

## DETERMINACION DE LOS ÍNDICES DE REFRACCION DEL GaSb MEDIANTE ELIPSOMETRIA Y UN PRISMA

M. Muñoz Uribe<sup>1,2</sup>, J. G. Mendoza-Alvarez<sup>1</sup>, C.E.M. de Oliveira, M. B. Zakia, y N. B. Patel  
Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Unicamp Campinas,  
SP, Brasil .

### RESUMEN

Fueron determinados los índices de refracción del GaSb en la región de 1.75-2.56 $\mu\text{m}$  por dos vías: mediante elipsometría y por refracción en un prisma de este material. Los índices de refracción obtenidos por ambas técnicas presentan consistencia. Los resultados obtenidos son ajustados de manera bastante precisa por el modelo de un oscilador.

### ABSTRACT

We have measured the refractive index of GaSb using ellipsometry and a refraction prism in the region from 1.75 $\mu\text{m}$  to 2.56 $\mu\text{m}$ . The values obtained agree well each other. A good fit to the experimental results is obtained using the single oscillator model.

PACS: 78.20Ci, 78.30Fs, 07.60Fs

Keywords: GaSb, refractive index, prism.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los compuestos cuaternarios GaAlAsSb y GaInAsSb crecidos sobre el GaSb con redes cristalinas acopladas son empleados [ 1 ] en varios dispositivos optoelectrónicos como láseres y detectores. El análisis y diseño de tales dispositivos [ 2 ] requiere el conocer en forma precisa los valores de los índices de refracción de las diferentes películas que componen el dispositivo.

Existen pocos reportes [ 3 ]-[ 5 ] de las medidas de los índices de refracción del GaSb en la región transparente y estas por razones desconocidas presentan una gran dispersión entre sí como muestra la Figura 1. Las barras en esta figura indican el posible error que se cometió al extraer los valores a partir de la gráfica original extremadamente condensada.

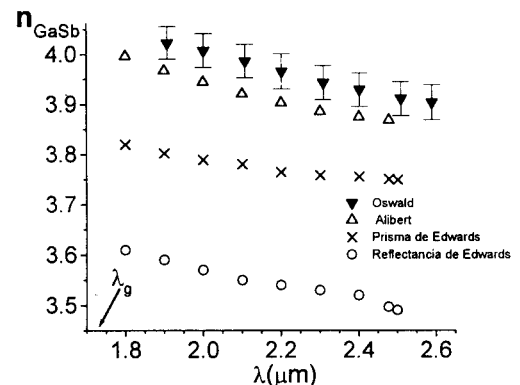


Figura 1. Dispersión en los índices de refracción del GaSb disponibles antes de este trabajo.

Debido a dicha dispersión, surge la necesidad de una determinación precisa y consistente de los índices de refracción del GaSb como un paso previo en la determinación de los índices de refracción de las películas crecidas sobre sustratos de este material.

<sup>1</sup> Departamento de Física, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN, Caja Postal 14-740, México D.F., México.

<sup>2</sup> Autor para correspondencia. Tel. (52-5) 747-7000 ext. 4209, e-mail: martin@fis.cinvestav.mx.

En este trabajo se presentan los valores obtenidos para los índices de refracción del GaSb tanto a partir de medidas elipsométricas como de medidas de refracción en un prisma de este material.

## 2. MEDICIONES ELIPSOMÉTRICAS

La elipsometría [ 6 ] es una técnica experimental que mide los cambios en los estados de polarización de la luz cuando esta es reflejada o transmitida a través de un sistema de tipo laminar. Estos cambios son tomados en cuenta mediante los ángulos elipsométricos los cuales a su vez se relacionan mediante ecuaciones trascendentes con los índice de refracción y las espesuras de las películas que integran la muestra.

En este tipo de medidas se empleó un elipsómetro manual Rudolph modelo 436 el cual posee como fuente de luz una lámpara de tungsteno de 150W. Las señales de salida en estos experimentos fueron registradas con un sistema de *lock-in* y un detector de InAs. Las longitudes de onda usadas en las mediciones elipsométricas fueron seleccionadas mediante filtros de interferencia colocados frente a la ventana de entrada del detector. Los filtros utilizados fueron de 1.75, 2, 2.3 y 2.477 $\mu\text{m}$ , siendo que los tres primeros poseen un ancho de banda de 100nm y el último de 70nm.

