

Fabricación de láseres semiconductores basados en puntos cuánticos de InAs insertados en un pozo de InGaAs por EHM

Ismael Lara Velázquez

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Av. Tecnológico s/n Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, C.P. 78376, México, teléfono (444) 8182136
ismael.lara@itslp.edu.mx

Ramón Díaz de León Zapata

Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Av. Tecnológico s/n Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, C.P. 78376, México, teléfono (444) 8182136
ramondz@hotmail.com

Jorge Ortega Gallegos

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica IICO- UASLP, Av. Karakorum 1470, Lomas 4a. San Luis Potosí, C.P. 78210, México, teléfono (444) 8250183
jortega@iico.uaslp.mx

Resumen

En esta comunicación presentamos los resultados de la fabricación de láseres semiconductores con su caracterización morfológica y óptica de láseres de confinamiento óptico y electrónico de puntos cuánticos autoensamblados de InAs crecidos por Epitaxia de Haces Moleculares y el proceso post crecimiento de la heteroestructuras láser. El crecimiento fue monitoreado In Situ mediante RHEED con el haz de electrones incidente paralelo a la dirección [1 - 10]. Imágenes de microscopía de Fuerza Atómica (MFA) y de Efecto Túnel demostraron la formación de heteroestructuras nanométricas de geometrías distintas. Las películas fueron caracterizadas por fotoluminiscencia y se tomaron espectros a diferentes temperaturas. El dispositivo fue caracterizado eléctricamente por

electroluminiscencia. Los láseres operan a temperatura ambiente con corriente pulsada y con potencias pico de 12 mW.

Palabras Claves: Electroluminiscencia, Epitaxia de Haces Moleculares, Fotoluminiscencia, InAs, láser, pozo cuántico, puntos cuánticos.

1. Introducción

Con el desarrollo de técnicas epitaxiales en los 70's (*epitaxia por haces moleculares EHM*) fue posible fabricar regiones activas del orden de angstrom. Este método es usado para fabricar heteroestructuras láser con películas muy delgadas.

La primera etapa en la fabricación de un láser semiconductor consiste en la obtención de una heteroestructura semiconductor, depositando una serie de películas semiconductoras muy delgadas con espesores de milésimas de milímetro, sobre un sustrato de un material también semiconductor. Una de estas capas se convertirá en la región activa del láser. Las dos capas que emparedan a la región activa se denominan "emisores". Después de la formación de estas capas se depositan películas metálicas muy delgadas sobre las caras superior e inferior de la heteroestructura, las cuales servirán como contactos eléctricos (electrodos) para inyectar una corriente eléctrica a la región activa del láser. Finalmente, después de la formación de los electrodos, el sustrato se divide en "chips" con dimensiones de fracciones de milímetro.

2. Desarrollo

Para la fabricación de los láseres semiconductores se utilizan técnicas sofisticadas que están emparentadas con las técnicas empleadas en la fabricación de microcircuitos de silicio. En el crecimiento por haces moleculares [1] los flujos de átomos o moléculas son evaporadas térmicamente en celdas de efusión, y debido al ambiente de ultra alto vacío en el que se encuentra las moléculas salen despedidas en forma de haz molecular. El

haz molecular se impacta con el sustrato cristalino en donde ocurre gran diversidad de procesos superficiales (difusión, absorción, desorción), cada capa de átomos se considera monocapa como se observa en la Fig. 1. La temperatura de las celdas y del porta sustrato son controladas por separado. La técnica permite velocidades tan bajas de crecimiento del orden de $1 \mu\text{m h}^{-1}$ (3 \AA s^{-1}). Esto permite realizar cambios en la composición desde dimensiones atómicas, determinado por el tiempo de operación de los obturadores. El control de los obturadores se realiza de forma automatizada [2].

