

Estudio de propiedades estructurales y electrónicas de GaSb:V

 R. Yaringaño^{*1} y R. Sonco²

¹ Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas. Lima, Perú

² Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de Ciencias. Lima, Perú

Recibido 16 Set 2021 – Aceptado 06 Nov 2021 – Publicado 07 Dic 2021

Resumen

El semiconductor binario antimoniuro de galio ha tenido muchas aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos en los últimos años. El estudio de sus defectos en los materiales semiconductores es de vital interés para este tipo de aplicaciones. Pero, además de la caracterización rutinaria del semiconductor sin dopar, es necesario la caracterización de los efectos que producen las impurezas eléctricamente activas en las muestras dopadas. En este trabajo se estudiaron las propiedades estructurales y electrónicas del semiconductor binario antimoniuro de galio dopado con vanadio (GaSb:V) por medio de un Microscopio de Fuerza Atómica. El barrido de su superficie se realizó en el modo *tapping* para obtener imágenes de la topografía y de los perfiles topográficos de la muestra, mientras las propiedades electrónicas se determinaron a través de las curvas I vs V conseguidas mediante el modo contacto.

Palabras clave: GaSb:V, Microscopio de Fuerza Atómica, Propiedades Electrónicas, Semiconductores III-V.

Study of structural and electronic properties of GaSb:V

Abstract

Gallium antimonide binary semiconductor has had many applications in optoelectronic devices in recent years. The study of their defects in semiconductor materials is of vital interest for this type of application. But, in addition to the routine characterization of the undoped semiconductor, it is necessary to characterize the effects produced by electrically active impurities in the doped samples. In this work, the structural and electronic properties of the vanadium doped gallium antimonide binary semiconductor (GaSb:V) were studied by means of an Atomic Force Microscope. The scan of its surface was carried out in the tapping mode to obtain images of the topography and topographic profiles of the sample, while the electronic properties were determined through the I vs V curves obtained by the contact mode.

Keywords: GaSb:V, Atomic Force Microscope, Electronic Properties, III-V Semiconductors.

Introducción

En la actualidad los materiales semiconductores anisotrópicos siguen contribuyendo al desarrollo de las telecomunicaciones por sus propiedades ópticas y electrónicas [1] [2] [3]. Entre ellos, el más investigado y utilizado es el silicio, pero debido al carácter indirecto de su banda de energía prohibida (*band gap*) [4] no es adecuado como fuente óptica, por lo que se están investigando combinaciones de elementos de los grupos II-VI y III-V cuyos valores de banda de energía prohibida directa se

encuentra entre 0,8 a 6,0 eV [5]. El semiconductor binario antimoniuro de galio ha demostrado ser un excelente material en la fabricación de soluciones sólidas de compuestos del tipo III-V, con valores de banda de energía prohibida entre 0,3 – 1,58 eV, cuya longitud de onda de la transición óptica varía entre 0,8 – 4,3 μm [6]. En particular, el semiconductor GaSb se ha empleado en la fabricación de detectores de láseres, dispositivos de alta frecuencia, sensores de radiación infrarroja, así como celdas solares, debido a su respuesta en un amplio rango de longitudes de onda en la región del infrarrojo [7]. La

* roxani.yaringano@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



región del infrarrojo medio es de gran interés para la investigación porque la realización práctica de dispositivos optoelectrónicos que operan en la región de longitud de onda de 2 a 5 μm brindaría aplicaciones potenciales en una amplia gama de áreas, incluida la detección óptica de gases y la supervisión ambiental, comunicaciones ópticas, contramedidas infrarrojas e imágenes térmicas [2]. Los defectos puntuales en los semiconductores del grupo III-V, desempeñan un papel muy importante, en el caso del GaSb, se conoce que la conductividad intrínseca tipo p del GaSb, está relacionada con los defectos puntuales [8] como vacancias de los átomos de Sb o la formación de soluciones sólidas complejas $V_{Ga}Ga_{Sb}$, con sus consecuencias en la red cristalina [9]. La conductividad tipo-p del GaSb [10] se atribuye a defectos de anti-sitio como vacantes de $Sb(V_{Sb})$, complejos $V_{Ga}Ga_{Sb}$ (vacancia de galio y galio en el sitio antimonio) y más probablemente galio en el sitio del $Sb(Ga_{Sb})$. Lo que resulta en un número mayor de aceptores (cargas positivas) que los donantes (cargas negativas) en una concentración de 10^{17} cm^{-3} .

