



Universidad de Valladolid

Facultad de Ciencias

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Física

Estudio de la interacción luz/nanohilos semiconductores

Autor:

Celia García Montoya

Tutores:

Jose Luis Pura Ruiz

Juan Jiménez López

Ángel Carmelo Prieto Colorado

Índice

Índice de figuras.....	3
Objetivo	4
Resumen	5
Abstract.....	7
1. Introducción teórica. Estado del Arte	8
1.1. Nanohilos semiconductores	9
1.2. Crecimiento de NWs	11
1.3. Espectroscopía Raman	14
2. Método experimental	18
2.1. Equipamiento.....	18
2.2. Preparación de las muestras.....	21
2.3. Adquisición de espectros	21
3. Resultados	25
3.1. Grupo 1: intensidad constante	27
3.2. Grupo 2: reducción de la intensidad.....	28
3.3. Grupo 3: aumento de la intensidad	30
3.4. Comparativa.....	31
4. Conclusiones. Trabajo futuro	33
4.1. Conclusiones	33
4.2. Trabajo futuro	34
Bibliografía.....	35

Índice de figuras

Figura 1. Esquema general del proceso de selección de NWs favorables para caracterizar localmente superficies. Este esquema incluye el estudio realizado para los NWs de GaAs sobre Si para este trabajo.....	6
Figura 2 Figura del crecimiento VLS de NWs: a) sustrato cubierto con el catalizador, b) los precursores entran en las gotas de catalizador, d) saturación y precipitado, c) NW crecido. [13].....	12
Figura 3 Crecimiento de NW por litografía. A la izquierda vemos el patrón sobre el material y a la derecha los NWs una vez se retira el material sobrante. [17]]...	13
Figura 4 Espectro Raman.....	16
3. Figura 5 Esquema de un espectrómetro Raman [18]	18
Figura 6 Espectrómetro Raman y microscopio utilizados en este trabajo.....	19
Figura 7 Izquierda: El microscopio electrónico que se ha utilizado. Derecha: Imagen tomada con el SEM de una acumulación de NW de GaAs sobre sustrato de Si.	20
Figura 8 Espectro de Si medido el 11/06/2019, imagen obtenida del programa LabSP402. El eje horizontal corresponde al desplazamiento Raman (cm^{-1}) y el vertical a la intensidad.	22
Figura 9 Medida transversal al NWs de GaAs sobre sustrato de Silicio. El haz laser (en verde) sigue la línea de puntos tomando medidas en cada uno de ellos.....	23
Figura 10 Espectro del NW3 colocado sobre sustrato de Silicio.....	26
Figura 11 S NW3 en el microscopio acoplado al Raman a la izquierda y una imagen SEM a la derecha.	27
Figura 12 Variación de la intensidad de la señal de Si (rojo) en función de la distancia de la medida al NW de GaAs (azul) que se encuentra localizado en $0\mu\text{m}$, en un barrido transversal del NW3.	27
Figura 13 NW4 un el microscopio acoplado al Raman a la izquierda, a la derecha imagen SEM del mismo NW.....	28
Figura 14 Variación de la intensidad del pico de Si (rojo) en función de la intensidad y distancia de la medida al NW de GaAs (azul) en el barrido transversal del NW4.	29
Figura 15 A la izquierda imagen del NW7 en el microscopio acoplado al Raman, a la derecha imagen SEM del mismo NW.....	30
Figura 16 Variación de la intensidad del pico de Si (rojo) en función de la intensidad y distancia de la medida al NW de GaAs (azul) en un barrido transversal del NW7.	30
Figura 17. Tabla con los datos obtenidos para cada uno de los NWs analizados, en la primera columna tenemos el nombre del NW, tras esta viene el diámetro (nm) y su error. Las dos últimas columnas corresponden a las intensidades normalizadas del NW y el sustrato frente a la intensidad lejos del hilo en el sustrato. Los NWs están ordenados según su comportamiento: reducción, constante y aumento	31
Figura 18 Comparativa entre los resultados obtenidos para la intensidad Raman en el sustrato de Si y el modelo teórico.....	32

Objetivo

El objetivo es estudiar, la viabilidad y el posible beneficio, del uso de nanohilos semiconductores para la **caracterización local de superficies** mediante espectroscopía Raman.

En este trabajo se van a examinar las propiedades ópticas de un sustrato de Silicio en presencia de nanohilos de GaAs, mediante espectroscopía Raman, vamos a estudiar la dependencia con el diámetro de los nanohilos, en función de las resonancias ópticas de las estructuras con dimensiones inferiores a la longitud de onda, en este caso, el diámetro de los nanohilos.

Resumen

A mediados del siglo pasado empezó el interés sobre las propiedades de las estructuras con dimensión nanométrica —al menos una de las dimensiones estudiadas se encuentra entre 1 y 100 nanómetros— en este orden de magnitud, se observan cambios substanciales en las propiedades físicas de la materia, y más en concreto de los semiconductores. A partir de las técnicas de crecimiento que se han ido desarrollando se pueden conseguir objetos de dimensión nanométrica con formas diversas, esto abre la puerta al desarrollo de nanodispositivos con nuevas funcionalidades.

Uno de los cuellos de botella para el estudio de las propiedades ópticas a escala nanométrica, es la resolución espacial de la microscopía óptica, limitada inferiormente por la difracción a dimensiones del orden de la longitud de onda. Sabiendo que las nanoestructuras se comportan como antenas ópticas, vamos a explorar como podemos utilizar nanohilos depositados sobre una superficie para estudiar dicha superficie, mediante un microscopio óptico, alcanzando resoluciones por debajo del límite de difracción.

En este trabajo utilizamos nanohilos (NWs) de GaAs sobre un sustrato de Si. La interacción luz/NW presenta una serie de resonancias de diámetro y longitud de onda que provocan la amplificación del campo eléctrico en los NWs superando el obstáculo del límite de difracción. Esto nos permite observar la resonancia de la señal Raman del Si en presencia del nanohilo de GaAs. La espectroscopia Raman es una herramienta útil en este caso ya que nos proporciona tanto el valor del desplazamiento Raman, que nos permite conocer el material que estamos estudiando así como la intensidad Raman que es proporcional al cuadrado del campo electromagnético y, por consiguiente, nos aportará información sobre la distribución del mismo, facilitándonos una imagen de la superficie —que no podríamos haber obtenido sin la amplificación causada por el nanohilo—, más en concreto, se observa cómo actúa la presencia del nanohilo sobre el campo electromagnético en el sustrato.

Para este estudio, se ha medido la respuesta del sustrato de Si frente a la excitación con un haz láser en presencia de NWs de GaAs de diferentes diámetros. Los resultados obtenidos muestran que la distribución del campo electromagnético sobre el sustrato de Si depende del diámetro de los NWs; la intensidad puede verse aumentada, reducida o mantenerse invariante con respecto a la respuesta del Si en ausencia de NWs. La variación que se observa en la intensidad del sustrato nos proporcionará información acerca de la interacción entre el haz láser y el sistema NW/Substrato gracias a la proporcionalidad existente entre la intensidad y el cuadrado del campo electromagnético.

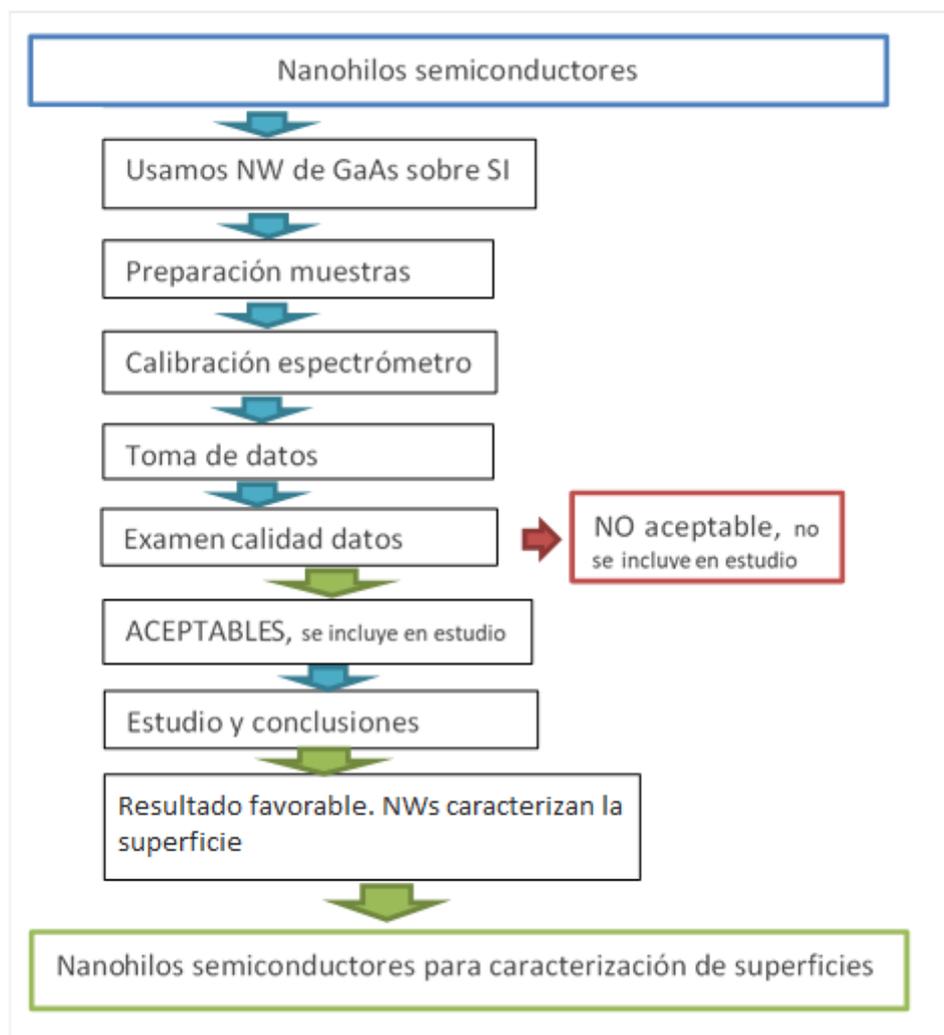


Figura 1. Esquema general del proceso de selección de NWs favorables para caracterizar localmente superficies. Este esquema incluye el estudio realizado para los NWs de GaAs sobre Si para este trabajo.

Abstract

In the second half of last century, the properties of the structures with nanometric dimensions began to gain interest. At this scale, changes are observed in the physical properties of matter. Thanks to the recent development of growth techniques it is possible to obtain objects of nanometric dimension with different shapes, opening the door to the development of nanodevices with new functionalities.

One of the key points for the study of the optical properties at nanometer scale is the spectral resolution of optical microscopy, which is limited by diffraction to dimensions similar to the light wavelength. In this work we use GaAs nanowires (NWs) on a Si substrate and observe the resonance of the Raman signal of Si in presence of the GaAs nanowire, reaching resolutions below the diffraction limit. Raman spectroscopy is a useful technique since the Raman intensity is proportional to the square of the electromagnetic field, therefore, it will provide us with information on its distribution, more specifically on how the presence of the nanowire interferes with the electromagnetic field in the substrate.

For this study, the response of a Si substrate to excitation with a laser beam in presence or not of a GaAs NW has been explored. The obtained results show that the distribution of the electromagnetic field on the Si substrate depends on the diameter of the NWs; the intensity can be increased, reduced or remain invariant with respect to the Si response in the absence of NWs. The variation observed in the intensity of the substrate will provide us with information about the interaction between the laser beam and the NW / Substrate system thanks to the proportionality between the intensity and the square of the electromagnetic field.

1. Introducción teórica. Estado del Arte

Los semiconductores son materiales cuya conductividad eléctrica se encuentra entre los aislantes y los conductores. En este tipo de materiales la banda de valencia está llena pero su gap es relativamente pequeño, es decir, no se requiere de una energía muy alta para colocar electrones en la banda de conducción. Es posible controlar la cantidad de electrones en la banda de conducción con métodos como: dopaje, campo eléctrico externo, iluminación, etc. Además, la variación de estos parámetros permite cambiar también el estado de conducción. La banda de energía prohibida puede llegar hasta aproximadamente los 6 eV (AlN), a partir de esta energía el material será considerado un aislante. Las longitudes de onda asociadas van desde el IR al UV si bien es cierto que los semiconductores más comunes no sobrepasan el azul.

Existen semiconductores simples, como el Si y el Ge, y compuestos como el GaAs, InP, o GaP. Dependiendo de las características del semiconductor sus aplicaciones se centran esencialmente en la electrónica y la optoelectrónica como puede ser la fabricación de LEDs o láseres. Una de las grandes ventajas del uso de semiconductores radica en la capacidad que tenemos de modificar propiedades como la energía de la banda prohibida controlando la composición.

Existe un gran interés por el estudio de los semiconductores en baja dimensión debido a sus propiedades únicas que permitirán desarrollar dispositivos con nuevas funcionalidades; en particular, los NWs semiconductores se postulan como uno de los elementos básicos para la construcción de los futuros nanodispositivos optoelectrónicos.

1.1. Nanohilos semiconductores

Los nanohilos (NWs) son estructuras cuasi-unidimensionales (1D), cuyos diámetros varían entre unos pocos nanómetros y cientos de ellos, su longitud, sin embargo, puede llegar a ser algunos órdenes de magnitud superior, presentando una elevada relación de aspecto.

Como consecuencia de la baja dimensionalidad de su diámetro, en ocasiones menor que ciertas longitudes de onda, estas estructuras presentan complejas interacciones con la luz, resultando en propiedades ópticas singulares [1] [2], como puede ser la existencia de resonancias y efectos de confinamiento. Algunas de las principales propiedades de los NWs [3], [4] son:

- **Confinamiento.** Si el diámetro es suficientemente pequeño las propiedades de ciertas partículas se ven modificadas debido a los efectos cuánticos.
- **Efectos magnéticos.** En este tipo de sólidos los efectos de borde son mucho más pronunciados que en los volúmenes, pudiendo llegar a cambiar por completo sus propiedades magnéticas.
- **Estabilidad mecánica y térmica.** El pequeño tamaño de estos sistemas les dota de gran rigidez y resistencia además de hacer que disminuya su temperatura de fusión, son sistemas ideales para conversión termoeléctrica.
- **Cavidades ópticas resonantes.** Láseres. Los NWs se pueden ser utilizados para producir luz coherente en nanoescala [5] [6]
- **Fotoconductividad.** Cuando exponemos un NW a fotones con energías mayores que las de su gap se induce conductividad eléctrica, esto les hace útiles como sensores de radiación.

Una gran ventaja que se deriva de utilizar NWs, es la capacidad que tenemos de modificar características como su diámetro, longitud o concentración, diseñando la estructura según nuestras necesidades. De la misma forma, encontramos como desventaja la difícil manipulación, debido precisamente al tamaño del material. Cabe destacar el control sobre el gap o banda de energía prohibida del que disponemos en

este tipo de estructuras, que vendrá determinado por la composición del semiconductor.

Estas características hacen a los NWs excelentes candidatos para numerosas aplicaciones que van desde la electrónica o la nanofotónica [7], a las células solares, los nanoLEDs, baterías recargables [8], o los biosensores, entre otros. Vamos a examinar algunas de estas aplicaciones en mayor profundidad.

