

Organización espontánea de puntos cuánticos de InSb crecidos por ALMBE sobre sustratos de InP

J.C.FERRER^{1,2}, F.PEIRÓ¹, A.CORNET¹, J.R.MORANTE¹, T.UTZMEIER³, G.ARMELLES³ y F.BRIONES³

¹ EME, Ingeniería i Materials Electrònics, Dpt. Física Aplicada i Electrònica, Universitat de Barcelona, Diagonal, 645-647, 08028, Barcelona.

² Serveis Científic-Tècnics, Universitat de Barcelona, Lluís Solé i Sabarís, 1-3, 08028, Barcelona.

³ CNM, Instituto de Microelectrónica de Madrid, Isaac Newton, 8, Parque Tecnológico de Madrid, 28760, Tres Cantos, Madrid.

El crecimiento autoorganizado de puntos cuánticos de InSb sobre sustratos de InP mediante epitaxia de haces moleculares ha sido caracterizado mediante microscopía electrónica de transmisión y microscopía de fuerzas atómicas a fin de estudiar la morfología y establecer el mecanismo de relajación de las estructuras. Medidas de difracción de electrones de alta energía durante el crecimiento de las muestras indican una transición en el modo de crecimiento de bidimensional a tridimensional a partir de un espesor total equivalente depositado de 1.1 monocapas atómicas de InSb. Los puntos cuánticos tienen en general, una buena calidad cristalina así como una distribución superficial homogénea, pero una alta anisotropía en las dimensiones entre las direcciones [110] y [1 $\bar{1}$ 0]. Así mismo, se encuentra una rugosidad superficial, también afectada de un alto grado de anisotropía, siendo las crestas y los valles paralelos a la dirección de elongación de las islas. Las imágenes de microscopía electrónica revelan un facetado de las estructuras según planos (001) que las limitan por la parte superior y planos {111}, {113} y {114}, que las limitan lateralmente. Las tensiones son eficazmente relajadas por la presencia de una red de dislocaciones situada en la interficie InSb/InP.

Palabras clave: puntos cuánticos, InSb, epitaxia.

Spontaneous organization of InSb quantum dots grown by ALMBE on InP substrates

Self-organized growth of InSb quantum dots on InP substrates by Atomic Layer Molecular Beam Epitaxy has been characterized by Transmission Electron Microscopy and Atomic Force Microscopy in order to study the morphology of the dots and assess their relaxation mechanism. High energy electron diffraction measurements during samples growth indicate a transition from 2D to 3D growth mode beyond a equivalent amount of 1.1 monolayers of InSb. Dots have, in general, a good crystalline quality as well as an homogeneous surface distribution, but a high anisotropy between [110] and [1 $\bar{1}$ 0] directions for dot dimensions. Moreover, a surface corrugation is found, also affected by a high anisotropy, being its valley and hillocks parallel to dots elongation direction. Electron microscopy images show that dots are faceted by (001) top planes and by {111}, {113} and {114} planes. Stress is effectively relaxed by a dislocation array placed at the InP/InSb interface.

Key words: quantum dots, InSb, epitaxy.

1. INTRODUCCION

Las heteroestructuras basadas en materiales tipo III-V han sido objeto de interés en años recientes. Particularmente, el InSb ha atraído la atención debido a su baja banda prohibida de energía que permite que sea utilizado como emisor o detector en el rango de las longitudes de onda del infrarrojo. El crecimiento de este material en sustratos de materiales con un parámetro de malla muy diferente puede inducir un crecimiento tridimensional que implica la formación espontánea de islas. Tales islas, bajo un control adecuado, pueden ser mantenidas en un rango nanométrico dando lugar a estructuras de dimensión cero sin la necesidad de llevar a cabo procesos tecnológicos suplementarios.

Aunque recientemente se han publicado algunos trabajos sobre el crecimiento de puntos cuánticos con materiales como el $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ y $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{P}$ sobre GaAs, InAs sobre InP, o InP sobre GaAs (1-5), no existe mucha bibliografía sobre el creci-

miento de nanoestructuras de InSb. Así pues, el objetivo del presente trabajo es extender los estudios de crecimiento autoorganizado de puntos cuánticos existente para otros materiales, al sistema InSb sobre InP, presentando los parámetros tecnológicos necesarios para obtener islas de calidad, salvando el inconveniente de la fuerte desadaptación entre los parámetros de malla de ambos materiales, que alcanza el 10.4%, e induce la formación de altas densidades de defectos.

