

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



TESIS DOCTORAL

GaAs-based quantum well and quantum dot
light-emitting diodes and lasers
for 1.3 and 1.55 μm emission

Autor: D. Miguel Montes Bajo
Licenciado en C.C. Físicas

Director: Dr. Adrián Hierro Cano
Profesor Titular de Universidad

2010

TESIS DOCTORAL: GaAs-based quantum well and quantum dot light-emitting diodes and lasers for 1.3 and 1.55 μm emission

AUTOR: Miguel Montes Bajo
DIRECTOR: Dr. Adrián Hierro Cano

El tribunal nombrado por el Mgfc. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 201...., para juzgar la Tesis arriba indicada, compuesto por los siguientes doctores:

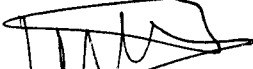
Dr. ... Iguacio Esquivias Moscarco (PRESIDENTE)
Dr. ... GUILLERMO CARPINTERO DEL BARRIO (VOCAL)
Dr. ... BENJAMIN DAMILANO (VOCAL)
Dr. ... JAVIER MIGUEL SANCHEZ (VOCAL)
Dr. ... JOSE MARIA ULLOA (SECRETARIO)

Realizado el acto de lectura y defensa de la Tesis el día 13 de Julio de 201... en Madrid... acuerda otorgarle la calificación de: Sobresaliente cum laude
per unanimidad


El Presidente :



El Secretario :



Los Vocales :


G. CARPINTERO
Javier Miguel Sanchez
B. DAMILANO

Resumen

El tremendo crecimiento de Internet y de la transmisión de datos a alta velocidad están elevando los requerimientos de ancho de banda de las redes de fibra óptica a un ritmo sin precedentes. Las fibras ópticas han sustituido en buena medida a los cables de cobre y han pasado de ser una curiosidad a ser la tecnología dominante. El objetivo de esta tesis es la investigación de nuevos materiales para la fabricación de dispositivos emisores de luz basados en GaAs que operen en las longitudes de onda de la segunda y tercera ventanas de telecomunicaciones por fibra óptica, alrededor de 1.3 y 1.55 μm , respectivamente. Para alcanzar ese objetivo se utilizan paralelamente dos estrategias basadas en heteroestructuras semiconductoras, de modo que esta tesis está dividida en dos grandes bloques. Por un lado, el primer bloque estará dedicado al estudio de dispositivos basados en pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs. Por otro lado, el segundo bloque se centra en los dispositivos basados en puntos cuánticos de InAs cubiertos con capas de GaInNAs o GaAsSb.

Dispositivos basados en pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs. El primer bloque de la tesis está dedicado a los dispositivos basados en pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs. Es bien sabido que la incorporación de una pequeña fracción molar de N en un cristal de InGaAs produce un fuerte desplazamiento al rojo de la longitud de onda de emisión. En este bloque se muestra una serie de diodos láser en los que, mediante la variación del contenido de N en el pozo cuántico, se consigue sintonizar la longitud de onda de emisión láser en todo el rango entre 1 y 1.5 μm . Asimismo, se demuestra cómo el aumento de la concentración de N también provoca una degradación de las figuras de mérito de los dispositivos, concretamente, un aumento de la densidad de corriente umbral, J_{th} , y una disminución de la eficiencia cuántica diferencial externa, η_d . El papel que juega el N en dicha degradación es estudiado en detalle, prestando especial atención a varias de las magnitudes implicadas en el funcionamiento del láser. Así, se encuentra que la eficiencia cuántica diferencial interna, η_i , disminuye en un $\sim 35\%$ con la incorporación de N, aunque es prácticamente independiente de la concentración de este elemento. Esta degradación se atribuye a que los portadores no alcanzan la región del pozo cuántico donde se produce la radiación láser, posiblemente por un aumento en la recombinación en las barreras o en las capas que forman la guía de onda, o también por una distribución inhomogénea de los portadores en el pozo cuántico. Las pérdidas ópticas de la cavidad, α_i , aumentan al aumentar la concentración de N. Este aumento se atribuye a una mayor dispersión de luz en las inhomogeneidades de composición del pozo cuántico, y a una

mayor absorción intrabanda de valencia a las longitudes de onda más largas. Por último, se observa que la densidad de corriente de transparencia, J_{tr} , aumenta con la concentración de N, efecto que se atribuye a un aumento en la fracción de portadores inyectados que acaban recombinándose no radiativamente en el pozo cuántico.

