

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

**Diseño, fabricación y caracterización de
diodos láser basados en pozos cuánticos
de InGaAs(N)/GaAs**

Presentada por:

D. Jose María Ulloa Herrero
Licenciado en Ciencias Físicas

Directores:

D. Jose Luis Sánchez-Rojas
Aldavero

Catedrático de Universidad

D. Adrián Hierro Cano
*Profesor Titular Interino de
Universidad*

Madrid, febrero de 2005

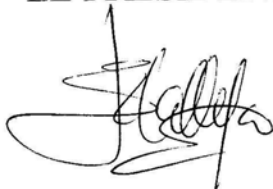
Tribunal nombrado por el Mgfco. Y Excmo. Sr. Rector de
la Universidad Politécnica de Madrid, el día17..... de
Febrero..... de 20.05

Presidente D. ENRIQUE CALLEJA PARDO
Vocal D. Ignacio Esquivias Moscardó
Vocal D. Achim Traupert
Vocal D. Eric Tournié
Secretario D. Álvaro de Guzmán Fdez. Alz.

Realizado el acto de lectura y defensa de la Tesis el día
.....25 de Abril..... de 20.05 enMadrid.....

Calificaciónsobresaliente "Cum Laude" por unanimidad.....

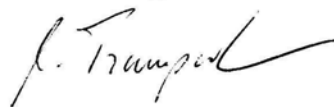
EL PRESIDENTE



LOS VOCALES


E. Tournié

EL SECRETARIO



RESUMEN

En este trabajo se pretende contribuir al desarrollo de diodos láser de pozo cuántico en dos rangos de longitud de onda de gran interés por sus aplicaciones y que no están actualmente satisfactoriamente cubiertos por las tecnologías existentes. Estos son:

- a) 1.06 – 1.1 μm : comunicaciones ópticas entre satélites a 1.06 μm , aplicaciones magnetométricas de alta sensibilidad a 1.08 μm , detección óptica de gases, instrumentación científica, metrología, aplicaciones médicas etc.
- b) 1.3 – 1.55 μm : comunicación por fibra óptica

Para la zona de 1.06 – 1.1 μm la aproximación elegida es el uso de pozos cuánticos de InGaAs/GaAs crecidos sobre sustrato de GaAs con orientación (111)B. El espesor crítico en esta orientación es mayor que en la más convencional (100), lo que permitiría obtener una longitud de onda de emisión mayor y una mayor fiabilidad en los dispositivos por encima de 1.06 μm . Además, la presencia de un campo piezoeléctrico en el caso (111) hace que estos dispositivos resulten muy interesantes desde el punto de vista físico, permitiendo el desarrollo de nuevas aplicaciones, como moduladores ópticos integrados y dispositivos no lineales.

En cuanto a la zona de 1.3 – 1.55 μm , se ha elegido el cuaternario GaInNAs. Se ha demostrado que al sustituir una pequeña cantidad de arsénico por nitrógeno en GaAs o InGaAs se produce una fuerte disminución en la energía del *gap* y cambian drásticamente las propiedades electrónicas del material. En particular, un pozo de GaInNAs/GaAs presenta una mayor discontinuidad en la banda de conducción que uno de InGaAsP/InP, usado actualmente a nivel comercial, por lo que es de esperar un mayor confinamiento de electrones y por tanto un mejor comportamiento a altas temperaturas. Además, este sistema permite la realización de láseres de cavidad vertical basados en la ampliamente establecida tecnología de los reflectores de Bragg de Al(Ga)As/GaAs, evitando así las complicaciones tecnológicas presentes en el caso del InP.

InGaAs/GaAs (111)B

Se realiza un extenso análisis teórico sobre las propiedades de ganancia de láseres de pozo cuántico de InGaAs/GaAs (111)B, y se realiza un estudio comparativo con el caso (100). Se calcula además la estructura de la banda de valencia de los pozos considerando interacción huecos pesados-huecos ligeros en la aproximación de masa efectiva degenerada, resolviendo el Hamiltoniano de Luttinger-Kohn 4x4, y se estudia cómo ésta se ve modificada por el contenido de In, la anchura de pozo y el campo piezoeléctrico. Se calcula también la renormalización del *gap* (BGR) en estas estructuras y se compara con el correspondiente al caso (100). Teniendo en cuenta todo esto, se proponen unas estructuras óptimas para obtener emisión láser en 1.06 y 1.08 μm .

