

XXVII CONVOCATORIA DE PREMIOS "Ingenieros de telecomunicación" 06



Resumen de la Tesis Doctoral:

"Crecimiento por MBE de pozos cuánticos de InGaAsN sobre GaAs (111)B y (100) para su aplicación en láseres de semiconductor"

Javier Miguel Sánchez
Dr. Ingeniero de Telecomunicación

1. Descripción del trabajo de Tesis

1.1 Comunicaciones ópticas: Necesidad de nuevos emisores

Es conocida la ley de Moore, que dice que la capacidad de cálculo de los ordenadores, y su memoria, se duplican cada 18 meses [1], aproximadamente. Teniendo en cuenta también la ley de Shannon [2], que nos da la limitación de transmisión de información por un canal, se hace necesario el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales que sean capaces de superar las limitaciones físicas que se encuentran en el momento de realizar un enlace de comunicaciones entre dos puntos a las velocidades demandadas en la actualidad por los sistemas electrónicos. La evolución de las telecomunicaciones, y su impacto en la sociedad actual, hace que se requiera cada día un mayor ancho de banda para la transmisión de datos.

La solución adoptada para alcanzar las más elevadas velocidades de transmisión es la telecomunicación mediante enlaces sobre fibra óptica, principalmente. Esto es así debido a que supera a muchos otros medios de transmisión por cable, en tanto que tiene unas pérdidas muy reducidas. Así, las pérdidas de aproximadamente 10 dB/m y 1 dB/m a 10 Gbps del par trenzado y del cable coaxial, respectivamente, son muy elevadas comparadas con los 0,0002 dB/m que presenta una fibra óptica cuando se transmite una señal a 1,55 μm . [3,4]

1,55 μm , junto con 1,3 μm y 850 nm son las longitudes de onda centrales de las denominadas ventanas de transmisión de la fibra óptica. Las fibras ópticas presentan picos de absorción, debidos a impurezas metálicas e iones *OH*. [4,5] Las zonas en las que esta absorción es mínima, son las ventanas de transmisión de la fibra óptica: de 800 a 900 nm la primera, a 1,3 y a 1,5 μm la segunda y tercera ventanas, respectivamente. Actualmente, existe una tendencia muy marcada a un aumento del acceso inalámbrico a las redes de comunicación (picocélulas, telefonía celular de gran ancho de banda, WiFi, ...), por lo que se requieren muy altos anchos de banda para la transmisión de datos desde el acceso a la red. Esta transmisión es posible mediante la fibra óptica, y técnicas de multiplexación muy eficientes (CWDM: *Coarse Wavelength Division Multiplexing*; DWDM: *Dense Wavelength Division Multiplexing*, entre otras) que hacen que el ancho de banda sea muy superior a otras formas de comunicación. [4]

Estas perspectivas de crecimiento demandadas por la sociedad se tienen que ver reflejadas en la tecnología. Los datos del mercado de emisores láser para comunicaciones ópticas muestra inestabilidad desde 2001, con fluctuaciones e incertidumbre debido a problemas tecnológicos y la gran competencia, no así otros apartados dentro del mercado de los diodos láser, como los aplicados al almacenamiento óptico. [6] Aun así, la tendencia del mercado de los láseres de comunicaciones, es de un crecimiento sostenido desde 2003. [6]

Dentro de éstos, los láseres para enlaces a 10 Gbps, para las redes 10-Gbit Ethernet, son los que esperan un mayor crecimiento. El precio medio del láser de comunicaciones se va reduciendo, lo que permite una incorporación más fácil de la tecnología a la sociedad, aunque se espera que estos precios se establezcan para los próximos años. En la actualidad, el precio de los VCSELs (*Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*, láseres de cavidad vertical de emisión por la superficie) de GaAs usados en las LAN (*Local Area Network*, Red de área Local) es muy reducido. El problema es que al trabajar a 850 nm solamente pueden transmitir datos a una velocidad de 10 Gbps hasta una longitud máxima de 50 metros. [7] Por ello, es necesario disponer de una tecnología más barata, como por ejemplo una basada en el GaAs, que pueda emitir a mayores longitudes de onda, donde la dispersión y la atenuación son menores, y así poder aumentar las dimensiones y la velocidad de las redes.

Las razones anteriormente expuestas motivan la realización de investigación y desarrollo en el área de los materiales optoelectrónicos con aplicación a láseres de semiconductor, basados en una tecnología conocida, como es la del GaAs, para contribuir a mejorar los dispositivos actuales.

1.2 Los materiales actuales de los láseres de semiconductor: (In,Ga)(As,P)

Los materiales que en la actualidad cubren el rango de las 1,3 a 1,55 μm son los basados en InP, InGaAsP o AlGaInAs, crecidos sobre sustratos de InP. [7,8] Son estructuras con reflectores Bragg o DFBs (*Distributed Feedback Lasers*, láseres de realimentación distribuida), usados en los enlaces de comunicaciones de largo alcance (*long haul*) por fibra óptica. El precio elevado de estos láseres los hace prohibitivos para su implantación en redes MAN (*Metropolitan Area Network*, Red de área metropolitana) y LAN, donde se requiere un menor coste para los emisores láser, debido a que se utilizan muchos más para redes más pequeñas. La tecnología VCSEL basada en fosfuros no es adecuada debido a que los materiales disponibles para crecer sin desajuste de red sobre este tipo de sustratos no presentan unas discontinuidades del índice de refracción elevadas, por lo que los reflectores en los VCSEL son de baja calidad. Esto hace que el rendimiento de la producción de VCSELs de fosfuro sea muy bajo en la industria. [7] Otra desventaja de los actuales láseres basados en InP es que tienen una mala respuesta a las variaciones de temperatura, esto es, sus prestaciones son muy dependientes de la misma, lo que se traduce en un bajo parámetro T_0 (60-80 K) comparado, por ejemplo, con láseres de InGaAs sobre GaAs, que presentan un T_0 mayor que 150 K. [8] Por ello, para ser usados en las aplicaciones prácticas, se necesita enfriarlos por métodos termoeléctricos, para su correcto funcionamiento, lo que los encarece todavía más. Esta dependencia con la temperatura de su funcionamiento es debida a un débil confinamiento de los electrones en la banda de conducción. [8] Así, se observa la necesidad de desarrollar nuevos materiales capaces de mejorar las prestaciones de los actuales basados en fosfuros, para el desarrollo de láseres para comunicaciones.

1.3 InGaAsN como sustituto del (Al,Ga,In)(As,P)

En 1996, el grupo de Kondow presentó la primera publicación sobre InGaAsN. [8] Este material representa una seria alternativa al sistema InGaAsP/InP, debido a sus peculiares características: Kondow *et al.* [8,9] comprobaron que al añadir pequeñas cantidades de nitrógeno al sistema (In,Ga)As, al contrario de lo que en principio pudiera esperarse, se reducía el *gap* del semiconductor. Esto hace que sea posible la realización de dispositivos basados en GaAs funcionando a las longitudes de onda de interés para la telecomunicación en segunda y tercera ventanas. La reducción del *gap* con la adición del pequeño átomo de nitrógeno es explicada mediante la interacción de un nivel que introduce el átomo de nitrógeno con las bandas del material que lo aloja, en este caso, (In,Ga)As, y que es descrita mediante el modelo BAC (*Band Anti-Crossing*) de una manera muy precisa. [10] Esta teoría describe, cómo la incorporación de N a las capas de InGaAs produce un desdoblamiento de la banda de conducción, creando dos niveles, uno a una energía mayor que el inicial de InGaAs, y otro a menor energía, que es el que constituye el nuevo *bandgap*, provocando así la reducción de la energía de transición. Al tratarse de un material cuaternario, las distintas combinaciones de sus elementos dan lugar a una gran libertad para la variación de su *gap* y su parámetro de red. En el caso de la optoelectrónica, nos interesan materiales que puedan ser crecidos sobre sustratos con poco o ningún desajuste de red. Un candidato inmejorable como sustrato para el crecimiento de nitruros diluidos es el GaAs, debido a su gran implantación en la industria actual (se pueden encontrar dispositivos basados en GaAs en cada teléfono celular hoy en día, por ejemplo) y su desarrollada tecnología para componentes optoelectrónicos, presentes en muchas de las redes de telecomunicación actuales como emisores, receptores, láseres de bombeo, etc. El desajuste de red del InGaAsN sobre GaAs puede ser controlado mediante su composición, pudiéndose crecer incluso sin ningún desajuste teórico (*lattice-matched*). Otra de las ventajas que presenta el sistema GaAs/InGaAsN es la posibilidad de utilizar el material AlAs para realizar cavidades ópticas de muy alta calidad. El AlAs puede ser

crecido con un desajuste de red despreciable sobre GaAs. El contraste de índices de refracción del sistema (Al,Ga)As/GaAs hace que sea posible el crecimiento de reflectores de Bragg (DBRs, *Distributed Bragg Reflectors*) y espejos de mucha calidad y con un tamaño razonable, que favorecen la tecnología de las estructuras VCSEL, haciéndola más reproducible que para el sistema basado en InGaAsP/InP.

Otra gran ventaja reside en que la unión de los materiales InGaAsN y GaAs presenta una gran discontinuidad en la banda de conducción entre el pozo y las barreras, lo que permite un gran confinamiento de los portadores. Este confinamiento hace que la estabilidad con la temperatura de las prestaciones de los láseres basados en este sistema de materiales sea mucho mayor que las basadas en InGaAsP,[7][8] haciéndolos mucho más ventajosos para su uso en comunicaciones, ópticas. Hasta aquí se han presentado simplemente las características más positivas del material InGaAsN. Sin embargo, existen dos principales dificultades para su crecimiento y aplicación a dispositivos, que se describen a continuación. El material InGaAsN tiende a descomponerse espinodalmente [16-19] durante su crecimiento. Además, la temperatura de crecimiento del InGaAsN tiene que ser muy baja para evitar la transición del modo de crecimiento 2D o Frank-van der Merwe al modo de crecimiento Stranski-Krastanov o tridimensional, 3D. Si esta última situación ocurre, se producen estructuras similares a puntos cuánticos u ondulaciones de la intercara superior del pozo cuántico, como corroboran observaciones por microscopía de transmisión de dichos pozos [20,21][24-26], que afectan a las características de los dispositivos. [22,23] Una situación intermedia entre el completo crecimiento bidimensional y el tridimensional es la aparición de pozos bidimensionales, pero con una modulación de composición lateral, con un periodo entre 10 y 50 nm. [24][27,28]. Otra de las características descritas con frecuencia en la literatura, es la reducción en las propiedades ópticas del material al añadirle N a las capas de GaAs o InGaAs. [29-33] éste es uno de los principales inconvenientes a la hora de aplicar el material para longitudes de onda largas. Esta degradación se explica en la literatura por la baja temperatura empleada para la incorporación de contenidos de N suficientes, y la creación de vacantes de Ga, de intersticiales de N y daños creados por la presencia de iones en el plasma [34-36]. Pero al aplicar un recocido térmico al material InGaAsN, muchos de estos defectos no radiativos son eliminados, y la calidad de la luminiscencia se ve fuertemente incrementada (se incrementa la intensidad de emisión y se estrecha el espectro), aunque las causas de la eliminación de estos defectos no radiativos no esté todavía clara en la literatura. [32][37-42]. Se verá más adelante en esta tesis los efectos que este necesario recocido tiene sobre las propiedades ópticas de los pozos de InGaAsN.