Sensores ópticos. Hasta ahora no son muchos los sensores de este tipo creados mediante el uso de NWs semiconductores, sin embargo, la capacidad de estos para actuar como guías de ondas nanométricas por a su geometría, podrían aportar grandes beneficios como un menor tiempo de respuesta, menor interferencia con el campo electromagnético y mayor sensibilidad [9] [10].

En nanoelectrónica la reducción del tamaño de los transistores presenta el gran problema de la disipación de potencia. Para intentar solucionar esto, los NWs podrían ser clave debido a la posibilidad de diseñar el circuito acorde a las necesidades o la capacidad de controlar los portadores de carga de forma eficiente [11].

Un campo que ha centrado gran número de estudios es la aplicación de NWs semiconductores en células solares, debido a la necesidad creciente de aumentar su eficiencia manteniendo un coste reducido. La geometría de los NWs proporciona beneficios potenciales en la conversión de energía, como son la reducción de la reflectividad, una mejora en la capacidad para cambiar el gap entre bandas y un incremento en la tolerancia [12] [13].

Tras la descripción de algunas aplicaciones llegamos a la que será el cuerpo de este trabajo, la **caracterización de superficies**. La interacción luz/NW presenta una serie de resonancias de diámetro y de longitud de onda, estas resonancias ópticas son útiles en espectroscopia debido a la amplificación del campo eléctrico en los NW [14]. Además, el NW puede actuar como una nanolente focalizando el haz de luz sobre el sustrato, ello permitiría aumentar el campo electromagnético local sobre el sustrato. Si bien es cierto que carecemos por el momento de estudios sobre un gran

número NWs y la posible interacción de estos con el material a caracterizar, el Grupo de Investigación GdS Optronlab ha llevado a cabo el análisis de resonancias ópticas en NWs de Si y SiGe [15].

1.2. Crecimiento de NWs

Vamos a analizar algunos de los métodos que se utilizan en la actualidad para sintetizar NWs semiconductores.

A grandes rasgos podemos clasificar los procesos en dos grupos fundamentales: “bottom-up” en el que las estructuras se ensamblan de forma aditiva a partir de sus subcomponentes y “top-down” mediante el cual la estructura se esculpe en piezas más grandes del material [16].

1.2.1. Métodos de crecimiento

Método VLS (Vapor-Liquid-Solid)

Este es el método más habitual en el crecimiento de NWs semiconductores.

En el método VLS encontramos que las tres fases (vapor, líquido y sólido) se ven involucradas, los precursores del NW se hayan en forma de vapor, la fase líquida la encontraremos en el catalizador (usualmente Au) siendo por supuesto el sólido el propio NW [17]. La posición de los NW, así como su diámetro, están directamente relacionados con la colocación y radio de las gotas de catalizador inicial.

Tal como se puede ver en la **Figura 2**, el proceso comienza con el catalizador sobre el sustrato en el que se van a crecer los NWs (a), al calentar disponemos de el catalizador en forma de gotas y los precursores como vapor (b); estos se disocian al entrar en contacto con el catalizador. Una vez se satura con los elementos que formarán el NW, los precursores comienzan a depositarse en la fase sólida provocando el crecimiento del NW (d). Una vez terminado el proceso podremos

trasladarlos a otros sustratos bien sea para estudiarlos o para usarlos en alguna aplicación.

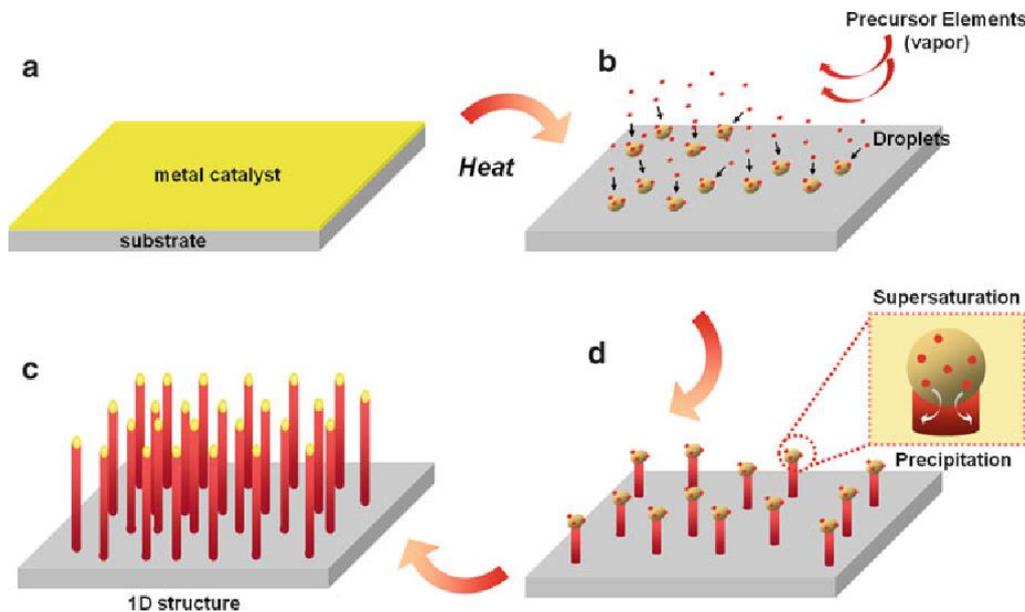


Figura 2 Figura del crecimiento VLS de NWs: a) sustrato cubierto con el catalizador, b) los precursores entran en las gotas de catalizador, d) saturación y precipitado, c) NW crecido. [17]

Con este método, una de las formas para crecer NWs de GaAs es usar Au como catalizador y BuAsH₂ junto con Me₃Ga como precursores [18], siendo los diámetros de los NWs prácticamente iguales al diámetro de la gota de Au. Esto es así para los NWs de GaAs cuando trabajamos con temperaturas por debajo de los 425 °C. Si el crecimiento se hace a temperaturas demasiado altas (por encima de los 425 °C) los NWs toman forma cónica (tapering) [19], la parte inferior del NW es sustancialmente más ancha que la superior, este efecto empeora con el aumento de la temperatura aunque resulta imposible evitarlo por completo aun cuando trabajando a temperaturas inferiores a 425 °C.

Los NWs que vamos a utilizar en este estudio han sido crecidos por el método VLS.

Litografía

La litografía es una de las técnicas top-down más ampliamente utilizada para la fabricación de nanoestructuras, especialmente aquellas dirigidas a la industria microelectrónica.

Para llevar a cabo esta técnica de fabricación necesitamos un material resistente, como puede ser el polimetilmetacrilato (PMMA), que nos sirva de patrón o máscara permitiéndonos retirar posteriormente el material sobrante.

Para la producción de NWs verticales el patrón consistirá en una serie de círculos en la superficie de una oblea del material objetivo, el material que se encuentra bajo dicho círculo será el que constituya el NW una vez el material sobrante sea retirado [20]. Usando esta técnica pueden fabricarse diversos tipos de nanoestructuras, incluyendo pequeños circuitos.

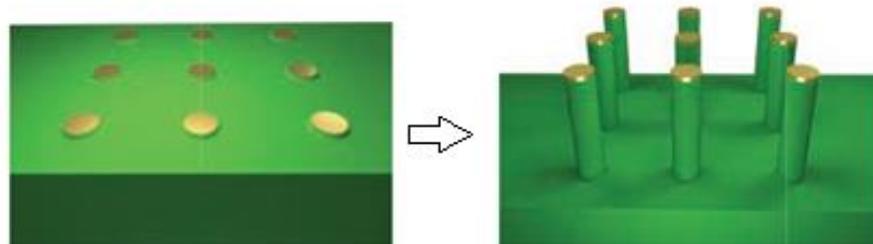


Figura 3 Crecimiento de NW por litografía. A la izquierda vemos el patrón sobre el material y a la derecha los NWs una vez se retira el material sobrante. [21]]

Una de las ventajas del uso de técnicas “top-down” frente a las “bottom-up” es la capacidad que tenemos de controlar la posición de los NWs, sin embargo, la calidad es menor y las posibilidades para la creación de heteroestructuras están limitadas con respecto al crecimiento bottom-up.

1.3. Espectroscopía Raman

En este trabajo se ha utilizado como principal herramienta experimental la espectroscopía Raman, basada en la dispersión Raman [22]. Este es un método de caracterización de materiales ampliamente extendido tanto en Química como en Física de la Materia Condensada. A partir de la información obtenida mediante esta técnica, podemos conocer desde la composición del material que estamos examinando hasta su orientación cristalina o el dopado.

Cuando la luz interacciona con el material pueden ocurrir tres procesos: absorción, reflexión y dispersión. Este último puede ser elástico, cuando la frecuencia de la luz dispersada es igual a la incidente, llamada dispersión Rayleigh, o bien inelástico, cuando la frecuencia de la luz cambia en el proceso. Este tipo de dispersión puede ocurrir de diversas maneras, una de ellas, que involucra a los fonones ópticos de la red que se acoplan con el campo electromagnético a través del momento dipolar eléctrico de la nube de electrones, es el llamado efecto Raman, descubierto por Sir Chandrashekhara Venkata Raman en 1928.

El efecto Raman, el que nos interesa para nuestro estudio, es un proceso óptico de segundo orden que consiste en observar la pérdida o ganancia de energía del fotón emitido respecto del absorbido cuando la luz interacciona con la muestra bajo estudio. Cada material, dependiendo de su estructura, se caracteriza por unas relaciones de dispersión asociadas a los fonones (modos de vibración de la red), el efecto Raman consiste entonces en el acoplamiento electromagnético de la luz (campo electromagnético) con los fonones ópticos.

1.3.1. Descripción semiclásica

El efecto Raman es un proceso óptico de segundo orden, para realizar una descripción semiclásica del mismo es necesaria una aproximación electromagnética (para ver descripción cuántica [23]). Tomando una onda electromagnética plana linealmente polarizada:

$$\vec{E}(\omega_i) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}_i \vec{x} - \omega_i t)}$$

Al incidir sobre el sólido induce una polarización proporcional al campo eléctrico.

$$\vec{P}(\omega_s) = \chi \vec{E}(\omega_i)$$

La polarización dependerá del tensor generalizado de la susceptibilidad dieléctrica (χ) y la frecuencia de la radiación dispersada (ω_s). La susceptibilidad χ puede ser desarrollada en serie de potencias de las variables normales en torno a la posición de equilibrio, si los desplazamientos son suficientemente pequeños podemos quedarnos tan solo con el primer orden:

$$\chi = \chi_0 + \sum_j \left(\frac{\partial \chi}{\partial u_j} \right)_0 u_j + \dots$$

En la ecuación anterior el subíndice 0 hace referencia a la magnitud en el punto sin movimiento atómico, sustituyendo esta aproximación en la ecuación de la polarización:

$$\vec{P}(\omega_s) = \chi_0 \vec{E}_0 e^{i(\vec{k}_i \vec{r} - \omega_i t)} + \vec{E}_0 \sum_j \left(\frac{\partial \chi}{\partial u_j} \right)_0 u_{j0} e^{i[(\vec{k}_i \pm \vec{q}_j) \vec{x} - (\omega_i \pm \omega_j) t]} + \dots$$

El primer término corresponde a la polarización debida a la **dispersión Rayleigh**, siendo el segundo el debido a la **dispersión Raman**.

En el proceso de dispersión Raman de primer orden las reglas de selección de la energía y el momento, deducidas a partir de la ecuación anterior, son:

$$\hbar\vec{k}_s = \hbar\vec{k}_i \pm \hbar\vec{q}_j$$

$$\hbar\vec{\omega}_s = \hbar\vec{\omega}_i \pm \hbar\vec{\omega}_j$$

La aparición del signo + corresponde a la dispersión Raman Anti-Stokes (en adelante AS), la luz incidente absorbe energía de la vibración de la red; el signo – será entonces la de Stokes (en adelante S), la luz incidente excita un fonón en la red perdiendo energía.

En el espectro, según estas ecuaciones deberemos obtener dos picos simétricos, correspondientes a la explicación del párrafo anterior, respecto a la banda asociada a la dispersión Rayleigh. A pesar de la simetría la intensidad de los picos Stokes y Anti-Stokes no será la misma. Esto se debe a que la dispersión Raman S es más probable que la AS, ya que, mientras la primera implica que un fonón sea generado, en la otra necesitamos que el fonón ya exista. La relación anti-Stokes/Stokes aumenta con la temperatura al ir aumentando la población de fonones, cuanto mayor es el número de fotones incidentes más eventos tendrán lugar en nuestro material haciendo que aumente la intensidad Raman,

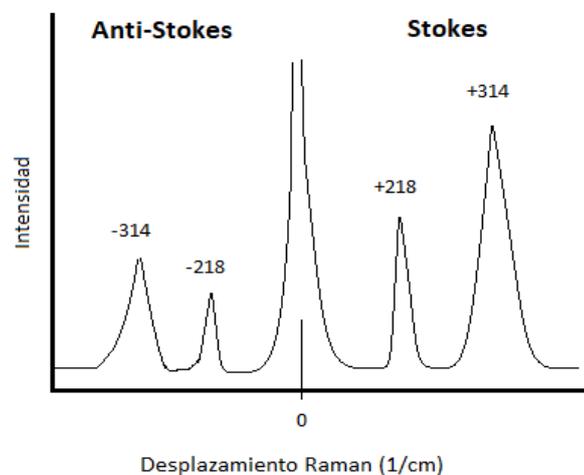


Figura 4 Espectro Raman

La intensidad Raman será proporcional a la sección eficaz total (σ), esta puede ser calculada para los dos tipos de dispersión Raman a partir de las siguientes ecuaciones [24]:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_S = V\omega_S^4 |\vec{e}_i R \vec{e}_s|^2 (n + 1)$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{AS} = V\omega_{AS}^4 |\vec{e}_i R \vec{e}_s|^2 n$$

siendo \vec{e}_i y \vec{e}_s los vectores de polarización de la luz incidente y dispersada y R el tensor Raman que podemos escribir:

$$R_p = \left(\frac{\partial\chi}{\partial u_p}\right)_0 u_{p0}$$

De esta forma, la ya mencionada intensidad Raman, será proporcional a la intensidad de excitación y por tanto al cuadrado del campo eléctrico, E_0^2 , así como proporcional al volumen de interacción y la cuarta potencia de la frecuencia de la luz incidente.