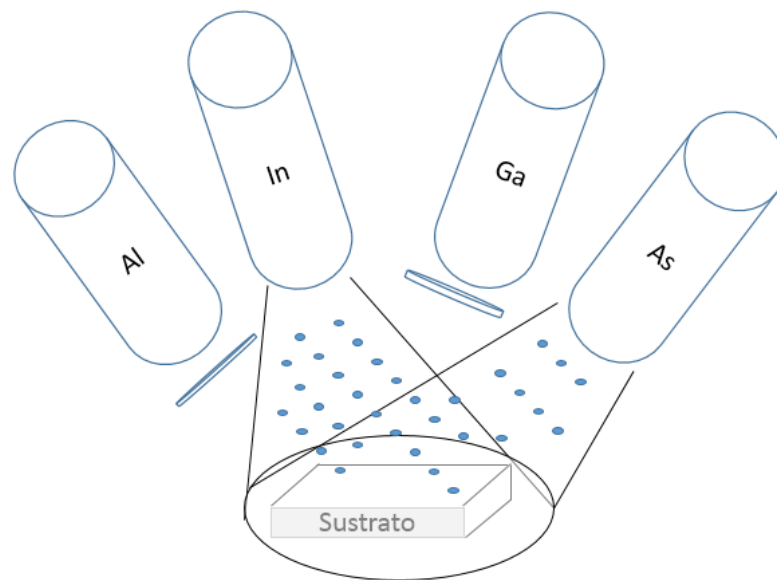


Fig. 1. Depósito de películas por Epitaxia por Haces Moleculares.

Procedimiento experimental

El crecimiento de heteroestructuras InGaAs-GaAs es compleja debido a la significativa diferencia de parámetros de red entre el GaAs y la concentración x de Indio $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ [3]. La heteroestructura láser descrita se determinó con una composición de $\text{In } x = 0.15$, que corresponde a un desacople reticular de 1.07 %. En la Fig. 2 se muestra un diagrama de la heteroestructura, el crecimiento se hizo sobre sustratos Epi-Ready de GaAs-N⁺ con orientación (001) impurificado con Si. La desorción de óxidos fue también llevada a cabo a una temperatura de 600 °C por alrededor de 15 minutos bajo un flujo de As_4

equivalente a una presión de 10^{-6} Torr e igualmente monitoreada mediante difracción RHEED. Una vez que la superficie estuvo libre de óxidos, se creció una película colchón (buffer) de GaAs con un espesor de $0.3 \mu\text{m}$, seguida de una barrera de $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ de $1 \mu\text{m}$ de espesor, una película de guía de onda de GaAs sin dopar sobre la cual se crece el pozo cuántico, comenzando con una base de $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$ $0.011 \mu\text{m}$ de espesor o en una base del pozo de espesor de $0.002 \mu\text{m}$ donde se colocan los puntos cuánticos de InAs los cuales se entierran con una película de InGaAs de $0.009 \mu\text{m}$ y son espaciados con una película espaciadora de GaAs repetido este proceso en 3 ocasiones, centrados en la película de la guía de onda. En la parte superior se crece una barrera de $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ de $1 \mu\text{m}$ de espesor y finalmente una película de contacto GaAs de $0.1 \mu\text{m}$ de espesor. Ambos niveles de dopaje de las barreras tipo N y P son de 10^{18}cm^{-3} mientras que el nivel de dopaje en la película de contacto es de 10^{19}cm^{-3} .

En la Fig. 2 a) se muestra el diagrama de la heteroestructura láser de los puntos cuánticos autoensamblados en el pozo cuántico de pozo cuántico $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$ de $0.011 \mu\text{m}$. En la b) se muestran los niveles de energía de la región activa GaAs- $\text{In}_{0.11}\text{Ga}_{0.89}\text{As}$ -InAs.

