

# Caracterización estructural de capas epitaxiadas de InAlAs/InGaAs crecidas sobre sustratos {111} de InP

A. VILÀ, F. PEIRÓ, A. CORNET Y J.R. MORANTE

EME, Dept. Física Aplicada i Electrónica, Universitat de Barcelona, Av. Diagonal 645-647, 08028-BARCELONA

Se ha analizado por microscopía electrónica en transmisión (TEM) la estructura de transistores HEMT basados en un pozo cuántico tensionado de InGaAs/InAlAs crecido sobre un sustrato {111} de InP. Se han observado dislocaciones filiformes y defectos planares que cruzan la capa superior hacia la superficie, así como maclas paralelas a la interficie y grandes complejos defectivos en forma de V que se nuclean unos pocos nanómetros por encima de la interficie entre el pozo cuántico y la capa superior que lo confina. La estructura de los defectos es muy diferente de la observada en heteroestructuras similares crecidas sobre sustratos {100}, hecho que sugiere que hay que tener en cuenta consideraciones sobre el proceso mismo de nucleación de los defectos junto con las convencionales relacionadas con el desajuste de redes.

*Palabras clave:* pozo cuántico, sustrato {111}, caracterización, TEM

## Structural characterization of InAlAs/InGaAs epitaxial layers grown onto {111}-InP substrates

Structure of HEMT's made of an InGaAs/InAlAs strained quantum well grown on {111} InP substrates has been analyzed via transmission electron microscopy. Threading dislocations and stacking faults crossing the upper layer towards the sample surface are found to nucleate a few nanometers away from the quantum-well/cladding-layer interface. In the same manner, they are also observed twinned regions parallel to the interfaces and large V-shaped defect complexes. These structure defects are very different from those expected for {100} heterostructures. These findings suggest that other growth considerations about the nucleation of defects must be taken into account together with the conventional ones related to the lattice mismatch.

*Key words:* quantum well, {111} substrate, characterization, TEM

## 1. INTRODUCCION

Durante la pasada década ha tenido lugar un considerable incremento de la investigación de estructuras basadas en pozos cuánticos y superredes debido tanto a su potencial aplicación en nuevas configuraciones de dispositivos como a sus peculiares propiedades físicas (1, 2). Hasta el momento, la mayoría de estudios de estructuras semiconductoras se han concentrado en capas crecidas sobre sustratos convencionales orientados {100}. La introducción en estas heteroestructuras de capas tensionadas actuando como canal en configuraciones de transistores de alta movilidad (HEMT) ha posibilitado la mejora de las características eléctricas de los dispositivos, aumentando la movilidad y permitiendo un mayor grado de confinamiento de los portadores (3). Por otra parte, el hecho de que debido a la diferencia de las estructuras de bandas de conducción y valencia según la orientación cristalográfica algunas propiedades eléctricas sean fuertemente dependientes de la orientación ha impulsado un interés creciente por el estudio de estructuras epitaxiadas sobre sustratos con diferentes orientaciones (4,5) y se han concebido dispositivos optoelectrónicos con más prestaciones (6,7) en comparación con los crecidos según la dirección <100>. Así, la posibilidad de cambiar y mejorar las propiedades fundamentales de los materiales, los mecanismos de crecimen-

to, las cinéticas superficiales o la incorporación de impurezas a partir del crecimiento de materiales sobre sustratos con orientaciones diferentes a la {100}, ha permitido el estudio de aspectos tales como el efecto piezoeléctrico, la incorporación de dopantes, la organización espontánea de microestructuras, la posibilidad de obtener materiales ordenados o un incremento de esfuerzos. Sin embargo, el desarrollo de dispositivos basados en estas propiedades requiere la obtención de materiales con un alto grado de calidad cristalina (8,9) Aunque el origen de los defectos presentes en capas {100} tensionadas ha sido extensamente estudiado, se sabe poco sobre sustratos {111} (10).

En este trabajo se presenta una caracterización estructural mediante microscopía electrónica en transmisión (TEM) y de fuerzas atómicas (AFM) de estructuras HEMT constituidas por pozos cuánticos tensionados de InGaAs/InAlAs sobre InP {111}, con la idea de profundizar en el conocimiento de los mecanismos físicos involucrados en la evolución de los defectos en este tipo de estructuras, así como en el análisis de la influencia de la orientación cristalográfica sobre los mecanismos de relajación. Se ha observado que las características del canal son muy inhomogéneas, originando una distribución irregular de defectos en las capas superiores. Nuestros resultados indican que los parámetros tecnológicos que han demostrado su capacidad para dar capas de buena calidad estructu-

ral sobre sustratos {100} no son los óptimos para el crecimiento sobre sustratos orientados según {111}.