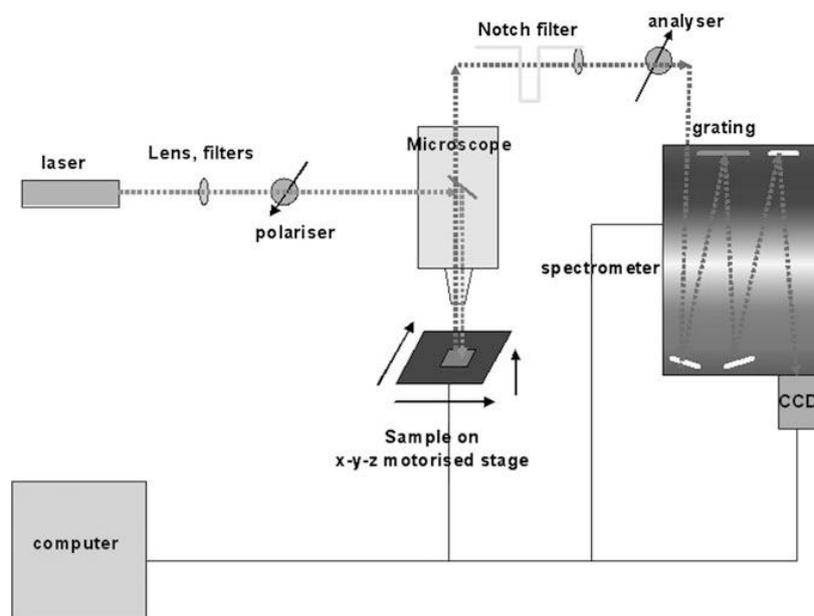
$$I \propto \sigma I_0 \propto V\omega^4 E_0^2$$

2. Método experimental

2.1. Equipamiento

2.1.1. Espectrómetro Raman

Partimos de un láser como fuente de excitación con filtros y polarizadores para controlar la intensidad y polarización de la luz. La luz incide sobre la muestra colocada en una plataforma motorizada a través de un microscopio óptico. La luz dispersada llega a un filtro de corte (edge) que elimina¹ la banda correspondiente a la dispersión Rayleigh y posteriormente al espectrómetro que dispone de un detector multicanal CCD.



3. Figura 5 Esquema de un espectrómetro Raman [22]

¹ No se elimina por completo, sigue apareciendo en nuestro espectro, pero con menor intensidad lo que nos permite observar la dispersión Raman

Las medidas de espectroscopía Raman, en este trabajo, se han realizado con un espectrómetro Raman LabRam UV-HR 800 de Horiba (Jobin-Yvon). Está provisto de tres láseres con distintas longitudes de onda, 325nm (ultravioleta), 532nm (verde) y 633nm (rojo).

En nuestro caso hemos utilizado tan solo el láser verde para las medidas experimentales, este laser es un láser Nd:YAG doblado en frecuencia (532 nm). La señal es recogida por un detector multicanal CCD (Charged Coupled Device) que se refrigera con nitrógeno líquido. Como puede verse en la imagen siguiente, la CCD utilizada debió ser adaptada a nuestras necesidades ya que debimos usar una con una geometría distinta a la original del espectrómetro.

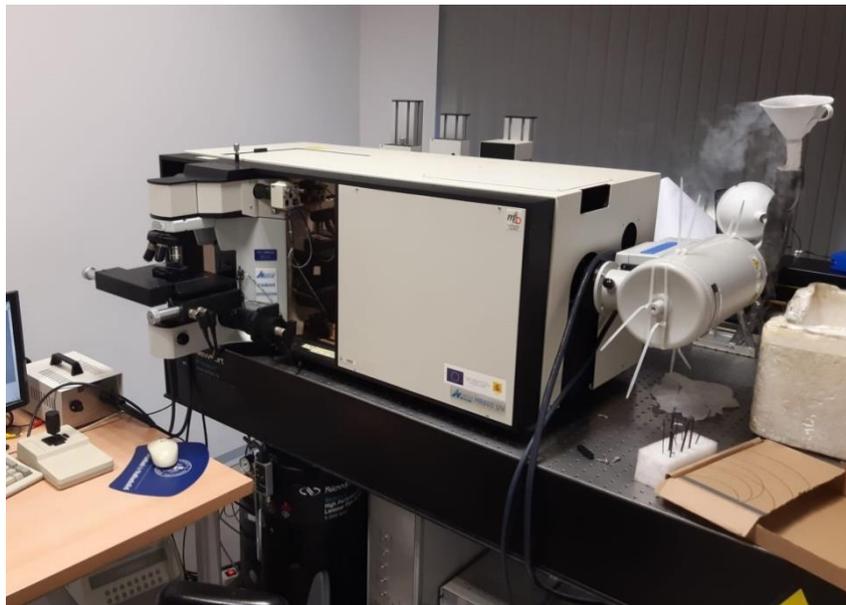


Figura 6 Espectrómetro Raman y microscopio utilizados en este trabajo.

La muestra se coloca sobre una plataforma motorizada acoplada a un microscopio metalográfico Olympus BX41 que dispone de tres objetivos para luz visible y dos más para UV, entre los de luz visible encontramos el x10 que utilizaremos para ver y fotografiar la zona genérica de la muestra, para poder encontrarla más tarde, x50 y x100, este último será el que utilizaremos para hacer las medidas Raman. Este objetivo es muy luminoso debido a que tiene una apertura numérica de 0.95.

Para el análisis y obtención de los espectros Raman hemos utilizado el software LabSpec perteneciente a Horiba-Jobin & Yvon. De estos espectros podremos obtener el desplazamiento Raman, que nos indicará el material con el que estamos trabajando, la intensidad, que dará cuenta de la magnitud del campo eléctrico y anchura espectral a media altura del pico que nos informa sobre la calidad estructural del material.

2.1.2 Microscopía electrónica

Para poder obtener imágenes de los NWs y con ello medir sus diámetros, hemos utilizado un Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo (FE-SEM) de alta resolución LEO-1530 Carl Zeiss.

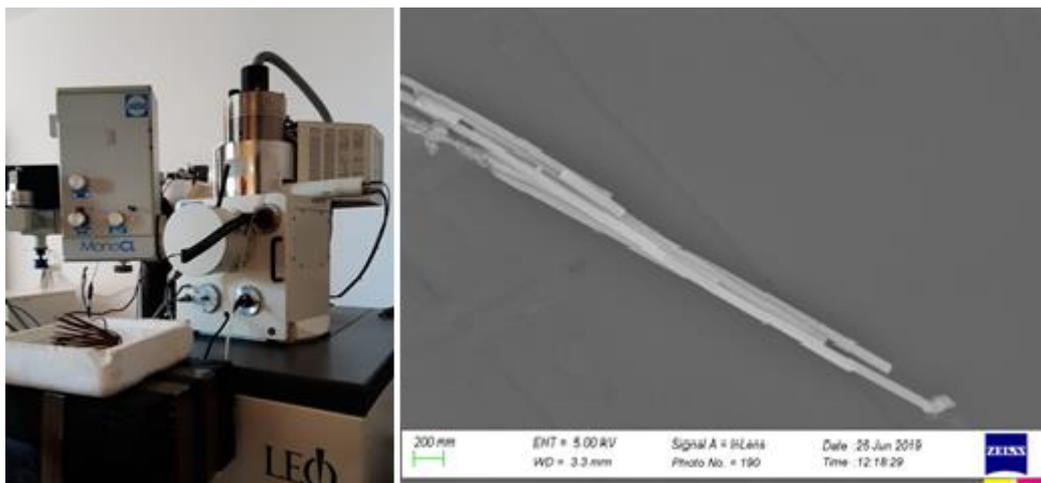


Figura 7 Izquierda: El microscopio electrónico que se ha utilizado. Derecha: Imagen tomada con el SEM de una acumulación de NW de GaAs sobre sustrato de Si.

2.2 Preparación de las muestras

Inicialmente, disponemos de una muestra de Si con NWs de GaAs suministrada por el fabricante. Se procede a limpiar la muestra. Una vez la muestra está limpia, cortamos un fragmento que introducimos en un vial con etanol y aplicaremos ultrasonidos. Esta técnica hace que los NWs se despeguen del sustrato quedando suspendidos en el etanol.

Una vez hemos limpiado también el nuevo sustrato de Si podemos proceder a depositar los NWs sobre el mismo. Para ello tomamos un par de gotas de la solución de NWs en etanol y las depositamos sobre el sustrato. Una vez se evapore el etanol podremos comenzar a realizar medidas. Es interesante fijar la nueva muestra en un portamuestras para evitar el contacto con ella al manipularla.

2.3 Adquisición de espectros

2.3.2 Calibración

Antes de poder tomar una medida es necesario calibrar el instrumento que vamos a utilizar. Para el espectrómetro Raman debemos calibrar la longitud de onda de la luz dispersada.

Para la calibración es necesario utilizar una muestra de la que se conozca con gran precisión la posición de la dispersión Raman, para ello hemos escogido Si cristalino y observaremos el pico Raman de primer orden que se encuentra en 520.6 cm^{-1} . En el espectro de Si cristalino deberíamos encontrar un pico en el origen que corresponde a la radiación Rayleigh.

En caso de que ese pico no coincida con su posición teórica, tendremos que cambiar los parámetros de calibración que asignan a cada píxel un valor de desplazamiento Raman.

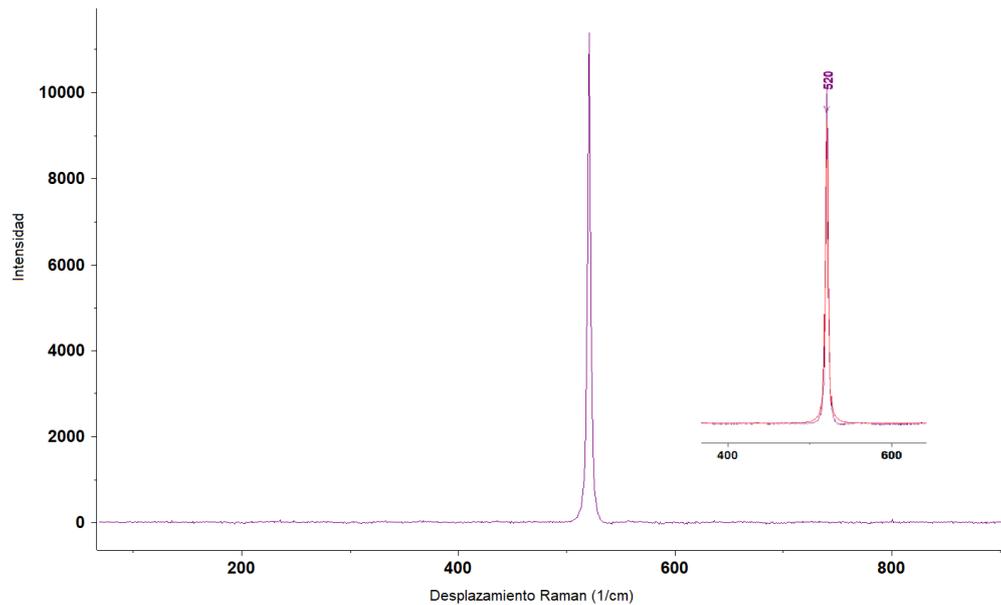


Figura 8 Espectro de Si medido el 11/06/2019, imagen obtenida del programa LabSP402. El eje horizontal corresponde al desplazamiento Raman (cm^{-1}) y el vertical a la intensidad.

Una vez fijamos el origen, comprobamos la posición del pico correspondiente a la dispersión Raman. En caso de no estar en el lugar correcto cambiamos los parámetros de los píxeles hasta conseguir un buen ajuste. Hecho esto, tomamos un espectro de Si de referencia para guardarlo junto con las medidas del día.

2.3.3 Toma de datos

Tras el calibrado podemos comenzar a tomar medidas de los NWs de GaAs sobre el sustrato de Si. Lo primero es localizar un NW en la muestra, en nuestro caso, esta no dispone de ningún tipo de marca que nos permita orientarnos en el interior de ella con lo que utilizamos NWs cercanos al borde, para poder reconocerlos posteriormente a partir de las imperfecciones debidas al corte o bien a cualquier pequeño golpe que haya podido sufrir.

Una vez identificado el NW que queremos medir, se ha de colocar de tal forma que el eje de polarización de la luz coincida con el eje del NW, ya que, debido a las propiedades del NW la señal Raman es máxima en esa situación [25]. Para ello rotamos la plataforma hasta que el NW se encuentra en vertical en la pantalla.

Además, debido al comportamiento del NW como una nanolente, es posible superar el límite de difracción y se pueden observar los NWs orientados paralelamente a la polarización de la luz en microscopio óptico.

De cada NW seleccionado tomaremos varias medidas, cada una de ellas compuesta a su vez de varias adquisiciones con las que el programa realiza una media para eliminar parte del ruido. En este trabajo se han realizado dos tipos de medidas:

1. Una única medida, compuesta de 2 adquisiciones de espectro de 20 segundos cada una, en el centro de cada NW para comprobar que se trata de GaAs, además, esta medida nos servía para comprobar el estado aproximado del sistema.
2. Posteriormente se ha realizado una medida en una serie de puntos sobre una recta transversal al NW que comienza en el sustrato de Si lejos del NW, atraviesa el NW aproximadamente por su centro y finaliza de nuevo en el sustrato; en cada punto de la serie se han realizado 2 adquisiciones de 20 segundos cada una. De esta forma se obtiene un perfil de las bandas Raman de GaAs y Si al acercarnos al NW, sobre él y al alejarnos de nuevo. Para tener una imagen más clara de dicha medida se ha realizado el siguiente esquema:

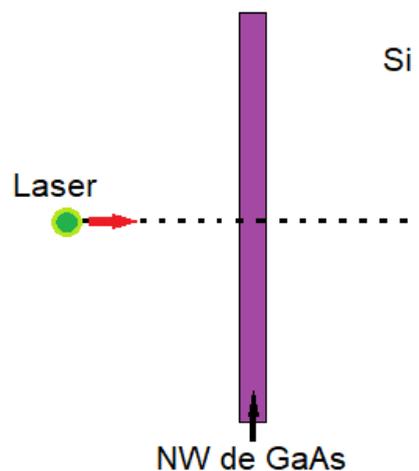


Figura 9 Medida transversal al NWs de GaAs sobre sustrato de Silicio. El haz láser (en verde) sigue la línea de puntos tomando medidas en cada uno de ellos.

Para poder comparar los NWs en función de sus diámetros hemos utilizado el microscopio electrónico que nos proporciona una imagen de los NWs a partir de la cual podemos hacer una medida bastante precisa de sus diámetros.

Paralelamente a las medidas experimentales, el grupo realizó simulaciones a partir de modelos desarrollados en trabajos anteriores [25]. En el modelo se analiza la distribución del campo electromagnético tanto en el interior del NW de GaAs como en el sustrato de Si. A partir de estos datos se calcula la señal Raman teórica del NW y del sustrato para distintos valores del diámetro del NW y se comparó con los resultados experimentales.

3 Resultados

En esta sección presentaremos los resultados obtenidos experimentalmente.

Los principales resultados han sido obtenidos mediante espectroscopia Raman, estableciendo la relación entre la intensidad Raman del sustrato de Si bajo la influencia del NW y la intensidad del sustrato sin la influencia del NW, para distintos diámetros de NW. Posteriormente hemos comparado estos datos con los del modelo teórico comprobando que su ajuste es adecuado.

Datos²

Se han realizado 15 medidas de NWs sobre el sustrato de Si estudiado, de estos tan solo 7 de ellos han cumplido los requisitos mínimos que hemos establecido.

- NWs individuales. Si al observar el NW en el SEM se ven más de un NW esta medida debe ser descartada (**Figura 8**)
- Limpios. Tanto el NW como su entorno deben estar limpios para evitar efectos que interfieran en la interpretación de los resultados.
- NWs en buen estado. Buscamos que los NWs no estén rotos, además, otros NWs han tenido que ser descartados debido a la imposibilidad de sacar un diámetro fiable de los mismos.