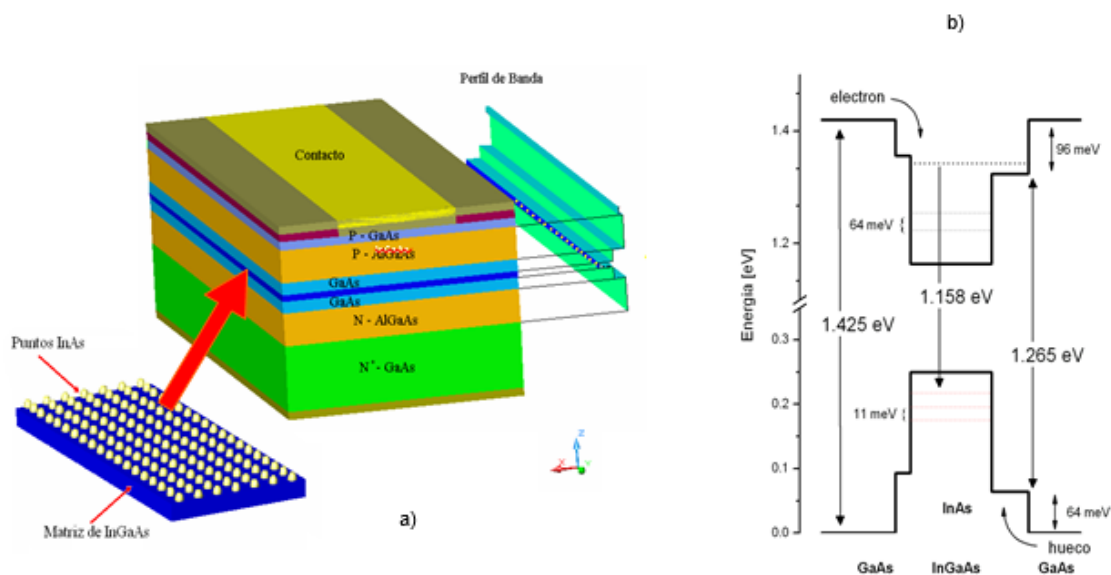


Fig. 2. a) Diagrama esquemático de la heteroestructura laser de puntos cuánticos b) Diagrama de bandas de energía puntos cuánticos InAs insertados en el pozo de InGaAs.

Caracterización de la heteroestructura

Para el crecimiento de los puntos cuánticos de InAs autoensamblados se empleó la técnica de Stranski-Krastanow, una de las formas más sencillas y eficientes para fabricar estas nanoestructuras [4] [5]. El proceso de autoensamble explota el carácter tridimensional en forma de islas que tiene lugar con el depósito de semiconductores con un desacople de red grande. El crecimiento de InAs sobre InGaAs es un ejemplo típico en donde el desacople entre las constantes de red. De esta manera, las islas de InAs se forman coherentemente, libres de dislocaciones sobre el sustrato de InGaAs [6].

Al iniciarse un crecimiento de la película de InGaAs los patrones RHEED muestran un crecimiento bidimensional de capa por capa, y al cerrar la celda de efusión de Galio como se muestra en la Fig. 3 se observa el patrón de intensidad RHEED del crecimiento en todo el intervalo durante el cual la celda de efusión de Indio permanece abierta, en la imagen se puede apreciar el modo de crecimiento de 2D a 3D región, lo cual evidencia de los puntos cuánticos la presencia de difracción de los puntos en una dirección del sustrato conocidos como chevrones [7], finalmente la intensidad se satura después de finalizado el crecimiento.

Una vez concluida esta película los puntos quedan enterrados por las películas superiores logrando recuperar la superficie bidimensional monitoreada por RHEED.