2. DETALLES EXPERIMENTALES

Con el fin de obtener una superficie de buena calidad sobre la que depositar el InSb, previo al crecimiento de las islas, se depositó una cantidad equivalente a 500 monocapas de InP a 410°C sobre un sustrato semiaislante (001) del mismo material. Tanto la capa de InP como las islas de InSb se depositaron mediante epitaxia de haces moleculares (ALMBE), siendo el

flujo de moléculas del grupo V pulsado. Una cantidad equivalente a 5 y 7 monocapas atómicas fue depositada en dos muestras llamadas #5 y #7 respectivamente a una temperatura $T=410^{\circ}\text{C}$. Tras el depósito, se hizo un recocido de ambas muestras a 440°C durante un tiempo de 120 segundos.

Las muestras fueron preparadas para microscopía electrónica de transmisión (TEM) mediante pulido mecánico convencional, plano y cóncavo, y ataque iónico final de las muestras, mantenidas a baja temperatura, hasta la perforación. Las observaciones se llevaron a cabo en un microscopio electrónico Philips CM 30 operando a un potencial de 300 KV.

Las muestras fueron previamente examinadas mediante microscopía de fuerzas atómicas (AFM) a fin determinar el tamaño medio de las islas. Las imágenes de AFM fueron obtenidas por un Nanoscope III Multimode AFM Digital Instruments.

3. RESULTADOS

Las características morfológicas principales de los puntos cuánticos pueden deducirse de la imagen de AFM en la figura 1. En ella se presenta la superficie de la muestra #7, en la que se percibe una marcada anisotropía entre las direcciones $[110]$ y $[1\bar{1}0]$. Las islas aparecen alargadas en la dirección $[110]$, siendo la dimensión media en esta dirección, para las muestras #5 y #7, de 62 y 90 nm respectivamente, mientras que el tamaño medio de las islas medido en la dirección perpendicular, $[1\bar{1}0]$, es de 27 y 33 nm respectivamente. Estos valores están de acuerdo con los medidos en las imágenes de TEM a bajos aumentos. La densidad media de las islas es de $8.8 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ para la muestra #5, y de $5.5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ para la muestra #7. La altura del punto medio de la isla es de 14.5 y 18 nm para las muestras #5 y #7 respectivamente. Así, el tamaño medio de las islas aumenta con la cantidad de InSb depositado, mientras que la densidad desciende ligeramente.

Otro detalle que puede ser observado en la imagen de AFM es que en la superficie del sustrato se ha desarrollado una rugosidad que también tiene un alto grado de anisotropía. La orientación de los valles y las crestas es paralela a la dirección de alargamiento de las islas, $[110]$. Se podría pensar que tal rugosidad superficial es el resultado de las tensiones producidas al proceder con el depósito de InSb y que podría ser un mecanismo de acomodación que relaja una parte de las mencionadas tensiones, reduciendo, de esta forma, la energía superficial. Esta idea es confirmada si tenemos en cuenta que un gran número de las islas está situado en los valles de las ondulaciones.

Continuando con la morfología de los puntos cuánticos, las fotografías de TEM de la figura 2 evidencian que las islas crecen desarrollando un facetaje que las limita tanto por la parte superior mediante un plano (001), como lateralmente, en cuyo caso cabe distinguir entre las facetas que se observan si la dirección de observación es la $[110]$ (paralela al alargamiento de las islas) o si es la $[1\bar{1}0]$. En el primer caso las caras laterales son únicamente del tipo $\{111\}$, mientras que en el segundo, además de estas se pueden distinguir otras del tipo $\{113\}$ y $\{114\}$.

Para completar la caracterización estructural de las muestras, se llevaron a cabo observaciones en alta resolución, a fin de confirmar los índices de las facetas y determinar el mecanismo y estado de relajación de las estructuras. La figura 3 muestra un punto cuántico desde la dirección del alargamiento

