

Variación de la emisión de fotoluminiscencia de puntos cuánticos de inas con tratamiento térmico

L. D. Cruz, J. L. Casas y T. V. Torchynska

L. D. Cruz, J. L. Casas y T. V. Torchynska
Tecnológico de Estudios Superiores del Estado de México
ESFM-Instituto Politécnico Nacional, D.F
ttorch85@yahoo.com.mx

M. Ramos., V.Aguilera., (eds.).Ciencias Naturales y Exactas, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

Abstract

The photoluminescence (PL) and its temperature dependence have been studied in MBE grown InAs quantum dots (QDs) embedded in $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_z\text{As}$ quantum wells (QWs) with two capping layers ($\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.15}\text{As}$ or GaAs) and after the thermal annealing. Temperature dependences of PL peak positions in QDs have been analyzed in the range of 10-400K and compared with the temperature shrinkage of the band gap in the bulk InAs crystal. This permits to investigate the efficiency of the Ga/In interdiffusion processes in dependence on the capping layer compositions and thermal annealing. Experimental and fitting parameters obtained for InAs QDs have been compared with known ones for the bulk InAs crystal. It is revealed that the efficiency of the Ga/In interdiffusion depends essentially on the capping layer compositions. It is also shown the fast thermal decay of the integrated PL intensity in the structure with the GaAs capping layer in comparison with other one with AlGaInAs capping. To confirm the change in the material composition due to interdiffusion Ga/In in the quantum dots of InAs,

5 Introducción

Durante los últimos 20 años, los puntos cuánticos de cero dimensiones (0D) o sistemas con un confinamiento cuántico en tres direcciones ha sido de gran interés tanto en la física fundamental como en aplicaciones de dispositivos tales como: fotodiodos emisores de luz, celdas solares y dispositivos de almacenamiento masivos [1-3]. Para desarrollar dispositivos emisores de luz eficientes que operen a temperatura ambiente es necesario entender la dependencia de la temperatura de los puntos cuánticos (QDs) y estudiar las razones de la variación de la fotoluminiscencia (PL) con la temperatura. La intensidad de la PL decae en los QDs de InAs, como una regla, atribuida al escape térmico de excitones desde los QDs hacia la capa de mojado (WL) o hacia la barrera de GaAs [4-8] o a la captura térmica de excitones por defectos no radiativos (NR) o en la interfase de GaAs/InAs [5,8]. Esto muestra experimentalmente que la razón principal para decaimiento térmico en la PL de las estructuras de QDs relacionadas al escape térmico de excitones o correlaciones del par electrón-hueco de los QDs [8-10].

En estructuras de QD se introdujo una capa intermedia adicional de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_z\text{As}$ en los pozos cuánticos (QWs) de InGaAs/GaAs con lo cual se espera incrementar la altura de la barrera de potencial para evitar el escape térmico de excitones desde los puntos cuánticos hacia la capa barrera y permita sus aplicaciones mencionadas anteriormente en estructuras de QDs a altas temperaturas. El mismo efecto se puede lograr introduciendo capas intermedias de pozos cuánticos de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_z\text{As}$ en pozos de InGaAs/GaAs. Ya que se sabe que los láseres de QD fabricados con AlGaInAs muestran un buen desempeño a altas temperaturas debido al incremento de la banda prohibida [11,12].

Se ha demostrado que los dispositivos de diodo laser de mayor rendimiento son los de QDs en comparación con los láseres de QWs, éstos son más confiables, mas reproducibles y manipulables durante la formación de QDs autoensamblados es esencial para mejorar sus propiedades de dimensión cero. Se podría obtener una mejora en el entendimiento de operación y diseño de QDs de InAs embebidos en QWs de InGaAs/AlGaInAs del estudio de la variación de PL con la temperatura.

Las estructuras de QDs mencionadas han sido mejoradas debido a una mejor calidad de los cristales de las capas de QW y debido a la captura de excitones sobre los QWs y QDs [4].