Una razón por la cual los semiconductores binarios son tan útiles en dispositivos electrónicos es debido a sus propiedades eléctricas pueden cambiar significativamente con la incorporación de pequeñas cantidades de impurezas o con algún tipo de defectos [11]. El dopado de semiconductores del grupo III-V con elementos de transición, produce un incremento en los valores de resistencia eléctrica [12]. El estudio de los efectos de los átomos dopantes sobre la matriz de estos materiales es muy importante porque se puede determinar la formación de precipitados, así como el mecanismo de incorporación en la red puede ser sustitucional o intersticial [13]. Los principales átomos dopantes del GaSb son los pertenecientes al grupo II-A: Zn y Cd, que proporcionan cargas positivas; así también los átomos del grupo IV-A: S, Se y Te, que suministran cargas negativas. Además de los dopantes de los grupos II y VI, elementos como Al y As también se suelen utilizar, principalmente para ajustar y mantener la calidad estructural de la matriz y disminuir defectos nativos de anti-sitio [11].

Por otro lado, el microscopio de fuerza atómica es un instrumento mecano-óptico que forma imágenes de la topografía de la superficie utilizando una sonda o micropalanca, la cual explora la superficie línea por línea, es decir, barre la superficie en función de la posición generando posteriormente una imagen [14]. Esta técnica nos permite obtener imágenes topográficas en tres dimensiones, hacer mediciones del orden de los nanómetros, detectar fuerzas del orden de los nanonewtons, hacer mediciones de visco-elasticidad y dureza de la muestra, entre otras. Esta técnica es ampliamente utilizada en el análisis de nanomateriales, pues, a diferencia de un microscopio electrónico no se requiere trabajar en condiciones de vacío, la muestra a analizar no requiere una preparación sofisticada, así como tampoco es necesario que la mues-

tra a estudiar sea conductora o se encuentre recubierta, estas características amplían el rango de muestras que es posible analizar. Por tanto, se pueden llevar a cabo análisis sobre muestras sólidas, polvos, películas delgadas, muestras biológicas, etc.

En este trabajo se estudió la distribución no homogénea del dopante, V, formando microprecipitados en la superficie de la muestra. También se caracterizaron las propiedades electrónicas en regiones como la matriz de GaSb:V, y el microprecipitado, utilizando un Microscopio de Fuerza Atómica (AFM) en modo *tapping* y contacto, respectivamente [9].

Materiales y Métodos

Técnica de Síntesis Bridgman-Stockbarger Vertical. El semiconductor binario de antimonio de galio (GaSb) dopado con vanadio (V), fue crecido por la técnica Bridgman-Stockbarger vertical a partir de una solución líquida. Esta técnica es muy utilizada para crecer monocristales de semiconductores. El horno de síntesis se coloca en posición vertical, con la finalidad de facilitar la formación del monocristal del semiconductor. Brevemente, en un crisol de forma cilindro-cónica se llena de polvo de la sustancia a fundir, luego se desliza el crisol lentamente por el interior de un horno en donde se establecen dos zonas de temperaturas diferentes, una levemente por encima (T_1) y otra por debajo (T_2) del punto de fusión del compuesto, como se muestra en la Figura 1.

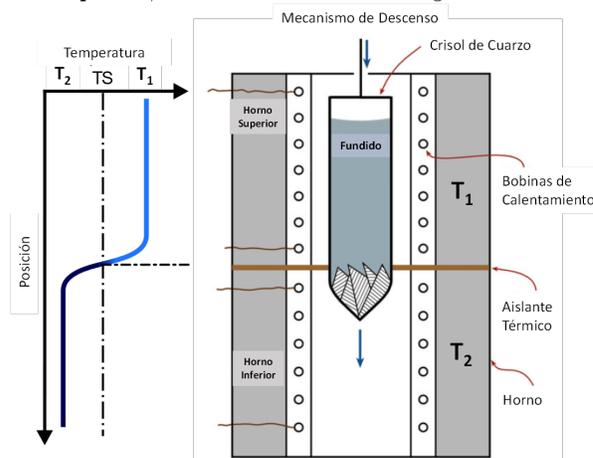


Figura 1: Esquema de la Técnica de Síntesis Bridgman-Stockbarger Vertical. Adaptado de la referencia [15].

La finalidad de esta configuración es crear un gradiente de temperatura entre ambas zonas. En la zona de mayor temperatura el polvo se funde para pasar luego muy lentamente a la segunda zona de menor temperatura de tal manera que el compuesto ya sintetizado se cristaliza muy lentamente (1 - 30 mm/h) al encontrarse por debajo de su temperatura de fusión, formándose un pequeño

monocristal del semiconductor en la punta del crisol [16]. El método Bridgman-Stockbarger se ha utilizado principalmente en el crecimiento de haluros alcalinos y haluros alcalinotérreos. Uno de los problemas asociados con el método Bridgman-Stockbarger ocurre si el cristal se expande al enfriarse (esto sucede en los cristales Si y Ge unidos covalentemente, como ocurre con el hielo). El crisol actúa como una restricción sobre el cristal en crecimiento, y la expansión generalmente conduce a grandes tensiones, que pueden resultar en la introducción de dislocaciones y fronteras de grano de bajo ángulo e incluso hacer que el crisol explote. Es difícil producir monocristales con densidades de dislocación $< 10^4 \text{ cm}^{-2}$ mediante esta técnica [15].

