



## Caracterización de aleaciones semiconductoras por espectroscopia Raman

Veronica Espinoza Carrasco<sup>a\*</sup> y Whualkuer Lozano Bartra<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Matemática y Ciencias Naturales, Universidad Nacional del Callao, Bellavista-Callao.

<sup>b</sup>Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos Ap. Postal 14-0149, Lima 14, Perú

Recibido: 10-08-2009; Aceptado: 02-10-2009

### Resumen

El efecto del desorden estructural en el esparcimiento Raman de los modos acoplados plasmón - fonón LO, fue estudiado en aleaciones  $Al_xGa_{1-x}As$  dopadas con Silicio. Las asimetrías de las líneas Raman nos permitió la observación de estos modos debido a que la simetría traslacional del cristal fue destruida. El análisis de la posición y la forma de sus líneas espectrales proporciona información sobre la concentración de los portadores y los efectos del desorden estructural del material. Observamos que la concentración efectiva de portadores medida en Raman difiere de la concentración nominal dada por el fabricante, lo cual sugiere posibles pérdidas en el proceso de evaporación del Silicio o al exceso de tiempo de evaporación. Los resultados fueron verificados por medidas de Capacitancia versus Voltaje para dos muestras.

**Palabras claves:** Aleaciones; Excitaciones colectivas; Concentración de portadores.

### Alloy characterization semiconductors by Raman spectroscopy

#### Abstract

The effect of the structural disorder in the Raman scattering of the coupled plasmon - LO phonon modes was studied in doped  $Al_xGa_{1-x}As/Si$  alloys. The asymmetry in the Raman lines allows us the observation of these modes because the translational symmetry of the crystal was destroyed. The analysis of the position and shape of their spectral lines provides information on the concentration of carriers and the effects of structural disorder of the material. We note that the effective concentration of carriers in Raman measure differs from the nominal values given by the manufacturer, which suggests possible losses in the evaporation process of the silicon or the excess of evaporation time. The results were verified by measurement of Capacitance versus Voltage for two samples.

**Keywords:** Alloys; Collective excitations; Carrier concentrations.

### 1. Introducción

Los avances en las diferentes técnicas de crecimiento de materiales semiconductores permiten que un cristal crezca capa por capa sobre un sustrato con una gran precisión, garantizando así el control de los defectos en el crecimiento de heteroestructuras semiconductoras para obtener excelentes propiedades electro-ópticas [1]. Tenga presente que un defecto puede ser originado de diversas maneras, ya sea, por la variación en una región

de la muestra causada por una modificación de la red cristalina o por la adición de átomos extraños en la muestra. Por ejemplo, agregando impurezas [2] en heteroestructuras como las aleaciones  $Al_xGa_{1-x}As/Si$  o creciendo súper redes artificiales [3,4] Richter *et. al.* observaron [5] que las fluctuaciones del potencial electrónico producidas por impurezas en semiconductores destruían la simetría de traslación, dando como resultado, un desplazamiento y ensanchamiento

asimétrico de las líneas Raman. Recordemos, que este desorden lleva a una quiebra en las reglas de selección que permite que un número mayor de frecuencias participen del esparcimiento donde cada frecuencia contribuye con una lorentziana centrada en  $\omega$  y con un ancho de línea a media altura  $\Gamma$ . Esta quiebra en las reglas de selección nos permite un conocimiento más amplio de la estructura cristalina. Teniendo un control sobre los defectos podemos variar las características del material. Por ejemplo, controlando las impurezas en la muestra semiconductor se puede determinar la localización de los portadores (electrón o hueco) que serán responsables por el tipo de conductividad del cristal. Este efecto es relevante cuando se construyen dispositivos electrónicos como, diodos, láseres, fotodetectores, transistores HEMT (*High Electron Mobility Transistors*), lo que hace indispensable entender el proceso vibracional de los fonones y las propiedades de transporte de los portadores de carga. Además de las características energéticas contenidas en los procesos, un espectro Raman nos proporciona información sobre el tiempo de vida (ancho de línea) y la naturaleza de las excitaciones (forma de línea).