Medidas

Como ha sido descrito en el apartado anterior, sobre cada NW se hace una medida inicial (2 adquisiciones de 20 segundos), los espectros obtenidos para esta medida simple son análogos ya que la composición y estructura del sistema no varía: en todos los casos se tienen NWs de GaAs sobre sustrato de Si. Por ello se mostrará sólo uno de estos espectros para su descripción.

² Los datos de los 15 NWs analizados están recogidos en el Anexo de este trabajo.

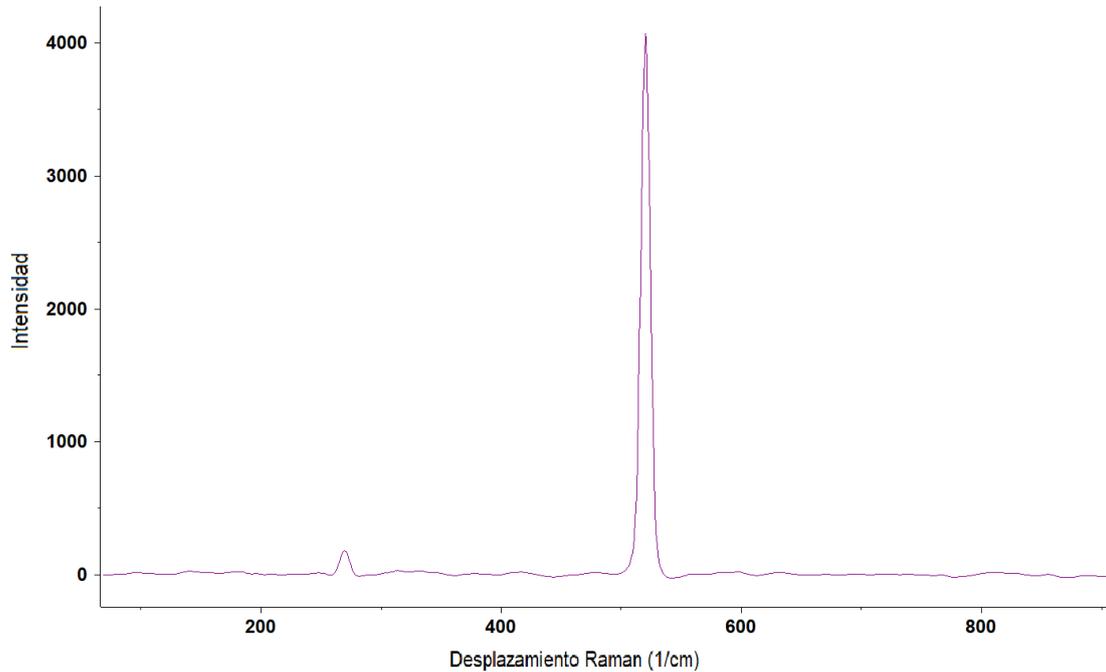


Figura 10 Espectro del NW3 colocado sobre sustrato de Silicio.

Aparecen dos bandas Raman, una corresponde al sustrato de Si cristalino que se encuentra situado en 520 cm^{-1} y otra en 268 cm^{-1} debido al desplazamiento Raman del pico Raman de primer orden transversal óptico (TO) del GaAs [26]. Es fácil observar que la intensidad de la banda Raman correspondiente al sustrato es mucho mayor que la proveniente del NW de GaAs.

A continuación, se van a presentar los resultados obtenidos, los cuales van a ser divididos en tres grupos, cada uno de ellos con un comportamiento distinto según el diámetro. Todos los NWs pueden ser incluidos en uno de estos tres:

- Grupo 1: La intensidad Raman para el sustrato de Si permanece constante dentro y fuera del hilo.
- Grupo 2: La intensidad Raman del Si disminuye cuando el haz láser ilumina el NW de GaAs.
- Grupo 3: La intensidad Raman aumenta a su paso por el NW.

3.1 Grupo 1: intensidad constante

Dentro de este grupo vamos a fijarnos en el NW3

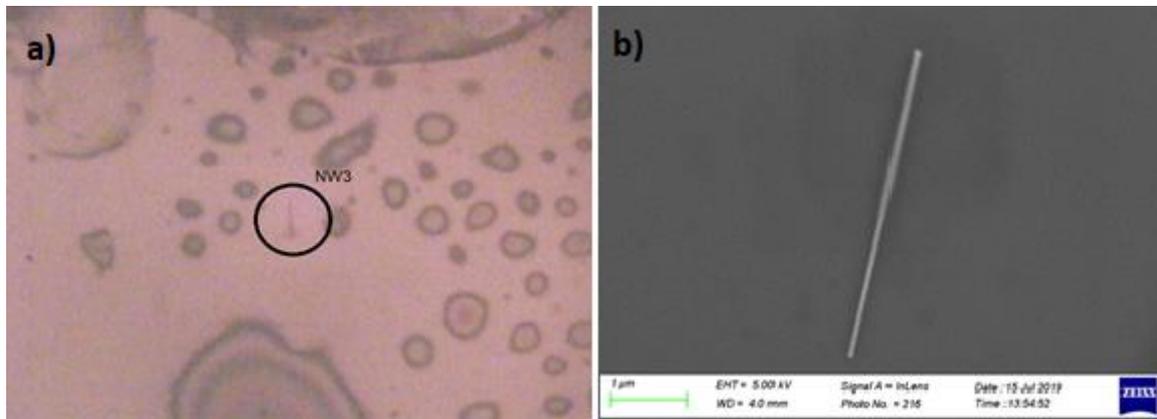


Figura 11 a) NW3 en el microscopio acoplado al Raman, b) imagen SEM del NW3.

Al realizar un barrido transversal, obtenemos los datos correspondientes a cada punto de la recta, de donde podemos extraer los correspondientes a las dos bandas Raman, la del NW de GaAs y el sustrato de Si, en cada punto del barrido pudiendo compararlos tal y como se ve en la **Figura 12**.

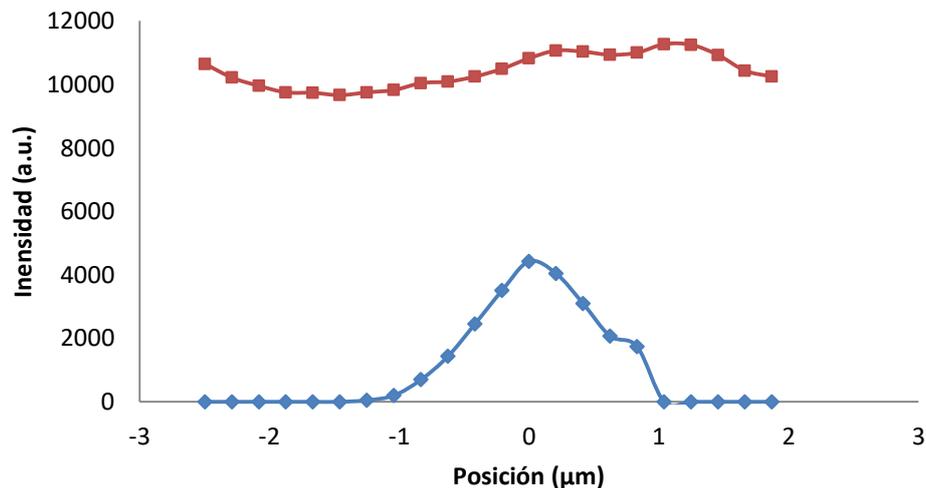


Figura 12 Variación de la intensidad de la señal de Si (rojo) en función de la distancia de la medida al NW de GaAs (azul) que se encuentra localizado en el origen, en un barrido transversal del NW3.

En esta gráfica se observa una fluctuación inferior al 10% en la intensidad del Si siendo esta, además, muy homogénea, es decir, la intensidad Raman del Si apenas se ve afectada por la presencia del NW. El NW parece no modificar el campo electromagnético del sustrato con esta geometría.

Con la imagen SEM de este NW hemos podido calcular su diámetro a partir de un programa de tratamiento de imágenes, ImageJ, que nos permite medir el número de píxeles y con ello obtener el diámetro que buscamos. En este caso:

$$d = 79,09 \pm 4,73 \text{ nm}$$

3.2 Grupo 2: reducción de la intensidad

Para el conjunto de los NWs englobados en este grupo nos fijaremos en el NW4.

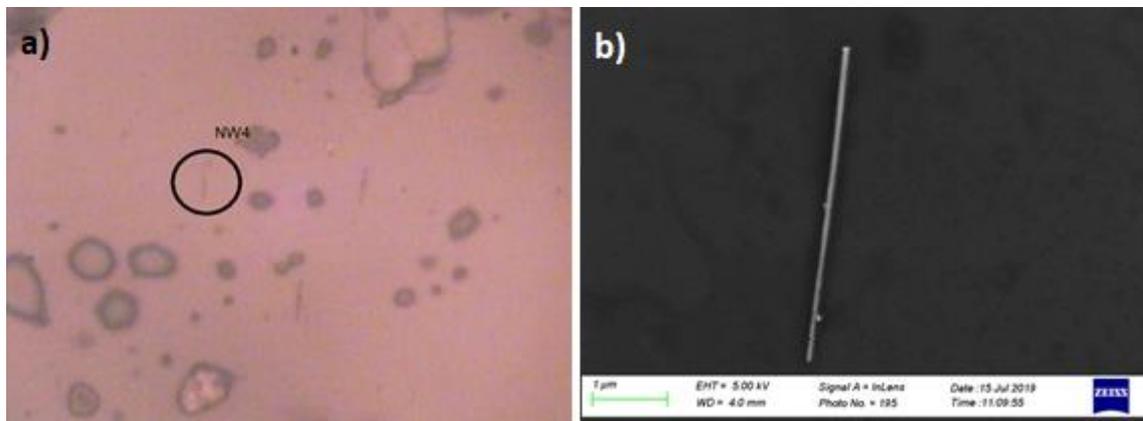


Figura 13 a) NW4 en el microscopio acoplado al Raman, b) imagen SEM del mismo NW.

Se sigue el mismo procedimiento que para el NW anterior, realizamos una barrido transversal y comparamos las intensidades en cada punto.

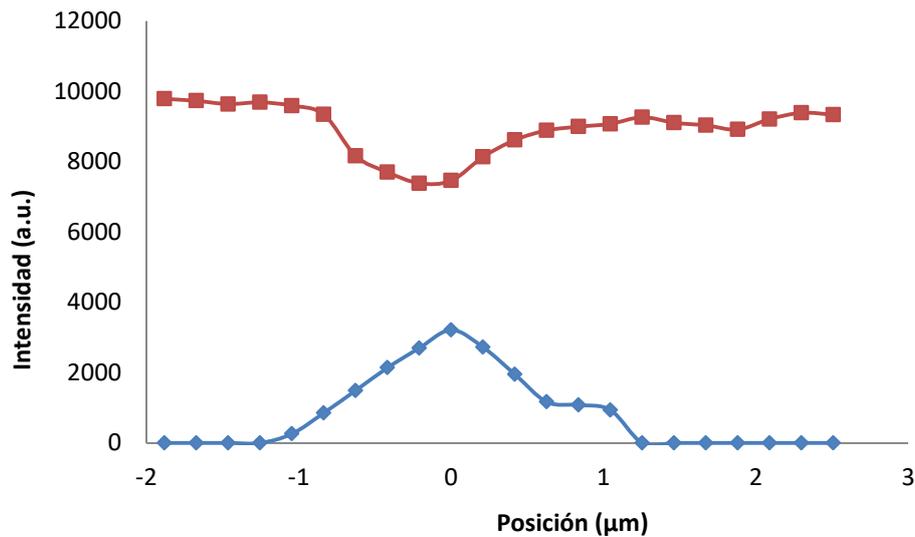


Figura 14 Variación de la intensidad del pico de Si (rojo) en función de la intensidad y distancia de la medida al NW de GaAs (azul) en el barrido transversal del NW4.

En este caso observamos una variación de en torno al 30%, conforme entramos en el NW (esto lo determina el aumento de la intensidad del pico de GaAs) disminuye la intensidad de Si, y cuando salimos (observado porque el valor de la intensidad del NW cae a cero) se vuelve a recuperar el valor anterior. El NW parece concentrar el campo electromagnético haciendo que decrezca la intensidad en el Si en presencia del NW.

El diámetro en este caso:

$$d = 65.155 \pm 7,97 \text{ nm}$$

3.3 Grupo 3: aumento de la intensidad

En este caso nos vamos a fijar en el NW7 que muestra esta tendencia.

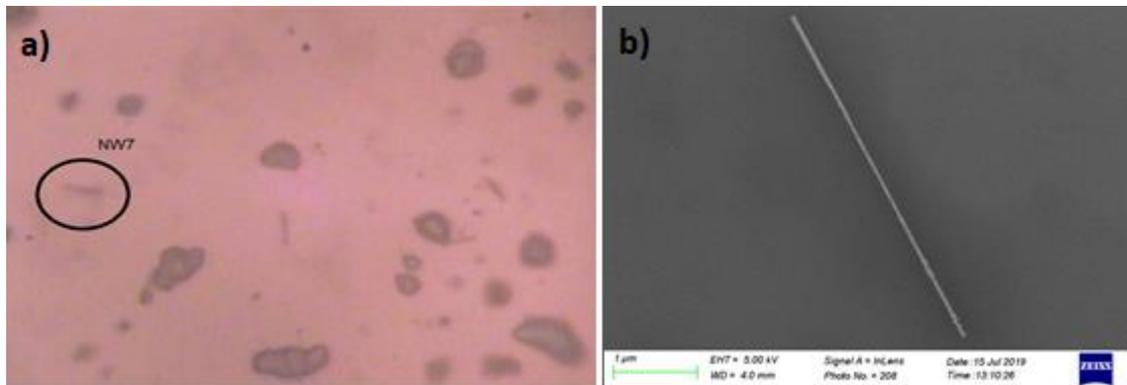


Figura 15 a) Imagen del NW7 en el microscopio acoplado al Raman, b) imagen SEM del mismo NW.

Se sigue el mismo procedimiento que para los NWs anteriores, realizamos una medida transversal y comparamos las intensidades para cada punto de la medida

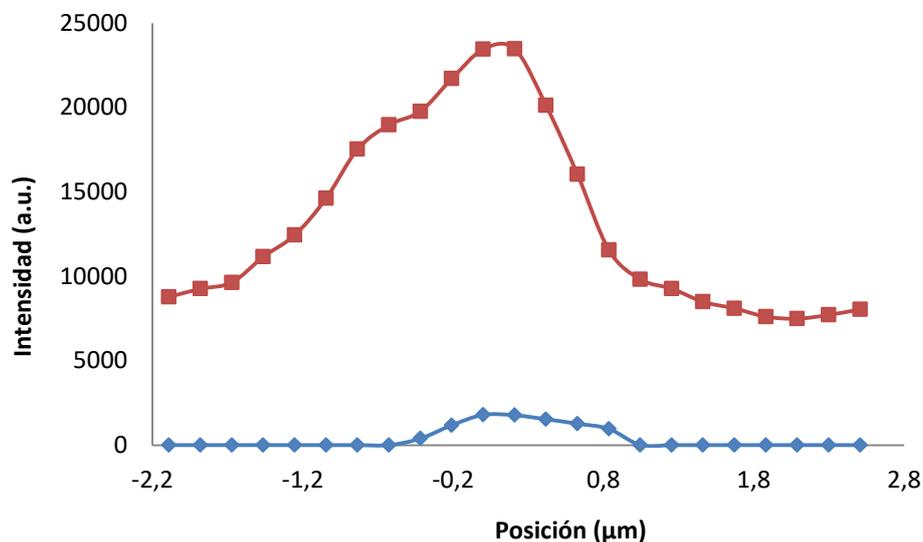


Figura 16 Variación de la intensidad del pico de Si (rojo) en función de la intensidad y distancia de la medida al NW de GaAs (azul) en un barrido transversal del NW7.