1.4 Una nueva orientación: (111)B frente a (100)

En la literatura, hasta el comienzo de esta tesis, los trabajos publicados sobre el sistema de materiales (In,Ga)AsN, o nitruros diluidos (*dilute nitrides*) como se les conoce habitualmente, están crecidos sobre el sustrato estándar GaAs (100). [8][29][42] En este trabajo de tesis se aborda el crecimiento de dichos nitruros diluidos, además, sobre la superficie GaAs (111)B. Esta motivación es debida a las interesantes propiedades que pueden presentar las heteroestructuras crecidas sobre este tipo de orientación superficial. Una de ellas, es la existencia de un campo piezoeléctrico en las heteroestructuras tensionadas crecidas sobre esta orientación. [43] Estas propiedades han sido estudiadas extensivamente en la literatura para el sistema InGaAs/GaAs (111)B y excelentes descripciones del mismo pueden encontrarse en [43-47]. Con este sistema de materiales se ha conseguido emisión láser a 1.1 μm [48-52]. Además, este campo piezoeléctrico se ha utilizado para el diseño y la realización con éxito de dispositivos no lineales y moduladores ópticos integrados [53-57], basados en el sistema InGaAs/GaAs. Otro de los intereses que motivaron en un principio el estudio de las propiedades de los nitruros diluidos crecidos sobre este tipo de orientación son las propiedades del espesor crítico del material InGaAs sobre GaAs (111)B. Diversos trabajos muestran como teóricamente el espesor crítico sobre este tipo de orientación sería mayor [58][59] que sobre

GaAs (100). Además, una de las propiedades interesantes que presenta la superficie (111)B es la dificultad del crecimiento 3D o Stranski-Krastanov sobre este tipo de orientación. Existe controversia en la literatura, ya que algunos autores no encontraron crecimiento 3D en la misma [62-64], mientras que también existen publicaciones sobre crecimiento de puntos cuánticos sobre GaAs (111)B [60][65-69]. En alguno de ellos se discute que los puntos se forman por un mecanismo diferente al de la relajación de la deformación, como ocurre en GaAs (100). [69] Este hecho puede ser una propiedad interesante para el crecimiento de nitruros diluidos, ya que podría reducir la zona de crecimiento 3D de éstos, descrito en la sección anterior, al crecerlos sobre las superficies GaAs (111)B, y permitir el crecimiento de pozos cuánticos con mayor contenido en In, para conseguir longitudes de onda mayores, sin crecimiento tridimensional, como ocurre en el sistema InGaAs/GaAs (111)B [62] y conseguir reducir las ondulaciones y la transición al crecimiento 3D observado en el sistema InGaAsN/GaAs (100).

1.5 Objetivos de la tesis:

Los objetivos de esta tesis doctoral se pueden resumir en tres grandes líneas, el crecimiento del material InGaAsN por epitaxia de haces moleculares (MBE) sobre sustratos de GaAs (111)B y (100), la caracterización y optimización del plasma de radiofrecuencia utilizado para el crecimiento de nitruros diluidos y la aplicación de este material a dispositivos optoelectrónicos de interés en telecomunicación. Concretamente se centran en los siguientes puntos:

1. Explorar los parámetros de crecimiento de InGaAsN por MBE, sobre sustratos de GaAs (100) y sustratos desorientados GaAs (111)B. Se analizará la influencia de los parámetros de crecimiento usuales sobre la calidad óptica de los pozos cuánticos de InGaAsN, a saber, el flujo de arsénico, la velocidad de crecimiento, y la temperatura del sustrato, entre otros.
2. Caracterización del plasma de nitrógeno por radiofrecuencia. Se analizarán las condiciones necesarias para el crecimiento de nitruros diluidos de alta calidad, en términos de flujo y potencia de radiofrecuencia aplicada. Además, se pretende caracterizar las especies del plasma que pudieran influir en la calidad de los pozos cuánticos de InGaAsN crecidos, como los iones presentes durante el crecimiento. Se propondrán métodos para caracterizar y controlar la cantidad de los iones en el plasma, y se estudiarán los efectos que los mismos producen en la calidad estructural y óptica de los pozos cuánticos de InGaAsN.
3. Estudio de los efectos que el recocido térmico rápido (RTA) tiene sobre las características de los pozos cuánticos de InGaAsN sobre GaAs (111)B: Efecto sobre la intensidad de fotoluminiscencia y sobre el *gap* del semiconductor para optimizar emisión en dispositivos.
4. Aplicación del material crecido y procesado a la demostración de dispositivos optoelectrónicos basados en InGaAsN/GaAs, desarrollando dispositivos de interés para la telecomunicación: Diodos p-i-n y láser.

1.6 Desarrollo de la Tesis

El desarrollo de los objetivos de la tesis consistió en la superación de tres hitos tecnológicos, fundamentalmente, a saber:

1. Diseño y puesta a punto de un equipo MBE para la fabricación de estos materiales: Se realizó el estudio y diseño de la implantación de una línea de nitrógeno ultrapuro para alimentar un sistema comercial MBE Riber32 para aportar nitrógeno a los semiconductores fabricados. Además, se estableció el protocolo de fabricación para el

- crecimiento de los nitruros diluidos de alta calidad.
2. Optimización del material para la consecución de capas de alta calidad: En tres fases. En una primera, se optimizaron los parámetros usuales de crecimiento de un material semiconductor por MBE, mediante la realimentación de resultados provenientes de la caracterización óptica y estructural por medios avanzados. Asimismo se identificó una fuente de deterioro intrínseca a la utilización de fuentes de plasma de nitrógeno y se propuso y se aplicó un sistema para evitar estos efectos perniciosos, utilizando un sistema de deflexión magnética para la minimización del daño iónico, que además permite la caracterización *in-situ* del plasma en cualquier equipo comercial. Una última fase consistió en la optimización a posteriori del material fabricado, mediante ciclos térmicos, para maximizar la emisión óptica de los dispositivos.
 3. El último hito consistió en el diseño, procesado y caracterización de dispositivos optoelectrónicos para su aplicación en redes de telecomunicación. Se desarrollaron los primeros dispositivos de diodo p-i-n publicados en la literatura y el primer diodo láser basado en InGaAsN/GaAs (111)B del mundo, funcionando a temperatura ambiente sin necesidad de enfriadores termoeléctricos.

1.7 Conclusiones

El trabajo de tesis presentado resume el proceso completo para la fabricación de láseres de semiconductor para comunicaciones ópticas basados en nitruros diluidos, desde el diseño del aporte de nitrógeno para un sistema MBE comercial, pasando por la optimización completa del material InGaAsN, hasta el posterior procesado y caracterización de los mismos, en orientaciones (100) y (111)B. El autor ha demostrado que esta última orientación es al menos tan buena como la estándar (100) (en términos de corriente umbral de los primeros láseres fabricados), con la ventaja de poseer propiedades físicas interesantes para el desarrollo de dispositivos ópticos no lineales.

Desde el punto de vista físico además, se realiza la aportación del descubrimiento y observación de un nuevo tipo de reconstrucción superficial de los átomos de Ga y As sobre la orientación (111)B, una (3x3) superpuesta al resto de reconstrucciones usualmente encontradas, debida a la presencia de nitrógeno en la cámara de crecimiento.

Se han mostrado los parámetros de crecimiento óptimos para el material InGaAsN sobre GaAs (111)B por primera vez. Además se ha optimizado la fabricación de GaAs sobre GaAs (111)B para una velocidad de 1,0 $\mu\text{m}/\text{h}$, multiplicando por 2,5 veces la anterior velocidad óptima, permitiendo una fabricación de dispositivos más rápida y por tanto más económica.

Se estudió y se optimizó el crecimiento sobre 3 tipos de desorientaciones cristalinas de los planos (111)B, obteniéndose como resultado que el tipo de enlace de las especies en los escalones atómicos determina en gran medida la fabricación del material InGaAsN.

Con respecto a la cuestión de la incorporación del nitrógeno, se han mostrado en esta tesis emisión hasta longitudes de onda desde 1,1 μm hasta más de 1,5 μm , cubriendo la segunda y tercera ventanas de comunicaciones ópticas, y superando en mucho a las longitudes de onda encontradas en el resto de publicaciones sobre el mismo sustrato, aparecidas a lo largo de la tesis.

Se han realizado varias contribuciones al campo de la fabricación por MBE asistido por plasma de semiconductores, como es el caso de los nitruros diluidos, entre otros. En este campo se ha presentado una técnica *in-situ* de caracterización del plasma, que consiste en la utilización de las sondas de vacío Bayard-Alpert (encontradas en todos los sistemas comerciales) como sondas de Langmuir modificadas, con las que es posible obtener una caracterización del plasma de manera sencilla y muy precisa. Además, se ha propuesto la aplicación de campos magnéticos externos, tales que deflecten las partículas cargadas dañinas del plasma de nitrógeno. Se han estudiado los efectos de la densidad de iones en las capas del material InGaAsN sobre GaAs (111)B y GaAs (100). Los

resultados para ambas orientaciones son similares: se encontró que las muestras crecidas con una densidad menor de iones (utilizando la técnica propuesta) presentan mucho mejores características ópticas y estructurales, como lo demuestran experimentos combinados de TEM, AFM, fotoluminiscencia y catodoluminiscencia.

Se han estudiado los efectos del RTA en los pozos cuánticos de InGaAsN/GaAs (111)B, encontrándose que existe un rango de temperaturas donde la luminiscencia de éstos se maximiza. Tras el recocido térmico se observa también un desplazamiento hacia el azul de una magnitud similar al encontrado previamente en InGaAsN/GaAs (100), y una disminución de la anchura del espectro de emisión, lo que implica una mejora notable en la calidad óptica de los pozos.

Esta tesis ha dado como resultado además la fabricación de los primeros dispositivos basados en InGaAsN/GaAs (111)B publicados en la literatura: diodos con estructura p-i-n, sobre los que se han realizado medidas de absorción y de electroluminiscencia con buenos resultados, y el primer láser de emisión de borde de InGaAsN crecido sobre GaAs (111)B, funcionando a temperatura ambiente en régimen pulsado, con densidades de corriente umbral comparables similares a los primeros láseres sobre GaAs (100).

