

Anisotropías ópticas en GaAs (110)

S.E. Acosta Ortiz, B.C. Domínguez Méndez y A. Lastras Martínez

Instituto de Física "Manuel Sandoval Vallarta",

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 7800 San Luis Potosí, SLP, México

(Recibido el 24 de enero de 1989; aceptado el 27 de marzo de 1989)

Resumen. Se reportan mediciones de anisotropías en el espectro de reflectividad de la superficie (110) de GaAs en el rango de energías 1.0–5.5 eV. Se encuentra que al igual que para la superficie (001), el espectro de anisotropía muestra dos componentes: una primera componente con un origen electroóptico cuadrático y una segunda con un origen posiblemente superficial. El campo eléctrico responsable del efecto electroóptico es un campo superficial debido al amarre del nivel de Fermi en los estados superficiales del semiconductor.

PACS: 78.20.Jq; 78.65.Fa

1. Introducción

En los últimos años se ha despertado interés en el estudio de las anisotropías ópticas en el espectro de reflectividad de varios semiconductores con simetría cúbica [1,7]. Esto se debe al hecho de que las propiedades de volumen de estos semiconductores son nominalmente isotrópicas, de tal manera que alguna anisotropía que se observara debería estar asociada a la superficie del material. Así, se podría obtener información sobre las propiedades superficiales de dichos semiconductores a partir del estudio de su espectro de anisotropía. Sin embargo, esta afirmación debe ser tomada con cautela, pues la simetría cúbica del semiconductor puede ser rota por efecto de diversos agentes externos. De esta manera, se debe hacer una identificación inequívoca del origen de las anisotropías observadas con objeto de que el estudio de las mismas nos brinde información sobre las propiedades superficiales de los semiconductores cúbicos.

El primer estudio sistemático de las anisotropías ópticas en el espectro de reflectividad de semiconductores cúbicos fue hecho por Aspnes y Studna [1,2], quienes trabajaron con la superficie (110) de Ge y Si. Ellos demostraron que la contribución dominante a las anisotropías observadas en esos cristales tiene su origen en fenómenos superficiales de apantallamiento de carga con una contribución secundaria de efectos de dispersión espacial en el volumen del material [1,2]. Mochán y Barrera [3], trabajando con un modelo de campo local, predijeron una anisotropía superficial en las propiedades ópticas de cristales semiconductores con simetría cúbica. Sus cálculos para las anisotropías de la reflectancia de la superficie (110) de Ge concordaron bastante bien con los resultados experimentales de las Refs. [1,2]. Berkovits *et al.* [4], hicieron un estudio de las anisotropías en la reflectancia

de la superficie (110) de GaAs, InSb y Si. Ellos encontraron que para muestras con concentraciones mayores que 10^{16} cm^{-3} , las anisotropías observadas se hacían mayores aumentando la concentración de impurezas. En trabajos anteriores [5,6], se reportó un estudio sistemático del espectro de anisotropías de la superficie (001) de GaAs en función de su nivel y tipo de impurificación (donadores o aceptores) y se encontró que dicho espectro está formado por dos componentes: una primera componente de origen electroóptico lineal y una segunda componente de origen posiblemente superficial. Recientemente, también se reportaron [7] mediciones de anisotropías ópticas en la cara (110) de GaAs e InP, encontrando que la componente dominante de la anisotropía tiene la forma de línea correspondiente a fenómenos de dispersión espacial en el volumen del material.

El propósito de este trabajo es el de reportar un estudio de las anisotropías ópticas en el espectro de reflectividad de la superficie (110) de GaAs, llevado a cabo por medio de la técnica de reflectividad diferencial [5,6]. Se investigó el rango de energías 1.0–5.5 eV, de tal manera que en el estudio se incluyeron las transiciones E_0 , $E_0 + \Delta_0$, E_1 , $E_1 + \Delta_1$, E'_0 y E_2 . Al igual que lo que sucede para la superficie (001) [5,6], el espectro de anisotropía de la superficie (110) tiene dos componentes: una primera componente que es dependiente del grado de impurificación y una segunda componente que es independiente de este parámetro. El origen de la primera componente es un efecto electroóptico cuadrático; esto en contraste con lo observado para la superficie (001), para la cual el efecto electroóptico es lineal en el campo eléctrico [5,6]. Para ambas superficies el campo eléctrico responsable del efecto electroóptico es el campo superficial debido al amarre del nivel de Fermi en los estados superficiales del semiconductor [8].

2. Procedimientos experimentales

Las muestras de GaAs empleadas en los experimentos de reflectividad diferencial fueron obleas comerciales (Bertram Laboratories, New Jersey) contaminadas con Si, Zn o Cr. Las obleas habían recibido en el laboratorio un pulido químico-mecánico a base de 10:1:1 $\text{H}_2\text{O}:\text{NaOCl}:\text{Nalco 2360}$ y presentaban una superficie especular. Antes de realizar los experimentos, las muestras fueron limpiadas enjuagándolas en metanol y secándolas con un flujo de nitrógeno. Durante el experimento (Fig. 1), se hace incidir casi normalmente luz monocromática y linealmente polarizada sobre la muestra, la cual se pone a rotar a una frecuencia constante. La luz reflejada se recoge en un fotodiodo de silicio. La salida eléctrica del fotodiodo alimenta la entrada de un amplificador sensible a la fase, el cual se ajusta a una frecuencia dos veces mayor que la frecuencia de rotación de la muestra. De esta manera, se tiene a la salida del amplificador sensible a la fase una señal ΔR , la cual es proporcional a la diferencia en reflectividad de la muestra para luz incidente con vectores de polarización perpendiculares entre sí. El espectrómetro es controlado por una microcomputadora que lee tanto ΔR como R a cada punto experimental, calcula los cocientes $\Delta R/R$ y los almacena en disco magnético para su posterior manipulación, donde R es el promedio de la reflectividad para las dos orientaciones