Con este sistema fueron determinados los ángulos nulos o azimutales definidos por las posiciones del polarizador y el analizador en las cuales la señal detectada correspondiente a la luz reflejada por la muestra es nula. En base a este conjunto de ángulos nulos fueron determinados los ángulos elipsométricos  $\Psi$  y  $\Delta$  a partir de los cuales se calcularon los índices de refracción del GaSb. Con la finalidad de incrementar la precisión de las medidas y de disminuir los posibles errores causados por las imperfecciones del polarizador, analizador y compensador, fue empleado el método de promedio en las cuatro zonas [ 6 ], además de realizar medidas con diferentes ángulos de incidencia.

Para obtener las constantes ópticas del sistema a partir de los ángulos experimentales  $\Psi$  y  $\Delta$  se supuso que la muestra era de tipo laminar y que estaba integrada por tres medios; aire, óxido de GaSb (con una espesura  $d_{\text{ox}}$  y un índice de refracción  $n_{\text{ox}}$  desconocidos) y un sustrato de GaSb (con un índice de refracción  $n_{\text{GaSb}}$ ). Con la finalidad de considerar el sustrato infinito fue lijada la parte posterior del sustrato para minimizar las posibles reflexiones originadas en esta. El coeficiente de reflexión del sistema laminar es [ 7 ]:

$$r_{123} = \frac{r_{12} + r_{23}e^{i\phi}}{1 + r_{12}r_{23}e^{i\phi}} \quad (2-1)$$

Siendo  $r_{ij}$  los coeficientes de Fresnel correspondientes a la interface  $i$ - $j$  y  $\phi$  la fase de propagación dada por:

$$\phi = \frac{4\pi d}{\lambda} \sqrt{n_{\text{oxid}}^2 - \sin^2(\theta_{\text{inc}})} \quad (2-2)$$

siendo  $\lambda$  y  $\theta_{\text{inc}}$  la longitud de onda y el ángulo de incidencia de la luz.

Los valores típicos para el índice de refracción del óxido nativo de un semiconductor y para su espesura son aproximadamente 2 y 100 $\text{\AA}$ , respectivamente. Estos valores hacen que  $\phi$  sea suficientemente pequeña permitiendo así aproximar el coeficiente  $r_{123}$  apenas a primer orden, bajo esta aproximación se tiene:

$$r_{123} \approx r_{13} + i\delta r \approx r_{13} e^{i\delta r/r_{13}} \quad (2-3)$$

donde

$$\delta r = \frac{4\pi(1-r_{12}^2)r_{23}}{(1+r_{12}r_{23})^2} \sqrt{n_{\text{oxid}}^2 - \sin^2(\theta_{\text{inc}})} \times \left(\frac{d}{\lambda}\right) \quad (2-4)$$

A partir de los principios de la elipsometría sabemos que los ángulos elipsométricos  $\Psi$  y  $\Delta$  están relacionados con los coeficientes de reflexión  $r_p$  y  $r_s$  de la luz polarizada tipo  $p$  y  $s$  por:

$$\rho = \tan \Psi e^{i\Delta} = \frac{r^{(p)}}{r^{(s)}} \quad (2-5)$$

Denotando por  $\Psi_0$  y  $\Delta_0$  a los ángulos elipsométricos, en el caso ideal en el que no hay óxido presente, de la ecuación ( 2-5 ) se tiene:

$$\rho_0 = \tan \Psi_0 e^{i\Delta_0} = \frac{r_{13}^{(p)}}{r_{13}^{(s)}} \quad (2-6)$$

En el caso de no haber absorción, el índice de refracción es real así como el cociente  $r_{13}^{(p)}/r_{13}^{(s)}$ , por lo que en este caso hipotético no hay información en  $\Delta_0$ , el cual adquiere un valor de  $\pi$  ó de 0 dependiendo de si el ángulo de incidencia es menor ó mayor que el ángulo de Brewster. De la ecuación ( 2-3 ) se sigue que si  $(\delta r/r_{13}) \ll 1$  la presencia del óxido desvía a  $\Delta$  del valor ideal  $\Delta_0$  apenas por un término de segundo orden en  $\delta r^{(p)}/r_{13}^{(p)} - \delta r^{(s)}/r_{13}^{(s)}$ . En este orden se tienen:

$$\Psi \approx \Psi_0 \quad (2-7)$$

y

$$\Delta \approx \Delta_0 + \frac{\delta r^{(p)}}{r_{13}^{(p)}} - \frac{\delta r^{(s)}}{r_{13}^{(s)}} \quad (2-8)$$