1.8 Referencias

- [1] G. E. Moore, *Electronics*, 38 (8), 1965.
 [2] C. E. Shannon, *The Bell System Technical Journal*, 27, 379, 623, 1948.
 [3] J. Bowers, ECE228A Lectures, <http://www.ece.ucsb.edu/courses/ECE228/> (2005).
 [4] G. P. Agrawal, *Fiber Optic Communication Systems*, Third Edition, Wiley Series, 2002.
 [5] <http://www.fiber-optics.info/fiber-history.htm>, 2005.
 [6] R. Steele, *Laser Focus World 2005 Annual Review, Part II*. <http://lfw.pennnet.com> (2005).
 [7] J.S. Harris Jr., *J. Cryst. Growth* 78, 3, 2005.
 [8] M. Kondow, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, Part 1 35, 1273 (1996).
 [9] J. Neugebauer, C.G. Van der Walle, *Phys. Rev. B* 51, 10568 (1995).
 [10] W. Shan, et al., *Phys. Rev. Lett.* 82, 1221 (1999)
 [11] J.S. Harris Jr., <http://www-ee.stanford.edu/harris/AgilentSeminar.pdf> (2005).
 [12] G. Bisognin, et al., *J. Appl. Phys.* 95, 48, (2004).
 [13] W. Li, M. Pessa, J. Likonen, *Appl. Phys. Lett.* 78, 2864 (2001).
 [14] S. G. Spruytte, et al., *J. Appl. Phys.* 89, 4401 (2001).
 [15] I. Vurgaftman, et al., *J. Appl. Phys.* 89, 5815 (2001).
 [16] R. Asomoza, et al., *Appl. Phys. Lett.* 81, 1785 (2002).
 [17] Borg, et al., *The Physical Chemistry of Solids*, Ac. Press Inc. (1992).
 [18] J. W. Cahn, *Acta Metallurgica*, 10, 179 (1962).
 [19] J. W. Cahn, *Acta Metallurgica*, 9, 795 (1961).
 [20] H. P. Xin, et al., *Appl. Phys. Lett.* 74, 2337 (1999).
 [21] P.R. Chalker, et al., *J. Cryst. Growth* 233, 1 (2001).
 [22] J.-M. Ulloa, et al., *IEE Proc Optoelectronics*, 151 (5), 421 (2004).
 [23] J.M. Ulloa, et al., *Appl. Phys. Lett.* 85, 40 (2004).
 [24] J.-M. Chauveau et al., *Appl. Phys. Lett.* 82 3451 (2003).
 [25] J.-M. Chauveau, et al., *J. Cryst. Growth* 251, 383 (2003).
 [26] A. Trampert, et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* 22, 2195 (2004).
 [27] V. Grillo, et al., *J. Appl. Phys.* 90, 3792 (2001).
 [28] M. Albrecht, et al., *Appl. Phys. Lett.* 81, 2719 (2002).
 [29] I. A. Buyanova, et al. *MRS Int. J. Nitride Semicond. Res.* 6, 2(2001).
 [30] M. Weyers, M. Sato, *Appl. Phys. Lett.* 62, 1396-1398 (1993).
 [31] M. Weyers, M. Sato, H. Ando, *Jpn. J. Appl. Phys.* 31, L853 (1992).
 [32] S. Francoeur, et al., *Appl. Phys. Lett.* 72, 1857 (1998).
 [33] I. A. Buyanova, et al., *Appl. Phys. Lett.* 75, 501 (1999).
 [34] W. Li, et al., *Appl. Phys. Lett.* 79, 1094 (2001).
 [35] S. G. Spruytte, et al., *J. Cryst. Growth* 227-228, 506 (2001).
 [36] Z. Pan, et al., *Appl. Phys. Lett.* 77, 1280 (2000).
 [37] I. A. Buyanova, et al., *Appl. Phys. Lett.* 77, 2325 (2000).
 [38] E. V. K. Rao, et al., *Appl. Phys. Lett.* 72, 1409 (1998).
 [39] H. P. Xin, C. W. Tu, *Appl. Phys. Lett.* 75, 1416 (1999).
 [40] Z. Pan, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, 1012 (1999).
 [41] L. H. Li, et al., *J. Appl. Phys.* 87, 245 (2000).
 [42] T. Kitatani, et al., *J. Cryst. Growth* 209, 345 (2000).
 [43] D.L. Smith, *Solid. State. Commun.* 57, 919 (1986).
 [44] J.L. Sánchez-Rojas, 'Contribución a la caracterización y aplicaciones de heteroestructuras piezoeléctricas de InGaAs', Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (1995).
 [45] J.M. Ulloa, 'Diseño, fabricación y caracterización de diodos láser basados en pozos cuánticos de InGaAs(N)/GaAs', Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (2005).
 [46] J. Hernando, 'Crecimiento por MBE, fabricación y caracterización de detectores de infrarrojos de pozo cuántico de InGaAs/GaAs', Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, (2002).
 [47] J.J. Sánchez, 'Crecimiento por MBE, fabricación y caracterización de láseres de AlGaAs/GaAs/InGaAs/GaAs (111)B para ...', Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid (2000).
 [48] I.W. Tao, W.I. Wang, *Electron. Lett.* 28, 705 (1992).
 [49] A. Ishihara, H. Watanabe, *Jpn. J. Appl. Phys.* 33, 1361 (1994).
 [50] T. Takeuchi, et al., *J. Cryst. Growth* 150, 1338 (1995).
 [51] T. Fleischmann, et al., *J. Appl. Phys.* 89, 4689 (2001).
 [52] L.A. Coldren, S.W. Corzine, "Diode lasers and photonic integrated circuits", Ed. Wiley-Interscience (1995).
 [53] K.W. Goosen, et al., *Appl. Phys. Lett.* 56, 715 (1990).
 [54] E.A. Khoo, et al., *IEE Proc.-Optoelectron.* 145, 62 (1999).
 [55] E.A. Khoo, et al., *Electron. Lett.* 35, 150 (1999).
 [56] V. Ortiz, N.T. Pelekanos, *Appl. Phys. Lett.* 77, 788 (2000).
 [57] T. Fleischmann, J.M.Ulloa, M.Moran, G.J.Rees, J.Woodhead and M.Hopkinson, *Microelectronics Journal* 33, 547 (2002).
 [58] T. Anan, K. Nishi, S. Sugou, *Appl. Phys. Lett.* 60, 3159 (1992).
 [59] H.G. Colson, and D.J. Dunstan, *J. Appl. Phys.* 81, 2898 (1997).
 [60] F.-Y. Tsai and C. P. Lee, *J. Appl. Phys.* 84, 2624 (1997).
 [61] Saroja et al., *J. Appl. Phys.* 82, 4870 (1997).
 [62] M. Gutiérrez, et al., *Appl. Phys. Lett.* 80, 1541, (2002).
 [63] H. Yamaguchi, et al., *Appl. Phys. Lett.* 69, 776 (1996).
 [64] M. Henini, et al., *Microelectron. J.* 28, 933 (1997).
 [65] S. Sanguinetti, M. Gurioli and M. Henini, *Microel. J.* 33, 583 (2002).
 [66] P. P. González-Borrero, et al., *Brazilian J. of Physics*, 27, 65, (1997).
 [67] W. Jiang, et al., *J. Vac. Sci. Technol. B* 19, 197, (2001).
 [68] S.L. Tyan, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 39, 3286 (2000).
 [69] F.Y. Tsai, C.P. Lee, *Jpn. J. Appl. Phys.* 38, 558 (1999).

2. Originalidad

La originalidad del tema de la tesis queda patente en el hecho de que a la fecha del comienzo del trabajo de investigación (2001-2002) no existía en la literatura científica ningún estudio sobre InGaAsN crecido sobre GaAs (111)B, con ninguna técnica de fabricación, como puede constatarse en las bases de datos de artículos científicos. Éste es además el único material sobre el que se trabaja y se obtienen resultados positivos en la actualidad para sustituir al actual sistema de materiales (Al,Ga,In)(As,P) para la fabricación de emisores para fibra óptica económicos.

La idea original se basa en publicaciones previas que demostraban láseres de semiconductor funcionando por encima de la micra basados en pozos cuánticos de InGaAs/GaAs (111)B, aprovechando de este sustrato sus interesantes propiedades físicas. El reto de aumentar la longitud de onda de emisión se basa en la incorporación de nitrógeno a este material sobre la superficie de alto índice (111) terminada en arsénico, dificultad añadida a la intrínseca del crecimiento sobre este tipo de superficies. Ningún artículo, ninguna referencia estaba disponible para comenzar a trabajar. Todos los indicios podrían indicar que se podría partir de condiciones similares a aquellas que daban buenos resultados para la fabricación del material InGaAs sobre GaAs (111)B. Nada más lejos de la realidad, como se constata en este trabajo: Las condiciones de crecimiento difieren considerablemente, debido al aumento en tres órdenes de magnitud de la presión de haz equivalente de fondo durante el crecimiento, y también a la peculiar interacción entre el nitrógeno y la superficie GaAs (111)B.

El estudio de diferentes desorientaciones de sustrato (tres distintas descritas en la memoria de la tesis, pero fundamentalmente 1° hacia [-211] y 2° hacia [2-1-1]) es además el primero que se presenta en la literatura del material, desde su aparición en 1996. En este caso se estudiaron superficies GaAs (111)B desorientadas, y se descubrió cómo tanto la naturaleza del enlace que forma los escalones atómicos de la desorientación (simple o doble), como la densidad de escalones en la oblea determinan la calidad óptica del material fabricado, debido a la interacción $N_2 \diamond GaAs$ (111)B.

La fabricación de los láseres de semiconductor para comunicaciones ópticas se realiza en la actualidad mediante MOCVD (*Metal-organic Chemical Vapor Deposition*, Deposición química en fase vapor por metal-orgánicos) principalmente. Esta técnica sin embargo adolece de la necesidad de utilizar temperaturas de crecimiento relativamente elevadas para favorecer la disociación de las moléculas metal-orgánicas y que se favorezca la reacción *química* sobre el sustrato. Para la fabricación de InGaAsN, que sufre de descomposición espinodal para esas temperaturas de crecimiento, se hace necesaria otra técnica más versátil que permita disminuir la temperatura de crecimiento aún más, como las técnicas de deposición *física*. Por ello, en la tesis se utilizó el MBE (*Molecular Beam Epitaxy*, Epitaxia por haces moleculares) para el crecimiento de las estructuras cuánticas. Éste es un método de crecimiento realmente versátil y que existe también en producción industrial de semiconductores, para la fabricación de nanoestructuras como pozos, hilos y puntos cuánticos con un control atómico.