Los crisoles utilizados fueron ampollas de cuarzo selladas al vacío con un valor de presión de $133,3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$. Esta técnica de crecimiento no induce una orientación preferencial a lo largo del eje de crecimiento. El dopado se realizó agregando los metales respectivos a la masa fundida a nivel de $10^{17} \text{ átomos/cm}^3$. Durante el crecimiento surge un gradiente de la concentración del dopante a lo largo del cristal. Tras el crecimiento el semiconductor binario presenta un aspecto de lingote cilíndrico de 12 milímetros de diámetro y aproximadamente 10 mm de longitud. Los discos se cortaron perpendicularmente al eje de crecimiento en un lugar cercano al extremo del lingote de GaSb rico en precipitados de Vanadio [9].

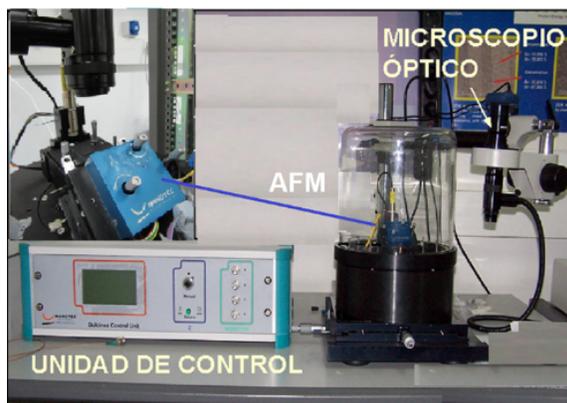


Figura 2: Equipo utilizado en este trabajo.

Fluorescencia de Rayos X. Los resultados obtenidos por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva, revelan un porcentaje atómico en los microprecipitados de 24% de Ga, 51% de Sb y 24% de V, mientras la matriz contiene una concentración del 48% de Ga frente al 51,78% de Sb [17], hecho que nos permitió determinar que los átomos de vanadio se ubican en los sitios de los átomos de Galio en el semiconductor binario. Estos resultados también nos demuestran que se ha sobrepasado el límite de solubilidad del vanadio en la matriz de antimonio de galio, por lo cual se han formado estos

microprecipitados [9].

Microscopio de Fuerzas Atómicas. El análisis de la muestra fue realizado con un Microscopio de Fuerza Atómica de la firma Nanotec Electrónica S.L Madrid, controlado mediante una unidad de alto voltaje, cuyo rango máximo de barrido es $15 \times 15 \mu\text{m}^2$. La fuente de excitación utilizada fue un láser de fibra (Schäfter + Kirchhoff, Alemania) cuya longitud de onda de emisión es 633 nm. Se utilizó el programa WSxM [18], el cual permite controlar los parámetros relacionados con la adquisición de las imágenes en tiempo real, así como la visualización de la imagen también en tiempo real. El sistema de microscopio óptico de la firma Nanotec Electrónica, brinda la posibilidad de monitorear fácilmente la posición del *cantilever* sobre la muestra. La combinación de lentes del microscopio óptico junto con el detector CCD permitió observar el movimiento del *cantilever* sobre la muestra en tiempo real en la pantalla de la computadora simultáneamente con la imagen adquirida. La figura 2 muestra el equipo utilizado en el presente trabajo [9].

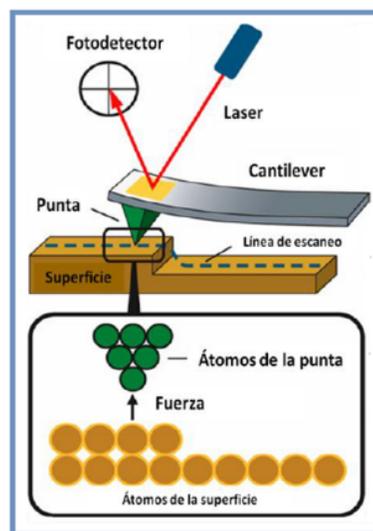


Figura 3: Esquema del funcionamiento del microscopio de Fuerza Atómica.

Un microscopio de fuerza atómica consiste básicamente de una sonda (en la cual una punta se encuentra en el extremo de un *cantilever*), un sistema de detección (láser y fotodiodo), un sistema de movimiento (cerámicas piezoeléctricas), y un sistema de control (software y hardware). La sonda se aproxima a la superficie de la muestra ocurriendo una interacción electrostática. Esta fuerza electrostática es sensada por la punta y transmitidas al *cantiléver*, de manera que responde a la fuerza ejercida sobre él, deformándose [19]. Entonces, si la fuerza de interacción aumenta, la amplitud de oscilación dis-

minuye [9]. La figura 3 muestra el esquema del proceso de barrido en un microscopio de fuerza atómica.