## 2. CONDICIONES EXPERIMENTALES

Las muestras fueron crecidas por epitaxia de haces moleculares (MBE) convencional. Su estructura básica aparece en la fig.1. Durante el depósito de InAlAs la temperatura se mantuvo a 530°C, que ha demostrado ser el valor óptimo para el crecimiento de InAlAs en dirección <100> (11) mientras que el pozo cuántico de InGaAs se creció a 500°C. La composición de las capas de InAlAs fue medida por XRD.

La muestras para la observación por TEM fueron preparadas utilizando las técnicas estándar de pulido mecánico y ataque iónico a temperatura de nitrógeno líquido. Las observaciones de TEM se llevaron a cabo en un Philips CM30-ST (300 KV) y las de AFM en un Nanoscope III Multimode.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSION

Las dos primeras capas de InAlAs crecidas sobre el sustrato {111} (la primera dopada y la segunda no dopada) muestran una cristalinidad perfecta, sin defectos y con una gran uniformidad en contraste y grosor a lo largo de la capa entera. El pozo cuántico aparece también libre de defectos, pero con algunas irregularidades en su espesor. Sin embargo, la capa superior contiene una gran densidad de defectos cristalográficos, como puede verse en la panorámica general de la estructura presentada en la fig.2.

Los defectos pueden dividirse en dos grupos principales: en primer lugar están las familias de maclas simétricas confinadas en planos {111} paralelos a la interficie de la capa confinadora con el pozo cuántico -y situados por un lado a unos pocos nanómetros y por otro a algunas décimas de micra de él- y en segundo lugar existen dislocaciones filiformes y fallos de apilamiento, junto con otros defectos más complicados, que cruzan la capa hasta la superficie de la muestra.

En el primer grupo, hay que destacar un tipo de defecto con unas características un tanto especiales. Se trata de una región maclada simétrica que permanece confinada a unos pocos nanómetros por encima del pozo cuántico paralelamente a él. Esta región es casi continua y actúa como punto de nucleación para muchos otros defectos (fig.3). Su grosor no es constante, pasando de 10 monocapas a la desaparición en determinadas zonas, y su situación tampoco, permaneciendo a 5-20 nm del pozo cuántico. El origen de esta región no está claro hasta el momento, pero parece estar relacionado con parámetros tecnológicos que influyen en el proceso del crecimiento, más que con un mecanismo de relajación.

A partir de esta zona aparecen otros defectos que cruzan la capa. No están distribuidos uniformemente por toda su superficie, sino que se concentran más bien en unas áreas muy defectivas, de varios cientos de nm de largo, situadas cerca de otras libres de defectos (fig.2).

Se observa que las zonas sin defectos aparecen básicamente sobre lugares en que el pozo cuántico es estrecho. Esto parece indicar que el grosor crítico de la capa no ha sido alcanzado. Sin embargo, en las áreas en que el pozo cuántico es más grueso se observan dislocaciones filiformes y pequeños defectos bidimensionales entremezclados en cúmulos de aspecto liado. Aunque el grosor total de la capa siga siendo el mismo, el

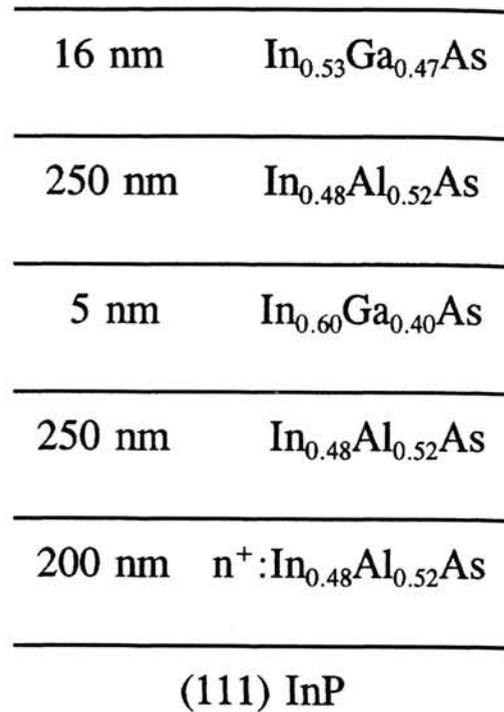


Fig.1. Estructura básica de las muestras HEMT con pozos cuánticos de InGaAs/InAlAs, tanto crecida sobre sustrato {111} como sobre {100}.