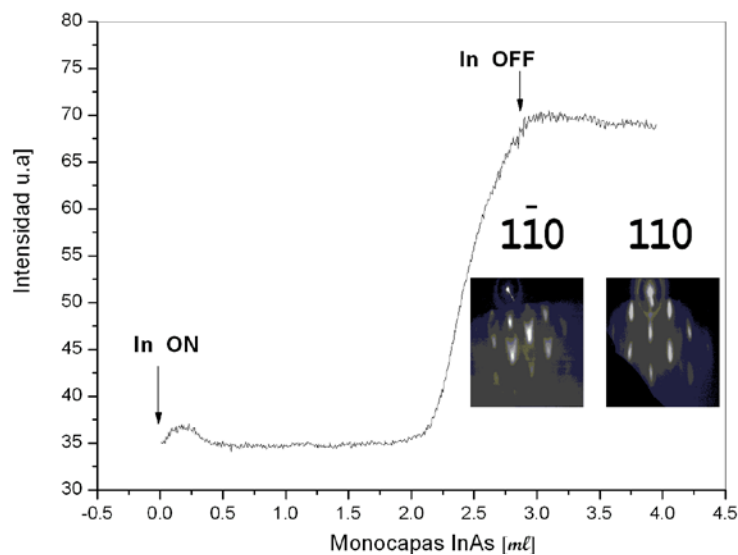
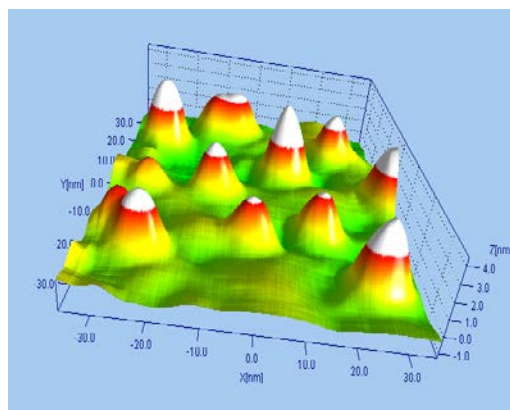
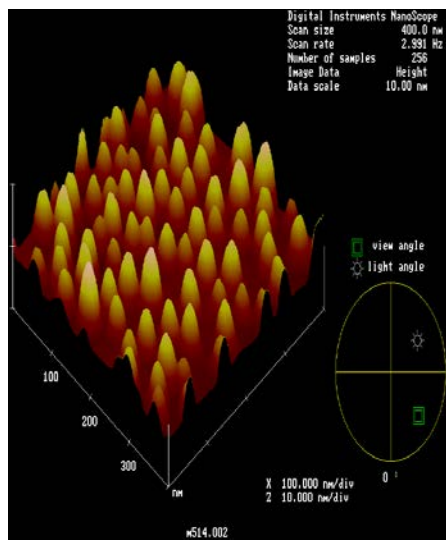
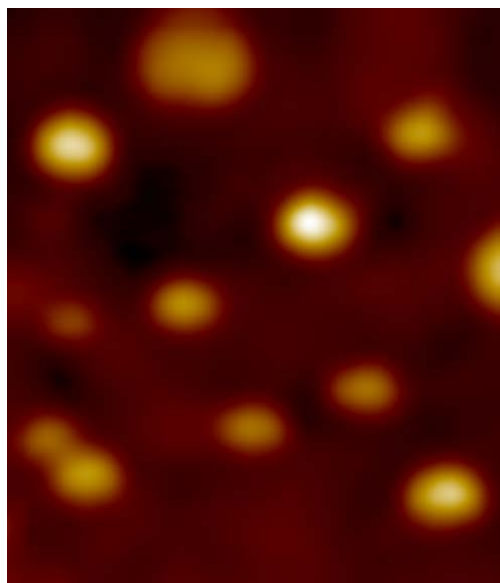
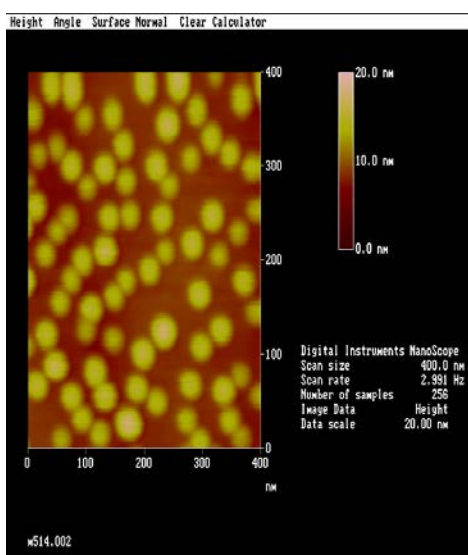


Fig. 3. Patrones de difracción de electrones (RHEED).

En las imágenes de la Fig.4 a) la morfología de las superficies fue evaluada *ex-situ* por medio de Microscopio de fuerza Atómica y en b) *in-situ* por medio de Microscopio de Efecto Túnel. Se evidencia la formación de estructuras tridimensionales nanométrica de geometrías distintas, que se distribuyeron en lugares preferenciales.



a)

b)

Fig. 4. a) Imágenes de MFA tomados en una área de $1\mu\text{m}$ y a presión atmosférica, b) Imágenes de MET tomadas en condiciones de alto vacío 10^{-10} Torr.