En este trabajo presentamos un análisis sistemático del comportamiento de los modos acoplados fonón LO-plasmón, sus frecuencias, las formas de las líneas Raman (asimetría) y los efectos de desorden debido a la presencia de impurezas.

## 2. Teoría

Dopando uniformemente un semiconductor, en adición a los modos vibracionales de las capas constituyentes, nuevos modos pueden ser observados debido a la presencia de portadores libres. Estos portadores libres forman un gas de electrones denominado plasma que interactúa vía atracción de Coulomb. La consecuencia física de esta fuerza de largo alcance es una oscilación de longitud de onda grande en la densidad de la nube electrónica. Por lo tanto, en el límite de grandes longitudes de onda, los electrones oscilan colectivamente a una frecuencia  $\omega_p$  (frecuencia de plasma). A un cuanto de esta oscilación se le da el nombre de plasmón.

En el caso de la aleación  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$ , la función dieléctrica en el límite de grandes longitudes de onda  $\epsilon$  es dada por [6]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty \frac{\omega_{LO_1}^2 - \omega_{TO_1}^2}{\omega_{TO_1}^2 - \omega^2 - i\Gamma_1\omega} + \epsilon_\infty \frac{\omega_{LO_2}^2 - \omega_{TO_2}^2}{\omega_{TO_2}^2 - \omega^2 - i\Gamma_2\omega} + \epsilon_\infty \frac{\omega_p^2}{\omega_{ij}^2 - \omega^2 - i\gamma_e\omega} \quad (1)$$

En este caso, las frecuencias de los modos acoplados son obtenidas haciendo  $\text{Re}\{\epsilon(\omega)\} = 0$ . Luego, la solución viene dada por:

$$\omega^3 - (\omega_{LO_1}^2 + \omega_{LO_2}^2 + \omega_p^2)\omega^2 + \left( \omega_{LO_1}^2\omega_{TO_2}^2 + \omega_{TO_1}^2\omega_{LO_2}^2 - \omega_{TO_1}^2\omega_{TO_2}^2 + \omega_{TO_1}^2\omega_p^2 + \omega_{TO_2}^2\omega_p^2 \right)\omega - \omega_{TO_1}^2\omega_{TO_2}^2\omega_p^2 = 0 \quad (2)$$

En estas aleaciones  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}$  existen dos tipos de fonón LO: los que son debidos a las capas del GaAs (tipo GaAs) y los que son debidos a las capas del AlAs (tipo AlAs). Estos fonones se acoplan con los electrones libres produciendo dos modos ópticos acoplados  $\omega_1^+$  y  $\omega_2^+$ , el primero de ellos debido al acoplamiento de los fonones LO del GaAs mientras que el segundo se origina de los fonones LO del AlAs.

## 3. Resultados y discusión

Fueron analizadas tres muestras de aleaciones  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  dopadas con Silicio, denominadas 908, 905 y 909. Estas muestras tienen espesores de 1,00  $\mu\text{m}$  y una fracción molar de Aluminio  $x = 0.20$ , con diferentes concentraciones de portadores libres  $N$ . Las muestras fueron crecidas por Epitaxia de Haces Moleculares sobre un substrato de GaAs orientados en (100) y fueron proporcionadas por el Laboratorio de *Molecular Beam Epitaxy* del Instituto de Física de la USP de Sao Carlos - Brasil. Las medidas experimentales fueron realizadas en el Laboratorio de Semiconductores del Departamento de Física de la Universidad Federal de Sao Carlos, estas fueron realizadas a baja temperatura ( $T \approx 10 \text{ K}$ ) con la finalidad de obtener líneas más intensas y con mayores definiciones.