Una de las características por las que los pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs se consideran una opción prometedora para obtener luz láser alrededor de 1.3 y 1.55 μm es la potencial baja dependencia de sus figuras de mérito de la temperatura de operación. Sin embargo, como se muestra en esta tesis, las temperaturas características de J_{th} y η_d , T_0 y T_1 , respectivamente, tienden a degradarse al aumentar el contenido de nitrógeno en el pozo cuántico. El posible origen de este comportamiento y, en particular, el papel que pueda jugar el escape de huecos del pozo a la barrera se analiza en detalle. Se observa que la degradación de T_0 se debe principalmente al aumento de α_i , y a la disminución tanto de la ganancia modal, Γg_0 , como de la temperatura característica de J_{tr} , T_{tr} . Por otro lado, el aumento de α_i es el principal responsable de la degradación de T_1 . Además, se realiza un cálculo del tiempo de vida medio efectivo de los portadores en el pozo cuántico y de su dependencia con la temperatura. Los resultados de este cálculo, junto con el hecho de que la temperatura característica de η_i , T_{η_i} , tiene una contribución pequeña tanto a T_0 como a T_1 , sirven para descartar la fuga de portadores del pozo cuántico como el proceso dominante en la degradación de T_0 y T_1 .

Por último, y teniendo en cuenta que la disminución de η_i es una de las causas de la degradación de las figuras de mérito de los diodos láser basados en pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs al aumentar el contenido de N, se realiza un análisis del papel que juega la eficiencia diferencial de distribución de portadores, η_s , en la degradación de η_i . En primer lugar, la homogeneidad del perfil de inyección de portadores a lo largo de la cavidad del láser se evalúa observando la dependencia de J_{th} de la posición sobre la superficie del láser donde se inyecta la corriente, para todo el rango de contenidos de nitrógeno considerados. Se obtiene que J_{th} es fuertemente dependiente del lugar donde se inyecta la corriente en los dispositivos con N debido a una pobre distribución de los portadores a lo largo del láser que se mitiga si la corriente se inyecta en varios puntos separados una cierta distancia. Se propone un modelo para explicar este fenómeno, en el que el calentamiento local causaría variaciones en la energía del gap a lo largo del láser que impediría que la mayor parte de la luz emitida se reabsorbiera por el pozo cuántico, haciendo así más difícil alcanzar inversión mediante bombeo óptico. Por otro lado, se demuestra que la corriente inyectada no se distribuye del mismo modo a lo largo de los láseres en dispositivos con N o sin él cuando se inyectan corrientes cercanas a la corriente umbral.

En segundo lugar, se analiza el perfil de inyección de portadores en la dirección perpendicular al eje óptico de la cavidad. Con este propósito, se estudia la evolución de la emisión espontánea del pozo cuántico en función de la corriente, tanto por encima como por debajo del umbral, para evaluar el anclado de los niveles de Fermi por encima del umbral. A partir de estos resultados se observa que η_s se degrada en $\sim 18\%$ al añadir N. Esta degradación puede explicar parte de la degradación en un 35% que se observa en η_i con la incorporación

de N. El resto de la degradación de η_i puede ser producido por otro mecanismo de recombinación que podría consistir, probablemente, en recombinación no radiativa en defectos en la barrera superior, producida por la presencia inintencionada de átomos de N en esas capas.