Se fabrican y caracterizan láseres piezoeléctricos de InGaAs con altos contenidos de In, con el objetivo de obtener emisión en 1.06 y 1.08 μm , y se explora la longitud de onda máxima alcanzable con este tipo de estructuras. Los resultados experimentales obtenidos de sus figuras de mérito se comparan con las predicciones del cálculo con el objetivo de validar el modelo. Una vez demostrado el funcionamiento de los láseres, se utilizan medidas de emisión espontánea en un rango muy amplio de corrientes para tratar de profundizar experimentalmente en el funcionamiento de los dispositivos. A partir de estas medidas se obtiene información sobre la influencia del campo piezoeléctrico y sobre el BGR. Esta información se utiliza a su vez para una verificación adicional del modelo teórico.

GaInNAs/GaAs

Se desarrollan dos modelos con distinto grado de aproximación, ambos basados en el modelo de *Band-Anticrossing* (BAC), que describen los estados de energía y las funciones de onda de los electrones confinados en pozos de GaInNAs/GaAs. Tras validar los cálculos comparando con resultados experimentales, se realiza un detallado análisis de la estructura de bandas en función de los parámetros de diseño del pozo. Posteriormente se calcula la ganancia material en pozos de GaInNAs/GaAs considerando un modelo simple para la estructura de bandas, pero que supone una buena aproximación en un amplio rango de inyección de portadores. Se analiza en detalle el efecto del N en la ganancia, así como el del In y la anchura del pozo.

Seguidamente se realiza una extensa caracterización óptica y estructural de pozos cuánticos de GaInNAs crecidos por la técnica de epitaxia de haces moleculares (MBE). Se estudia como la emisión se deteriora al aumentar el contenido de N, se muestra el efecto del aleado térmico rápido (RTA) en la fotoluminiscencia (PL), y se intenta encontrar un aleado óptimo que permita mejorar de forma sistemática la emisión óptica de las muestras. Se realiza un estudio estructural, por microscopía electrónica de transmisión (TEM), y óptico, sobre el efecto del RTA en pozos con altos contenidos de In y N pero diferente morfología: intercara superior muy rugosa (comienzo del crecimiento 3D), intercara planas pero fluctuaciones de composición, y alta calidad cristalina (intercaras planas y sin fluctuaciones de composición aparentes). Se relaciona la microestructura del pozo con sus propiedades ópticas, y en particular con la localización de portadores, y se estudia en detalle cómo el RTA afecta a la localización mediante medidas de PL con temperatura.

En lo referente a dispositivos, se fabrican y caracterizan diodos emisores de luz (LED) y láseres con un pozo simple de GaInNAs/GaAs en la zona activa. Se estudia en detalle la electroluminiscencia (EL) de los LEDs en función de la temperatura y la corriente inyectada. El objetivo es aclarar el origen y la influencia relativa de los distintos procesos de recombinación que determinan la eficiencia del LED. El efecto del RTA en las propiedades electro-ópticas de

los dispositivos es también analizado. Comparando medidas de EL y fotocorriente (PC) se cuantifica el efecto de la localización de portadores y se relaciona con la morfología del pozo. Se comparan las prestaciones de LEDs basados en pozos que presentan una morfología diferente. Finalmente se caracterizan los láseres fabricados, mostrándose sus figuras de mérito principales, y se analiza el impacto que la morfología del pozo tiene en éstas. Se comparan las longitudes de onda de emisión medidas con las que predice el modelo, determinando así el grado de validez del mismo.

SUMMARY

The objective of the present work is to contribute to the development of quantum well (QW) laser diodes in two different wavelength ranges of great interest because of their applications, and that are not successfully covered by the existing technologies. These are:

- a) 1.06 – 1.1 μm : optical intersatellite links at 1.06 μm , high sensibility magnetometer applications at 1.08 μm , optical detection of gases, scientific instrumentation, metrology, medical applications etc.
- b) 1.3 – 1.55 μm : optical fiber communications.

For the first region, the chosen approach is to use InGaAs/GaAs QWs grown on (111)B oriented GaAs substrate. The critical layer thickness in this orientation is larger than in the conventional (100) orientation, thus permitting to achieve longer lasing wavelengths and higher reliability in devices emitting above 1.06 μm . In addition, the presence of a piezoelectric field in the (111) orientation makes these devices very interesting from the physical point of view, giving rise to new applications such as integrated optical modulators and non-linear devices.