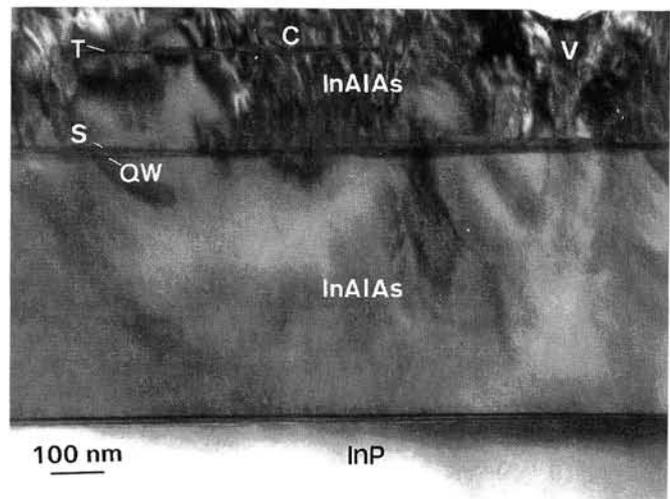


Fig.2. Imagen en sección transversal de la estructura HEMT [111] con pozo cuántico completa. Se observa una gran densidad de defectos confinados en la capa de InAlAs superior: cúmulos (C), maclada (T), en forma de V (V) y la región simétrica (S).

mayor espesor del pozo implica una contribución más importante a las tensiones acumuladas a lo largo de la epicapa, con lo cual el grosor crítico es menor y es posible la relajación mediante defectos en un estadio menos avanzado del crecimiento.

Además de los descritos hasta aquí, un tipo de defecto más complejo aparece generalmente limitando las zonas de existencia de la región simétrica. Tiene forma de V, y parece formado por un gran número de defectos bidimensionales {111} apilados partiendo de una estructura columnar. Está confinado principalmente en un tetraedro de planos {111}, que corta a la

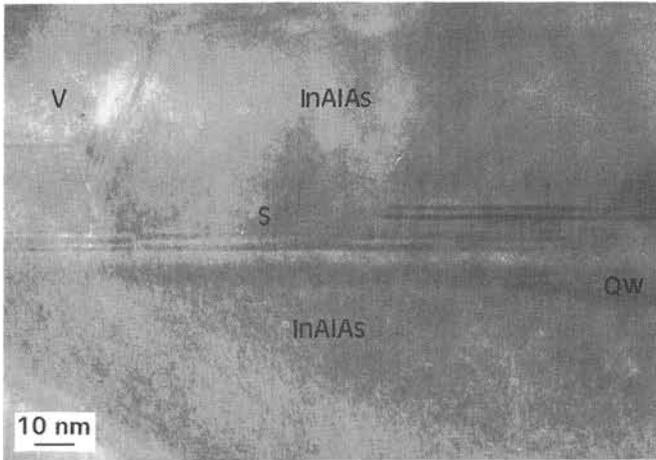


Fig.3. Micrografía en alta resolución de las capas superiores de la estructura. Se ve una región maclada simétrica (S) unos pocos nanómetros por encima del pozo cuántico (QW) en la capa superior de InAlAs, que actúa como punto de nucleación para otros tipos de defectos de cruzan la capa (V).