Para determinar esta microdeformación se utiliza un sistema de detección compuesto por un haz de láser, que incide sobre el *cantilever*, y por el fotodiodo, que recoge la señal del haz de láser reflejado del *cantilever*. La señal recopilada es monitoreada por el sistema de control que controla el proceso de barrido. El sistema de movimiento, formado por cerámicas piezoeléctricas, es utilizado para posicionar la punta del *cantilever* en relación con la superficie de la muestra. Estos cambios en la distancia dan lugar a la construcción de una imagen topográfica de la superficie.

Uno de los métodos de funcionamiento del AFM es el modo *tapping* o contacto intermitente, donde el *cantilever* oscila casi a su frecuencia de resonancia. La amplitud de oscilación de la sonda se mantiene constante por el sistema de retroalimentación y monitoreada por el fotodetector. Durante el proceso de exploración, la punta oscila sobre la superficie de la muestra llegando a tocarla muy sutilmente. Entonces, si la fuerza de interacción aumenta, la amplitud de oscilación disminuye. La figura 4 ilustra el funcionamiento del AFM en el modo *tapping* [20].

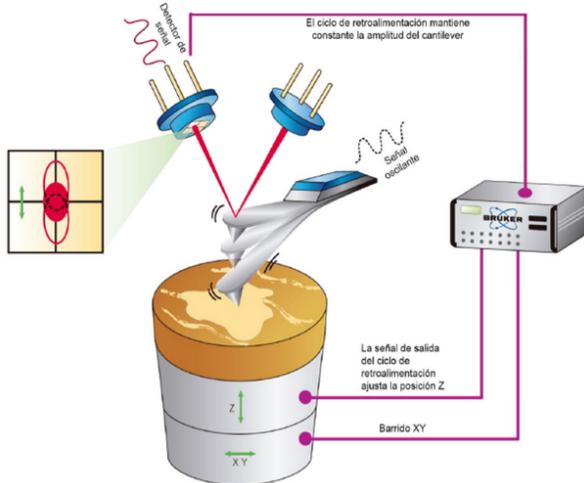


Figura 4: AFM en modo intermitente (*Tapping*).

Para la obtención de las imágenes se trabajó en el modo *Tapping* sobre áreas de $1,5 \mu\text{m} \times 1,5 \mu\text{m}$ para observar la morfología de la muestra. Además, se utilizaron *cantilevers* de silicio recubiertos con oro, presentando una frecuencia de resonancia de 275 kHz, y constante elástica $k = 0,2 \text{ N/m}$, la frecuencia de barrido fue realizado a un valor igual a 0,98 Hz [9].

Resultados y Discusión

La figura 5 ilustra la morfología de la superficie. Para generar las imágenes, el programa WSxM asocia una escala de color con cada valor de z (altura), convirtiendo los datos sin procesar en una matriz de puntos, donde las

regiones más altas se representan con tonos más claros, y las regiones más bajas están representadas con tonos más oscuros, como se muestran en la escala de colores en la Figura 5. La topografía de la superficie de la matriz presenta diferentes tamaños de grano, los cuales están delimitados por fronteras de grano bien definidas, además se visualiza diferentes matices de color, este hecho puede ser un indicativo que existan procesos de precipitación subyacentes.

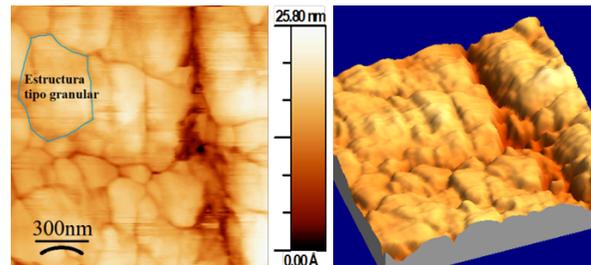


Figura 5: Imagen de topografía de $1,5 \mu\text{m} \times 1,5 \mu\text{m}$ de una región de la muestra de GaSb:V, junto a su correspondiente imagen tridimensional (derecha).