El conocer  $\Psi_0$  permite utilizar la ecuación ( 2-6 ) en lugar de ( 2-5 ) y determinar el índice de refracción del sustrato independientemente de no conocer a  $d_{\text{ox}}$

y  $n_{ox}$ . El índice de refracción del sustrato en función de  $\rho_0$  está dado por [ 6 ]:

$$n_{sub} = \sin(\theta_{inc}) \left[ 1 + \left( \frac{1 - \rho_0}{1 + \rho_0} \right) \tan^2(\theta_{inc}) \right]^{1/2} \quad (2-9)$$

Este valor para el índice de refracción del sustrato puede ser utilizado en ( 2-8 ) para obtener información del óxido que confirme las suposiciones iniciales acerca de su espesor.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de las medidas de dos sustratos de GaSb, uno de tipo  $p$  y otro de tipo  $n$  con densidades de portadores a temperatura ambiente de  $1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  y  $4.6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente .

Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Índice del sustrato tipo $p$	Índice del sustrato tipo $n$
1.75	$3.968 \pm 0.003$	$3.969 \pm 0.003$
2.0	$3.886 \pm 0.003$	$3.880 \pm 0.003$
2.3	$3.853 \pm 0.003$	$3.843 \pm 0.003$
2.477	$3.839 \pm 0.003$	$3.829 \pm 0.003$

Tabla 1 Índices de refracción de los sustratos.

Los resultados anteriores son presentados de forma gráfica en la Figura 2. En esta puede apreciarse que los índices de refracción del sustrato tipo  $n$  son ligeramente menores que los del tipo  $p$ . Esta diferencia se debe a los efectos de llenado de portadores en la banda de conducción (*band filling*), este efecto incrementa el valor de la banda prohibida causando una disminución en la constante dieléctrica [ 8 ]. Este efecto es casi despreciable en el material de tipo  $p$  ya que la densidad de portadores en este es dos ordenes de magnitud menor.

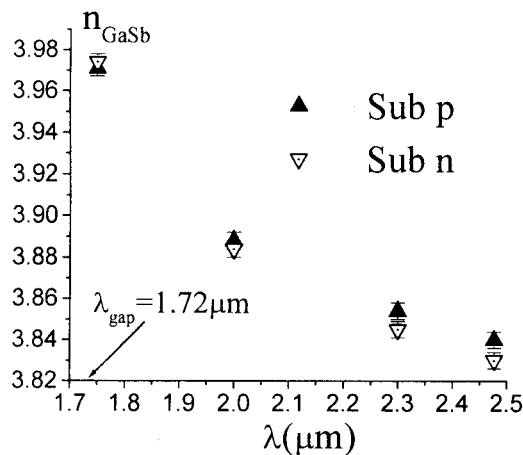


Figura 2 Índices de refracción de los sustratos vs.  $\lambda$ .

Como mencionamos anteriormente utilizaremos la ecuación ( 2-8 ) para calcular la espesura del óxido y su índice de refracción. Estos valores confirman la consistencia con las suposiciones que fueron hechas acerca de estos. Los valores que obtuvimos experimentalmente para  $\Delta - \Delta_0$  cuando  $\lambda = 2.3 \mu\text{m}$  fueron  $0.8^\circ$  y  $1.4^\circ$  para los ángulos de incidencia de  $45^\circ$  y  $50^\circ$ , respectivamente. Utilizando estos valores en la ecuación ( 2-8 ) se obtiene que  $n_{ox} \approx 2$  y  $d_{ox} \approx 70 \text{ \AA}$ .

### 3. MEDIDAS DE REFRACCIÓN

El prisma fue cortado a partir de un lingote de GaSb de 25mm de diámetro crecido en nuestros laboratorios [ 9 ]. El cristal del que se obtuvo el prisma, nominalmente no dopado, poseía una concentración residual de tipo  $p$  de  $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  a  $300^\circ\text{K}$ . Las dos caras del prisma fueron pulidas hasta obtener una terminación de tipo espejo utilizando primero carbeto de Si y posteriormente un paño de pulimento y una solución de Bromo-Metanol al 2%.