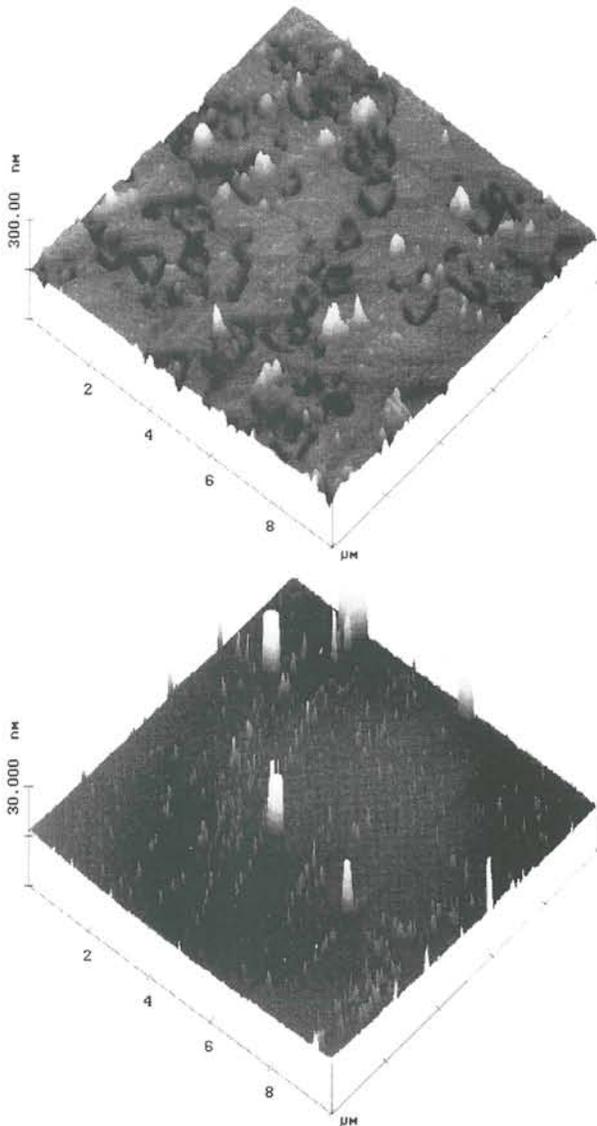


Fig.4. Imagen de AFM de la morfología superficial de las estructuras con pozo cuántico sobre sustrato {111} en a y {100} en b. En la primera aparecen surcos triangulares de ~50 nm de profundidad, mientras que la segunda es mucho más plana.

superficie de la muestra en triángulos equiláteros según segmentos  $\langle 112 \rangle$  de varias décimas de micra de longitud. Además, su intersección con la superficie origina socavones triangulares de ~50 nm de profundidad en ella, dando a la muestra apariencia accidentada, como puede verse en la figura comparativa de imágenes de AFM (fig.4). En la fig.4.a se observa una morfología más o menos plana con hondos surcos en forma de triángulo casi cerrado y escalones superficiales. En cambio, en la fig.4.b la planaridad es mucho más evidente (obsérvese que la escala vertical es 10 veces menor), sólo desdibujada por la presencia de algunas impurezas superficiales.

Las características especiales del último tipo de defecto descrito (defecto en V) indican que su aparición está relacionada con el proceso de crecimiento propiamente dicho. La presencia de la capa simétrica casi continua unos pocos nanómetros por encima del pozo cuántico apoya esta suposición. Sin embargo, los otros defectos probablemente se deban a un mecanismo diferente, ya que la diferencia de parámetros de red introduce unas tensiones que tienden a relajarse.

A la vista de la apariencia de las estructuras, se podría pensar que el grosor crítico de la capa de InAlAs sobre sustrato de {111} InP no había alcanzado el grosor crítico cuando se depositó el pozo. En consecuencia, una cierta cantidad de tensión se acumulaba en la capa. El crecimiento del pozo cuántico implica una tensión adicional, que es más importante en las zonas en que el QW es más grueso y menos donde es más fino. Esto significa que, cuando el depósito continúa, las primeras zonas alcanzan su grosor crítico antes que las últimas. Esta podría ser la razón para la existencia de áreas muy defectivas donde el QW ha crecido mucho, junto a otras de buena cristalinidad debidas a la delgadez del pozo de debajo. A pesar de todo, está claro que el crecimiento de un pozo cuántico tensionado de buena calidad cristalográfica sobre un sustrato {111} de InP necesita parámetros tecnológicos diferentes de los que se usan normalmente para obtener buenas estructuras {100}, como demuestra el hecho de que los defectos cristalográficos están completamente ausentes en muestras crecidas *simultáneamente*, y por tanto en las mismas condiciones, sobre sustratos {100} (fig.5). En la actualidad se están llevando a cabo más experimentos de cara a determinar cuáles son los parámetros óptimos para el caso de sustratos {111}.