Las concentraciones electrónicas fueron obtenidas por medidas Hall y Capacitancia. Efectuamos un análisis de la forma de las líneas espectrales Raman ya que nos permite un

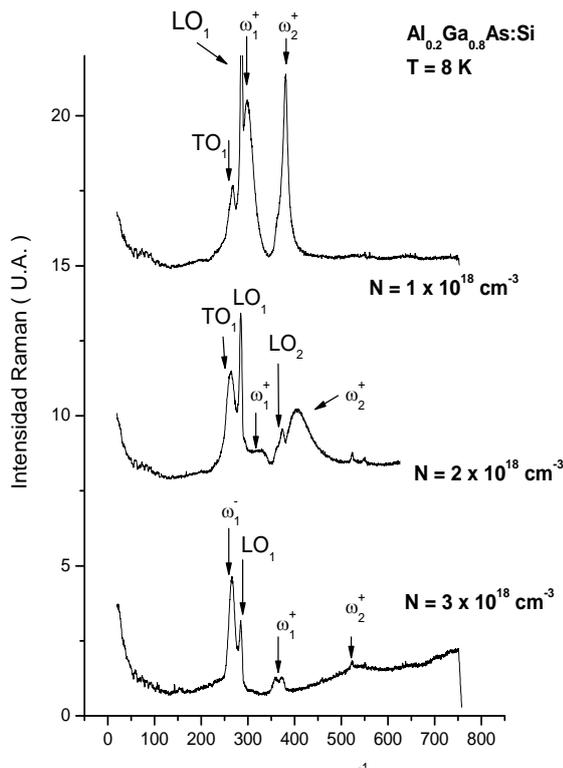


Fig. 1. Asimetría de las líneas Raman para los modos acoplado fonón LO – plasmón tipo GaAs y tipo AlAs.

conocimiento más amplio de la estructura cristalina, lo cual es mostrado en la figura 1. Observamos un modo LO (no acoplado) de la capa del GaAs, en la línea de  $285\text{ cm}^{-1}$  para las 3 muestras. La manifestación de esta línea tiene su origen en la capa de depleción y es debido a la transferencia de electrones de la primera capa para estados de superficie, induciendo un campo eléctrico. Esto concuerda con el trabajo de Pusep *et.al.* [2]. Las líneas indexadas por  $\omega_1^+$  y  $\omega_2^+$ , corresponden a los modos acoplados fonón LO – plasmón del tipo GaAs y AlAs, respectivamente. Otro punto importante, observado en los espectros Raman fue la modificación del carácter (fonón – plasmón) de los modos colectivos  $\omega_1^+$  y  $\omega_2^+$  a medida que la concentración aumenta. En las muestras con concentración  $1 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$  y  $2 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$  se puede observar un modo TO en  $264\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la capa de GaAs. También se pudo observar el modo acústico  $\omega_1^-$  debido a la alta concentración de dopaje, muestra con  $N = 3 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ . Este modo se presenta bastante intenso ya que se superpone al modo TO del GaAs. Tal como fue mostrado por Pusep *et.al.* [7,8], la asimetría, el desplazamiento y el

ensanchamiento de las líneas Raman están relacionadas entre sí, a través de la relación de dispersión  $\omega(k)$  de las excitaciones colectivas.

En la figura 1, notamos también que la forma de la línea Raman se altera drásticamente. Estas asimetrías en las líneas son provocadas por el desorden estructural de la muestra, debido a la quiebra de simetría traslacional de la red cristalina. Además, el acoplamiento de los fonones con los plasmones produce un desplazamiento de la línea para regiones de frecuencias más altas a medida que aumenta la concentración de portadores, lo que concuerda bastante bien con los cálculos teóricos realizados través de la ecuación (2).