Además de esta serie de diodos láser de pozo cuántico de GaInNAs/GaAs, y como primer paso hacia la fabricación de dispositivos de cavidad vertical, se presenta una serie de diodos emisores de luz de cavidad resonante basados en pozos cuánticos de GaInNAs/GaAs. Dichos dispositivos emiten luz a $1.3 \mu\text{m}$ a temperatura ambiente, y sus figuras de mérito se estudian en función de la temperatura de crecimiento de los reflectores de Bragg que forman la microcavidad, y del aleado de los contactos eléctricos. Se observa que la eficiencia externa, η_{ext} , y la anchura a media altura de los picos de electroluminiscencia se degradan según disminuye la temperatura de crecimiento de los reflectores de Bragg, junto con una degradación paralela de las características corriente-tensión de los diodos. Comparando los dispositivos con los contactos metálicos aleados o sin alear, se observa que la anchura a media altura del pico de electroluminiscencia aumenta al alear, probablemente por una pérdida de la lisura del reflector metálico superior debida a la difusión del metal en el GaAs. Los mejores resultados se han obtenido cuando la temperatura de crecimiento del reflector de Bragg es $750 \text{ }^\circ\text{C}$ y los contactos metálicos se dejan sin alear.

Dispositivos basados en puntos cuánticos de InAs. La segunda parte de la tesis se centra en dispositivos basados en puntos cuánticos autoensamblados de InAs. Se presentan dos series de diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés) basados en puntos cuánticos de InAs cubiertos por capas de diferente composición. Por una parte, se demuestran LED basados en puntos cuánticos de InAs cubiertos por una capa de GaInNAs. Siguiendo esta estrategia, se obtiene electroluminiscencia a temperatura ambiente a $1.5 \mu\text{m}$ con una composición del 15% de In y el 2% de N en la capa que cubre los puntos. Se observa que la incorporación de N no sólo produce un desplazamiento al rojo de la longitud de onda de emisión, sino que también produce una degradación de la eficiencia externa de los LED. Dicha degradación puede ser parcialmente solventada si se somete a los dispositivos a un recocido térmico rápido posterior al crecimiento, aunque dicho proceso también resulta en un desplazamiento al azul de la longitud de onda de emisión que debe ser tenido en cuenta a la hora de diseñar el dispositivo. Se observa que los espectros de electroluminiscencia de los dispositivos con N presentan dos transiciones radiativas diferenciadas, una de las cuales corresponde a emisión desde el punto cuántico, y la otra a emisión desde la capa que cubre los puntos. El escape de portadores desde el punto cuántico hasta la capa de cobertura se identifica como el mecanismo dominante de pérdida de portadores. El recocido térmico rápido resulta en una fuerte reducción de la energía de activación para el escape de los portadores en los LED de InAs/InGaAs, sin embargo, tiene un efecto despreciable en el caso de los LED de InAs/GaInNAs.

La segunda estrategia para obtener dispositivos emisores de luz a 1.3 y $1.55 \mu\text{m}$ basados en puntos cuánticos de InAs consiste en cubrir dichos puntos con una capa de GaAsSb. Esta estrategia permite obtener electroluminiscencia a temperatura ambiente a longitudes

de onda entre 1.1 y 1.5 μm . Como se muestra en esta tesis, el valor de η_{ext} aumenta con el contenido de Sb en la capa que cubre los puntos hasta alcanzar una concentración de este elemento a la que η_{ext} disminuye. A dicha concentración, el alineamiento entre las bandas electrónicas de los puntos cuánticos y la capa de GaAsSb pasa de ser tipo I a ser tipo II. Esta transición se confirma experimentalmente mediante la observación del desplazamiento al azul de los picos de electroluminiscencia en función de la corriente inyectada. Se pueden resolver varios picos en los espectros de electroluminiscencia de los dispositivos tipo I, que se atribuyen a emisión desde estados confinados de los puntos cuánticos. Las emisiones de los LED tipo II, al inyectar corrientes bajas, se atribuyen a recombinación entre electrones confinados en los puntos cuánticos y huecos confinados en la capa de GaAsSb. Sin embargo, si se aumenta la corriente, una intensa banda centrada en 1100 nm domina el espectro. Esta banda es debida probablemente a la transición tipo I entre electrones confinados en el punto cuántico y huecos confinados en un estado extendido del pozo cuántico compuesto por los puntos cuánticos y la capa de GaAsSb que cubre los puntos.