La determinación del ángulo  $A$  del prisma fue realizada montando el mismo en el soporte de rotación de un elipsómetro Rudolph modelo 436. Se hizo incidir luz de un láser de He-Ne sobre una de las caras del prisma de forma tal que después de reflejada esta regresara sobre sí misma. A continuación el soporte fue rotado al ángulo necesario para repetir la condición de reflexión sobre la otra cara. La diferencia entre  $180^\circ$  y este ángulo nos proporcionó el ángulo  $A$  del prisma el cual fue de  $6.53^\circ \pm 0.01^\circ$ .

Para la determinación de los índices de refracción se utilizó la geometría de la Figura 3.

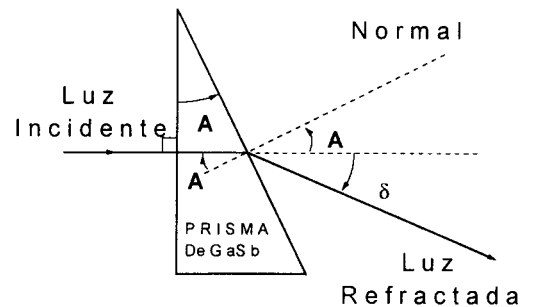


Figura 3 Luz refractada por el prisma de GaSb

El prisma fue montado nuevamente en el soporte rotatorio y los ángulos  $\delta$  a los cuales la luz era refractada fueron determinados con la ayuda de un detector de InAs ubicado en el brazo rotatorio de la base del elipsómetro. Estas medidas fueron realizadas en el intervalo de  $1.8 \mu\text{m}$  a  $2.56 \mu\text{m}$  con un ancho de banda de  $90 \text{ \AA}$ ; la luz en este intervalo se obtuvo a partir de un monocromador McPherson modelo 218 con una red de difracción con *blaze* en  $2 \mu\text{m}$ . Un sistema de pulsador mecánico de luz *lock-in* fue utilizado para mejorar la sensibilidad de estas

medidas. Con el arreglo descrito fue posible determinar el ángulo  $\delta$  con una precisión mejor que  $0.01^\circ$ .

Aplicando la ley de Snell a la geometría de la Figura 3 se obtiene que los índices de refracción del prisma están dados por la siguiente expresión:

$$n = \frac{\sin(A + \delta)}{\sin A} \quad (3-1)$$

el error experimental estimado en la determinación del índice de refracción con esta configuración fue de  $\pm 0.005$ .

Los valores de los índices de refracción obtenidos en función de la longitud de onda son presentado en la Figura 4 donde también han sido incluidos los valores correspondientes a las longitudes de onda medidas por elipsometría presentadas en la sección anterior.

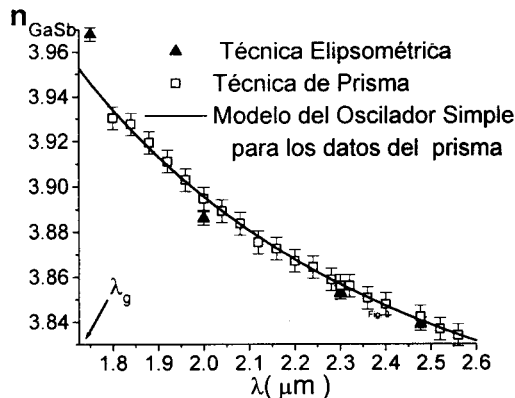


Figura 4 Comparación de los índices de refracción obtenidos por las técnicas de elipsometría y de prisma

Estas medidas de transmisión mostraron que la luz de  $1.75\mu\text{m}$  sufría una absorción considerable reduciendo así la señal por debajo de nuestras capacidades de medición. Lo anterior hace cuestionables los valores para esta longitud de onda obtenidos por elipsometría ya que el análisis empleado no considera absorción. Los restantes puntos se encuentran en buena concordancia con los obtenidos por las medidas elipsométricas.

La curva en continuo de la Figura 4 fue ajustada utilizando el modelo de un solo oscilador [ 10 ], el cual supone que en el límite de bajas frecuencias la constante dieléctrica  $\epsilon = n^2$  puede ser descrita por

$$\epsilon(E) = 1 + \frac{E_0 E_d}{E_0^2 - E^2} \quad (3-2)$$

siendo  $E_0$  y  $E_d$  dos parámetros empíricos y  $E$  la energía del fotón. En nuestro caso se encontró  $E_0 = 2.17\text{eV}$  y  $E_d = 28.27\text{eV}$ , con los que se obtiene un buen ajuste aún en frecuencias cercanas a la correspondiente de la banda prohibida.