3. Resultados

Fotoluminiscencia

EL experimento de fotoluminiscencia se realizó a temperatura ambiente, la fuente de excitación fue un láser de Ar^+ a una potencia nominal de 150 mW, para eliminar la señal del láser se utilizó un filtro pasa altas que restringe la línea de emisión del láser. En la fig. 5 se muestra el espectro de fotoluminiscencia para la heteroestructura de GaAs-InGaAs-InAs. El espectro de fotoluminiscencia de la heteroestructura láser mostró un pico centrado en 876.9 nm que corresponde a las transiciones de GaAs y de 970 nm de InGaAs. El semiancho es de 44.86 meV, lo que indica que el proceso radiactivo proviene del pozo de la heteroestructura láser mostrando sin embargo que el orden de la señal es débil pero con significativa con respecto al nivel de ruido.

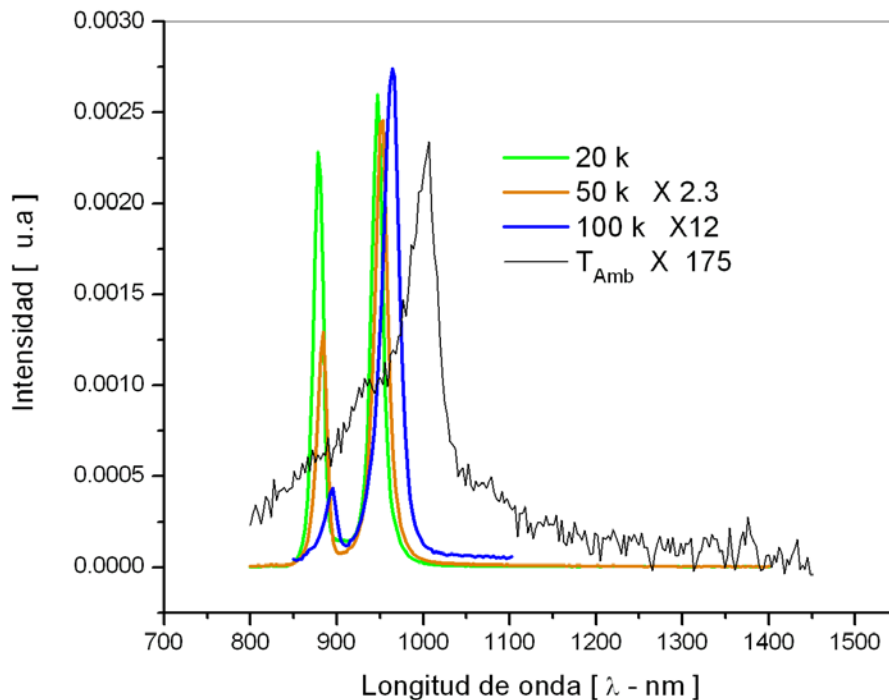


Fig. 5. Espectro de fotoluminiscencia de la heteroestructura láser de puntos cuánticos.

Parámetros del diodo láser

Una de las etapas más importantes en la fabricación de los láseres reportados fue el desarrollo de contactos óhmicos de baja resistividad, los cuales son esenciales para reducir la corriente de umbral y lograr emisión estimulada, así como incrementar la potencia emitida.

Los contactos óhmicos son los inyectores de corriente eléctrica al láser semiconductor. Los dispositivos láser tienen contactos de tira de $100\ \mu\text{m}$ con una longitud de la cavidad entre $.5$ y $1.7\ \text{mm}$, la resistencia de contactos obtenida es de $1.5\ \Omega$. En la Fig. 6 a) se muestran las dimensiones físicas del dispositivo láser y las tiras clivadas de la heteroestructura. Se puede observar la calidad espejo de las facetas de los diodos láser. Estos dispositivos son clivados a partir de barras que a su vez fueron clivadas de la heteroestructura láser. En b) se puede apreciar las dimensiones físicas del dispositivo comparado con un objeto difícil de encontrar en un pajar.