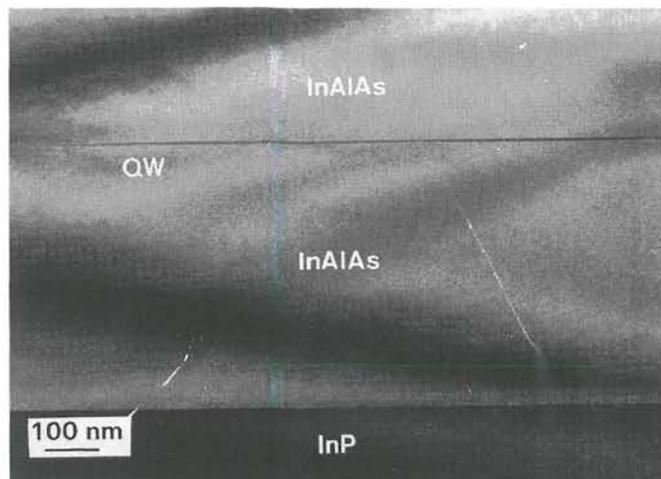


Fig.5. Sección transversal de la estructura HEMT {100} con pozo cuántico completa. Se observa la completa ausencia de cualquier tipo de defecto cristalográfico en toda la capa.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de las anteriores observaciones, se ve que la estructura defectiva de los pozos cuánticos tensionados de InGaAs/InAlAs sobre sustratos {111} de InP es muy diferente de la presente generalmente sobre sustratos {100}. En estructuras HEMT {111} los defectos se concentran en la capa superior de InAlAs y tienen unas características bastante especiales, especialmente una capa maclada simétrica casi continua que se localiza unos pocos nanómetros por encima del pozo cuántico, y grandes complejos de defectos en forma de V que graban triángulos en la superficie de la muestra. Además, estos resultados muestran que, para el crecimiento óptimo de heteroestructuras HEMT sobre sustratos {111} de InP hay que tener en cuenta consideraciones de la influencia del proceso de crecimiento propiamente dicho sobre la nucleación de defectos, aparte de las convencionales relacionadas con el proceso de relajación del desacuerdo de redes. ◆

#### REFERENCIAS

1. T. Grave, «Optimization of GaAs -based HEMTs for microwave and millimeter-wave IC applications», *Inst. Phys. Conf. Ser.* Vol. 145, pp. 7-12 (1996).
2. Y. Kwon y D. Pavlidis, «Delay time analysis of submicron InP-based HEMTs», *IEEE Transactions on Electron Devices* Vol. 43 (2), pp. 228-237 (1996).
3. T. Akazaki, J. Nitta, H. Takayanagi y T. Enoki, "Superconducting transistors using InAs-inserted-channel InAlAs/InGaAs inverted HEMTs" *Supercond.Sci.Techn.* Vol. 9 (4A), pp. A83-A86 (1996).
4. Y. Kajikawa, T. Kamijoh, Y. Katayama y N.H. Sugiyama, «Enhancement of quantum-confined Stark-effect in GaAs/AlGaAs quantum wells by quantization along the (111) axis» *Jpn.J.Appl.Phys.* Vol.28 (6), pp. L1022-L1024 (1989).
5. D.L. Smith y C. Mailhot, «Optical properties of strained-layer superlattices with growth axis along (111)» *Phys.Rev.Lett.* Vol.58 (12), pp. 1264-1267 (1987).
6. K.W. Goossen, E.A. Caridi, T.Y. Chang, J.B. Stark, D.A.B. Miller y R.A. Morgan, «Observation of room-temperature bleu shift and bistability in a strained InGaAs/GaAs (111) self-electro-optic effect device» *Appl.Phys.Lett.* Vol. 56 (8), pp. 715-717 (1990).
7. I. Sela, D.E. Watkins, B.K. Laurich, D.L. Smith, S. Subbanna y H. Kroemer, «Modulated photoabsorption in strained Ga<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>As/GaAs multiquantum wells» *Phys.Rev.B* Vol.43 (14), pp. 11884-11892 (1991).
8. H.Q. Hou y C.W. Tu, «Optical property of InAsP/InP strained quantum-wells grown on InP (111)B and (100) substrates» *J.Appl.Phys.* Vol.75 (9), pp. 4673-4679 (1994).
9. K. Nishi y T. Anan, «Optical characterizations of (111) oriented InGaAs/InAlAs strained quantum wells grown on InP substrates» *J.Appl.Phys.* Vol.70 (9), pp. 5004-5009 (1991).
10. H.Q. Hou y C.W. Tu, «Homoepitaxial growth on InP on (111)B substrates by gas-source molecular-beam epitaxy» *Appl.Phys.Lett.* Vol.62 (3), pp. 281-283 (1993).
11. A. Georgakilas, G. Halkias, A. Christou, N. Kornilios, C.Papavassiliou, K. Zekentes, G. Konstantinidis, F. Peiró, A. Cornet, S. Ababou, A. Tabata y G. Guillot, «A comprehensive optimization on InAlAs molecular-beam epitaxy for InGaAs/InAlAs HEMT technology» *J.Electrochem.Soc.* Vol. 140 (5), pp. 1503-1509 (1993).