## 4. DISCUSIÓN

Como se mostró en la introducción, existe una gran dispersión para los valores de los índices de refracción para el GaSb, la razón de esta discrepancia no es clara para nosotros. Sin embargo pensamos que una posible fuente de error pudo ser el manejo del óxido nativo ya que en ninguna de las referencias que dieron origen a la Figura 1 se menciona si este fue considerado y como fue tomado en cuenta al procesar los datos. Otra posible razón es que estos resultados fueron obtenidos en medidas de reflectividad, excepto uno de los de Edwards que trabajó con el ángulo de mínima desviación de un prisma.

Pensamos que la gran consistencia entre nuestros resultados se debe esencialmente a dos razones. La primera es que fueron utilizadas técnicas independientes de la intensidad de la luz incidente. La segunda es que en el tratamiento elipsométrico se consideró la presencia del óxido la cual afecta los ángulos de refracción en los experimentos con el prisma en una desviación mucho menor que el error experimental por ser el óxido una película muy fina.

## 5. CONCLUSIÓN

En este trabajo fueron presentados los valores de los índices de refracción del GaSb obtenidos mediante las técnicas de elipsometría y de refracción en un prisma en la región comprendida entre  $1.75\mu\text{m}$  y  $2.56\mu\text{m}$ . Los resultados conseguidos en ambas experiencias presentan una excelente concordancia nunca antes presentada. Un buen ajuste de los datos fue obtenido usando el modelo de un oscilador simple.

## 6. REFERENCIAS

- [ 1 ] A. G. MILNES and A. Y. POLIAKOV, 'Review: Gallium Antimonide Device related properties', Solid State Electronics, **36** (1993), 803-818.
- [ 2 ] S. S. LOURAL, M. B. Z. MOROZINI, J. L. HERRERA-PÉREZ, A. A. G. VON ZUBEN, A. C. DA SILVEIRA. N.B.Patel, 'Refractive index step and optical confinement in  $\text{Ga}_{0.86}\text{In}_{0.14}\text{As}_{0.13}\text{Sb}_{0.87} / \text{Ga}_{0.73}\text{Al}_{0.27}\text{As}_{0.02}\text{Sb}_{0.98}$  double heterostructure lasers emitting at  $2.2\mu\text{m}$ ', Electron. Lett. **29** (1993), N14, 1240-1241.
- [ 3 ] D.F.EDWARDS and G.S. HAYNE, 'Optical properties of Gallium Antimonide', J. Opt. Soc. Am. **49**, (1959) 414-415.
- [ 4 ] OSWALD und R. SCHADE, 'Über die bestimmung der optischen konstanten von halbleitern des typus  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  im infraroten', Z. Naturforsch. **9a**, (1954) 611-617.

- [ 5 ] ALIBERT, M. SKOURI, A. JOULLIE , M. BENOUNA and S. SADIQ, 'Refractive indices of AlSb and GaSb-lattice matched  $Al_x Ga_{1-x} As_y Sb_{1-y}$  in the transparent wavelength region', J. Appl. Phys. **69**(5) , (1991) 3208-3211.
- [ 6 ] R. M. AZZAM AND N. M. BASHARA, Ellipsometry and Polarized Light, North Holland, Amsterdam, 1992
- [ 7 ] P. YEAH, Optical Waves in Layered Media, John Wiley&Sons, New York, 1988.
- [ 8 ] J. G. MENDOZA ALVAREZ, F.D. NUNES AND N.B. PATEL "Refractive Index Dependence on Free Carriers for GaAs". J. Appl. Phys. **51**, 4365 (1980)
- [ 9 ] C. E M. DE OLIVEIRA, M.M.G. DE CARVALHO, 'A simple technique for Czochralski growth of GaSb single crystals from scum-free melt', J. of Crystal Growth **151** (1995) 9-12.
- [ 10 ] H. WEMPLE and M. DiDOMENICO, JR, 'Behavior of the electronic dielectric constant in covalent and ionic materials', Phys. Rev. B, **V3 N4** (1971), 1338-1351.