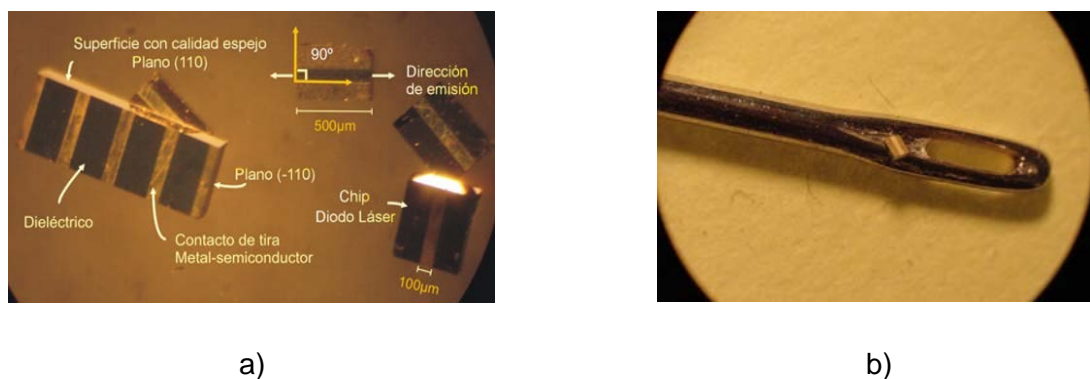


Fig. 6. a) clivado de la heteroestructura láser, b) Tamaño físico del chip comparado con el ojo de una aguja.

Corriente Potencia IP

En la Fig. 7, se muestra la curva característica I-P de una sola cara. Las curvas I-P para los diodos láser InGaAs-GaAs. El dispositivo opera con corriente pulsada la cual tiene un

ciclo de trabajo de 4 %, la densidad de corriente de umbral es de 500 A/cm^2 lo que lo hace apropiado operar en estas condiciones de trabajo a temperatura ambiente sin degradarse en poco tiempo.

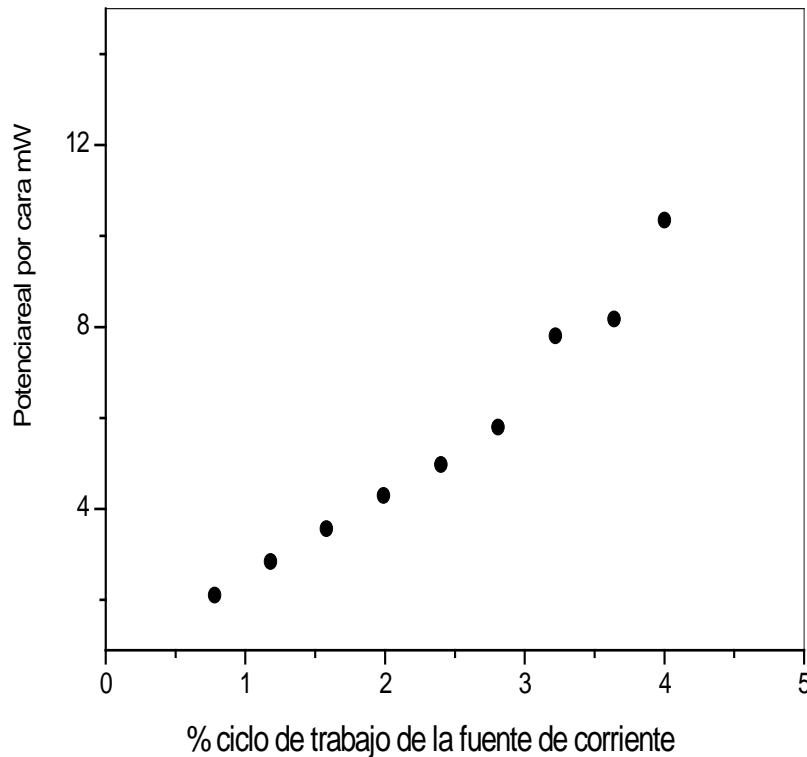


Fig. 7. Corriente potencia de los diodos láser de puntos cuánticos.

Densidad de Corriente de umbral

Al aplicar al diodo láser una pequeña corriente el dispositivo empieza a emitir luz espontánea conforme la corriente incrementa aumenta la ganancia del medio activo hasta que surge la emisión estimulada de forma inmediata. El inicio del laseo es acompañado por un claro aumento en la intensidad de luz y más allá de ese punto se observa una dependencia lineal entre la corriente inyectada y la luz emitida por el diodo láser. El estado en el cual la acción láser empieza es llamado corriente de umbral.