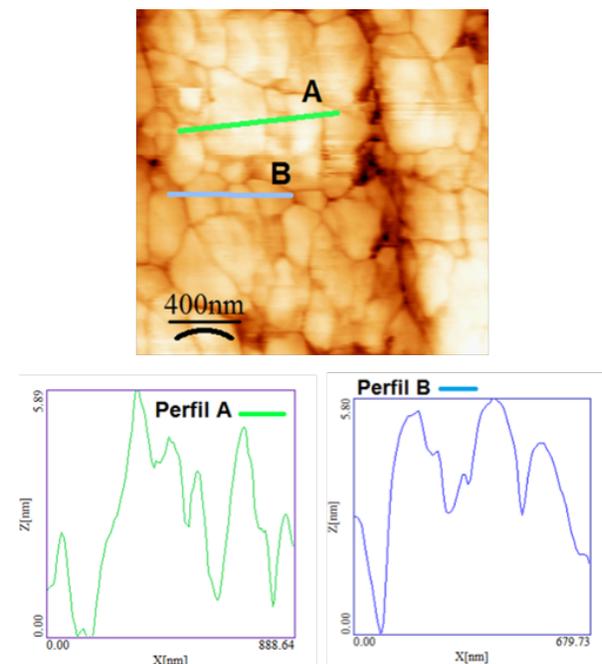


Figura 6: Barridos lineales denotados por las rectas A y B. Obsérvese la diferencia de tamaños de granos en la superficie de la matriz de GaSb:V

El barrido lineal permite obtener información relevante sobre los perfiles topográficos de la superficie de la matriz, como se observa en la Figura 6, donde comparamos los barridos lineales denotados por las rectas A y B, donde se aprecia tamaños de granos de diferentes dimensiones.

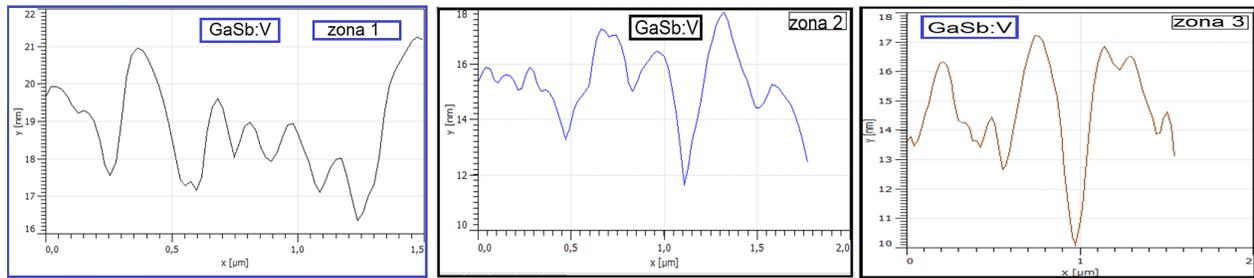


Figura 7: Tres barridos lineales en tres zonas, observándose diferentes perfiles de la superficie de la matriz.

Por otro lado, trabajando la imagen de la figura 6 con el programa WSxM se obtuvo la información cuantitativa sustancial sobre los valores del tamaño y altura de los granos de la matriz de GaSb:V. Por un lado, del barrido lineal A, se determinó que estos granos poseen un espesor promedio aproximado de 348,3 nm, una altura media de 4,1 nm y una altura máxima de 5,8 nm. Además, del perfil B se resolvió que los granos poseen un espesor promedio aproximado a 236,5 nm, una altura media de 3,8 nm y una altura máxima de 5,5 nm [9]. Así mismo, se realizó el análisis estadístico del tamaño del grano utilizando el software Gwyddion para diferentes zonas de la muestra. En la figura 7 se muestran tres zonas seleccionadas, obteniéndose para la zona 1 el valor promedio del diámetro de grano 1,07 μm , y un error de 0,23 μm . Para la zona 2 el valor promedio del diámetro

de grano es 1,01 μm y un error de 0,24 μm , mientras que para la zona 3 el valor promedio conseguido del diámetro de grano es 0,71 μm y un error de 0,15 μm . Adicionalmente, se explota el potencial de programa WSxM para analizar cada una de las imágenes para obtenerse los histogramas de la distribución de las áreas de los microprecipitados sobre la matriz de la muestra a partir de imágenes seleccionadas que se presentan en la figura 8. En las imágenes se muestran los precipitados como zonas brillantes, exhibiendo una distribución de tamaños de área que van desde 0,10 μm^2 hasta 2,10 μm^2 en la figura 8b, mientras en la figura 8d de 1,40e5 μm^2 hasta 2,40e5 μm^2 , y en la figura 8f de 2,40e5 μm^2 hasta 8,50e5 μm^2 .