También se introdujeron adicionalmente en estructuras de QD las siguientes capas a los pozos cuánticos $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ en $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ con lo que se espera incrementar las alturas de la barrera del potencial para evitar el escape térmico de excitones desde los QDs hacia la barrera y permitir la aplicación de estas estructuras a temperaturas elevadas. Para mejorar y entender las propiedades de diseño y operación de los QDs de InAs embebidos en pozos de $\text{InGaAs}/\text{AlGaInAs}$ se podrían obtener estudios de cómo es la variación del espectro de FL con el recocido térmico.

5.1 Materiales y métodos

Los materiales investigados en el presente trabajo son nanoestructuras constituidas por semiconductores de los grupos III-V con estructura blenda de zinc.

Heteroepitaxial es el crecimiento de un material orientado sobre un sustrato de material distinto. Normalmente el material que se deposita y el sustrato tienen estructuras cristalinas y constantes de red parecidas.

Los QDs autoensamblados en heteroestructuras de semiconductor son de gran interés debido a sus niveles de energía discretos semejantes al átomo, buenas propiedades ópticas y las aplicaciones en dispositivos tales como el láser de QDs. Los láseres de QDs exhiben propiedades muy superiores a los láseres basados en pozos cuánticos, tales como la reducción de la sensibilidad a la temperatura [13].

Estos QDs tienen un espectro de energía discreto que puede ser excitada por una simple inyección de portadores sobre una estructura, usados en diodos láser que operan con densidades de corriente de umbral más bajas en comparación con otros láseres a temperatura ambiente [14]. La mayor parte de los semiconductores de los grupos III-V, como el GaAs y el InAs cristalizan en la estructura blenda de zinc.

5.2 Puntos cuánticos

Un punto cuántico (QD) es un semiconductor donde los excitones se encuentran confinados en las tres dimensiones espaciales. Como resultado, tienen propiedades que se encuentran entre las de semiconductores en bulto y los de moléculas discretas.

5.3 Crecimiento epitaxia por haces moleculares (MBE)

Consiste en hacer incidir haces moleculares ionizados sobre un blanco (material a depositar) del cual se desprenden átomos que van a depositarse al sustrato. La deposición tiene lugar en forma de monocapas sucesivas.

La epitaxia por haces moleculares (Molecular Beam Epitaxy, MBE), es actualmente la técnica más empleada para el crecimiento de puntos cuánticos. En ella, se hacen converger sobre el sustrato haces de átomos de los materiales correspondientes, permitiendo la deposición de las capas atómicas una a una. Este proceso permite el crecimiento más puro, con un control exhaustivo de la composición química de la película. La MBE debe ser realizada en una cámara de alto vacío. A cambio, presenta la ventaja de poder cerrar el flujo de cualquiera de las componentes de manera rápida. El crecimiento se denomina homoepitaxial cuando la película y el sustrato son del mismo material, y heteroepitaxial cuando son de materiales diferentes.

Las técnicas de crecimiento heteroepitaxial antes descritas pueden dar lugar a puntos cuánticos autoensamblados si los parámetros físicos son los apropiados, según el modo de crecimiento de Volmer-Weber o Stranski-Krastanov. Los principales problemas a la hora de emplear estos puntos cuánticos en aplicaciones consisten en la no uniformidad de sus tamaños, distribución y geometrías.

5.4 Fotoluminiscencia

La fotoluminiscencia consiste en la radiación emitida por un sólido cristalino o amorfo o por una nanoestructura como una consecuencia de la excitación óptica; en particular esta deriva del proceso de recombinación radiativo del par hueco electrón fotoexcitado. La amplia difusión de esta técnica en el campo de nanoestructuras semiconductoras está motivada por el hecho de que esta permite obtener información general de las propiedades optoelectrónicas lo cual es de particular interés en la calidad de las nanoestructuras. El estudio del espectro de FL depende de parámetros externos, como por ejemplo, la temperatura, la energía y la intensidad de excitación nos ayuda a obtener esta información.

5.5 Estructuras

Las heteroestructuras consisten de al menos dos materiales diferentes. La geometría de las interfaces entre los dos materiales podría ser muy complicada. El caso más simple es la superficie planar, es decir, sistemas por capas. Una unión metal-semiconductor es generalmente una heteroestructura. Sin embargo, vamos a utilizar el término que fundamentalmente se usa para estructuras de varios semiconductores diferentes. La mayoría de las heteroestructuras aquí utilizadas son epitaxiales, es decir, fabricadas por la epitaxia sucesiva de varias capas sobre el sustrato.