Para la medición de electroluminiscencia se utilizó el espectrómetro multicanal HR4000 el cual tiene una dispersión de 0.247 nm/píxel con una resolución espectral de 0.49 nm. Lo que lo hace muy confiable para rango espectral de estos dispositivos láser de respuesta en el infrarrojo cercano. En la Fig. 8 se muestra el espectro de electroluminiscencia de la heteroestructura láser de pozo cuántico de InGaAs de 0.011 μm de espesor. La corriente de umbral en este dispositivo es 1.12 A con una densidad de corriente de 588 A/cm^2 , la línea de emisión láser se encuentra en 1040.7 nm, con un semiancho de 1.63 nm. El dispositivo láser tiene contactos de tira de 100 μm con una longitud de la cavidad de 1700 μm . La resistencia de contactos para este dispositivo es de 1.5Ω . El dispositivo trabaja con corriente pulsada y a temperatura ambiente.

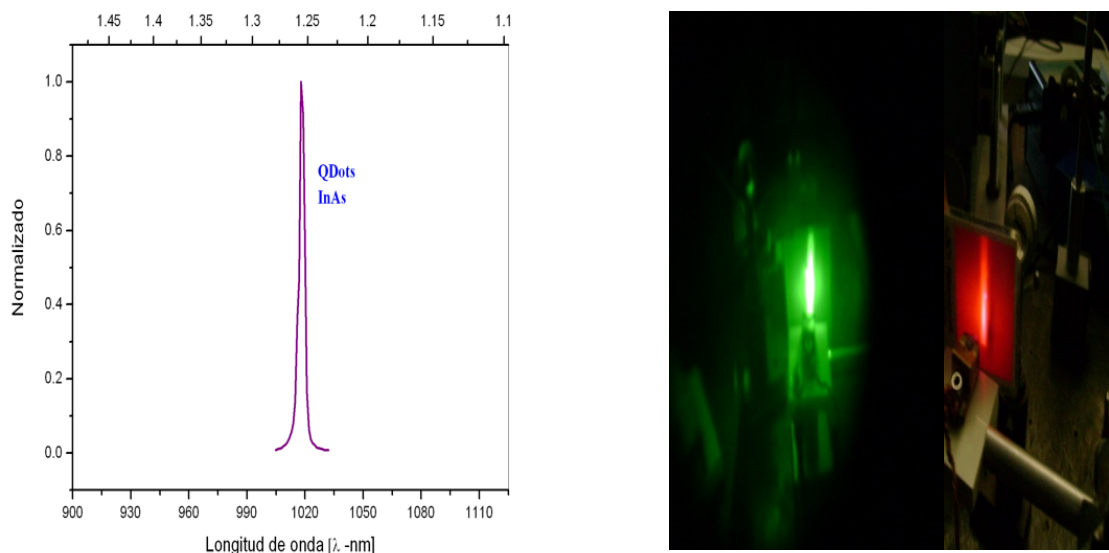


Fig. 5. a) Emisión espectral del láser de puntos cuánticos. b) imagen del haz del láser empleando un visor infrarrojo y proyectando el haz del láser en una pantalla de Fósforo.

4. Conclusiones

En este trabajo reportamos el desarrollo de dispositivos láser de pozo cuántico a base de puntos cuánticos de InAs. Los puntos cuánticos crecidos por EHM muestran que el tiempo

de formación depende de la temperatura de crecimiento [8], sin embargo estos puntos quedan enterrados en la etapa del pozo cuántico dificultando el crecimiento de películas superiores; logramos en este trabajo que los puntos cuánticos no se desvanecieran por el incremento de temperatura y la velocidad de crecimiento ligero de las películas superiores que componen la estructura.

Se alcanzaron potencias de emisión promedio por faceta de 12 mW con densidades de corriente de 600 A/cm². La longitud de onda de emisión en los láseres es de 1018 nm logrando periodos continuos de trabajo del dispositivo hasta 200 hrs.