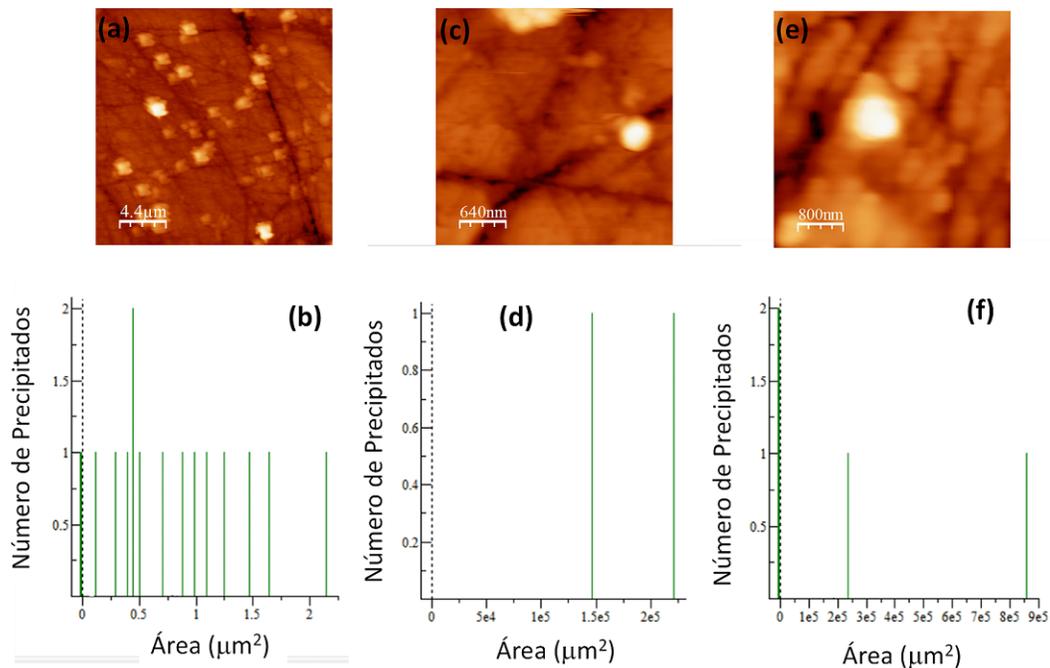


Figura 8: Histogramas de la distribución de los precipitados sobre la matriz de la muestra. Su correspondiente imagen se presenta en la fila superior.

Cabe señalar que uno de los objetivos del trabajo fue encontrar y caracterizar microprecipitados sobre la topografía de la matriz de GaSb:V, para ello ha sido necesario invertir una cantidad significativa de tiempo realizando series y series de imágenes, comparando las imágenes de topografía con su respectiva imagen de fase, para finalmente lograr encontrar imágenes que demostraban la existencia de dichos microprecipitados. Utilizando el software WSxM se determinó que los precipitados presentan valores de espesor que van desde 128 nm a 692 nm, obteniéndose un valor medio aproximado de 449 nm, una altura desde 21 nm hasta 107 nm, el valor promedio de la altura es 60 nm. La Figura 7 ilustra la imagen de la topografía y de fase de estas inclusiones de tamaño micrométrico. Las imágenes fueron adquiridas sobre regiones de $6,5 \mu\text{m} \times 6,5 \mu\text{m}$ [9].

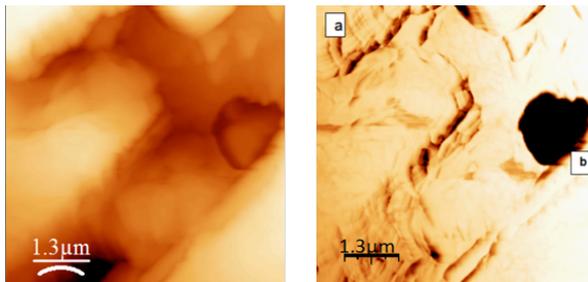


Figura 9: Imágenes de topografía (derecha), y de fase (izquierda). La zona denotada con (a) es la de la matriz de GaSb:V, mientras la zona (b) indica la presencia de un microprecipitado.

Debemos mencionar que ambas señales, de topografía y de fase, dependen de diversos parámetros experimentales, esta diferencia radica en un mayor o menor grado de sensibilidad frente a la variación de cada uno de ellos, es decir, que la señal de fase es más sensible a la variación en la composición de la superficie con respecto a la señal de topografía. Por tanto, la Figura 9 nos permite claramente discernir las imágenes provenientes de la matriz de GaSb:V, o del microprecipitado. Así mismo, la distribución de los microprecipitados no es uniforme en toda la superficie de la muestra. Por medio de la microscopía electrónica de barrido [13] ha sido posible determinar que existen regiones en donde se concentran en mayor número. Una posible explicación de este hecho es debido que durante el crecimiento de la solución sólida existen procesos de convección que llevarían a los microprecipitados a concentrarse en ciertas regiones de la superficie de la muestra [9].

Entonces, una vez localizado el microprecipitado se procedió a la caracterización de sus propiedades electrónicas. Para tal fin, primero se detuvo el sistema de barrido, posteriormente la punta se aproximó a la muestra hasta hacer contacto con su superficie. Luego, se cambió a la configuración donde se permitía el paso de una nanoco-

riente (I) sensando la caída de potencial (V), de esta manera se obtuvieron las curvas I vs V para la matriz en la región (a) como para el microprecipitado en la región (b) de la Figura 9. La Figura 10 muestra las curvas de I vs V para la matriz de GaSb:V y el microprecipitado, respectivamente [9].