Regarding the 1.3 – 1.55 μm range, we have focused on the quaternary alloy GaInNAs. It has been found that replacing a small amount of arsenic atoms in GaAs or InGaAs by nitrogen strongly reduces the energy gap and drastically changes the electronic structure. This opens interesting prospects for band structure engineering and specifically for the feasibility of long wavelength (1.3-1.55 μm) lasers with improved performance. In particular, the larger conduction-band offset in InGaAsN compared to the commonly used InGaAsP system is expected to lead to a stronger electron confinement that should result in an improved high temperature laser performance. In addition, this system allows the realization of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) based on the well-established Al(Ga)As/GaAs Bragg reflector technology, circumventing the technological problems caused by the lack of high quality Bragg reflectors in the InP- based material system.

InGaAs/GaAs (111)B

An extensive theoretical analysis of the gain properties of InGaAs/GaAs (111)B QW laser diodes is performed comparing to the (100) counterparts. The valence band structure of the QWs is calculated considering heavy hole – light hole interaction in the degenerate effective mass approximation, by solving the 4x4 Luttinger-Kohn Hamiltonian, and the results are compared with those of the parabolic approximation. The band gap renormalization (BGR) is also calculated for these structures and compared to the (100) case. Accounting for all these processes, the optimum heterostructures for laser emission at 1.06 and 1.08 μm are proposed.

Based on the previous design, piezoelectric InGaAs/GaAs QW lasers with high In content are fabricated and characterized in order to achieve emission at 1.06 and 1.08 μm , and the longer possible emission wavelength that can be obtained with these structures is explored. The experimental results obtained from the figures of merit are compared with the predictions of the theoretical model in order to validate it. Once laser emission is demonstrated, spontaneous emission measurements in a wide range of injection currents are performed. From these measurements, information about the influence of the piezoelectric field and the BGR is obtained, which is again used to compare with the theoretical model.

GaInNAs/GaAs

Two theoretical models based on the Band-Anticrossing (BAC) model using different approximations are developed in order to describe the confined electronic states in a GaInNAs/GaAs QW. An experimental validation of the results is carried out, and after that, a detailed analysis of the QW conduction band structure as a function of the QW design parameters is performed. Using the previous models, the material gain as a function of the injection level is calculated for moderate carrier densities and its dependence with the nitrogen and indium contents, and QW thickness is analysed.

An extensive optical and structural characterization of GaInNAs QWs grown by Molecular Beam Epitaxy is also performed. The degradation of the photoluminescence (PL) spectra with the N content is studied, as well as the positive effect that Rapid Thermal Annealing (RTA) has on the light emission properties. An structural analysis by Transmission Electron Microscopy (TEM) together with the optical characterization allows to establish a direct relation between the QW morphology, the optical properties and the effect of RTA on the luminescence, and clarifies the impact of RTA on carrier localization.

Regarding devices, light emitting diodes (LED) based on a single GaInNAs QW are fabricated and characterized. The electroluminescence (EL) of the LEDs is analysed in detail as a function of temperature and injection current in order to find the origin and relative influence of the different carrier recombination mechanisms that determine the LED efficiency. The effect of RTA on the opto-electronic properties of the devices is also studied. From a comparison of EL and photocurrent measurements, carrier localization is quantified and directly related to the QW morphology as obtained by TEM. The performance of devices based on QWs with different morphologies are also compared. Finally, long wavelength laser diodes with a similar active zone to that of the LEDs are fabricated and characterized, and lasing is demonstrated up to 1.486 μm . The measured lasing wavelengths are compared with the ones predicted by the model, thus determining its accuracy.