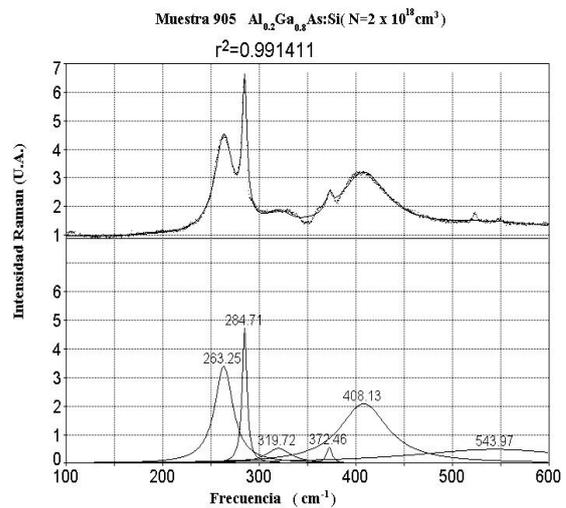


Fig. 2. Ajustes de los espectros de la muestra 905 realizado en Peakfit

El ajuste de los espectros fueron realizados utilizando un programa comercial conocido como *Peakfit*, el cual es mostrado en la figura 2.

De nuestros espectros obtenidos por la técnica Raman se obtuvieron las frecuencias de los picos más evidentes, que al ser comparado con los resultados de Adachi [9] hizo posible determinar los tipos de los modos excitados.

En la figura 3, se muestra el gráfico  $\omega \times \sqrt{N}$  para nuestra aleación. En dicho gráfico se trazaron los cálculos teóricos y los resultados experimentales de los modos acoplados  $\omega_2^+$ ,  $\omega_1^+$  y  $\omega^-$ . Se puede notar que los modos acoplados  $\omega_2^+$  están encima de la curva calculada a través de la ecuación 2.

Esto se explica por el hecho de que las frecuencias de los modos  $\omega_2^+$  fueron tomadas como referencia para determinar las

concentraciones de portadores  $N$ , ya que estos modos  $[\omega_2^+$  (tipo  $AlAs$ )] son más sensibles al cambio en la concentración de portadores. Se

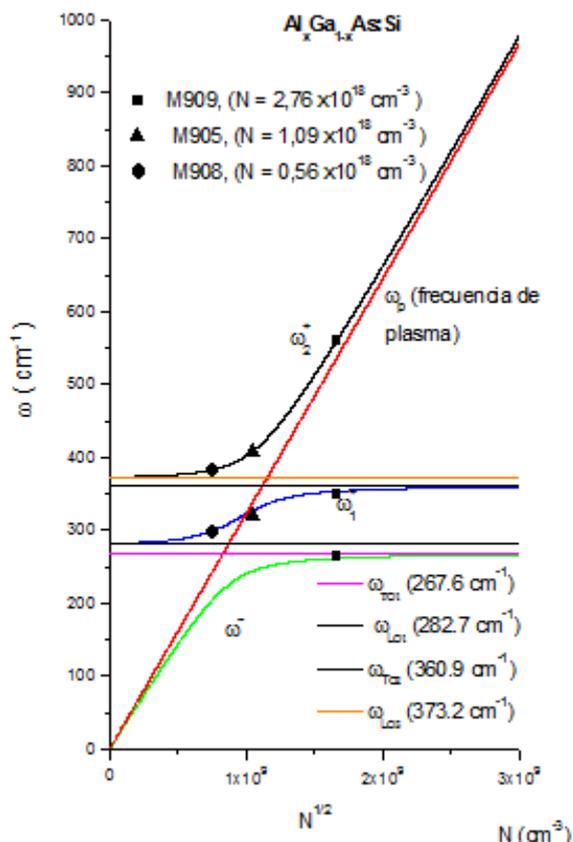


Fig. 3. Comparación entre los modos acoplados obtenidos a través de la ecuación 2 y a través de los resultados experimentales.

puede observar también que los resultados experimentales y teóricos concuerdan bastante bien para los modos acoplados  $\omega_1^+$ . No podemos decir lo mismo para los modos  $\omega^-$  debido a que dicho modo solo se observó en una muestra.