Además, el hecho de utilizar una fuente de plasma de nitrógeno, alimentada por una fuente de potencia de radiofrecuencia, hace que las condiciones habituales de crecimiento por epitaxia por haces moleculares de nitruros diluidos se vean considerablemente alteradas comparadas con las de los tradicionales arseniuros. Pero es principalmente la presencia de especies iónicas procedentes del plasma las que ocasiona un daño más significativo, y por tanto, una disminución de la calidad del material fabricado.

En la tesis se ha realizado un fuerte énfasis en comprender, caracterizar y minimizar el daño realizado por estas especies iónicas. El trabajo original de la tesis en este campo se destaca fundamentalmente en tres puntos:

a) Se desarrolló un nuevo procedimiento de crecimiento para nitruros diluidos utilizando una fuente de plasma de radiofrecuencia, para minimizar este daño, mejorando la calidad del material crecido.

b) Se propuso un nuevo método de caracterización del plasma (especies cargadas) basado en la utilización de una sonda de Bayard-Alpert (presente en cada sistema de ultra alto vacío) como sonda de Langmuir modificada, polarizada como un triodo de vacío, para evaluar la calidad del plasma *in-situ*, y en la posición de crecimiento, donde se realiza la deposición física y no dentro de la cavidad del plasma, como otros métodos tradicionales.

c) Aunque en la literatura ya se había mostrado que los iones de nitrógeno afectaban negativamente a la calidad del material sobre GaAs (100), la primera publicación sobre este fenómeno simplemente constataba el hecho. En la tesis, se ha realizado una caracterización exhaustiva por primera vez de los efectos de los iones de nitrógeno en los pozos cuánticos de InGaAsN, tanto sobre GaAs (100) como (111)B, pero fundamentalmente sobre la primera de ellas (orientación estándar de la industria) y se determinó el efecto de estas especies cargadas sobre las propiedades estructurales (mediante microscopía de fuerza atómica (AFM, *Atomic Force Microscopy*), microscopía de barrido de electrones (SEM, *Scanning Electron Microscopy*), microscopía de transmisión de electrones (TEM, *Transmission Electron Microscopy*) y difracción de rayos X; sobre sus propiedades ópticas (fotoluminiscencia y catodoluminiscencia) y sobre la energía de localización de los portadores (fotoluminiscencia con temperatura y catodoluminiscencia). Este resultado es importante y de aplicabilidad para la mejora de los láseres de semiconductor que se fabricaron y se venden desde hace 2 años, basados en InGaAsN (*Infineon Technologies, Alight, y Picolight*).

Durante el proceso de recocido térmico rápido (RTA, *rapid thermal annealing*), es conocido en la literatura que se produce un reordenamiento de los enlaces de los átomos en los pozos cuánticos de InGaAsN, lo que produce un aumento en la emisión óptica y un desplazamiento hacia el azul en la energía de la transición de los pozos. En esta tesis se mostró también la correlación de los iones de nitrógeno presentes durante el crecimiento y este desplazamiento hacia el azul o *blueshift*.

A pesar de ser una técnica muy poderosa de análisis y caracterización, la aplicación de la técnica de catodoluminiscencia para la caracterización de pozos cuánticos de nitruros diluidos no se ha mostrado en la literatura de manera extensa. En la tesis se utilizó para caracterizar tanto la longitud de difusión de los portadores en el material cuaternario, como para conocer las fluctuaciones efectivas a lo largo del plano de crecimiento, así como para la caracterización de las zonas no radiativas.

En lo concerniente a los dispositivos, se han fabricado dos tipos de estructuras de interés para las telecomunicaciones, diodos p-i-n y láseres de semiconductor de emisión de borde. Se realizaron diodos p-i-n, procesados mediante técnicas estándar de fabricación de dispositivos (ataque húmedo, litografía óptica y metalización por evaporación de metales) y encapsulados en TO-5. La realización de estos diodos basados en pozos cuánticos de InGaAsN fueron los primeros descritos en la literatura científica y técnica. Se realizaron medidas tanto de emisión como de absorción en estructuras con un sólo pozo.

Se realizaron diodos láser de pozo cuántico simple, insertadas entre dos zonas de alto contraste de índice de refracción, sobre sustratos GaAs (100) y (111)B. La caracterización de estos últimos demostró por primera vez emisión láser funcionando a temperatura ambiente de una estructura basada en este sistema de materiales. Estos dispositivos se realizaron con diversas anchuras y longitudes de cavidad de emisión de borde, con espejos formados por la exfoliación de los planos atómicos de la red cristalina del semiconductor.

3. Resultados

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de tesis han sido publicados en más de 20 artículos en revistas internacionales y comunicados en más de 30 contribuciones a congresos internacionales. Además, se han expuesto en varios capítulos invitados en libros. El autor además está editando un libro sobre la temática del crecimiento y caracterización de nitruros y nitruros diluidos y sus aplicaciones.

La presente tesis ha tenido una serie de resultados destacados en los siguientes puntos:

- Presenta por primera vez la optimización del material InGaAsN sobre sustratos GaAs (111)B.
- Se ha diseñado un procedimiento para aumentar la calidad óptica y estructural en el crecimiento de nitruros diluidos por epitaxia por haces moleculares.
- Se ha optimizado la emisión de las fuentes de plasma de nitrógeno por radiofrecuencia utilizando campos magnéticos para la deflexión de las especies cargadas que reducen la calidad del material fabricado.
- Muestra el trabajo de tesis los efectos perniciosos de las especies cargadas del plasma de nitrógeno por primera vez, mediante técnicas de caracterización estructural (AFM, TEM, SEM y XRD) y óptica (Catodoluminiscencia y fotoluminiscencia).
- Se han crecido y fabricado los primeros láseres basados en el sistema InGaAsN/GaAs (111)B, funcionando a temperatura ambiente, con una densidad de corriente umbral similar a aquella de los primeros láseres sobre GaAs (100).
- Se han crecido y fabricado los primeros dispositivos p-i-n basados en el cuaternario publicados en la literatura científico-técnica.
- Muestra las longitudes de onda más largas publicadas en la literatura para el sistema de materiales InGaAsN/GaAs (111)B, cubriendo todo el rango entre 1,1 y 1,55 μm , consiguiendo por tanto las mayores concentraciones de nitrógeno en capas de este material sobre este sustrato GaAs (111)B.
- Se ha optimizado la fabricación de GaAs (111)B a 1,0 $\mu\text{m}/\text{h}$, aumentando en más de dos veces la anterior velocidad optimizada para su crecimiento, lo que permite una fabricación más rápida, con la misma calidad, y por tanto más económica.
- Se presenta la optimización ex-situ a posteriori del material fabricado mediante técnicas de recocido rápido RTA, mostrándose los efectos positivos del mismo mejorando la emisión óptica de los pozos cuánticos fabricados.
- La tesis además presenta en forma de anexo una forma novedosa de caracterizar la desorientación de los sustratos de las obleas de semiconductor (independiente del material, GaAs, Si, InP, ...) utilizando varias técnicas matemáticas, y se corrobora el método mediante las medidas proporcionadas por el fabricante.

- Se ideó un método para calibrar la temperatura en los portasustratos de la cámara MBE. Es bien sabido que uno de los principales problemas que presenta la técnica MBE es la medida de la temperatura del sustrato de una manera precisa. Mediante el método presentado en la tesis se puede obtener una medida muy precisa de la diferencia de temperatura entre las diferentes partes del portasustrato, mediante la observación de las transiciones superficiales de los átomos de diferentes trozos de oblea mediante la técnica RHEED.
- Se ha estudiado el efecto de las diferentes desorientaciones de sustrato en las propiedades estructurales y ópticas de los pozos cuánticos de InGaAsN sobre GaAs (111)B, obteniéndose que existe una correlación muy clara entre la naturaleza del enlace libre y la calidad de las capas fabricadas.
- Además, se descubrió una nueva estructura superficial para el GaAs (111)B observada mediante RHEED: Una clara periodicidad (3x3) se observa superpuesta a las reconstrucciones tradicionales de esta superficie. Se descubrió que esta reconstrucción (3x3) es debida a la presencia de gas nitrógeno en la cámara de crecimiento.
- Se mostró la diferencia entre la interacción que existe entre el gas nitrógeno y las diferentes superficies GaAs (100) y (111)B. En la primera, esta interacción es muy débil, mientras que la interacción del gas con la superficie (111)B es mucho más acusada, induciendo en el crecimiento de GaAs sobre esta la aparición de rugosidades, agrupamiento de escalones, y la aparición de patrones o nanohuecos sobre la superficie.
- Se ha estudiado el efecto de la temperatura de crecimiento en las propiedades ópticas de los pozos cuánticos crecidos: Para una menor temperatura existe una mayor incorporación de nitrógeno, lo que desplaza significativamente la longitud de onda de la emisión de los pozos cuánticos. Además, se desarrolló un modelo semiempírico que relaciona esta incorporación de nitrógeno con la temperatura de crecimiento.

4. Aplicabilidad

La aplicabilidad de los resultados mostrados en el trabajo de tesis es muy variada, como se detalla a continuación:

4.1 Comunicaciones ópticas:

- El gap de los materiales fabricados, caracterizados y optimizados en este trabajo de tesis cubren todo el espectro de interés para las comunicaciones por fibra óptica, por lo que son aptos, como se ha demostrado en la tesis, para su utilización en la zona activa de dispositivos emisores (Láseres, LEDs) como receptores de luz. Más concretamente, en emisores láser basados en la tecnología de GaAs, que permite la realización de **VCSEL** a longitudes de onda de 1300 y 1550 nm. Esta tecnología VCSEL es importante debido a sus ventajas: Emite un haz de luz circular much más fácil de acoplar a la fibra, bajas densidades de corriente umbral, que se traduce en una menor interferencia electromagnética (EMI), crucial a altas velocidades de transmisión, menor consumo de potencia, comparado con láseres DFB, y más fácil y barato de fabricar que éstos últimos. En la actualidad, las empresas siguen adoptando y apostando por los nitruros diluidos. Por ejemplo, Picolight, una de las empresas que comercializa productos basados en nitruros diluidos como el InGaAsN, anunció recientemente (Diciembre del 2006) VCSELs funcionando en un diseño SFP+ del estándar IEEE 802.3aq para interfaces ópticos serie (10GBASE-LRM) en una **10G Ethernet**.
- El hecho de haber realizado la investigación sobre sustratos GaAs **(111)B**, distintos de los estándar GaAs (100), abre la posibilidad de la realización de dispositivos que aprovechan las propiedades físicas del mismo: el hecho de fabricar capas de material tensionadas sobre esta orientación hace que aparezca un campo piezoeléctrico en los pozos cuánticos, lo que posibilita la fabricación de **dispositivos con efectos no lineales y moduladores ópticos integrados**.