En este caso se observa un aumento de la intensidad para el Si de un 150% en presencia del NW con respecto a la señal del sustrato de Si lejos del NW. Conforme entramos en el hilo, aumenta la intensidad de GaAs, también lo hace la del Si. Al

alejarnos de nuevo, la intensidad en el NW cae a cero y el Si vuelve a su valor inicial. En este caso el NW hace el efecto inverso al anterior, parece concentrar el campo electromagnético sobre el sustrato de Si, que es el efecto esperado.

El diámetro en este caso:

$$d = 40,98 \pm 1,56 \text{ nm}$$

3.4 Comparativa

En primer lugar, presentamos la tabla de resultados para los siete NWs. Junto al nombre asignado para cada uno de los NWs puede verse el valor medido para su diámetro (d) en nanómetros, el error para dicha medida, ϵ (d), y las intensidades normalizadas del NW de GaAs y el sustrato de Si en el punto máximo de la curva del NW utilizando para normalizar el valor del Si fuera del hilo.

	d(nm)	ϵ (d)	I GaAs norm	I Si norm
NW4	65,155	7,974	0,09029	0,94854
NW1	55,845	6,685	0,10744	0,97062
NW3	79,091	4,73	0,08694	1,00247
NW2	63,575	2,275	0,10097	1,01384
NW5	51,215	1,615	0,05956	1,20121
NW7	40,984	1,563	0,04957	1,23463
NW6	44,855	4,905	0,02798	1,38036

Figura 17. Tabla con los datos obtenidos para cada uno de los NWs analizados, en la primera columna tenemos la referencia del NW, tras esta viene el diámetro (nm) y su error. Las dos últimas columnas corresponden a las intensidades normalizadas del NW y el sustrato frente a la intensidad en el sustrato lejos del NW. Los NWs están ordenados según su comportamiento: *reducción, constante y aumento*

Podemos comparar los datos obtenidos para la señal de Si en cada uno de los NWs con el modelo teórico desarrollado por el grupo de investigación.

Como podemos ver en la **Figura 18**, que relaciona la variación de la intensidad Raman de Si con el diámetro de los NWs, se obtiene una aproximación bastante buena al modelo.

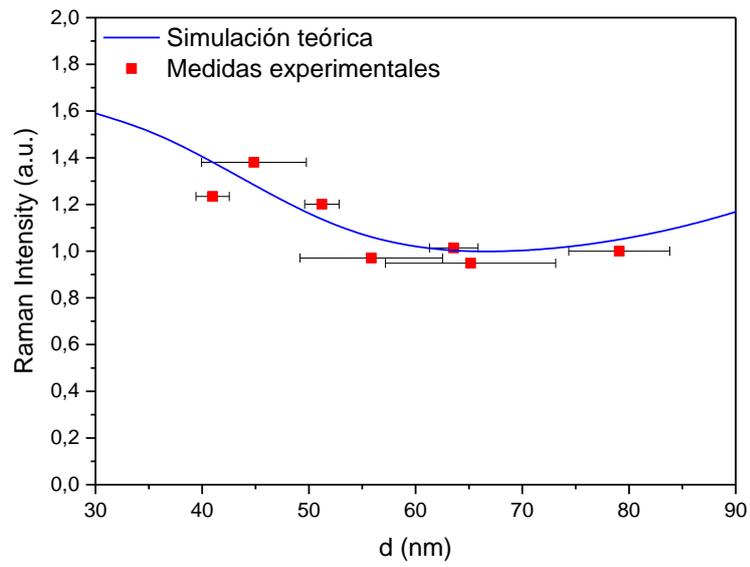


Figura 18 Comparativa entre los resultados obtenidos para la intensidad Raman en el sustrato de Si y el modelo teórico en función del diámetro de los NWs.

4 Conclusiones. Trabajo futuro

4.1 Conclusiones

El objetivo era estudiar la viabilidad y el posible beneficio del uso de NWs de GaAs para caracterización de superficies mediante espectroscopía Raman. Para ello hemos estudiado la relación entre la señal del sustrato de Si y NWs de GaAs dependiente del diámetro de estos.

Hemos podido comprobar que dependiendo del diámetro de nuestro NW el Si se comporta de formas distintas, mientras que para tamaños pequeños la señal se ve amplificada para tamaños cercanos a los 65 nm encontramos que aparece disminución de la intensidad para posteriormente volver a aumentar ligeramente. Al compararlo con el modelo teórico se observa que el comportamiento es el predicho por el modelo. Y por consiguiente, la distribución del campo eléctrico depende del acoplamiento del sistema NW/sustrato.

Finalmente, se ha encontrado el comportamiento inicialmente esperado: el aumento de la señal Raman del sustrato en presencia de NWs de GaAs. Es interesante notar que esta amplificación de la señal Raman sólo sucede para ciertos valores del diámetro del NW, lo que nos permitiría seleccionar previamente el valor adecuado del diámetro de los NWs para su aplicación en otros sistemas.

4.2 Trabajo futuro

En estudios realizados por el grupo de investigación anteriormente queda patente que la espectroscopia Raman para la caracterización de superficies puede verse gratamente beneficiada del uso de NWs semiconductores [25] [27], sin embargo, en lo que respecta a NWs de GaAs convendría disponer de un rango de diámetros más amplio del que disponíamos para comprobar y estudiar en mayor profundidad el comportamiento de estos NWs sobre sustrato de Silicio y ver si los datos obtenidos son más prometedores que aquellos recogidos en este trabajo.

Además, conocer el comportamiento de estos mismos NWs sobre otros sustratos podría ser fuente de interesante información no solo sobre la caracterización local de los sustratos sino además sobre el comportamiento del NW sobre ellos.

Bibliografía

- [1] Y. Cui y C. Lieber, «Functional nanoscale electronic devices assembled using silicon nanowire building blocks,» *Science*, vol. 291, pp. 851-853, 2001.
- [2] R. Rurali, «Colloquium: Structural, electronic, and transport properties of silicon nanowires,» *Modern Physics*, vol. 82, pp. 427-449, 2010.
- [3] A. D. Yoffe, «Electronic properties of low dimensional solids: The physics and chemistry of layer type transition metal dichalcogenides and their intercalate complexes,» *Solid State Ionics*, vol. 39, pp. 1-7, 1990.
- [4] J. Sarkar, G. Gopal Khan y A. Basumallick, «Nanowires: properties, applications and synthesis via porous anodic aluminium oxide template,» *Bulletin of Materials Science*, vol. 30, pp. 271-290, 2007.
- [5] A. B. Greyback, C. J. Barrelet, Y. Li y C. M. Lieber, «Semiconductor nanowire laser,» *Applied Physics Letters*, vol. 887, pp. 1-3, 2005.
- [6] S. W. Eason, A. Fu, A. B. Wong, C.-Z. Ning y P. Yang, «Semiconductor nanowire lasers,» *Nature Reviews Materials*, vol. 1, nº 2016.
- [7] R. X. Yan, D. Gargas y P. D. Yang, «Nanowire photonics,» *Nat Photonics*, vol. 3, pp. 569-576, 2009.
- [8] C. K. Chan, H. Peng, G. Liu, K. McIlweath, X. F. Zhang, R. A. Huggins y Y. Cui, «High-performance lithium battery anodes using silicon nanowires,» *Nature Nanotechnology*, vol. 3, pp. 31-35, 2007.
- [9] M. J. Law, D. J. Sirbuly, J. C. Johnson, J. Goldberger, R. J. Saykally y P. Yang, «Nanoribbon waveguides for subwavelength photonics integration,» *Science*, vol. 305, pp. 1269-1273, 2004.
- [10] X. Guo, Y. Ying y L. Tong, «Photonic Nanowires: From Subwavelength Waveguides to Optical Sensors,» *Accounts of Chemical Research*, vol. 47, pp. 656-666, 2013.
- [11] A. Lungstein, M. Steinmair, C. Henkel y E. Bertagnolli, «Scalable Approach for Vertical Device Integration of Epitaxial Nanowires,» *Nano Lett.*, vol. 9, nº 1830, 2009.

- [12] E. C. Garnett, M. L. Brongersma, Y. Cui y M. G. McGehee, «Nanowire Solar Cells,» *Annual Review of Materials Research*, vol. 41, 2011.
- [13] L. Tsakalakos, J. Balch, J. Fronheiser y B. A. Korevaar, «Silicon nanowire solar cells,» *Appl. Phys. Lett*, vol. 91, 2007.
- [14] R. Ruppin, «Electromagnetic energy inside an irradiated cylinder,» 1998.
- [15] J. Anaya, J. Jimenez, A. Rodriguez y T. Rodriguez, «Electromagnetic interaction between a laser beam and semiconductor nanowires deposited on different substrates: Raman enhancement in Si Nanowires,» *MRS Proceedings*, vol. 1627, 2014.
- [16] R. G. Hobbs, N. Petkov y J. D. Holmes, «Semiconductor Nanowire Fabrication by Bottom-Up and Top-Down Paradigms,» *Chemistry Materials*, vol. 24, pp. 1975-1991, 2012.
- [17] H.-J. Choi, «Vapor – Liquid – Solid Growth of Semiconductor Nanowires,» *Materials Science*, 2009.
- [18] P. Piadino, P. Prete, E. Speiser, N. Lovergine, W. Richter, L. Tapfer and A. M. Mancini, «GaAs nanowires grown by Au-catalyst-assisted MOVPE using tertiarybutylarsine as group-V precursor,» *Journal of Crystal Growth*, vol. 298, pp. 620-624, 2007.
- [19] Mancini, P. Piadino, P. Prete y N. Lovergine, «Size and shape control of GaAs nanowires grown by metalorganic vapor phase epitaxy using tertiarybutylarsine,» *Journal of Applied Physics*, 2006.
- [20] A. M. Munshi, D. L. Dheeraj, V. T. Fauske, D. C. Kim, J. Huh, J. F. Reinertsen, L. Ahtapodov, K. D. Lee, B. Hidari, A. T. van Helvoort, B. O. Fimland y H. Weman, «Position-Controlled Uniform GaAs Nanowires on Silicon using Nanoimprint Lithography,» *Nano Lett*, vol. 14, pp. 960-966, 2014.
- [21] D. J. Hill y J. J. Cahoon, «Nanowire Synthesis: From Top-Down to Bottom-Up,» *Material Matters*, 2017.
- [22] J. Jimenez y J. W. Tomm, *Spectroscopic Analysis of Optoelectronic Semiconductors*, Springer Series in Optical Sciences, 2016.

- [23] W. Hayes y R. Loudon, «Light Scattering in Solids,» New York, J. Wiley, 1978.
- [24] M. Cardona y G. Gutherodt, «Light Scattering in Solids, Topics in applied Physics».
- [25] J. L. Pura, J. Anaya, J. Souto, A. C. Prieto, A. Rodriguez, T. Rodriguez, P. Periwal, T. Baron y J. Jimenez, «Electromagnetic field enhancement effects ingroup IV semiconductor nanowires. A Raman spectroscopy approach,» *Journalof Applied Physics* , vol. 123, 2018.
- [26] D. Spirkoska, G. Abstreiter y A. Fontccuberta i Morral, «Size and environment dependence of surface phonon modes of gallium arsenide nanowires as measured by Raman espectroscopy,» *Nanotechnology*, vol. 19, 2008.
- [27] J. L. Pura; J. Anaya; and J. Jiménez, About the Interaction Between a Laser Beam and Group IV Nanowires: A Study of the Electromagnetic Field Enhancement in Homogeneous and Heterostructured Nanowires, *Phys. Status Solidi A*, 215, 1800336, 2018.

Anexo

En este Anexo se incluyen los datos obtenidos para todos los NWs medidos, los datos que se muestran en las tablas y por consiguiente en la representación gráfica son los correspondientes al barrido transversal. En la primera columna aparece la posición del haz láser (posición de la medida), la segunda corresponde a la intensidad Raman para el GaAs en cada una de las posiciones, en la tercera encontramos la intensidad Raman del Si y finalmente, en la cuarta esta misma intensidad normalizada de tal forma que la representación sea clara. Junto a cada tabla de datos aparecen dos imágenes, la primera corresponde a la representación gráfica ya mencionada donde en azul podemos ver la intensidad de la banda de GaAs en función de la posición y en rojo la del Si. Tras esta aparecen la imagen obtenida con el microscopio electrónico para cada uno de los NWs. Por último aparece una conclusión sobre la validez de cada NWs para nuestro estudio y, en caso de haber sido descartados, un motivo para dicha decisión. Los NWs están clasificados según la zona en la muestra en la que se encuentran y el número de NW dentro de dicha zona. En caso de haber sido aceptados se incluirá el nombre que han recibido en el trabajo.