Muestras	$N_f$ ( $cm^{-3}$ )	$N_e$ ( $cm^{-3}$ )	$N_{C-V}$ ( $cm^{-3}$ )
908	$1 \times 10^{18}$	$0.56 \times 10^{18}$	$0,7 \times 10^{18}$
905	$2 \times 10^{18}$	$1,09 \times 10^{18}$	$0,7 \times 10^{18}$
909	$3 \times 10^{18}$	$2,76 \times 10^{18}$	-----

Tabla 1. Concentración de portadores obtenidos por el fabricante ( $N_f$ ), por medidas Raman ( $N_e$ ) y por medidas de Capacitancia – Voltaje ( $N_{C-V}$ )

Otra técnica usada para hallar la concentración de portadores  $N$ , es la medida de Capacitancia versus Voltaje. Esta es una caracterización eléctrica del material que consiste en la salida de

los electrones de la región de depleción en función de la variación del voltaje aplicado.

La Tabla 1, muestra la concentración nominal dada por el fabricante ( $N_f$ ), la concentración efectiva ( $N_e$ ) obtenida por espectroscopía Raman y la concentración efectiva obtenida por medidas de capacitancia en función del voltaje ( $N_{C-V}$ ).

Comparando los resultados presentados en la tabla 1, notamos que la concentración efectiva medida en  $C - V$  es bastante próxima a la obtenida por una medida en Raman para las diferentes muestras. Con ello se ha mostrado la potencialidad de la espectroscopía Raman en el análisis de materiales semiconductores dopados, con la ventaja de que no es una técnica destructiva y que no es necesario colocar contactos eléctricos, como en el caso de medidas por capacitancia. La diferencia entre los valores nominales y efectivos puede ser explicada por posibles pérdidas durante el proceso de evaporación de silicio en la fabricación de las muestras o por el exceso de tiempo de exposición de evaporación.

4. Conclusiones

Estudiamos el comportamiento del sistema fonón LO- plasmón dentro del formalismo de la función Respuesta Dieléctrica de una aleación posibilitando el levantamiento de las curvas de dispersión de los modos acoplados fonón LO – plasmón. Los resultados muestran que las concentraciones de portadores  $N$  obtenidas por la técnica Raman difieren de los valores nominales dados por el fabricante. Para confirmar nuestros resultados se realizaron medidas de capacitancia versus voltaje. Comparando los resultados de estas dos técnicas, notamos que los valores obtenidos son bastante próximos.

5. Agradecimientos

V. Espinoza agradece a Yu. A. Pusep por la preparación de las muestras y a José Claudio Galzerani por la ayuda en las medidas experimentales. Este trabajo fue financiado por el Consejo Superior de Investigación y el Vicerrectorado Académico de la UNMSM.

**Referencias**

- [1] H. Ariza Calderon, Rev. Acad. Colomb. Cienc.27 (104) (2003) 357-358.
- [2] Yu. Pusep, M.T.O.Silva, J.C. Galzerani, N.T. Moshegov, P. Basmaji; Physical Review B, V 58 (1998) 16 .
- [3] K. Uesugi, T. Obinda, I. Suemune, H. Kumano; Applied Physics Letters 68 (6) (1996) 844-846.
- [4] Yu. Pusep, M.B. Ribeiro, V.E.Carrasco, G.Zanelatto, J.C. Galzerani, Physical Review Letters, V 94 (2005) 136407.
- [5] H.Richter, Z.P. Wang, and L.Ley, Solid State Commun. 39 (1981) 625.
- [6] B.B.Varga, Phys. Rev. **137** A (1965) 1896.
- [7] Yu.A. Pusep, M.T.O. Silva, N.T. Moshegov, J.C. Galzerani, Phys. Rev. B 61 (2000) 4441.
- [8] V.E. Carrasco, G. Zanelatto, Yu. A. Pusep. J. C. Galzerani Internet Electron. J. Nanoc. Moletrón., vol. 4 , N°3 (2006) 775-784.
- [9] S. Adachi, J. Appl. Phys. 58 (3) (1985) 1.