Índice general

Motivación, objetivos y estructura de la tesis.....	1
Capítulo 1. Introducción a los diodos láser de pozo cuántico	9
1.1. Introducción	10
1.2. Estados electrónicos en pozos cuánticos.....	10
1.2.1. Aproximación de función de onda envolvente	10
1.2.1.1. Ecuación de masa efectiva no-degenerada	11
1.2.1.2. Ecuación de masa efectiva degenerada	12
1.3. Efecto de la deformación.....	13
1.4. Principios de funcionamiento de un láser de semiconductor	16
1.4.1. Procesos ópticos en semiconductores.....	16
1.4.2. El láser de semiconductor.....	19
1.4.2.1. El diodo láser de pozo cuántico deformado.....	21
Capítulo 2. Técnicas de caracterización y fabricación	24
2.1. Introducción.	25
2.2. Técnicas de caracterización del material.....	25
2.2.1. Técnicas de caracterización óptica: fotoluminiscencia	25
2.2.2. Técnicas de caracterización estructural: microscopía electrónica de transmisión	28
2.3. Fabricación de dispositivos: diodos electroluminiscentes y diodos láser.	28
2.4. Técnicas de caracterización de dispositivos.....	33
2.4.1. Electroluminiscencia	33
2.4.2. Fotocorriente.....	35
2.4.3. Figuras de mérito de diodos láser.....	36
2.4.3.1. Espectro de emisión láser.....	37
2.4.3.2. Característica potencia - corriente.....	38
PARTE I: InGaAs/GaAs (111)B	
Capítulo 3. Diseño de diodos láser de pozo cuántico de InGaAs/GaAs sobre GaAs (111) B.....	42
3.1. Introducción	43
3.2. Diferencias principales entre orientaciones: (111)B vs. (100).....	44
3.2.1. El efecto piezoeléctrico	45
3.3. Descripción del modelo teórico	47
3.3.1. Cálculo de los niveles confinados en el pozo	48
3.3.1.1. Comparación con experimento.....	48
3.3.2. Cálculo de la ganancia y la emisión espontánea.....	50
3.4. Resultados del modelo teórico	54
3.4.1. Análisis de la ganancia: (111)B vs. (100)	55
3.4.2. Criterios de diseño de la zona activa	57
3.5. Efecto del mezclado de bandas	59
3.6. Efecto de la renormalización del <i>gap</i>	68
3.7. Diseño de láseres en 1.06 y 1.08 μm	74
3.8. Conclusiones	75

Capítulo 4. Caracterización de dispositivos basados en pozos cuánticos de InGaAs/GaAs sobre GaAs (111) B.....	76
4.1. Introducción	77
4.2. Caracterización de diodos láser.....	78
4.2.1. Medidas de fotoluminiscencia.....	79
4.2.2. Medida de las figuras de mérito	80
4.2.3. Comparación con el modelo teórico	86
4.3. Estudio del funcionamiento de los dispositivos mediante el análisis de la emisión espontánea	88
4.3.1. Estudio del efecto del campo piezoeléctrico	89
4.3.2. Estudio del efecto de la renormalización del <i>gap</i>	95
4.4. Conclusiones	98
*	
PARTE II: GaInNAs/GaAs	99
Capítulo 5. Diseño de diodos láser de pozo cuántico de GaInNAs/GaAs.....	100
5.1. Introducción	101
5.2. Modelado de pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs	102
5.2.1. Modelo Band Anti-Crossing (BAC)	102
5.2.2. Modelos para un pozo cuántico de GaInNAs/GaAs.....	107
5.2.3. Comparación con experimento: deducción parámetros BAC.....	110
5.2.4. Análisis de la estructura de bandas.....	114
5.3. Diseño de estructuras láser: cálculo de la ganancia material	119
5.4. Conclusiones	126
Capítulo 6. Caracterización de pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs	127
6.1. Introducción	128
6.2. Fotoluminiscencia de pozos cuánticos de GaInNAs.....	129
6.2.1. Efecto del N en la PL.....	130
6.2.2. Efecto de la morfología del pozo.....	132
6.2.3. Efecto del aleado térmico rápido (RTA)	134
6.2.4. Localización de portadores	137
6.2.5. Hacia 1.55 μm	142
6.3. Efecto del RTA en las propiedades estructurales y ópticas de los pozos.....	143
6.3.1. Modo de crecimiento y efecto del RTA en la calidad estructural	144
6.3.2. Efecto del RTA en las propiedades ópticas	146
6.3.2.1. RTA y recombinación no-radiativa.....	146
6.3.2.2. Efecto del RTA en la localización de portadores.....	148
6.4. Conclusiones	151
Capítulo 7. Caracterización de dispositivos basados en pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs.....	153
7.1. Introducción	154
7.2. Caracterización de diodos emisores de luz	155
7.2.1. Procesos dominantes de recombinación de portadores	156
7.2.2. Efecto del RTA en las propiedades electro-ópticas.....	163
7.2.3. Efecto de la morfología del pozo.....	166
7.3. Caracterización de diodos láser.....	169
7.3.1. Efecto de la morfología del pozo.....	170

7.3.2. Medida de las figuras de mérito	173
7.3.2.1. Láseres en 1.3 μm	173
7.3.2.2. Láseres por encima de 1.4 μm	180
7.3.3. Comparación con el modelo.....	181
7.4. Conclusiones	184
 Capítulo 8. Conclusiones y trabajo futuro.....	 186
8.1. Conclusiones.....	187
8.1.1. InGaAs sobre GaAs (111)B.....	187
8.1.2. GaInNAs.....	188
8.2. Trabajo futuro.....	190
 Bibliografía.....	 194