Índice de resultados para las muestras

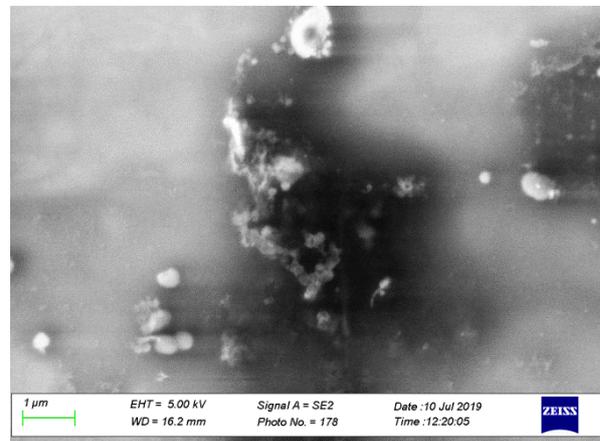
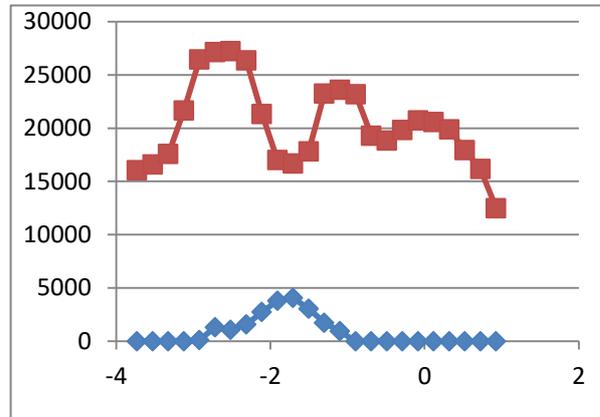
NW1, Zona 1	2
NW2, Zona 1	3
NW1, Zona 2 (Aceptado, NW1)	4
NW1, Zona 3	5
NW2, Zona 3	6
NW1, Zona 4 (Aceptado, NW2)	7
NW1, Zona 5 (Aceptado, NW3)	8
NW2, Zona 5	9
NW3, Zona 5	10
NW4, Zona 5	11
NW5, Zona 5 (Aceptado, NW4)	12
NW1, Zona 6 (Aceptado, NW5)	13
NW2, Zona 6 (Aceptado, NW6)	14
NW1, Zona 7	15
NW2, Zona 7 (Aceptado, NW7)	16

NW1, Zona 1

Datos obtenidos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,72991	0	66051,2	16051,2
-3,52735	0	66594,8	16594,8
-3,32479	0	67572,3	17572,3
-3,12224	0	71642	21642
-2,91968	114,014	76458	26458
-2,71713	1307,37	77125	27125
-2,51457	1052,31	77218,6	27218,6
-2,31202	1571,46	76357,7	26357,7
-2,10946	2734,75	71336,9	21336,9
-1,90691	3796,39	67013,3	17013,3
-1,70435	4047,28	66666,9	16666,9
-1,5018	3055,82	67825,9	17825,9
-1,29924	1735,57	73243,8	23243,8
-1,09669	941,536	73591	23591
-0,89413	0	73188	23188
-0,69158	0	69294,5	19294,5
-0,48902	0	68841,2	18841,2
-0,28646	0	69823,5	19823,5
-0,08391	0	70713	20713
0,118646	0	70573,2	20573,2
0,321202	0	69892,9	19892,9
0,523757	0	67932	17932
0,726312	0	66156	16156
0,928868	0	62496,8	12496,8

Representación gráfica e imagen SEM



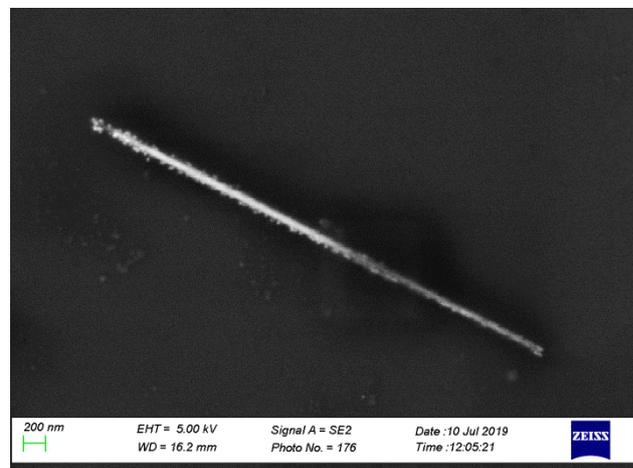
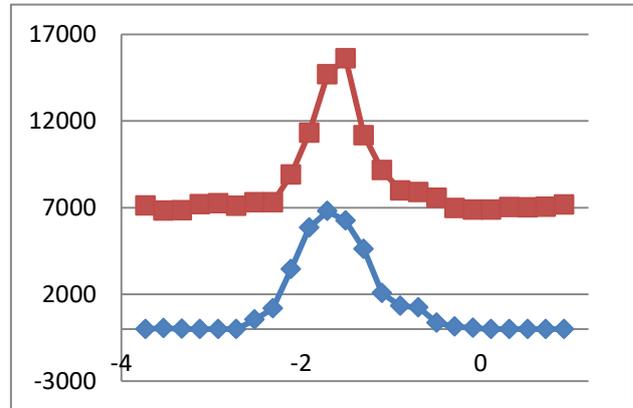
Resultado

DESCARTADO. Este NW ha sido descartado por no encontrarse en un entorno limpio. La medida de este nanohilo fue premeditada para observar si en presencia de suciedad era posible extraer conclusiones.

NW2, Zona 1

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,72991	0	62120,8	7120,8
-3,52735	51,2178	61829,1	6829,1
-3,32479	9,48945	61842,2	6842,2
-3,12224	0	62184	7184
-2,91968	0	62247,6	7247,6
-2,71713	0	62103,3	7103,3
-2,51457	537,616	62302,6	7302,6
-2,31202	1191,44	62307,7	7307,7
-2,10946	3457,56	63908,8	8908,8
-1,90691	5851,24	66320,2	11320,2
-1,70435	6796,21	69681,7	14681,7
-1,5018	6245,73	70601,8	15601,8
-1,29924	4607,22	66167,9	11167,9
-1,09669	2079,89	64164,8	9164,8
-0,89413	1328,6	62990,4	7990,4
-0,69157	1245,32	62898,2	7898,2
-0,48902	367,695	62564	7564
-0,2864	150	61960,9	6960,9
-0,08390	62,4409	61885,1	6885,1
0,118646	0	61877,6	6877,6
0,321202	0	62033,5	7033,5
0,523757	0	62000,5	7000,5
0,726312	0	62051,4	7051,4
0,928868	0	62179,4	7179,4



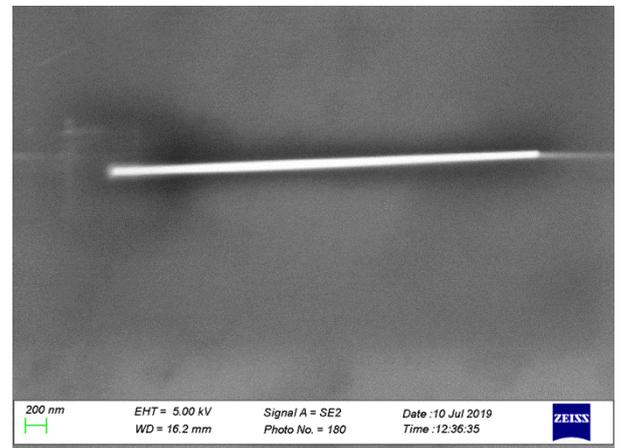
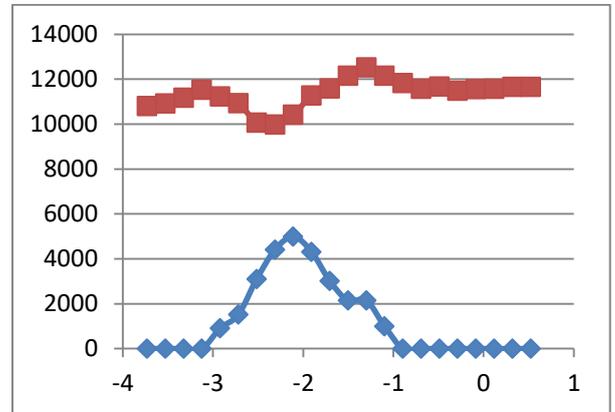
Resultado

DESCARTADO. Como puede verse en la imagen obtenida con el SEM de este NW su perfil no es nítido habiendo cierto tipo de residuo sobre su superficie. Una medida del diámetro no sería exacta además de la posible aparición de alguna interferencia debido a la sustancia desconocida alrededor del NW.

NW1, Zona 2 (Aceptado, NW1)

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,72991	0	45808,4	45808,4
-3,52735	0	45914,4	45914,4
-3,32479	0	46166,3	46166,3
-3,12224	0	46524,9	46524,9
-2,91968	909,855	46230,6	46230,6
-2,71713	1522,34	45935	45935
-2,51457	3103,35	45067,2	45067,2
-2,31202	4406,41	44974,6	44974,6
-2,10946	4992,01	45412,3	45412,3
-1,90691	4313,51	46268,2	46268,2
-1,70435	3014,3	46584,5	46584,5
-1,5018	2141,65	47157,7	47157,7
-1,29924	2150,66	47515,7	47515,7
-1,09669	1000	47156,5	47156,5
-0,89413	0	46821,8	46821,8
-0,691575	0	46563,9	46563,9
-0,48902	0	46666,9	46666,9
-0,286464	0	46481,1	46481,1
-0,083909	0	46558,7	46558,7
0,118646	0	46564,9	46564,9
0,321202	0	46649,4	46649,4
0,523757	0	46661,7	46661,7
0,726312	0	46425,2	46425,2
0,928868	0	46349	46349



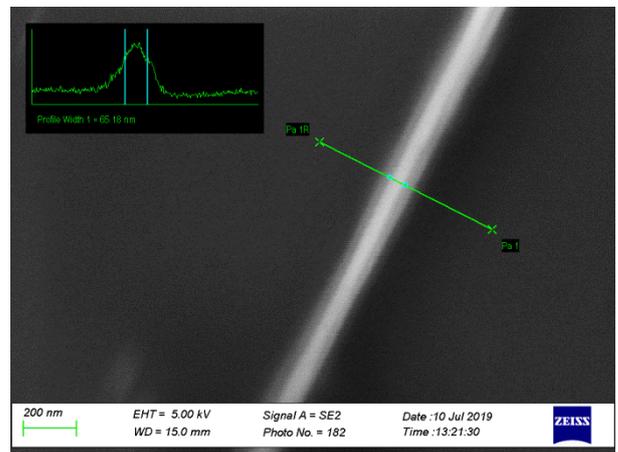
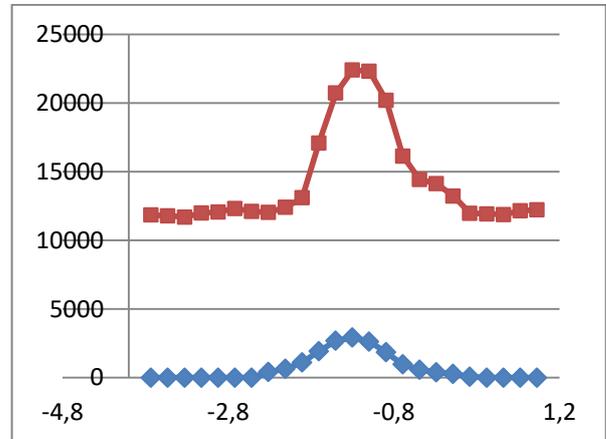
Resultados

ACEPTADO → NW1

NW1, Zona 3

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,72991	0	61836,8	61836,8
-3,52735	0	61782,2	61782,2
-3,32479	0	61685,9	61685,9
-3,12224	0	61984,4	61984,4
-2,91968	0	62066,3	62066,3
-2,71713	0	62314,9	62314,9
-2,51457	0	62097,4	62097,4
-2,31202	409,619	62042,4	62042,4
-2,10946	647,438	62399,3	62399,3
-1,90691	1107,14	63091,5	63091,5
-1,70435	1927,73	67081,4	67081,4
-1,5018	2687,92	70718,9	70718,9
-1,29924	2924,47	72395,2	72395,2
-1,09669	2632,46	72307	72307
-0,89413	1851,28	70198,7	70198,7
-0,69157	970,391	66130,9	66130,9
-0,48902	567,546	64437	64437
-0,28646	400,918	64113,4	64113,4
-0,08390	272,13	63228,3	63228,3
0,118646	67,6981	61969,8	61969,8
0,321202	0	61917,2	61917,2
0,523757	0	61874,1	61874,1
0,726312	0	62148	62148
0,928868	0	62223,5	62223,5



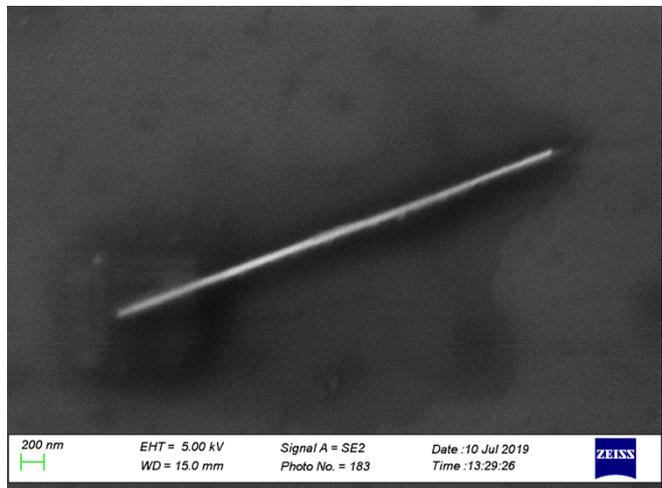
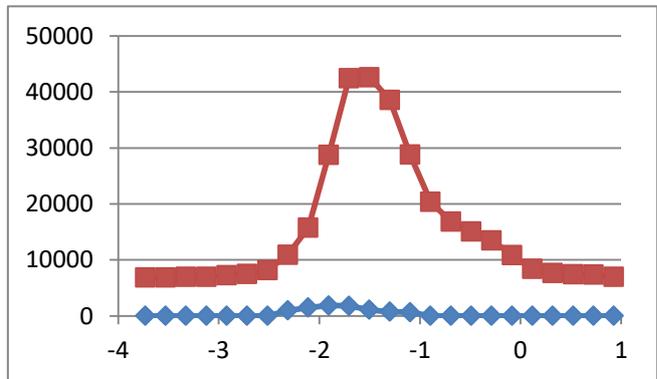
Resultado

DESCARTADO. En este caso la imagen obtenida con el SEM presentada se trata de una tomada con mayor zoom en la que se puede ver que en lugar de un solo NW parece haber al menos dos.

NW2, Zona 3

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,72991	0	66881,80	6881,80
-3,52735	0	66891,20	6891,20
-3,32479	0	67004,20	7004,20
-3,12224	0	66977,50	6977,50
-2,91968	0	67260,00	7260,00
-2,71713	0	67481,40	7481,40
-2,51457	0	68199,40	8199,40
-2,31202	989,481	70918,40	10918,40
-2,10946	1490,76	75783,00	15783,00
-1,90691	1870,57	88743,30	28743,30
-1,70435	1817,27	102404,00	42404,00
-1,5018	1090,38	102601,00	42601,00
-1,29924	755,922	98558,70	38558,70
-1,09669	668,376	88776,80	28776,80
-0,89413	0	80382,50	20382,50
-0,691575	0	76825,60	16825,60
-0,48902	0	75049,50	15049,50
-0,286464	0	73476,60	13476,60
-0,083909	0	70858,60	10858,60
0,118646	0	68386,50	8386,50
0,321202	0	67669,30	7669,30
0,523757	0	67428,50	7428,50
0,726312	0	67351,60	7351,60
0,928868	0	66987,10	6987,10



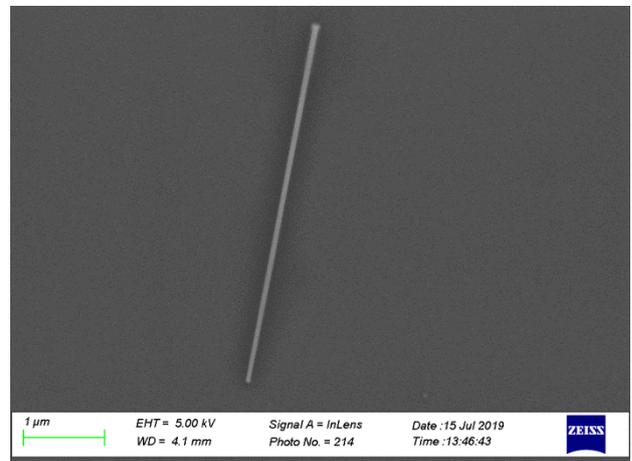
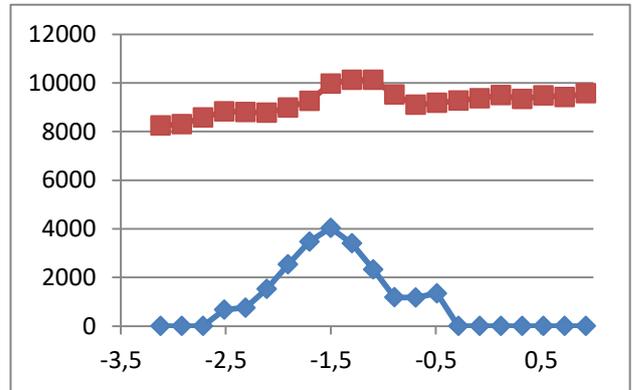
Resultado

DESCARTADO. Debido a un mal enfoque en el microscopio electrónico no ha sido posible conseguir un diámetro claro. Además, pueden observarse algunas partículas alrededor del NW que posiblemente sean las causantes de la imposibilidad de enfocar correctamente.