4.2 Otras aplicaciones del semiconductor optimizado:

- El material estudiado y optimizado en el trabajo de tesis también se utiliza en la actualidad para desarrollar **células solares**, debido a la sintonizabilidad del gap que presenta y su posibilidad de fabricación sobre sustratos GaAs sin desajuste de red. Existe una intensa línea de investigación basada en este material para células solares.
- Otra aplicación directa, que hizo que el trabajo de tesis presentado fuera reseñado en Boletín de Observación Tecnológica en Defensa (Nº 10), es la utilización de este material optimizado, InGaAsN, para la realización de dispositivos funcionando a longitudes de onda seguras para el ojo ($> 1.45 \mu\text{m}$) debido a sus mayores prestaciones frente a los sistemas actuales de materiales (Al,Ga,In)(As,P) para la emisión láser. Con el material InGaAsN se pueden desarrollar **telémetros, sistemas LADAR** (*Laser Detection and Ranging*) aplicables en Defensa y Seguridad.

4.3 Nanotecnología:

- El estudio y la comprensión de la interacción gas-material así como su incorporación durante el crecimiento presentada en la tesis abre nuevas ventanas de exploración en la nanoingeniería:

- a) La observación de los fenómenos de interacción entre el gas y las superficies (111)B así como la introducción de defectos puntuales en la red cristalina del semiconductor hace que se generen **nanopatrones** en la superficie **auto-ordenados** durante el crecimiento así como tras un procesado de recocido térmico RTA. Este proceso es importante ya que permite ahorrarse un proceso litográfico para la definición de patrones sobre la superficie, y que puede realizarse *in-situ* en condiciones de alto vacío y extremada pureza. Estas observaciones han dado lugar a diversas publicaciones y ponencias en congresos internacionales reseñando estos efectos descubiertos durante el desarrollo de la tesis. La aplicación de estos patrones auto-ordenados puede ser múltiple: desde el aumento por porosidad de superficies de sensores semiconductores, hasta la fabricación de puntos cuánticos enterrados.
- b) La aplicación de los métodos de optimización del material presentados para su aplicación al crecimiento de estructuras nanométricas: **puntos cuánticos** basados en InAsN, un nuevo material con posible aplicación en detectores de infrarrojo así como emisores en las longitudes de onda de interés para la telecomunicación. Este hecho ha sido publicado y presentado en diversos congresos y publicaciones internacionales.

4.4 Mejoras en la fabricación de semiconductores:

- Se puede utilizar el método propuesto de caracterización de plasma *in-situ* en cualquier equipo de ultra-alto vacío que disponga de una sonda de Bayard-Alpert (la práctica totalidad de ellos poseen un medidor de este tipo), por lo que es una aportación que puede ser de aplicación en todos los sistemas de crecimiento epitaxial asistido por plasma.
- El método de deflexión de iones emitidos por la fuente de plasma es aplicable a la mejora de cualquier sistema de crecimiento por epitaxia de haces moleculares asistido por plasma, tanto para el crecimiento de nitruros diluidos como para el de nitruros puros (GaN, AlN, InN y sus combinaciones para formar ternarios), grupo de materiales con múltiples aplicaciones (LEDs para iluminación, diodos láser y LED visible y ultravioleta para iluminación y almacenamiento denso de datos (HD-DVD, BluRay), transistores de alta movilidad HEMT, etc.) dadas sus buenas características para funcionar a altas temperaturas, altas frecuencias y altas potencias.

ANEXOS

ANEXO 1**Participación en Proyectos de I+D financiados en Convocatorias públicas.**

Título del proyecto: **GaNAs-based Semiconductor Heterostructures for 1.5mm Opto-electronics (GINA)**

Entidad financiadora: Unión Europea , IST-2000-26478

Entidades participantes: *CRHEA-CNRS, Valbonne, Francia y Paul Drude Institut, Berlín, Alemania.*

Duración, desde: 2001 hasta: 2004

Cuantía de la subvención: 300.000 €

Investigador responsable: E. Calleja

Número de investigadores participantes: 12

Título del proyecto: Crecimiento **Epitaxia por Haces Moleculares (MBE) de Aleaciones de GaInAsN: Aplicación a Láseres emitiendo en 1.3 a 1.5 micras**

Entidad financiadora: CICYT-TIC2001-3849

Entidades participantes: ISOM

Duración, desde: 2001

hasta: 2004

Cuantía de la subvención: 134.000 €

Investigador responsable: E. Calleja

Número de investigadores participantes: 5

Título del proyecto: **Key Organisation for Research on Integrated Circuits in GaN Technology (KORRIGAN)**

Entidad financiadora: Europa contract nº 04/102.052/032, 2005-2009

Entidades participantes: Thales, IEMN, Picogiga, IRCOM, Selex, elettronica, CRN IFN, INFM-NNL Leche, U. Of Roma, Politécnico di Torino, U. De Padova, UMS GMBH, Thales Naval Nederland, TNO-FEL, Ericsson Microwave Systems, Chalmers Univ., Linköping Univ., Norstel, Saab Tech., INDRA, CIDA, ISOM, Selex UK, B AE, QinetiQ.

Duración, desde: 2005

hasta: 2009

Investigador responsable: E. Muñoz

Número de investigadores participantes: >100

Título del proyecto: **"Heteroestructuras semiconductoras basadas en GaInNAs para ..."**

Entidad financiadora Min. Ciencia y Tecnología TIC-2001-4950

Duración, desde: 2002

hasta: 2004

Investigador responsable: E. Calleja

Título del proyecto: **Nanoestructuras de semiconductores como componentes para la información Cuántica**

Entidad financiadora Min. Ciencia y Tecnología NAN2004-09109-C04-02

Entidades participantes: ISOM, UAM, CNM-CSIC

Duración, desde: 2002 hasta: 2004 Cuantía de la subvención: -

Investigador responsable: E. Calleja

Número de investigadores participantes: >30

Título del proyecto: **"Desarrollo de láseres horizontales y de cavidad vertical para ..."**

Entidad financiadora Min. Ciencia y Tecnología TEC2005-03694

Entidades participantes: ISOM-UPM

Duración, desde: 2005 hasta: 2008 Cuantía de la subvención: -

Investigador responsable: A. Hierro

Número de investigadores participantes: -

ANEXO 2

Publicaciones o Documentos Científico-Técnicos

(CLAVE: L = libro completo, CL = capítulo de libro, A = artículo, R = "review", E = editor,
S = Documento Científico-Técnico restringido.)

Artículos en revistas internacionales:

El trabajo realizado por el candidato ha sido publicado en diversas revistas internacionales revisadas por pares, y de importante índice de impacto, tales como *Applied Physics Letters*, *Physical Review B*, *Semiconductor Science and Technology*, *Journal of Crystal Growth*, *Photonics Technology Letters*, *IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics*, *Physica Status Solidi (c)*, entre otras. Los artículos están divididos por áreas temáticas.

QWIPs: Fotodetectores basados en pozo cuántico (Quantum Well Infrared Photodetectors).

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, E. Luna, E. Muñoz.

Título: Noise Measurements of Modulation doped AlGaAs/AIAs/GaAs Quantum Well Infrared Photodetectors"

Ref. X revista: enviado a IEEE Proc on Instrumentation and Measurements. (enviado)
Libro

Clave: A Volumen: Páginas, inicial: final: Fecha:

Lugar de publicación: EEUU

Autores (p.o. de firma): E. Luna, A. Guzmán, J.L. Sánchez-Rojas, **J. Miguel-Sánchez**, E. Muñoz

Título: GaAs-Based Modulation-doped quantum well infrared photodetectors for photovoltaic operation in 3-5 μ m

Ref. X revista: IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics Libro

Clave: A Volumen: 8 (5) Páginas, inicial: 992 final: 997 Fecha: 2002

Lugar de publicación: EEUU

Autores (p.o. de firma): A. Guzmán, E. Luna, **J. Miguel-Sánchez**, E. Calleja, E. Muñoz

Título: Study of GaAsN/AIAs/AlGaAs double quantum wells grown by Molecular Beam Epitaxy as an alternative to infrared absorption below 4 μ m

Ref. X revista: *Infrared Physics & Technology* Libro

Clave: A Volumen: 44 (5-6) Páginas, inicial: 377 final: 381 Fecha: 2003

Lugar de publicación: EEUU

Crecimiento epitaxial por haces moleculares (MBE) de nitruros diluidos (Ga,In)(N,As)

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro and E. Muñoz

Título: Influence of substrate misorientation and growth temperature on N incorporation in InGaAsN/GaAs quantum wells grown on (1 1 1)B GaAs

Ref. X revista: Physica E Libro
 Clave: A Volumen: 23(3-4) Páginas, inicial: 356 final: 361 Fecha: 2004
 Lugar de publicación: Holanda

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, M. Hopkinson, M. Gutiérrez, H.Y. Liu, P. Navaretti, A. Guzmán, J. M. Ulloa, A. Hierro

Título: Structural and optical quality of InGaAsN quantum wells grown on misoriented (111)B GaAs substrates by molecular beam epitaxy

Ref. X revista: Journal of Cristal Growth Libro
 Clave: A Volumen: 270 (1-2) Páginas, inicial: 62 final: 68 Fecha: 2004
 Lugar de publicación: Holanda

Autores (p.o. de firma): A. Guzmán, **J. Miguel-Sánchez**, E. Luna and E. Muñoz

Título: InGaAsN and GaAsN based quantum well lasers and detectors" for optical sensing in 1.3 and 1.55 μm

Ref. X revista: Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng Libro
 Clave: A Volumen: 5502 Páginas, inicial: 414 final: 417 Fecha: 2004
 Lugar de publicación: EEUU

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro, E. Muñoz

Título: Effect of nitrogen ions in the properties of InGaAsN-based lasers grown by plasma assisted molecular beam epitaxy,

Ref. X revista: IEE Proc. Optoelectronics Libro
 Clave: A Volumen: 151 (5) Páginas, inicial: 305 final: 308 Fecha: 2004
 Lugar de publicación: Reino Unido

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán and E. Muñoz,

Título: The role of N ions on the optical and morphological properties of InGaAsN quantum wells for 1.3 - 1.5 μm applications

Ref. X revista: Appl. Phys. Letters Libro
 Clave: A Volumen: 85 Páginas, inicial: 1940 final: 1942 Fecha: 2004
 Lugar de publicación: EEUU

Autores (p.o. de firma)s: **J. Miguel-Sánchez**, A.Guzmán, J. M. Ulloa, M. Montes, A. Hierro, E. Muñoz

Título: MBE growth and processing of diluted nitride quantum well lasers on GaAs (111)B

Ref. X revista: Microelectronics Journal Libro:.