Dado que el diseño y fabricación de estos dispositivos por esta técnica de crecimiento no se había llevado a cabo en nuestro país tendremos el proceso de fabricación de estos dispositivos en un avance de investigación pero con la capacidad tecnológica de aportar las condiciones para explotar su producción comercial que hasta el momento son de importación, patentes extranjeras o en su caso compra de tecnología.

Como trabajo a futuro se ha desarrollado una técnica para la fabricación de láseres de puntos cuánticos en la que se puede dimensionar el tamaño de los puntos cuánticos y lo que podrá cambiar la línea de emisión del láser más hacia el infrarrojo cercano y en un proyecto más ambicioso es el fabricar dispositivos láser de cascada cuántica para explorar líneas de emisión en el infrarrojo lejano.

5. Referencias

- [1] J. R Artur. "Molecular Beam Epitaxy". *Surface Science*. Vol. 500, Issues 1-3, Marzo 2002, p. 189-217
- [2] O. F. Núñez, A. R. Gonzalez, I. Lara. "Sistema de control de obturadores de un sistema de epitaxia por haces moleculares basado en microcontroladores". *Memorias del XX de la Sociedad Mexicana de Instrumentación, SOMI XX, León, Guanajuato. México 2005. p. 72.*

- [3] I. L. Velázquez, Crecimiento y caracterización óptica de películas semiconductoras III-V y su aplicación a la fabricación de láseres semiconductores. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Investigación en Comunicación Óptica UASLP-IICO, San Luis Potosí, México. 2008.
- [4] A. Pulzara, E. Cruz-Hernández, J. Rojas Ramirez, M. Bernal, V.H. Méndez-García. "Puntos Cuánticos Auto ensamblados de InAs crecidos sobre sustratos de GaAs por Epitaxia de Haces Moleculares". *Revista Colombiana de Física*. Vol. 40, No. 1, Abril 2008. P. 183-185
- [5] N. N. Ledentsov, N. Kirstaedter. "Low threshold, large To injection laser emission from (InGa)As quantum dots". *Electronics Letters*, Vol. 30, Issue 17, Agosto 1994, p. 1416-1417.
- [6] M. Kosmala, K. Reginski, "Some problems of molecular beam epitaxy growth of epitaxial structures of semiconductor lasers for a 980 nm band". *Optica Applicata*. Vol. 35, No.3, 2005. p. 399-405.
- [7] R. H. Lee, R. Lowe-Webb, W. Yang, P. C. "Determination of the shape of self-organized InAs/GaAs quantum dots by reflection high energy electron diffraction". *Applied Physics Letters*. Vol. 72, Issue 7, Febrero 1998. p. 812-814
- [8] J.W. Lee, D. Schuh, M. Bichler, G. Abstreiter. "Advanced study of various characteristics found in RHEED patterns during the growth of InAs quantum dots on GaAs (001) substrate by molecular beam epitaxy." *Applied Surface Science*. Vol. 228, Issues 1-4 Abril 2004, p. 306-312.

6. Autores

Dr. Ismael Lara Velázquez, Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Catedrático del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. Jefe de Proyectos de Investigación de la carrera de Ingeniería Eléctrica, actualmente está desarrollando proyectos relacionados con dispositivos optoelectrónicos multidisciplinares con el Instituto de Investigación en Comunicación Óptica de la UASLP.

M. en C. Ramón Díaz de León Zapata obtuvo su título de Maestría en Ciencias con especialidad en Ciencias de la Computación por el Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. Candidato a Doctor en Ciencias Experimentales con especialidad en Nanomateriales por la Universidad Autónoma de San Luis. Potosí.

Dr. Jorge Ortega Gallegos obtuvo su título de Doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma de San. Luis. Potosí. Actualmente es profesor Investigador del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO_UASLP), Actualmente trabaja en propiedades ópticas de semiconductores tecnología de semiconductores y dispositivos. SNI Nivel 1.

7. Agradecimientos

Agradecimiento especial al Instituto de Investigación en Comunicación Óptica y a su Director, por el apoyo técnico y de asesoría otorgado para la realización de este proyecto.

Se agradece al Departamento de Eléctrica, Electrónica y Mecatrónica del ITSLP por todo el apoyo otorgado durante la elaboración de la presente investigación.