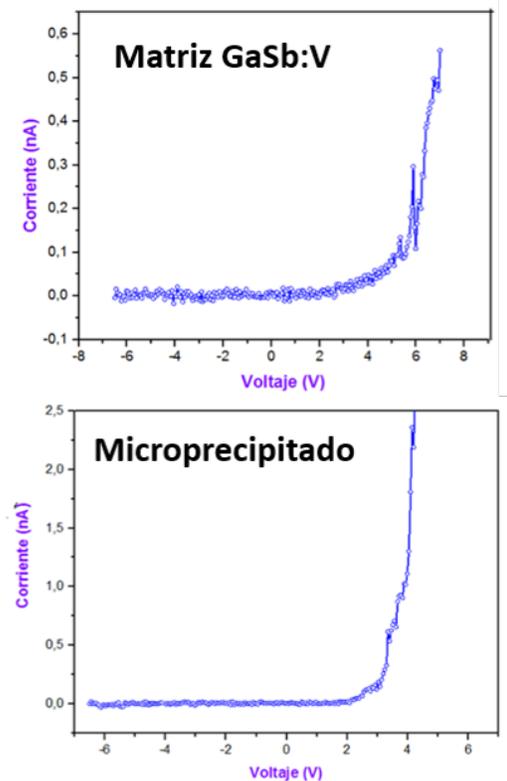


Figura 10: Curvas I vs V de la matriz, y del microprecipitado.

El comportamiento observado en las curvas de I vs V nos proporciona una valiosa información sobre las propiedades electrónicas del microprecipitado, el cual presenta un comportamiento más conductivo con respecto a la matriz, esto es debido que a $V = 3,018$ voltios se produce un cambio brusco en la conductividad, mientras en la matriz su comportamiento es menos conductivo, como consecuencia, a partir de $V = 5,445$ voltios empieza ser conductora [9]. Por lo tanto, el microprecipitado posee una mayor presencia de electrones libres que la matriz semiconductor dopada de GaSb:V, debido a una mayor presencia de portadores de carga debido a los átomos metálicos de vanadio en el microprecipitado, por ello la diferencia en los valores de conductividad. Este resultado está soportado por los estudios realizados por Hidalgo [17], que mediante espectroscopía de catodoluminiscencia mostraron una baja eficiencia en la incorporación

de Vanadio en la matriz de GaSb, en donde sus imágenes presentaron claramente las inclusiones de Vanadio en el cristal, además el resultado que obtuvieron del microanálisis de esas regiones por fluorescencia de rayos X por energía dispersiva mostraron que estas inclusiones son áreas ricas en vanadio, y en menor medida, ricas en antimonio, lo que indica que corresponden a precipitados con vanadio como componente principal [9].

Conclusiones

En las imágenes de topografía obtenidas en diferentes aéreas del semiconductor binario dopado de GaSb:V se observa en la superficie una estructura compuesta por granos, los cuales están bien delimitados por fronteras de granos. Así mismo, se visualiza diferentes coloraciones, el cual es indicativo que existen procesos de precipitación. Ha sido posible cuantificar los valores de espesor y altura de los granos a través de barridos lineales, donde los granos poseen un espesor promedio entre 236,5 nm a 348,3 nm, una altura promedio entre 3,8 nm a 4,1 nm y una altura máxima entre 5,5 nm a 5,8 nm.

Explotando la configuración del AFM con el barrido en topografía y en fase, nos ha permitido discernir claramente las imágenes del microprecipitado y la matriz de

GaSb:V. Por otro lado, cambiando a la configuración de contacto del *cantilever*, se obtuvieron las curvas I vs V, los valores obtenidos nos permiten concluir que los microprecipitados presentan una mayor conductividad con respecto a la matriz de GaSb:V, debido a una mayor presencia de átomos de Vanadio en el microprecipitado, convirtiéndolo en una impureza eléctricamente activa. Finalmente, se ha demostrado que el AFM es un equipo versátil en la caracterización tanto estructural y electrónica de la superficie de la matriz semiconductor dopada y los microprecipitados en la muestra.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Javier Piqueras, jefe del Grupo de Investigación de Física de Nanomateriales Electrónicos de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid, por brindarme todos los recursos y equipos que fueron necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación, así como por la confianza brindada al aceptarme que realizara mi estancia en su laboratorio; asimismo al Dr. Pedro Hidalgo por el apoyo recibido.