Abstract

The tremendous growth of the Internet and high speed data transmission pushes the bandwidth requirements for fibre networks at an unprecedented pace. Optical fibres have largely replaced copper wire in communications and have developed from a curiosity status to being the dominant technology. The goal of this thesis is the research of new materials for the fabrication of light-emitting devices based on GaAs for operation at the second and third optical fibre telecommunications windows, at wavelengths around 1.3 and 1.55 μm , respectively. In order to achieve this goal, two parallel approaches based on semiconducting heterostructures are employed. Thus, this thesis is divided in two main parts. On the one hand, the first part is dedicated to the study of GaInNAs/GaAs quantum well (QW)-based devices. On the other hand, the second part focuses on the study of devices based on InAs quantum dots (QDs) covered either by GaInNAs or GaAsSb capping layers.

GaInNAs/GaAs QW-based devices. The first part of the thesis is dedicated to the study of GaInNAs/GaAs QW-based devices. It is well known that adding a small molar fraction of N into an InGaAs matrix results in a strong red-shift of the emission wavelength. In this part, a series of laser diodes is presented from which, by varying the N content in the quantum well from 0 to 3.3%, laser operation from 1 to 1.5 μm is achieved. Moreover, it is demonstrated how the increase in N concentration also results in a degradation of the figures of merit of the devices, namely, an increase of the threshold current density, J_{th} , and a decrease of the external differential quantum efficiency, η_d . The role played by N in such degradation is analysed in detail, paying special attention to several of the magnitudes involved in the performance of the laser diodes. It is found that the internal quantum efficiency, η_i , degrades by $\sim 35\%$ with the addition of N, although it is roughly independent of N concentration. This is attributed to failure of the carriers to reach the area of the QW where lasing is taking place, probably due to an increased recombination at the barriers or cladding layers, or by an inhomogeneous spreading of the carriers. The optical losses of the cavity, α_i , increase as the N content is increased. This is attributed to an enhanced light scattering due to compositional inhomogeneities in the QW, and to a higher intra-valence band absorption at the longest wavelengths. Finally, the transparency current density, J_{tr} , is found to increase with the N concentration, which is attributed to an increase in the fraction of injected current that results in non-radiative recombination in the QW.

One of the characteristics by which GaInNAs/GaAs QWs are considered a promising

option to obtain laser light around 1.3 and 1.55 μm is the expected low sensitivity to temperature of the figures of merit of the laser diodes based on this material system. However, as it is demonstrated in this thesis, the characteristic temperatures of J_{th} and η_d , T_0 and T_1 , respectively, tend to degrade as the N content in the QW is increased. The possible origin of this behaviour is analysed in detail and, in particular, the role played by the escape of holes from the QW to the barrier is addressed. It is found that the degradation of T_0 is mainly due to the increase of α_i , and a decrease of both the modal gain, Γg_0 , and the characteristic temperature of J_{tr} , T_{tr} . In turn, the increase of α_i is the main responsible for the degradation of T_1 . In addition, a calculation is made of the effective lifetime of carriers in the QW and its temperature dependence. The results of this calculation, taken together with the fact that the characteristic temperature of η_i , T_{η_i} , has a small contribution to T_0 and T_1 , rule out carrier leakage from the QW as the dominant process limiting T_0 and T_1 .

Finally, and taking into account that the degradation of η_i is one of the causes for the degradation of the figures of merit of GaInNAs/GaAs QW laser diodes upon increasing of the N content, an analysis of the role played by the differential carrier spreading efficiency, η_s , on the degradation of η_i is performed. Firstly, the homogeneity of the carrier injection profile along the laser cavity is evaluated by the observation of the dependence of J_{th} on the location on the surface of the laser where the current is injected, for all the range of N contents considered. It is found that J_{th} is strongly dependent on the current injection location in N-containing diodes, due to a poor carrier spreading along the length of the laser diodes, which is alleviated if the current is injected at several points separated by a certain distance. A model is proposed as an explanation for this phenomenon, in which local heating would cause band gap energy variations along the stripe which will prevent most of the emitted light to be reabsorbed by the QW, thus making it more difficult to reach inversion by optical pumping. On the other hand, it is shown that the injected current is not distributed similarly along the laser stripe in N-containing and N-free devices when injected at currents near threshold.