NW1, Zona 4 (Aceptado, NW2)

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,72991	997,232	47742,5	7742,5
-3,52735	0	47452,5	7452,5
-3,32479	0	47958,3	7958,3
-3,12224	0	48241	8241
-2,91968	0	48300,3	8300,3
-2,71713	0	48572,4	8572,4
-2,51457	675,06	48829,3	8829,3
-2,31202	752,884	48802,2	8802,2
-2,10946	1529,06	48770,2	8770,2
-1,90691	2533,27	48984,5	8984,5
-1,70435	3469,1	49262,6	9262,6
-1,5018	4034,35	49961,6	9961,6
-1,29924	3396,07	50127	10127
-1,09669	2326	50116,8	10116,8
-0,89413	1179,59	49516,4	9516,4
-0,691575	1172,07	49098,2	9098,2
-0,48902	1342,93	49171,8	9171,8
-0,286464	0	49270,1	9270,1
-0,083909	0	49366,9	9366,9
0,118646	0	49492,7	9492,7
0,321202	0	49331,5	9331,5
0,523757	0	49478,7	9478,7
0,726312	0	49417,7	9417,7
0,928868	0	49567,4	9567,4



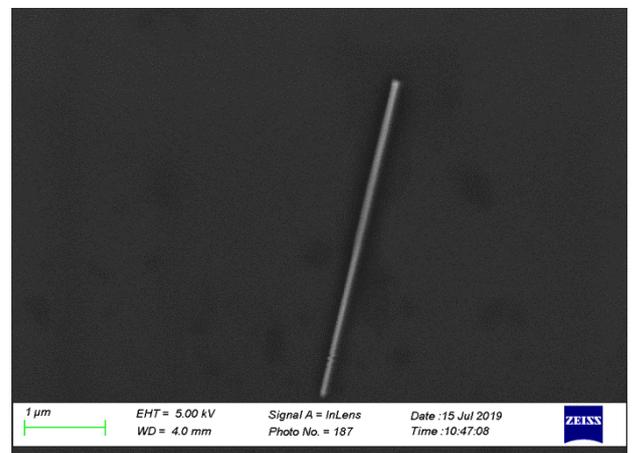
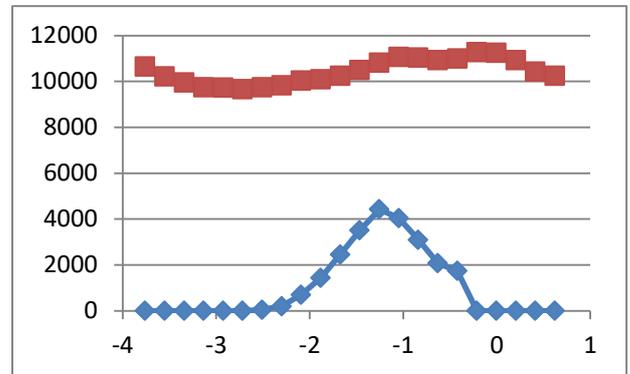
Resultado

ACEPTADO → NW2

NW1, Zona 5 (Aceptado, NW3)

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,7592	0	50644,6	10644,6
-3,55057	0	50213,9	10213,9
-3,34195	0	49953,7	9953,7
-3,13332	0	49750	9750
-2,9247	0	49735,7	9735,7
-2,71607	0	49662,7	9662,7
-2,50745	49,202	49750,5	9750,5
-2,29882	200,821	49823,3	9823,3
-2,0902	700,247	50042,2	10042,2
-1,88157	1436,18	50088,7	10088,7
-1,67294	2457,15	50247,9	10247,9
-1,46432	3506,04	50493,2	10493,2
-1,25569	4425,12	50823,8	10823,8
-1,04707	4044,1	51068,2	11068,2
-0,838443	3095,42	51033,5	11033,5
-0,629818	2073,19	50934,2	10934,2
-0,421193	1737,39	50999,6	10999,6
-0,212567	0	51269,6	11269,6
-0,003942	0	51248,6	11248,6
0,204683	0	50927,5	10927,5
0,413309	0	50433,3	10433,3
0,621934	0	50247,7	10247,7



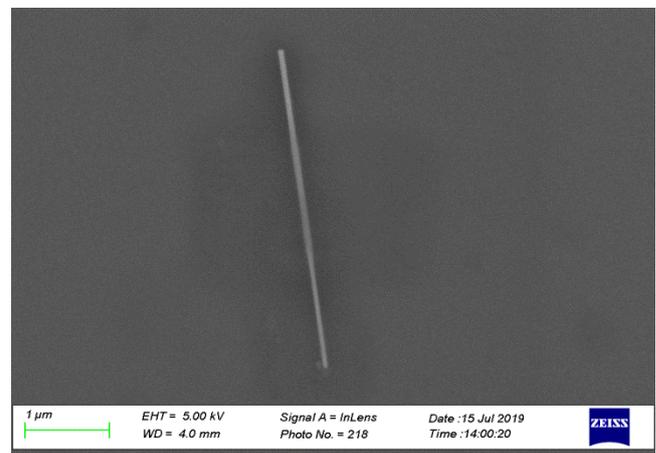
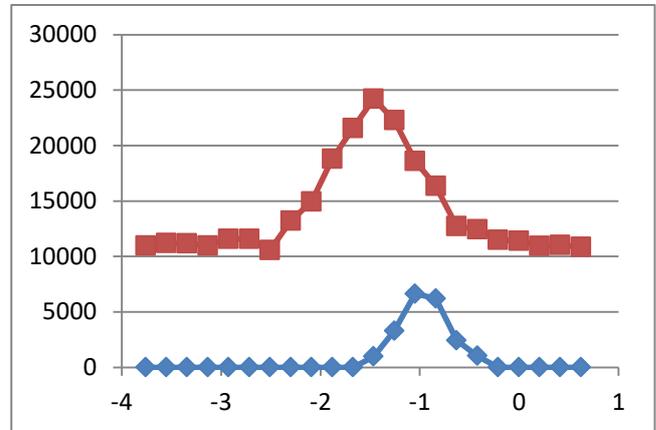
Resultados

ACEPTADO → NW3

NW2, Zona 5

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,7592	0	50974,6	10974,6
-3,55057	0	51194,4	11194,4
-3,34195	0	51179	11179
-3,13332	0	50985,2	10985,2
-2,9247	0	51583,7	11583,7
-2,71607	0	51587,2	11587,2
-2,50745	0	50589,6	10589,6
-2,29882	0	53218,3	13218,3
-2,0902	0	54957,6	14957,6
-1,88157	0	58798,2	18798,2
-1,67294	0	61572,1	21572,1
-1,46432	983,267	64219,5	24219,5
-1,25569	3298,3	62286,1	22286,1
-1,04707	6646,62	58609,3	18609,3
-0,838443	6203,94	56346,6	16346,6
-0,629818	2443,28	52728	12728
-0,421193	1036,01	52449,7	12449,7
-0,212567	0	51500,2	11500,2
-0,003942	0	51405,2	11405,2
0,204683	0	50958,3	10958,3
0,413309	0	51029,6	11029,6
0,621934	0	50873,2	10873,2



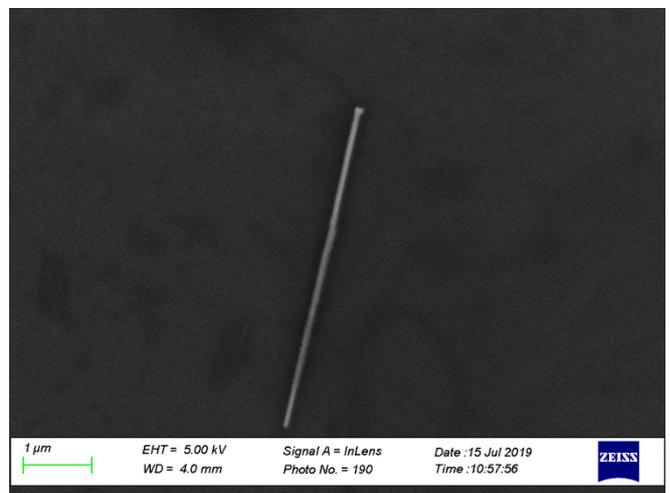
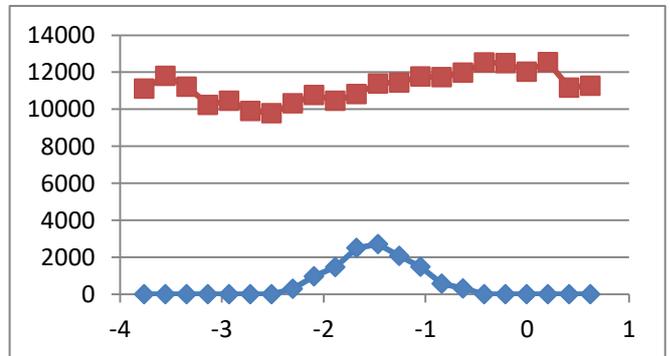
Resultado

DESCARTADO. Este NW tuvo que ser medido en más de una ocasión con el espectrómetro Raman debido al calentamiento de la CCD, al observarlo en el SEM se puede ver que en el centro aparece una zona algo difuminada que podría ser fruto de demasiada exposición al haz láser con lo que el resultado obtenido para el diámetro no es adecuado.

NW3, Zona 5

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,7592	0	51113,9	11113,9
-3,55057	0	51807,9	11807,9
-3,34195	0	51217,2	11217,2
-3,13332	0	50238,8	10238,8
-2,9247	0	50464	10464
-2,71607	0	49913,4	9913,4
-2,50745	0	49786,1	9786,1
-2,29882	304,647	50318,7	10318,7
-2,0902	974,851	50777,9	10777,9
-1,88157	1473,9	50454,5	10454,5
-1,67294	2498,99	50820,7	10820,7
-1,46432	2710,4	51396,1	11396,1
-1,25569	2068,23	51453,7	11453,7
-1,04707	1482,09	51769,3	11769,3
-0,838443	566,835	51737,5	11737,5
-0,629818	316,656	51980,1	11980,1
-0,421193	0	52530,8	12530,8
-0,212567	0	52493	12493
-0,003942	0	52033,8	12033,8
0,204683	0	52544	12544
0,413309	0	51173,4	11173,4
0,621934	0	51274,8	11274,8



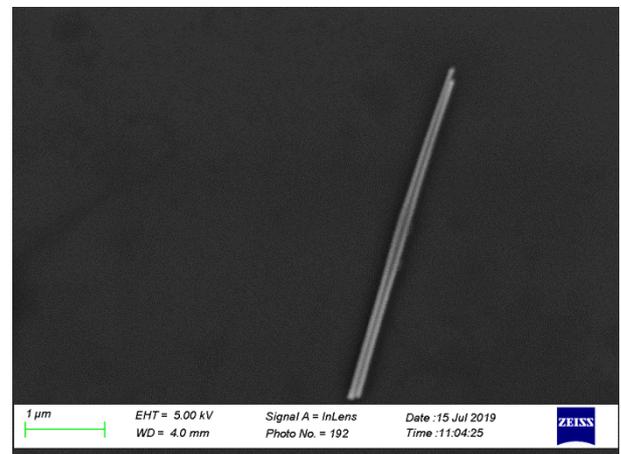
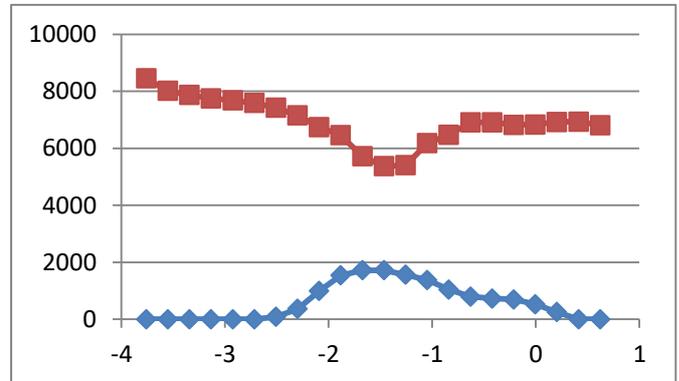
Resultado

DESCARTADO. El NW presenta desperfectos lo cual se hizo visible al observarlo en el SEM.

NW4, Zona 5

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,7592	0	48449,5	8449,5
-3,55057	0	48017,3	8017,3
-3,34195	0	47871,9	7871,9
-3,13332	0	47753,4	7753,4
-2,9247	0	47679,2	7679,2
-2,71607	0	47589,5	7589,5
-2,50745	87,1633	47424,5	7424,5
-2,29882	363,846	47151,2	7151,2
-2,0902	990,676	46745,6	6745,6
-1,88157	1538,89	46455,6	6455,6
-1,67294	1718,35	45721,8	5721,8
-1,46432	1719,25	45372,9	5372,9
-1,25569	1562,73	45405,3	5405,3
-1,04707	1379,13	46180,7	6180,7
-0,838443	1044,71	46467,3	6467,3
-0,629818	794,431	46904,5	6904,5
-0,421193	728,874	46911,5	6911,5
-0,212567	696,708	46823,7	6823,7
-0,003942	527,154	46832,4	6832,4
0,204683	251,862	46924	6924
0,413309	0	46931,8	6931,8
0,621934	0	46809,4	6809,4



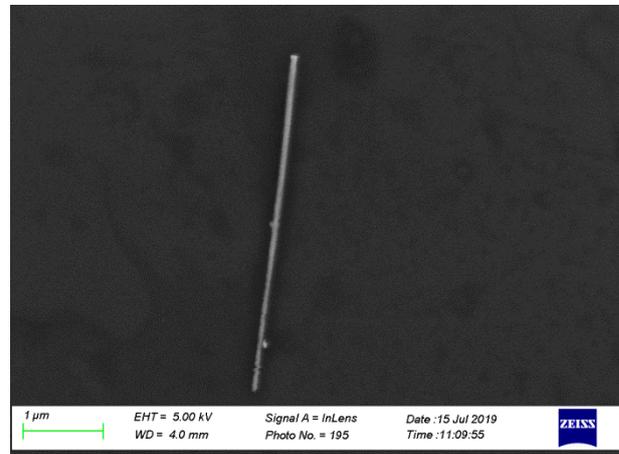
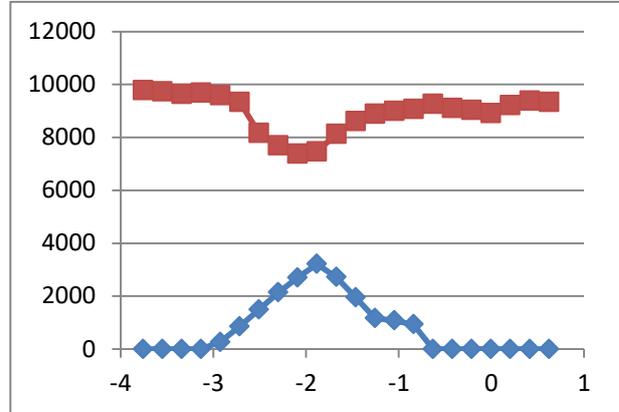
Resultado

DESCARTADO. Como puede verse en la imagen obtenida con el SEM en este caso aparecen dos NWs adyacentes haciendo que la medida no sea válida por la interacción que puedan causar el uno sobre el otro.