Referencias

- [1] F. Giannazzo, E. Schilirò, G. Greco and F. Roccaforte. Conductive Atomic Force Microscopy of Semiconducting Transition Metal Dichalcogenides and Heterostructures. *Nanomaterials* **10**, 803 (2020). <https://doi.org/10.3390/nano10040803>
- [2] S. Niu, Z. Wei, X. Fang, D. Wang, X. Wang, X. Gao and R. Chen. Brief Review of Epitaxy and Emission Properties of GaSb and Related Semiconductors. *Crystals* **7**, 337 (2017). <https://doi.org/10.3390/cryst7110337>
- [3] D. Wua, X. Lia, L. Luana, X. Wua, W. Lib, M. Yogeeshb, R. Ghoshb, Z. Chua, D. Akinwandeb, Q. Niua and K. Laia. Uncovering edge states and electrical inhomogeneity in MoS₂ field-effect transistors. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **113**, 8583 (2016). <https://doi.org/10.1073/pnas.1605982113>
- [4] L. Yuan, H. Deng, S. Li, S. Wei and J. Luo. Unified theory of direct or indirect band-gap nature of conventional semiconductors. *Phys. Rev. B* **98**, 245203 (2018). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.245203>
- [5] A. Beltrán. Efecto de la incorporación de Antimonio sobre la nanoestructura de Puntos Cuánticos III-V/III-V (Tesis de Doctorado). Universidad de Cádiz, España (2009). <https://rodin.uca.es/xmlui/bitstream/handle/10498/18000/AnaMBeltran-Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [6] J. Calderón. Estudio de las Propiedades Ópticas y Eléctricas del Compuesto Ga_{1-x}MnxSb usado para Aplicaciones en Espintrónica (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia (2016).
- [7] F. Benyettou, A. Aissat1, M. Benammar and J. Vilcot. Modeling and simulation of GaSb/GaAs quantum dot for solar cell. *Energy Procedia* **74**, 139, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.535>
- [8] J. Kujala, N. Segercrantz, F. Tuomisto and J. Slotte. Native point defects in GaSb. *J. of Appl. Phys.* **116**, 143508, (2014). <https://doi.org/10.1063/1.4898082>
- [9] R. Yaringaño. Estudio mediante Microscopia de Fuerza Atómica Conductivo de capas delgadas de GaSb dopado con Vanadio. (Tesis de Maestría).

- Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú (2020). https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/15458/Yaringano_lr.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] V. Virkkala, V. Havu, F. Tuomisto and M. Puska. Native point defect energetics in GaSb: Enabling p-type conductivity of undoped GaSb. *Phys. Rev. B* **86**, 144101 (2012). <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.86.144101>
- [11] A. Goyal, P. Gorai, S. Anand, E. Toberer, G. Snyder and V. Stevanović. On the Dopability of Semiconductors and Governing Material Properties. *Chem. Mater.* **32**, 4467 (2020). <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.9b05126>
- [12] B. Clerjaud. Transition-metal impurities in III-V compounds. *J. Phys. C: Solid State Phys.* **18**, 3615 (1985). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0022-3719/18/19/005>
- [13] P. Hidalgo. Estudio correlativo de propiedades electrónicas locales de GaSb mediante Microscopías Electrónica y Túnel de Barrido. (Tesis de Doctorado). Universidad Complutense, Madrid, España. (2005). <https://eprints.ucm.es/7285/1/T24894.pdf>
- [14] O. Sahin, S. Magonov, C. Su, C. Quate and O. Solgaard. An atomic force microscope tip designed to measure time-varying nanomechanical forces. *Nature Nanotech* **2**, 507, (2007). <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.226>
- [15] Growing Single Crystals. In *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Carter, C., and Norton, M. (eds) Springer Science+Business Media New York. (2013). https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3523-5_29
- [16] Bridgman–Stockbarger technique. Dictionary of Gems and Gemology. In Manutchehr-Danai M. (eds) Springer, Heidelberg, Berlin. (2009). https://doi.org/10.1007/978-3-540-72816-0_2926
- [17] P. Hidalgo, B. Méndez, P. Dutta, J. Piqueiras and E. Dieguez. Luminescence properties of transition-metal-doped GaSb. *Physical Review B* **57**, 6479. (1998). <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.57.6479>
- [18] I. Horcas, R. Fernández, J. Gómez-Rodríguez, J. Colchero, J. Gómez-Herrero and A. Baro. WSXM: A software for scanning probe microscopy and a tool for nanotechnology. *Rev Sci Instrum.* **78**, 013705. (2007). <https://doi.org/10.1063/1.2432410>
- [19] D. Fernandes. Microscopia de força atômica in-situ de superfícies de membranas poliméricas de naftion com nanopartículas de sílica incorporadas. (Tesis de maestría). Universidade Federal de Viçosa. Brasil (2008). <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/4229>
- [20] Bruker Corporation Tapping Mode AFM. (2011). <https://blog.brukerafmprobes.com/guide-to-spm-and-afm-modes/tapping-mode-afm/>