Clave: A Volumen: En imprenta (Available Online) Páginas, inicial: final:

Fecha: 2006

Lugar de publicación: Holanda

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J. M. Ulloa, A. Hierro and E. Muñoz

Título: InGaAsN on GaAs (111)B for telecommunication laser application

Ref. X revista: Journal of Crystal Growth Libro

Clave: A Volumen: 278 Páginas, inicial: 234 final: 238 Fecha: 2005

Lugar de publicación: Holanda

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro

Título: Optimization of InGaAsN on GaAs (111)B for semiconductor laser devices

Ref. X revista: Proc. Of CDE2005, IEEE Libro

Clave: A Volumen: Páginas, inicial: 319 final: 322 Fecha: 2005

Lugar de publicación: ieexplore.ieee.org

Caracterización y procesos físicos en dispositivos optoelectrónicos basados en nitruros diluidos (Ga,In)(As,N)

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro and E. Muñoz

Título: Effect of nitrogen on the optical properties of InGaAsN p-i-n structures grown on misoriented (111)B GaAs substrates

Ref. X revista: Appl. Phys. Letters Libro

Clave: A Volumen: 84 Páginas, inicial: 2524 final: 2526 Fecha: 2004

Lugar de publicación: EE:UU

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro, M. Montes and E. Muñoz

Título: Room temperature laser emission of InGaAsN/GaAs quantum wells grown on GaAs (111)B

Ref. X revista: Photonics Technology Letters Libro:.

Clave: A Volumen: 17 (11) Páginas, inicial: 2271 final: 2273 Fecha: 2005

Lugar de publicación: EE.UU.

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro, M. Montes and E. Muñoz

Título: Effects of rapid thermal annealing on InGaAsN p-i-n structures grown on misoriented (111)B GaAs

Ref. X revista: SPIE Proceedings Libro:..

Clave: A Volumen: 5840 Páginas, inicial: 766 final: 733 Fecha: 2005

Lugar de publicación: EE.UU.

Autores (p.o. de firma): J.-M. Ulloa, A. Hierro, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzman, A. Trampert, J.-M. Chauveau, E. Tournié, J. L. Sanchez-Rojas, and E. Calleja

Título: Opto-electronic properties of 2D and 3D-grown GaInNAs/GaAs QW light emitting diodes

Ref. X revista: IEE Proc Optoelectronics Libro

Clave: A Volumen: 151 (5) Páginas, inicial: 421 final: 425 Fecha:

Lugar de publicación: Reino Unido

Autores (p.o. de firma): J.M. Ulloa, A. Hierro, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.L. Sanchez-Rojas E. Calleja

Título: Dominant carrier recombination mechanisms in GaInNAs/GaAs quantum well light emitting diodes

Ref. X revista: Appl. Phys. Letters. Libro

Clave: A Volumen: 85 Páginas, inicial: 40 final: 42 Fecha: 2004

Lugar de publicación: EEUU

Autores (p.o. de firma): J.M. Ulloa, A. Hierro, M. Montes, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, B. Damilano, J. Barjon, M. Hugues, J.-Y. Duboz, J. Massies, and A. Trampert.

Título: Influence of carrier localization on lasing characteristics of MBE grown GaInNAs/GaAs QW laser diodes

Ref. X revista: SPIE Proceedings Libro:..

Clave: A Volumen: 5840 Páginas, inicial: 81 final: 90 Fecha: 2005

Lugar de publicación: EE.UU.

Caracterización óptica y estructural de pozos cuánticos de nitruros diluidos (Ga,In)(As,N).

Autores (p.o. de firma): U Jahn, , **J. Miguel Sánchez**, Flissikowski, H T Grahn, R Hey, A Guzmán

Título: Carrier diffusion lengths of GaAs, (In,Ga)As and (In,Ga)(As,N) quantum wells studied by spatially resolved cathodoluminescence

Ref. X revista: Phisica Status Solidi (c). Libro:..

Clave: A Volumen: 3 (3) Páginas, inicial: 627 final: 630 Fecha: 2005

Lugar de publicación: Reino Unido.

Autores (p.o. de firma): J.M. Ulloa, A. Hierro, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.-M. Chauveau, A. Trampert, E. Tournié, and E. Calleja

Título: Correlation between quantum well morphology, carrier localization and the opto-electronic properties of GaInNAs/GaAs light emitting diodes

Ref. X revista: Semicond. Science and Technology Libro:.
Clave: A Volumen: 21. Páginas, inicial: 1047 final: 1052 Fecha: 2006
Lugar de publicación: EE.UU.

Autores (p.o. de firma): U. Jahn, S. Dhar, R. Hey, O. Brandt, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán

Título Impact of localization on the carrier diffusion in GaAs/(Al,Ga)As and (In,Ga)(As,N)/GaAs quantum wells: a comparative study

Ref. X revista: Physical Review B Libro:.
Clave: A Volumen: 73 Páginas, inicial: 125303 final: 125310
Fecha: 2006
Lugar de publicación: EE.UU.

Autores (p.o. de firma): E. Luna, A. Trampert, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, K. H. Ploog,

Título Vertical composition fluctuations in (GaIn)(Nas) quantum wells grown on vicinal (111)B GaAs"

Ref. X revista: J. Phys. Chem. Solids, (accepted) Libro:.
Clave: A Volumen: Páginas, inicial: final: Fecha: 2006
Lugar de publicación: EE.UU.

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, U. Jahn, A. Guzmán, E. Muñoz

Título "Cathodoluminescence of GaInNAs quantum wells on GaAs (111)B"

Ref. X revista: Appl. Phys. Lett. Libro:
Clave: A Volumen: 89 Páginas, inicial: 231901 final: 231903 Fecha: 2006
Lugar de publicación: EE.UU.

Nanopatrones auto-ordenados y puntos cuánticos :

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, U. Jahn, E. Luna, E. Muñoz

Título: Patterning by rapid thermal annealing of GaAs layers grown on diluted nitride QWs

Ref. X revista: Microelectronics Journal Libro:.
Clave: A Volumen: En imprenta (Available Online) Páginas, inicial: final:
Fecha: 2006
Lugar de publicación: Holanda

Autores (p.o. de firma): R. Gargallo, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, U. Jahn, E. Muñoz.

Título: Self-organized GaAs patterns on misoriented GaAs (111)B substrates using dilute nitrides by molecular beam epitaxy

Ref. X revista: Microelectronics Journal Libro:.

Clave: A Volumen: En imprenta (Available Online) Páginas, inicial: final:

Fecha: 2006

Lugar de publicación: Holanda

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, U. Jahn, A. Trampert, J.M. Ulloa, A. Hierro and E. Muñoz

Título: The effects of plasma nitrogen ions on the optical and structural properties of GaInNAs quantum wells.

Ref. X revista: Journal of Applied Physics Libro:.

Clave: A Volumen: (Aceptado) Páginas, inicial: final:

Fecha:

Lugar de publicación: EE.UU.

Libros y capítulos en libros

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel Sánchez**

Título: "Medidas de Detectividad en dispositivos cuánticos de detección de infrarrojo", **Proyecto Fin Carrera**.

Ref. revista : X Libro

Clave: Libro Completo Volumen: Páginas, inicial: final: Fecha: 2001

Editorial (si libro): ETSI Telecomunicación, UPM.

Lugar de publicación: Madrid.

Autores (p.o. de firma): , R. S.Segundo (coord.) , J.M. Montero (coord.) , (alfabético) A. Araujo, R. De Córdoba, J. Ferreiros, A. Guzmán, J. Macías, **J. Miguel-Sánchez**, J.L. Pau

Título: **Introducción a los Sistemas Digitales con el microcontrolador MCF5272**

Ref. revista: X Libro

Clave: Libro Completo Volumen: Páginas, inicial: final: Fecha: 2005

Editorial (si libro): Marcombo ISBN: 84-267-1407-2

Lugar de publicación: Madrid

Autores: **J. Miguel-Sánchez** (Editor) (En preparación)

Título: *Nitrides and dilute nitrides: Growth, Physics and devices.*

(En preparación)

Ref. X revista Libro: Nitrides and dilute nitrides: Growth, characterization and devices

Clave: E Volumen: Páginas, inicial: final: Fecha: 2006

Editorial (si libro): . Research Signpost, ISBN: 81-7895-250-5

Lugar de publicación: India

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, A. Hierro, E. Muñoz, U. Jahn, A. Trampert

Título *Impact of nitrogen ion density on the optical and structural properties of MBE grown GaInNAs/GaAs (100) and (111)B quantum wells.*

Ref. X revista: Libro: Dilute Nitrides: Physics and Applications, Capítulo 15.

Clave: Capítulo Libro Volumen: Páginas, inicial: final: Fecha: 2007 (En imprenta)

Editorial : Research Signpost , ISBN: 81- 7895-249-1

Lugar de publicación: India

Autores (p.o. de firma): , R. S.Segundo (coord.) , J.M. Montero (coord.) , (alfabético) A. Araujo, R. De Córdoba, J. Ferreira, A. Guzmán, J. Macías, **J. Miguel-Sánchez**, J.L. Pau

Título: *Desarrollo de Sistemas Digitales con el Microcontrolador MCF5272*, ISBN: 84-7402-315-7

Ref. revista: X Libro

Clave: L Volumen: Páginas, inicial: final: Fecha: 2005

Editorial (si libro): Fund. Rogelio Segovia, ISBN: 84-7402-315-7

Lugar de publicación: Madrid

Autores (p.o. de firma): **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro and E. Muñoz

Título: *New challenges in the growth of diluted nitrides*

Ref. revista: X Libro: Focus on crystal growth research

Clave: CL Volumen: Páginas, inicial: 111 final: 152 Fecha: 2005

Editorial (si libro): Nova Science Publishers. ISBN: 1-59454-540-5

Lugar de publicación: EE.UU.

Autores: **J. Miguel-Sánchez**

Título: Nitrogen in semiconductors (Accepted)

Ref. Libro: Libro: Nitrides and dilute nitrides: Growth, physics and devices.

Clave: CL Volumen: Páginas, inicial: final: Fecha:

Editorial (si libro): Research Singpost. ISBN: 81-7895-250-5

Lugar de publicación: India

Artículos en preparación:

Son artículos que están a punto de ser enviados a las revistas indicadas, con los experimentos ya concluidos.

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Trampert, A. Guzmán and E. Muñoz

Título: Microstructure of InGaAsN quantum wells grown on (111)B studied by transmission electron microscopy.

Ref. X revista: Applied Physics Letters Libro:.