Se utilizó una fuente sólida con la técnica epitaxia de haces moleculares (MBE) en un reactor V80H para crecer las estructuras que consisten de una capa de QDs autoensamblados de InAs embebidos en un pozo cuántico de $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ de 9 nm. Una capa colchón de $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ con un espesor de 1 nm, el cual fue crecido sobre una capa de $\text{Al}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$ de 300 nm y con una capa colchón (200 nm) sobre un sustrato de 2 pulgadas de GaAs (100). Una capa de recubrimiento de 2.5 monocapas (ML) de QDs de InAs fue confinada por una primera capa de $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ (8nm) y por una segunda capa de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_z\text{As}$ de 100nm (con $x=y=0$ para una estructura y con $x=0.40$, $y=0.45$, $z=0.15$ para la segunda estructura) y por las capas de AlAs de 10 nm y por la capa de GaAs de 2 nm (figura 3.1). Los puntos cuánticos de InAs están recubiertos por una primera capa de InGaAs y por una segunda capa de AlGaInAs o GaAs.

Las estructuras de QD investigadas se crecieron a una temperatura de 510°C durante la deposición de la región activa de InAs y la capa InGaAs. La densidad superficial de los QDs es de $4 \times 10^{10}\text{cm}^{-2}$ que se estimó previamente por estudios de microscopia de fuerza atómica (AFM).

Las estructuras se colocaron en un criostato de ciclo cerrado de He, donde se varió la temperatura de medición en un rango de 10 a 500 K, los espectros de FL se midieron con un láser de argón de onda continua de 488 nm y una densidad de potencia de excitación de 500 W/cm^2 .

Se investigaron dos grupos de estructuras de QDs con diferente composición en la segunda capa de recubrimiento $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_z\text{As}$ (100nm). En el primer grupo **#1** contiene $\text{Al}_{0.40}\text{Ga}_{0.45}\text{In}_{0.15}\text{As}$ conformado por tres estructuras, la primera sin tratamiento térmico (**#1A**) y las otras dos sometidas a un tratamiento de 640 (**#1B**) y 710 °C (**#1C**) durante dos horas y el segundo grupo **#2** contiene en la capa de recubrimiento GaAs conformado también por tres estructuras, la primera sin tratamiento térmico (**#2A**) y las siguientes dos sometidas a un tratamiento de 640 (**#2B**) y 710 °C (**#2C**).

5.6 Resultados

Se estudió la emisión de FL y su dependencia con la temperatura de puntos cuánticos autoensamblados de InAs en dependencia de la composición de la capa de recubrimiento de Al_xGa_{1-x}In_zAs y sometidos a tratamiento térmico. Se investigaron dos capas de recubrimiento (Al_{0.40}Ga_{0.45}In_{0.15}As y GaAs) y se compararon sus parámetros de FL.

Ambas estructuras fueron sometidas a tratamiento térmico de 640 °C y 710 °C durante 2 horas. Esto mostró que el recocido térmico produce un desplazamiento de la posición del pico de FL hacia altas energías y los valores de estos desplazamientos dependen de la composición de las capas que cubren a los QDs.

5.7 Discusión.

Para analizar la interdifusión de Ga/In de los QDs de InAs se estudiaron los espectros de FL a diferentes temperaturas en las estructuras sin tratamiento térmico y después con tratamiento térmico. En los espectros de FL se puede ver que la posición del pico de FL se desplaza hacia bajas energías con el incremento de la temperatura disminuyendo el valor de la banda prohibida de energía al aumentar la temperatura. Generalmente debido a la dilatación de la red y a la interacción electrón-red lo cual sigue la siguiente relación de Varshni $E(T)=E_0-aT^2/(T+b)$, [15].