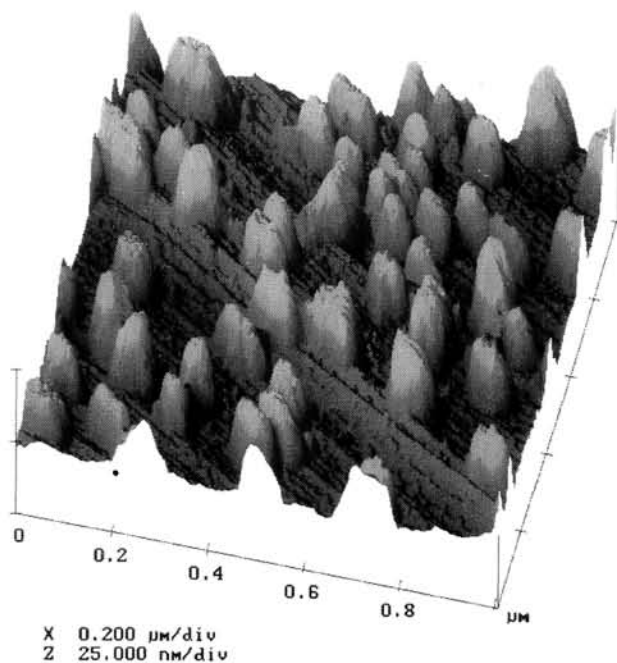


Fig.1. Imagen de AFM de la muestra #7. Nótese el alargamiento de los puntos cuánticos en la dirección $[110]$, y la presencia de una rugosidad superficial también anisotrópica.

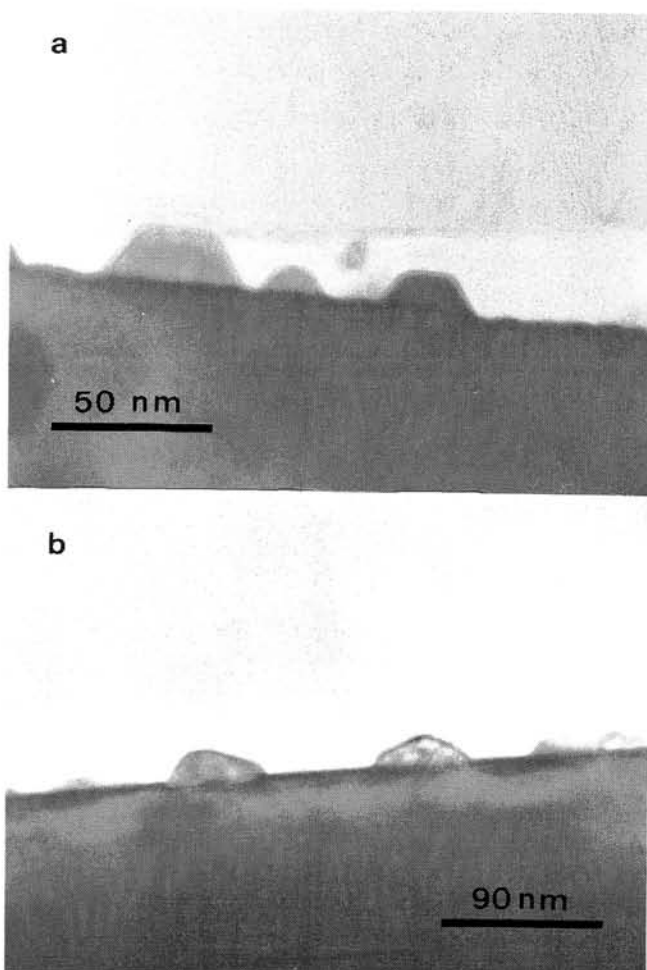


Fig.2. Imágenes de TEM de la muestra #7 desde las direcciones $[110]$ (a) y $[1\bar{1}0]$ (b). Obsérvese la presencia de algunos defectos en el interior de las islas y el facetado de estas según planos (001) por la parte superior y planos $\{111\}$, $\{113\}$ y $\{114\}$ laterales.

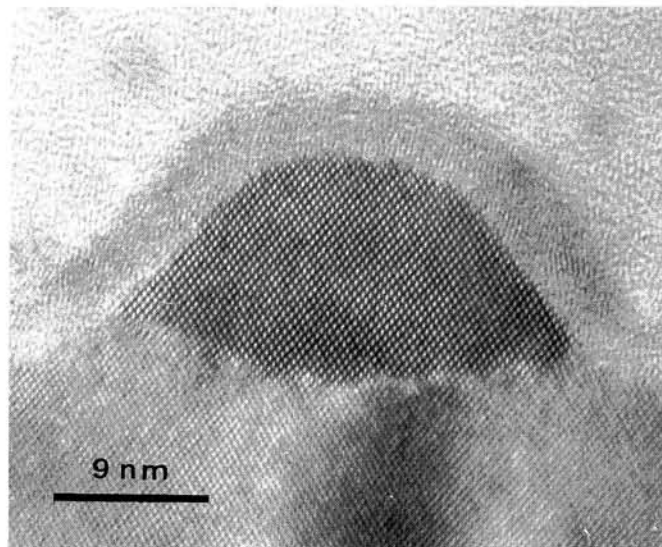


Fig.3. Imagen en alta resolución de una isla de la muestra #5 vista desde la dirección [110]. Se aprecia un conjunto de dislocaciones de desacuerdo situadas en la interficie que relajan la estructura.