Clave: A Volumen: (En preparación) Páginas, inicial: final:

Fecha:

Lugar de publicación: EE.UU.

Autores: M.F. Romero, A. Jiménez, **J. Miguel-Sánchez**, A.F. Braña, F. González-Posada, R. Cuerdo, E. Muñoz

Título: N₂ plasma pre-treatment effect on AlGaIn/GaN HEMT performance

Ref. X revista: IEEE Electron Device Letters Libro:.

Clave: A Volumen: (En preparación) Páginas, inicial: final:

Fecha:

Lugar de publicación: EE.UU.

ANEXO 3**Estancias en Centros extranjeros
(estancias continuadas superiores a un mes)**

CLAVE: D = doctorado, P = postdoctoral, I = invitado, C = contratado, O = otras (especificar).

Centro: Universidad de Sheffield, EEE Department, III/V Facility of the EPSRC NC for III-V Technologies

Localidad: Sheffield País Reino Unido Fecha: Junio-Julio 2003 Duración (semanas): 8

Tema: Crecimiento y caracterización óptica y estructural de nitruros diluidos sobre (111)B.

Clave: D

Centro: Paul Drude Institut für Festkörperelektronik

Localidad: Berlín País Alemania Fecha: Julio-Agosto 2004 Duración (semanas): 8

Tema: Caracterización estructural (Microscopía electrónica de transmisión TEM) de nitruros diluidos sobre GaAs (100) y (111)B.

Clave: D

Centro: Paul Drude Institut für Festkörperelektronik

Localidad: Berlín País Alemania Fecha: Julio-Agosto 2005 Duración (semanas): 8
(Aceptado)

Tema: Caracterización óptica y estructural (por Catodoluminiscencia, CL, SEM y TEM) de dispositivos basados en nitruros diluidos sobre GaAs (100) y (111)B.

Clave: D

ANEXO 4

Contribuciones a Congresos

El trabajo de investigación ha dado lugar a alrededor de una treintena de contribuciones a congresos internacionales muy relevantes, de física y crecimiento de semiconductores, de telecomunicación, electrónica, con contribuciones orales, póster e invitadas.

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J. Hernando, A. Hierro, E. Muñoz

Título: Growth of InGaAsN single quantum well p-i-n structures on GaAs (111)B substrates for laser applications

Tipo de participación: Poster

Congreso: 12th Euro-MBE Workshop

Publicación: -

Lugar celebración: Bad-Hofgastein, Austria 2003, 16-19 Febrero

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro, E. Muñoz

Título: Influence of surface misorientation on N incorporation in InGaAsN/GaAs quantum wells grown on (111)B GaAs

Tipo de participación: Poster

Congreso: Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces ESPS-NIS

Publicación: Physica E. (ver papers)

Lugar celebración: Stuttgart, Alemania Fecha: 2003, 13-15 Octubre

Autores: M. Gutiérrez, M. Hopkinson, H. Y. Liu, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, M. Herrera, D. González, R. García.

Título: Comparison between growth mechanisms in dilute nitrides grown on (111)B and (001) GaAs Substrates

Tipo de participación: Poster

Congreso: Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces ESPS-NIS

Publicación: -

Lugar celebración: Stuttgart, Alemania Fecha: 2003, 13-15 Octubre

Autores: J. M. Ulloa, A. Hierro, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzman, M. A. Pinault, E. Tournié, J. L. Sánchez-Rojas, E. Calleja, and E. Muñoz

Título: GaInNAs/GaAs quantum well devices for infrared emission applications

Tipo de participación: Oral

Congreso: 12th European Workshop on Heterostructure Technology, HeTech

Publicación: -

Lugar celebración: Segovia, España

Fecha: 2003, 12-15 Octubre

Autores: J.M. Ulloa, A. Hierro, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, M. Pinault, E. Tourné and E. Calleja

Título: Dominant Recombination Processes in GaInNAs/GaAs QW Light Emitting Diodes

Tipo de participación: Oral

Congreso: Materials Research Society MRS Fall Conference 2003

Publicación: -

Lugar celebración: Boston, EEUU

Fecha: 2003

Autores: A. Guzmán, E. Luna, **J. Miguel-Sánchez**, E. Calleja and E. Muñoz

Título: Study of GaAsN/AlAs/AlGaAs double barrier quantum wells grown by Molecular Beam Epitaxy as an alternative to infrared absorption below 4 μm

Tipo de participación: Oral

Congreso: QWIP 2002 Workshop

Publicación: IEEE Sel. Top. On Quant. Electronics. (ver papers)

Lugar celebración: Turín, Italia

Fecha: 2002, 13-17 Octubre

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J. M. Ulloa, A. Hierro, E. Muñoz

Título: Effect of nitrogen ions in the properties of InGaAsN-based lasers grown by plasma assisted molecular beam epitaxy

Tipo de participación: Poster

Congreso: European Materials Research Society E-MRS.

Publicación: IEE Proc. Optoelectronics (Ver Papers)

Lugar celebración: Estrasburgo, Francia

Fecha: 2004, 24-28 Mayo

Autores: J.-M. Ulloa, A. Hierro, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzman, A. Trampert, J.-M. Chauveau, E. Tournié, J. L. Sanchez-Rojas, and E. Calleja

Título: Opto-electronic properties of 2D and 3D-grown GaInNAs/GaAs QW light emitting diodes

Tipo de participación: Poster

Congreso: European Materials Research Society E-MRS,

Publicación: IEE Proc. Optoelectronics (Ver papers)

Lugar celebración: Estrasburgo, Francia

Fecha: 2004, 24-28 Mayo

Autores: A. Hierro, J. M. Ulloa, **J. Miguel-Sánchez**, E. Luna, A. Guzman, and E. Calleja

Título: Growth and characterization of GaInNAs quantum wells and their application to QWIPs and LDs

Tipo de participación: Poster

Congreso: 2nd International Workshop on "Metastable Compound Semiconductors and Heterostructures

Publicación: -

Lugar celebración: Marburg, Alemania

Fecha: 2004, 31 Marzo – 2 Abril

Autores: A. Guzmán, **J. Miguel-Sánchez**, E. Luna and E. Muñoz

Título: InGaAsN and GaAsN based quantum well lasers and detectors for optical sensing in 1.3 and 1.55 μm

Tipo de participación: Oral

Congreso: Second European Workshop on Optical Fiber Sensors, EWOFS '04

Publicación: SPIE Proceedings, pp. 414 - 417

Lugar celebración: Santander, España

Fecha: 2004, 9-11 Junio

Autores: E. Muñoz, E. Luna, C. Rivera, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, A. Hierro, J.L. Pau and E. Calleja

Título: Quantum well photodetectors based on nitrides. Operation in the near IR, visible and UV

Tipo de participación: Invitada oral.

Congreso: Ge-Jp-Sp Seminar on Optoelectronic Materials and Devices

Publicación: -

Lugar celebración: Yufuin, Japón

Fecha: 2004

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro and E. Muñoz

Título: InGaAsN on GaAs (111)B for telecommunication laser application

Tipo de participación: Oral

Congreso: XIII International Conference on Molecular Beam Epitaxy

Publicación: -

Lugar celebración: Edimburgo, Reino Unido

Fecha: 2004, 22-27 Agosto

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, M. Hopkinson, J.M. Ulloa, A. Hierro

Título: Optimization of InGaAsN on GaAs (111)B for semiconductor laser devices

Tipo de participación: Poster

Congreso: 2005 Spanish Conference on Electron Devices (IEEE)

Publicación: Proceedings pp. 319-322

Lugar celebración: Tarragona, España.

Fecha: 2005, 2-4 Febrero

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, U. Jahn, A. Trampert, A. Guzmán, J. M. Ulloa, A. Hierro and E. Muñoz

Título: Cathodoluminescence and TEM studies of InGaAsN QWs

Tipo de participación: Poster

Congreso: XIII EuroMBE 2005

Publicación: -

Lugar celebración: Grindelwald, Suiza

Fecha: 2005, Marzo 7-9

Autores: J.M. Ulloa, A. Hierro, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, A. Trampert and E. Calleja

Título: On the origin of carrier localization in GaInNAs/GaAs quantum wells: relative influence of QW morphology, and In and N contents QWs

Tipo de participación: Poster

Congreso: XIII EuroMBE 2005

Publicación: -

Lugar celebración: Grindelwald, Suiza

Fecha: 2005, Marzo 7-9

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J.M. Ulloa, A. Hierro and E. Muñoz

Título: Effects of Rapid Thermal Annealing on the optical properties of p-I-n structures grown on misoriented GaAs (111)B substrates

Tipo de participación: Poster

Congreso: Microtechnologies for the new millenium 2005.

Publicación [Proc. SPIE Vol. 5840](#), p. 766-773, Photonic Materials, Devices, and Applications.

Lugar celebración Sevilla, España

Fecha: 2005, 9-11 Mayo

Autores: J.M. Ulloa, A. Hierro, M. Montes, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, B. Damilano , J. Barjon, M. Hugues, J.-Y. Duboz, J. Massies, and A. Trampert

Título: Influence of carrier localization on lasing characteristics of MBE grown GaInNAs/GaAs QW laser diodes

Tipo de participación: Oral

Congreso: Microtechnologies for the new millenium 2005.

Publicación: [Proc. SPIE Vol. 5840](#), p. 81-90, Photonic Materials, Devices, and Applications;

Lugar celebración Sevilla, España

Fecha: 2005, 9-11 Mayo

Autores: U Jahn, T Flissikowski, H T Grahn, R Hey, E Wiebicke, A K Bluhm, **J Miguel-Sánchez** and A Guzmán

Título: Carrier diffusion lengths of GaAs, (In,Ga)As and (In,Ga)(As,N) quantum wells studied by spatially resolved cathodoluminescence

Tipo de participación: Oral

Congreso: Microscopy of Semiconducting Materials XIV

Publicación: -

Lugar celebración Oxford, Reino unido

Fecha: 2005, abril 11-14

Autores: U Jahn, T Flissikowski, H T Grahn, R Hey, **J Miguel Sánchez** and A Guzmán

Título: Carrier diffusion lengths of GaAs, (In,Ga)As and (In,Ga)(As,N) quantum wells studied by spatially resolved cathodoluminescence

Tipo de participación: Oral

Congreso: International Symposyum of Compound Semiconductors (ISCS 2005)

Publicación: -

Lugar celebración Freiburg, Alemania.

Fecha: 2005, Septiembre 18-22

Autores: E. Luna, A. Trampert, **J Miguel Sánchez**, A Guzmán, K.H. Ploog.

Título: Comparison of morphological instabilities of (Ga,In)(N,As) quantum wells grown on (001) and (111)B GaAs.

