M., and Splett, J. D. (2003). Accuracy of AlGaAs growth rates and composition determination using RHEED oscillations. *Journal of Crystal Growth*. 251(1-4): 73-79.
- Henini, M. (1993). Semiconductor lasers: An overview part I. *III-Vs Review*. 6(5): 50-53.
- Hu, X., Li, G., and Yu, J. C. (2010). Design, fabrication, and modification of nanostructured semiconductor materials for environmental and energy applications. *Langmuir*. 26(5): 3031-3039.
- Kyriienko, O., Kavokin, A. V., and Shelykh, I. A. (2013). Superradiant terahertz emission by dipolaritons. *Physical Review Letters*. 111(17):176401.
- Lastras-Martínez, L. F., Lastras-Martínez, A., and Balderas-Navarro, R. E. (1993). A spectrometer for the measurement of reflectance-difference spectra. *Review of Scientific Instruments*. 64(8): 2147-2152.
- Miller, R. C. and Kleinman, D. A. (1985). Excitons

- in GaAs quantum wells. *Journal of Luminescence*. 30(1-4): 520-540.
- Mishurnyi, V. A. y Lastras-Martínez, A. (2009). *Láseres de Semiconductor*. México: Editorial Universitaria Potosina. 163 Pp.
- Moebs, W., Ling, S. J. y Sanny, J. (2021). Física Universitaria. 9.5 Teoría de bandas de los sólidos, en *openstax*. [En línea]. Disponible en: <https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-3/pages/9-5-teoria-de-bandas-de-los-solidos>. Fecha de consulta: 1 de enero de 2023.
- Morkoc, H. (1982). Influence of MBE Growth conditions on the properties of Al_xGa_{1-x}As/GaAs heterostructures. *Journal de Physique Colloques*. 43(C5): 209-220.
- Ohring, M. (2002). *Materials science of thin films, deposition and structure*. California: Academic Press. 794 Pp.
- Ozturk, O., Ozturk, E., and Elagoz, S. (2018). The effect of barrier width on the electronic properties of double GaAlAs/GaAs and GaInAs/GaAs quantum wells. *Journal of Molecular Structure*. 40(2): 471-476.
- Rosenberg, I., Liran, D., Mazuz-Harpaz, Y., West, K., Pfeiffer, L., and Rapaport, R. (2018). Strongly interacting dipolar-polaritons. *Science Advances*. 4(10): eaat8880.
- Ruiz-Cigarrillo, O., Lastras-Martínez, L. F., Cerda-Méndez, E. A., Flores-Rangel, G., Bravo-Velazquez, C. A., Balderas-Navarro, R. E., ..., and Santos, P. V. (2021). Optical anisotropies of asymmetric double GaAs (001) quantum wells. *Physical Review B*. 103(3): 035309.
- Sands, D. E. (1993). *Introducción a la cristalografía*. España: Editorial Reverté. 176 Pp.
- Seedhouse, A., Wilkes, J., Kulakovskii, V. D., and Muljarov, E. A. (2019). Terahertz radiation of microcavity dipolaritons. *Optics Letters*. 44(17): 4339-4342.
- Serafin, P., Byrnes, T., and Kolmakov, G. V. (2020). Driven dipolariton transistors in Y-shaped channels. *Physics Letters A*. 384(34): 126855.
- Sivalertporn, K. (2016). Effect of barrier width on the exciton states in coupled quantum wells in an applied electric field. *Physics Letters A*. 380(22-23): 1990-1994.
- Sivalertporn, K., Mouchliadis, L., Ivanov, A. L., Philp, R., and Muljarov, E. A. (2012). Direct and indirect excitons in semiconductor coupled quantum wells in an applied electric field. *Physical Review B*. 85(4): 045207.
- Tapia, L. E. y Santiago-García J. G. (2022). ¿Cómo se fabrica un LED? *Universitarios Potosinos*. 268: 13-19.
- Tsao, J. Y. (2002). Light Emitting Diodes (LEDs) for General Illumination, OIDA Optoelectronics Industry Development Association. [En línea]. Disponible en: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/report_led_november_2002a_1.pdf. Fecha de consulta: 8 de enero de 2023.
- Weightman, P., Martin, D. S., Cole, R. J., and Farrell, T. (2005). Reflection anisotropy spectroscopy. *Reports on Progress in Physics*. 68(6): 1251.
- Weisbuch, C., Nishioka, M., Ishikawa, A., and Arakawa, Y. (1992). Observation of the coupled exciton-photon mode splitting in a semiconductor quantum microcavity. *Physical Review Letters*. 69(23): 3314-3317.
- Wilkes, J. and Muljarov, E. A. (2017). Excitons and polaritons in planar heterostructures in external electric and magnetic fields: A multi-sub-level approach, *Superlattices and Microstructures*. 108: 32-41.
- Witham, O., Hunt, R. J., and Drummond, N. D. (2018). Stability of trions in coupled quantum wells modeled by two-dimensional bilayers. *Physical Review B*. 97(7): 075424.