to [110]. En ella se observa la presencia de una red de dislocaciones de desacuerdo situada en la interficie InSb/InP. La distancia media entre dislocaciones contiguas es aproximadamente 4.5 nm, valor muy próximo a aquel necesario para la completa relajación de las estructuras (4.4 nm). Se han propuesto varios mecanismos para explicar la nucleación de tales dislocaciones en islas tridimensionales (6). Recientemente, Chen et al. (7) han propuesto un mecanismo basado en la nucleación de una parcial de Frank en los bordes de la isla, seguida de la extensión de un defecto de apilamiento durante el crecimiento hasta la nucleación de una parcial de Shockley cuya interacción con la de Frank aniquilaría el defecto de apilamiento dando lugar a la dislocación de Lomer en la interficie. Este mecanismo explicaría también la presencia frecuente de defectos de apilamiento y micromaclas en las islas de materiales fuertemente tensionados, como es nuestro caso si se observa la figura 2.

Una última cuestión a abordar sería establecer si el crecimiento de las islas ha seguido un modo de Stransky-Krastanov (con una transición de crecimiento bidimensional a tridimensional) o un modo de Wolmer-Weeber (nucleación directa de las islas). En nuestro caso, las imágenes de TEM no revelan la presencia de una capa de InSb superficial, por lo que se podría esperar que el crecimiento a seguido el modo

de Wolmer-Weeber. Sin embargo el control de crecimiento mediante difracción de electrones de alta energía muestra una transición en el modo de crecimiento de bidimensional a tridimensional tras el depósito de 1.4 monocapas atómicas, por lo que podríamos atribuir la reorganización de los átomos de la capa superficial al recocido posterior al depósito de InSb.

4. CONCLUSIONES

En resumen, se han obtenido puntos cuánticos autoorganizados de InSb de buena calidad depositados mediante ALMBE sobre sustratos de InP altamente desadaptados, para las condiciones estudiadas. Se ha encontrado que, aunque la distribución en superficie y las dimensiones son homogéneas, la morfología está afectada por un alto grado de anisotropía, estando las islas alargadas en la dirección [110], y presentando la superficie una ondulación con los valles y crestas paralelos a la dirección de alargamiento de las islas.

Los puntos cuánticos se presentan facetados por planos (001) como cara superior, y por planos {111}, {113} y {114} lateralmente.

Las tensiones debidas a la gran diferencia de parámetro de malla entre las nanoestructuras y el sustrato son relajadas completamente mediante la generación de una red de dislocaciones de desacuerdo situada en la interficie InSb/InP. ♦

REFERENCIAS

1. J.M.Moisson, F.Houzay, F.Barthe, L.Leprince, E.André, and O.Vatel. «Self-organized growth of regular nanometer-scale InAs dots on GaAs» *Appl.Phys.Lett.* **64**, 196-198 (1994)
2. D.Leonard, M. Krishnamurthy, S.Fafard, J.L.Merz and P.M.Petroff. «Molecular-beam epitaxy growth of quantum dots from strained coherent uniform islands of InGaAs on GaAs» *J.Vac.Sci.Technol.* **B12**, 1063-1066 (1994)
3. A.Kurtenbach, C.Ulrich, N.Y.Jin-Phillipp, F.Noll, K.Eberl, K.Syassen and F.Phillipp, «Structural and optical characterization of InP/GaInP islands grown by solid source MBE» *J.Electr.Mat.* **25**, 395-400 (1996)
4. S.Fafard, Z.Wasileswski, J.McCaffrey, S.Raymond, and S.Charbonneau, «InAs self-assembled quantum dots on InP by molecular beam epitaxy» *Appl.Phys.Lett.* **68**, 991-993 (1996)
5. M.Sopanen, H.Lipsanen and J.Ahopelto, «Self-organized InP islands on (110) GaAs by metalorganic vapor phase epitaxy» *Appl.Phys.Lett.* **67**, 3768-3770 (1995)
6. C.J. Kiely, J.I. Chyi, A. Rockett and H.Morkoç, «On the microstructure and interfacial structure of InSb layers grown on GaAs (100) by molecular beam epitaxy» *Phil. Mag.* **A60**, 321-337 (1989).
7. Y. Chen, X.W. Lin, Z. Liliental-Weber, J. Washburn, J.F. Klem and J.Y. Tsao, «Dislocation formation mechanism, in strained $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ islands grown on GaAs (001) substrates» *Appl. Phys. Lett.* **68**, 111-113 (1996).