NW5, Zona 5 (Aceptado, NW4)

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,7592	0	44783,2	9783,2
-3,55057	0	44726,5	9726,5
-3,34195	0	44635,6	9635,6
-3,13332	0	44684,2	9684,2
-2,9247	261,615	44589,2	9589,2
-2,71607	854,857	44337,2	9337,2
-2,50745	1492,22	43160,4	8160,4
-2,29882	2139,3	42697,9	7697,9
-2,0902	2698,86	42384,4	7384,4
-1,88157	3211,98	42458,5	7458,5
-1,67294	2720,84	43133,1	8133,1
-1,46432	1950,57	43612,7	8612,7
-1,25569	1166,68	43886,6	8886,6
-1,04707	1079,97	43991,9	8991,9
-0,838443	934,539	44072,7	9072,7
-0,629818	0	44262,2	9262,2
-0,421193	0	44104,6	9104,6
-0,212567	0	44030,2	9030,2
-0,003942	0	43911,6	8911,6
0,204683	0	44208	9208
0,413309	0	44385,2	9385,2
0,621934	0	44335,1	9335,1



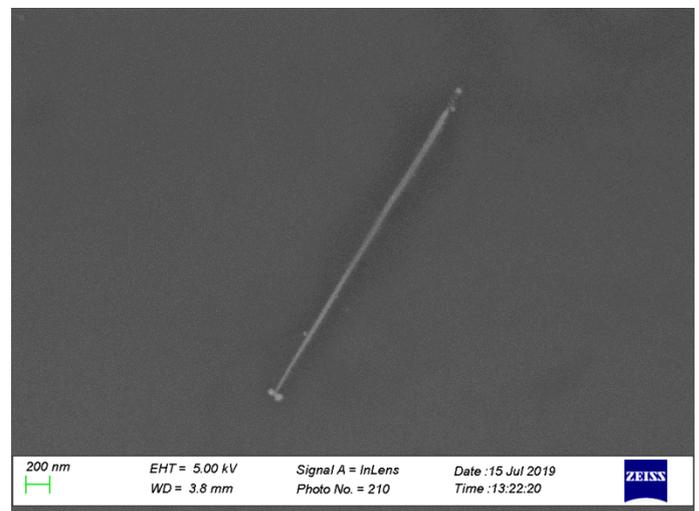
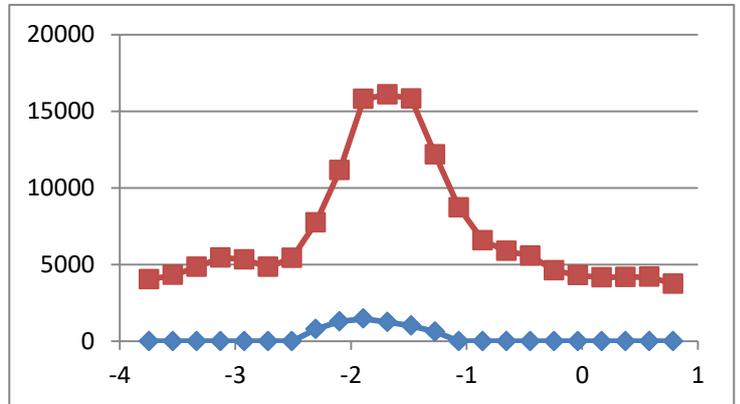
Resultado

ACEPTADO → NW4

NW1, Zona 6 (Aceptado, NW5)

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,74434	0	59027,5	4027,5
-3,53833	0	59323,8	4323,8
-3,33232	0	59836,2	4836,2
-3,1263	0	60451	5451
-2,92029	0	60330,8	5330,8
-2,71428	0	59837,1	4837,1
-2,50827	0	60436,8	5436,8
-2,30226	792,684	62747,8	7747,8
-2,09624	1291,37	66154,7	11154,7
-1,89023	1469,55	70792,3	15792,3
-1,68422	1246,94	71090,1	16090,1
-1,47821	1015,3	70807,1	15807,1
-1,2722	629,451	67178,5	12178,5
-1,06618	0	63727,7	8727,7
-0,860171	0	61581	6581
-0,654159	0	60883,3	5883,3
-0,448147	0	60580,1	5580,1
-0,242135	0	59622,6	4622,6
-0,036123	0	59303,3	4303,3
0,169889	0	59161,1	4161,1
0,375901	0	59190	4190
0,581912	0	59195,4	4195,4
0,787924	0	58748,9	3748,9



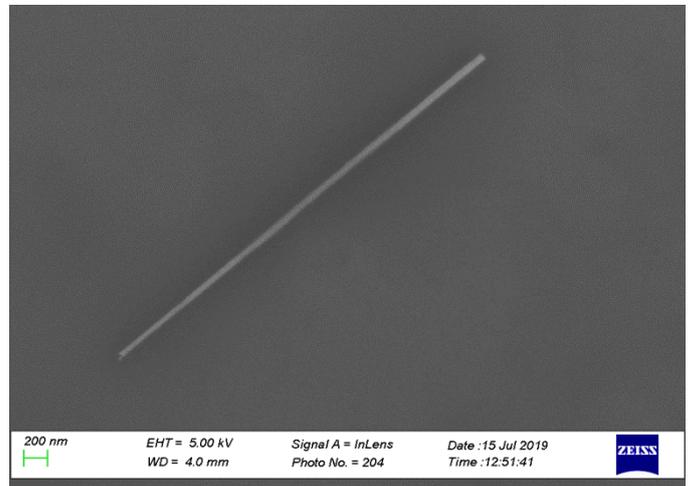
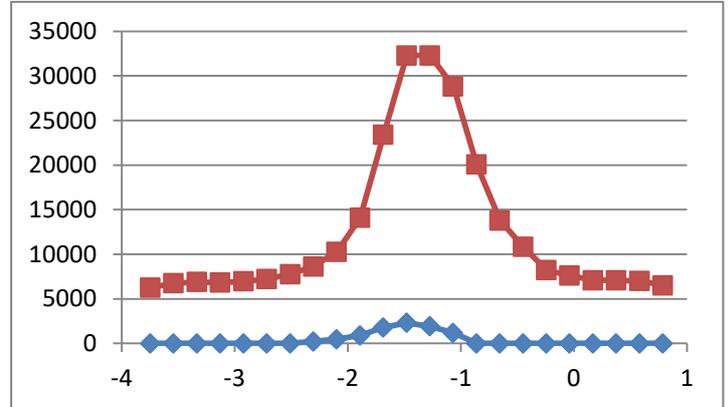
Resultado

ACEPTADO → NW5

NW2, Zona 6 (Aceptado, NW6)

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,74434	0	66277,5	6277,5
-3,53833	0	66750,7	6750,7
-3,33232	0	66887,2	6887,2
-3,1263	0	66832	6832
-2,92029	0	66968,7	6968,7
-2,71428	0	67209,3	7209,3
-2,50827	0	67778,8	7778,8
-2,30226	213,663	68624,1	8624,1
-2,09624	462,496	70281,9	10281,9
-1,89023	906,679	74094,3	14094,3
-1,68422	1798,01	83387,5	23387,5
-1,47821	2305,24	92285	32285
-1,2722	1928,34	92290,5	32290,5
-1,06618	1182,15	88824,1	28824,1
-0,860171	0	80088,1	20088,1
-0,654159	0	73785	13785
-0,448147	0	70836,2	10836,2
-0,242135	0	68212,2	8212,2
-0,036123	0	67608,9	7608,9
0,169889	0	67093,4	7093,4
0,375901	0	67069,3	7069,3
0,581912	0	66998,7	6998,7
0,787924	0	66513,2	6513,2



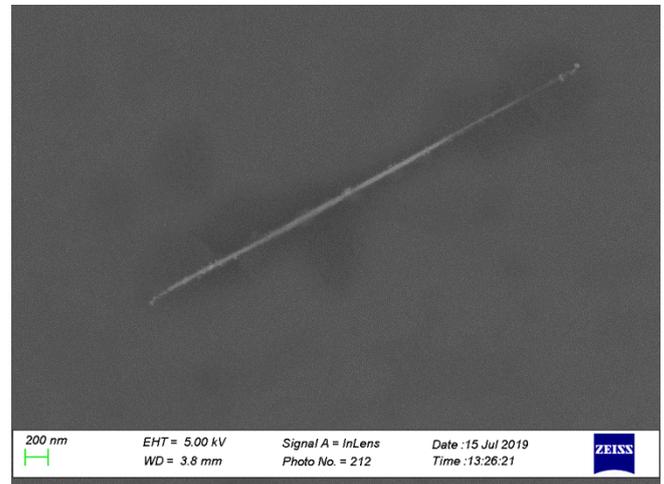
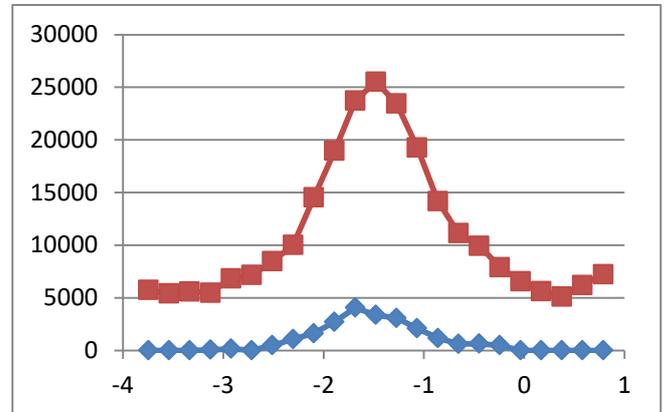
Resultado

ACEPTADO → NW6

NW1, Zona 7

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,74434	0	70730,5	5730,5
-3,53833	0	70402,7	5402,7
-3,33232	0	70600,2	5600,2
-3,1263	63,8056	70477,9	5477,9
-2,92029	141,51	71843,9	6843,9
-2,71428	19,028	72149,6	7149,6
-2,50827	488,921	73466,1	8466,1
-2,30226	1077,63	75028,3	10028,3
-2,09624	1615,86	79522,7	14522,7
-1,89023	2707,87	83973,7	18973,7
-1,68422	4054,07	88723,2	23723,2
-1,47821	3362,87	90526,7	25526,7
-1,2722	3076,3	88441,1	23441,1
-1,06618	2096,96	84252,1	19252,1
-0,860171	1168,34	79177,9	14177,9
-0,654159	612,02	76121,4	11121,4
-0,448147	627,725	74932,6	9932,6
-0,242135	483,57	72898,7	7898,7
-0,0361235	0	71556,4	6556,4
0,169889	0	70628,6	5628,6
0,375901	0	70115,2	5115,2
0,581912	0	71198,7	6198,7
0,787924	0	72234,4	7234,4



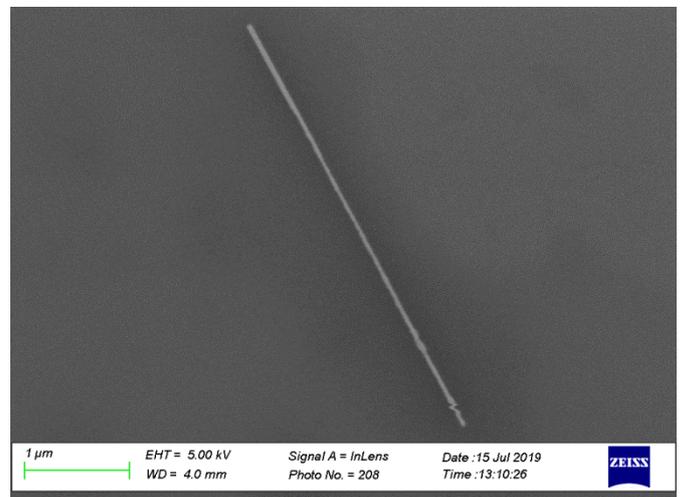
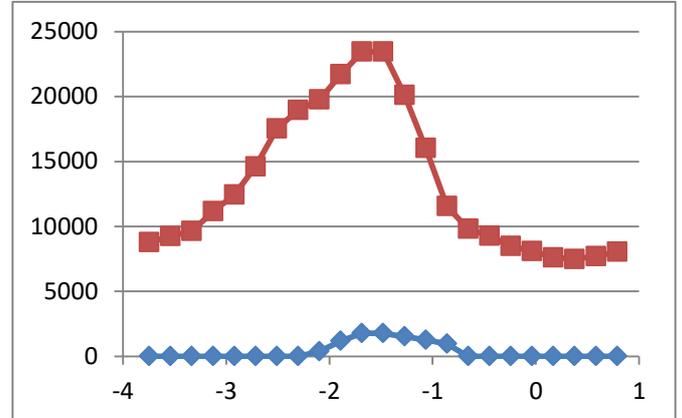
Resultado

DESCARTADO. El NW tiene muchas imperfecciones.

NW2, Zona 7 (Aceptado, NW7)

Datos

Posición	GaAs	Si	Si normalizado
-3,74434	0	68778,2	8778,2
-3,53833	0	69258,6	9258,6
-3,33232	0	69634,9	9634,9
-3,1263	0	71157,5	11157,5
-2,92029	0	72439,1	12439,1
-2,71428	0	74615,3	14615,3
-2,50827	0	77521,3	17521,3
-2,30226	0	78964,8	18964,8
-2,09624	389,943	79766,7	19766,7
-1,89023	1179,76	81707,1	21707,1
-1,68422	1791,7	83441,7	23441,7
-1,47821	1770,42	83463,3	23463,3
-1,2722	1531,35	80120,5	20120,5
-1,06618	1268,21	76030	16030
-0,860171	959,642	71552,4	11552,4
-0,654159	0	69815,2	9815,2
-0,448147	0	69265,5	9265,5
-0,242135	0	68485,1	8485,1
-0,0361235	0	68096,5	8096,5
0,169889	0	67605,5	7605,5
0,375901	0	67489,2	7489,2
0,581912	0	67710,4	7710,4
0,787924	0	68038,5	8038,5



Resultado

ACEPTADO → NW7