5.6 Conclusiones.

El estudio comparativo de los espectros de FL en la estructura #1 y #2 muestra que la estructura #1A con AlGaInAs en la capa de recubrimiento se caracterizó por una intensidad de FL más alta, una baja dispersión en el tamaño de los QDs y un ancho medio menor, así como un desplazamiento de la posición del pico de FL hacia bajas energías en comparación con la estructura #2A la cual contiene GaAs en la capa de recubrimiento.

El estudio de los espectros de FL de las estructuras #1 y #2 con tratamiento térmico a 640 y 710 °C durante dos horas muestran que la composición del material de los QDs cambia más en las estructuras #2 comparada con las estructuras #1 debido a un mayor proceso de intermezclado de In/Ga en la estructuras #2. Esta conclusión se confirma por la estimación de la composición del material de los QDs obtenida usando el ajuste de Varshni los cuales muestran que los parámetros de ajuste de las estructuras #1 que están más cerca de los parámetros de material del InAs en bulto en comparación con los parámetros de las estructuras #2.

Finalmente una aportación importante que este trabajo establece es que las estructuras con una capa barrera compuesta por aluminio (Al_{0.40}Ga_{0.45}In_{0.15}As) evitan el escape térmico de excitones en una mayor proporción, y además se logra obtener una emisión de fotoluminiscencia a temperaturas más altas del orden de 500 °C con emisión en 1.3 μm. Esta nueva estructura con aluminio tiene un mejor desempeño a altas temperaturas debido a una banda prohibida mayor en la capa barrera.

5.7 Agradecimientos.

Tecnológico de Estudios Superiores de Oriente del Estado de México.

5.8 Referencias

- Bimberg D., Grundman M, Ledentsov N. N. (2001). Quantum Dot Heterostructures, Ed. Wiley & Sons 328.
- Stintz A., Liu G. T., Gray L., Spillers R., Delgado S. M., Malloy K. J., J. (2000). Sci. Technol. B., , 18(3), 1496.
- Torchynska T. V., Casas Espínola J. L., Velazquez Losada E., Eliseev P. G., Stintz A., Malloy K. J., Peña Sierra R. (2003). Surface Science 532, 848.
- Kapteyn C. M. A., Lion M., Heitz R., Bimberg D., Brunkov P. N., Volovik B. V., Konnikov S. G., Kovsh A. R., and Ustinov V. M. (2000). Appl. Phys. Lett. 76, 1573.
- Duarte C. A., da Silva E. C. F., Quivy A. A., da Silva M. J., Martini S., Leite J. R., Meneses E. A. and Lauretto E. (2003), Appl. Phys., 93, 6279.
- Meng X. Q., Xu B., Jin P., Ye X. L., Zhang Z. Y., Li C.M., Wang Z.G. (2002). Journal of Crystal Growth 243, 432.
- Seravalli. L., Frigeri P., Minelli M., Allegri P., Avanzini V., Franchi S. (2005). J. Appl. Phys. Lett. 87, 063101.
- Torchynska T., (2008). J. Appl. Phys., 104, 074315, n.7.
- Torchynska T.V., Stintz A., (2010). J. Appl. Phys. 108, 2, 024316.
- Torchynska T. V., Casas Espinola J. L., Borkovska L. V., Ostapenko S., Dybic M., Polupan O., orsunka N. O., Stintz A., Eliseev P. G., Malloy K. J. (2007). J. Appl. Phys., 101, 024323.
- Zah. C.E., Bhat R., Pathak B.N., Favire F., Lin F., W. and Wang M.C. (1994). IEEE J. Quantum Electron., 30(2), 511–523.
- Takemasa K., Kubota M., Munakata T., and Wada H. (1999). IEEE Photon. Technol. Lett., 11(8), 949-951.
- Arakawa Y. and Sasaki H., (1982). Appl. Phys. Lett. 40, 939
- Liu. G. T., Stintz A., Li H., Malloy K. J., and Lester L. F. (1999). Electron. Lett. 35, 1163.
- Varshni Y.P. (1967). Physica (Utrecht) 34 149.
- The Ioffe Institute is one of Russia's. <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/index.html>.
- Dybiec M., Borkovska L., Ostapenko S., Torchynska T.V., Casas Espinola J. L., Stintz A. and Malloy K. J., (2006). Applid Surface Science, 252, 5542-5545.