Secondly, the carrier injection profile in the direction perpendicular to the cavity optical axis is analysed. With that purpose, the evolution of the spontaneous emission from the QW is studied as a function of the injected current, both above and below threshold, in order to evaluate the above-threshold Fermi level pinning in the QW. Based on the results of this experiment it is found that η_s degrades by a $\sim 16\%$ upon addition of N. This degradation can explain part of the previously found degradation by $\sim 35\%$ of η_i with the addition of N. The rest of the degradation of η_i could be accounted for by another recombination mechanism which could probably consist on non-radiative recombination at defects in the top barrier caused by the presence of non-intentional N atoms in these top layers.

In addition to this GaInNAs/GaAs QW laser diodes series, and as a first step into the fabrication of vertical cavity devices, a series of GaInNAs/GaAs QW-based resonant cavity light-emitting diodes is presented. Room-temperature 1.3 μm electroluminescence (EL) is demonstrated from these devices, and their figures of merit are studied as a function of the growth temperature of the distributed Bragg reflectors (DBRs) which define the cavity,

and as a function of the alloying of the electrical contacts. It is found that the external efficiency, η_{ext} , and the full width at half maximum (FWHM) of the EL peak degrade as the DBR growth temperature decreases in parallel to a degradation of the current-voltage characteristics of the diode. This degradation can be explained to arise from an enhanced roughness in the low temperature DBRs. By comparison of devices with alloyed and non-alloyed contacts, it is observed that the FWHM of the EL emission increases with alloying, probably due to the loss of flatness of the top metallic reflector upon diffusion of the metal into the GaAs. The best results have been obtained when the growth temperature of the DBR was 750 °C and the metallic contacts were left unalloyed.

InAs QD-based devices. The second part of the thesis focuses on InAs self-assembled QD devices. Two series of light-emitting diodes (LEDs) based on InAs QDs covered with capping layers of different composition are presented. On the one hand, LEDs based on InAs QDs covered by GaInNAs capping layers are demonstrated. Following this strategy, room-temperature EL at 1.5 μm is demonstrated with a capping layer composition of 15% In and 2% N. As it is shown, the incorporation of N not only yields a red-shift of the emission wavelength, but it also results in a degradation of η_{ext} . Such degradation can be partially alleviated if the devices are subjected to a post-growth rapid thermal annealing, although this process also results in a blue-shift of the emission wavelength which must be taken into account at the design of the device. It is observed that the EL spectra of the N-containing devices present two distinct radiative transitions, one of them corresponds to emission from the QD, whereas the other is attributed to emission from the capping layer. Carrier escape from the QD to the capping layer is identified as the dominant carrier loss mechanism. RTA results in a strong reduction of the activation energy for the escape of carriers in the InAs/InGaAs QDLEDs, but has a negligible effect in the case of InAs/GaInNAs QDLEDs.

The second strategy to obtain light-emitting devices around 1.3 and 1.55 μm based on InAs QDs consists on covering these dots with a GaAsSb capping layer. This strategy allows to obtain electroluminescence at room temperature at wavelengths between 1.1 and 1.5 μm . It is demonstrated that the value of η_{ext} increases with the Sb content in the capping layer until a concentration of this element at which η_{ext} decreases. That is the Sb concentration at which the band alignment between the dots and the capping layer changes from type I to type II. This band alignment transition is confirmed experimentally through the observation of the EL peak wavelength blue-shift as a function of the injected current. Several peaks have been resolved in the EL spectra of the type I QDLEDs which have been attributed to emission from QD confined states. The emissions from the type II QDLEDs, when injected at low currents, are attributed to recombination between electrons confined in the QD and holes confined in the capping layer. However, as the injected current is increased, a strong band centered at around 1100 nm dominates the spectra. This band is probably due to type I recombination between electrons in the QD and holes in an extended state of the QW composed by the QD and the capping layer.