Tipo de participación: Oral

Congreso: 2nd International Symposium on Point Defect and Nonstoichiometry", ISPN,

Publicación: -

Lugar celebración Kaohsiun, Taiwan

Fecha: 2005, 4-6 Octubre

Autores: A. Trampert, X. Kong, E. Luna, **J Miguel Sánchez** and A Guzmán

Título: Structural and compositional analysis of (Ga,In)(N,As) (111) quantum wells

Tipo de participación: Poster

Congreso: Microscopy of Semiconducting Materials XIV, 11-14 april 2005

Publicación: -

Lugar celebración Oxford, Reino unido

Fecha: 2005, 11-14 abril

Autores: A. Guzmán, **J. Miguel-Sánchez**, A. Trampert, E. Muñoz,

Título: Growth and characterization of (Ga,In)(N,As) lasers on GaAs (111)B

Tipo de participación: Oral

Congreso: Japanese-Spanish-German Joint Workshop on advanced Semiconductor optoelectronic Materials and Devices

Publicación: -

Lugar celebración Berlin, Alemania

Fecha: 08-09 Marzo 2006

Autores: J. Segura, N. Garro, A. Cantarero, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, A. Hierro

Título: Photoluminescence and magneto-photoluminescence studies in GaInNAs/GaAs quantum wells

Tipo de participación: Poster

Congreso: International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS 2006)

Publicación: -

Lugar celebración Viena, Austria

Fecha: 24-28 Julio 2006

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, J. M. Ulloa, M. Montes, A. Hierro, E. Muñoz

Título: MBE growth and processing of diluted nitride quantum well lasers on GaAs (111)B

Tipo de participación: Oral

Congreso: Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces (6th) ESPS-NIS

Publicación: -

Lugar celebración Nottingham, Reino Unido Fecha: 03-05 Abril 2006

Autores: **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, U. Jahn, E. Luna, E. Muñoz

Título: Patterning by rapid thermal annealing of GaAs layers grown on diluted nitride QWs

Tipo de participación: Poster

Congreso: Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces (6th) ESPS-NIS

Publicación: -

Lugar celebración Nottingham, Reino Unido Fecha: 03-05 Abril 2006

Autores: R. Gargallo, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán, U. Jahn, E. Muñoz.

Título: Self-organized GaAs patterns on misoriented GaAs (111)B substrates using dilute nitrides by molecular beam epitaxy

Tipo de participación: Poster

Congreso: Epitaxial Semiconductors on Patterned Substrates and Novel Index Surfaces (6th) ESPS-NIS

Publicación: -

Lugar celebración Nottingham, Reino Unido Fecha: 03-05 Abril 2006

Autores: A. Trampert, E. Luna, X. Kong, K.H. Ploog, **J. Miguel-Sánchez**, A. Guzmán

Título: Composition fluctuations in (Ga,In)(N,As) layers grown on GaAs (001) and (111)B by molecular beam epitaxy"

Tipo de participación: Poster

Congreso: Joint Meeting of German and Polish Associations for Crystal Growth 2006 (DGKK 2006), Berlin, Germany, 6th-8th March 2006.

Publicación: -

Lugar celebración Berlin, Alemania Fecha: 06-08 Marzo 2006

ANEXO 5

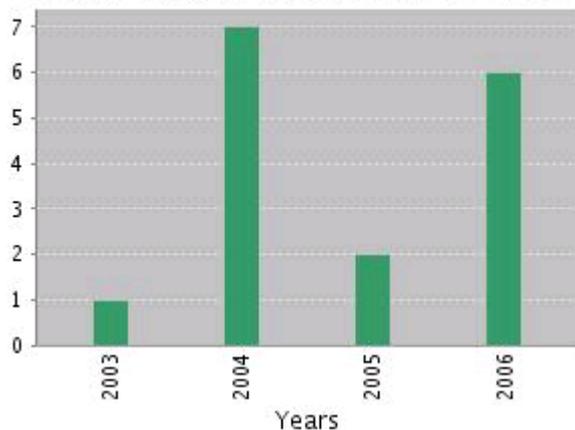
Como quinto anexo se adjuntan las citas de otros investigadores, revistas, tesis, publicaciones al trabajo realizado en la tesis doctoral. Se adjuntan gráficas y datos proporcionados por ISI Web of Knowledge.

Citation Report ISI Web of Science

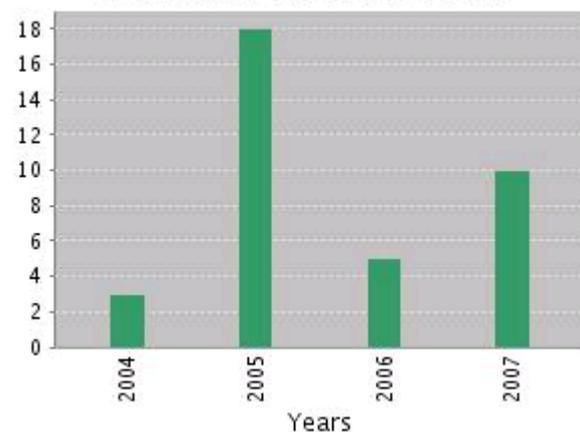
AU=(MIGUEL SANCHEZ J*)

DocType=All document types; Language=All languages; Databases=SCI-EXPANDED, CCR, IC, SSCI, A&HCI; Timespan=2000-2007

Published Items in Each Year



Citations in Each Year



Algunas citas de artículos de revistas de alto impacto a los trabajos de la tesis:

Jahn U, Dhar S, Hey R, et al.

Influence of localization on the carrier diffusion in GaAs/(Al,Ga)As and (In,Ga)(As,N)/GaAs quantum wells: A comparative study
PHYSICAL REVIEW B 73 (12): Art. No. 125303 MAR 2006

Damilano B, Barjon J, Duboz JY, et al.

Growth and in situ annealing conditions for long-wavelength (Ga, In)(N, As)/GaAs lasers
APPLIED PHYSICS LETTERS 86 (7): Art. No. 071105 FEB 14 2005

Cheah WK, Fan WJ, Tan KH, et al.

Characterizations of In_zGa_{1-z}As_{1-x-y}N_xSb_yP-i-N structures grown on GaAs by molecular beam epitaxy
JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE-MATERIALS IN ELECTRONICS 16 (5): 301-307
MAY 2005

Liu HF, Xiang N, Chua SJ, et al.

Structural and optical properties of GaInAs/GaAs and GaInNAs/GaNAs multiple quantum wells upon postgrowth annealing
APPLIED PHYSICS LETTERS 88 (18): Art. No. 181912 MAY 1 2006

Mussler G, Daweritz L, Ploog KH

Nitrogen-induced suppression of an indium-gallium interdiffusion in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{Ny}/\text{GaAs}$ multiple-quantum wells
APPLIED PHYSICS LETTERS 87 (8): Art. No. 081903 AUG 22 2005

Bais G, Cristofoli A, Jabeen F, et al.

$\text{InAsN}/\text{GaAs}(\text{N})$ quantum-dot and $\text{InGaNs}/\text{GaAs}$ quantum-well emitters: A comparison
APPLIED PHYSICS LETTERS 86 (23): Art. No. 233107 JUN 6 2005

Wistey MA, Bank SR, Yuen HB, et al.

Using beam flux monitor as Langmuir probe for plasma-assisted molecular beam epitaxy
JOURNAL OF VACUUM SCIENCE & TECHNOLOGY A 23 (3): 460-464 MAY-JUN 2005

Zhang SY, Niu ZC, Ni HQ, et al.

High structural and optical quality $1.3 \mu\text{m}$ $\text{GaInNs}/\text{GaAs}$ quantum wells with higher indium content grown by molecular-beam epitaxy
APPLIED PHYSICS LETTERS 87 (16): Art. No. 161911 OCT 17 2005

Giehler M, Hey R, Kleinert P, et al.

Intersubband transitions in dilute $(\text{In,Ga})(\text{As,N})/(\text{Al,Ga})\text{As}$ multiple quantum wells analyzed within a three-band k center dot p model
PHYSICAL REVIEW B 73 (8): Art. No. 085322 FEB 2006

Citas de otros trabajos de Tesis:

Título: "SYNTHESIS AND PROPERTIES OF NEW SEMICONDUCTOR ALLOYS FOR LONG WAVELENGTH COHERENT EMITTERS ON GALLIUM ARSENIDE" ,
Universidad: UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE, Italia.

Título: "Growth and Characterization of $\text{Ga}(\text{As,N})$ and $(\text{In,Ga})(\text{As,N})$ "

Universidad: Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät I der Humboldt-Universität zu Berlin, Alemania.

Título: "Transiente Ladungsträgerdynamik und optische Verstärkung in III-V-Halbleitern"

Universidad: Philipps-Universität Marburg, Alemania.

Título: "GROWTH OF $1.5 \mu\text{m}$ GaInNsSb VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASERS BY MOLECULAR BEAM EPITAXY"

Universidad: STANFORD UNIVERSITY, EEUU

Título: "Numerical Studies on Optical and Structural Properties of InGaAsN Quantum-Well Lasers"

Universidad: National Changhua University of Education , Taiwan

Citas en revistas nacionales al trabajo de Tesis:

Boletín de Observación y Prospectiva Tecnológica, Número 10, de la dirección general de armamento y material.

Revista UPM, sección I+D+i, pág 36-49, Universidad Politécnica de Madrid.



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

D. LUIS DE VILLANUEVA DOMÍNGUEZ, VICERRECTOR PRESIDENTE DE LA COMISIÓN DE POSTGRADO DE DOCTORADO DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

CERTIFICA:

que **D. JAVIER MIGUEL SÁNCHEZ** ha alcanzado la mención de “Doctor Europeo” por acuerdo de la Comisión de Doctorado de fecha 13 de diciembre de 2005 y una vez leída su Tesis Doctoral titulada “*Crecimiento por MBE de pozos cuánticos de InGaAsN sobre GaAs (111)B y (100) para su aplicación en láseres de semiconductor*” con todos los requisitos establecidos en el artículo I de la Normativa de Doctorados Europeos aprobada por la Comisión de Doctorado de la UPM en sesión de 3 de febrero de 2000.

La lectura de la Tesis Doctoral de D. Javier Miguel Sánchez tuvo lugar el día 10 de febrero de 2006 en la E.T.S.I. Telecomunicación de la UPM siéndole otorgada, por unanimidad, la calificación de Sobresaliente Cum Laudem.

Y para que así conste, a los efectos oportunos, se expide el presente certificado en Madrid a seis de abril de dos mil seis.

Obtuvo la Mención de Doctor Europeo, de conformidad con el Acuerdo de la Comisión de Doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid de 3 de febrero de 2000.



V: D:
[Handwritten signature]
(23/02/2007)