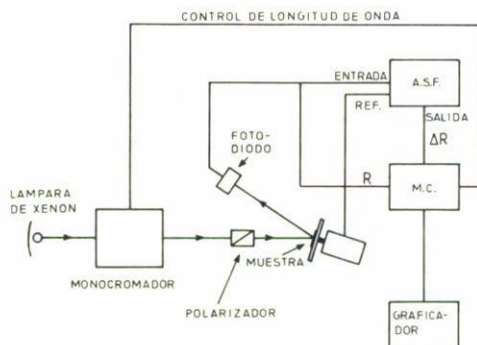


FIGURA 1. Diagrama esquemático del espectrómetro usado en los experimentos de reflectividad diferencial. Las siglas ASF y MC significan, respectivamente, Amplificador Sensible a la Fase y Micro Computadora.

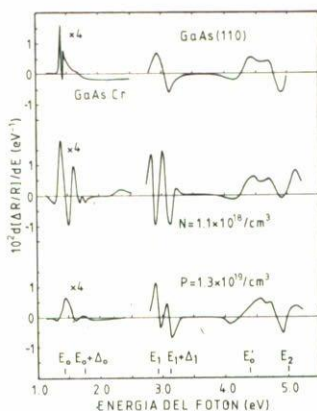


FIGURA 2. Espectros de anisotropía de la superficie (110) de GaAs, para tres muestras contaminadas con Cr (semiaislante), Si (tipo n) y Zn (tipo p). Las energías de las transiciones comprendidas entre E_0 y E_2 se indican en la figura.

del vector de polarización. El ángulo de incidencia de la luz fue aproximadamente de 10 grados y se usó polarización tipo s. La frecuencia de rotación de la muestra fue aproximadamente 25 Hz. La señal de referencia para el amplificador sensible a la fase fue proporcionada por un codificador óptico. Para alinear la superficie de la muestra perpendicular a su eje de giro se empleó un láser de He-Ne y un detector de posición. La muestra fue fijada en una montura cinemática formada por dos platos de aluminio unidos por tres tornillos ajustables y un resorte bajo compresión. Durante el proceso de alineación se ajustaron los tornillos hasta que el haz del láser reflejado en la superficie de la muestra tuviera un mínimo de movimiento sobre la superficie del detector de posición a medida que la muestra rotaba. La mejor alineación obtenida de esta manera implicó una desviación de $100\mu\text{m}$ del centroide del haz reflejado. Esta desviación corresponde a un ángulo de $\approx 0.038^\circ$.

3. Resultados

En la figura 2 se muestran los espectros de anisotropía obtenidos, tal como se describió en la sección anterior, para la reflectividad de la superficie (110) de tres muestras de GaAs contaminadas con Cr, Si y Zn. Con el objeto de incrementar la estructura de los espectros alrededor de los puntos críticos del material, en la Fig. 2 se presentan los espectros de anisotropía derivados numéricamente con respecto a la energía. Debe hacerse notar que la escala vertical representa el valor rms de la señal $\Delta R/R$, de tal manera que para obtener el correspondiente valor pico a pico es necesario multiplicar dicha escala por un factor de $2\sqrt{2}$. De igual forma, se hace notar que alrededor de E_0 y $E_0 + \Delta_0$, los espectros mostrados han sido multiplicados por un factor de 4. La muestra contaminada con Cr es semiaislante con una resistividad de 10^7 ohm-cm, mientras que las muestras contaminadas con Si (tipo *n*) y Zn (tipo *p*) tienen concentraciones de impurezas de 10^{18} cm⁻³ y 10^{19} cm⁻³, respectivamente. El rango de energía de los espectros de la Fig. 2 comprende las transiciones E_0 , $E_0 + \Delta_0$, E_1 , $E_1 + \Delta_1$, E'_0 y E_2 .

4. Discusión y conclusiones

Como se puede deducir de la Fig. 2, alrededor de los puntos E_0 y E_1 , las anisotropías son bastante sensibles al grado de impurificación del GaAs, mientras que alrededor de las energías E'_0 y E_2 , éstas resultan relativamente independientes de dicho parámetro. De esta observación se concluye que al igual que para los espectros de anisotropía de la superficie (001) de GaAs [5,6], los espectros correspondientes a la superficie (110) tienen dos componentes con un diferente origen físico: una componente que depende del grado de impurificación del material y otra componente que es independiente de este parámetro. A la componente que depende del grado de impurificación del semiconductor se le adjudica un origen electroóptico. El campo eléctrico responsable del efecto electroóptico es el campo superficial debido al intercambio de carga eléctrica llevado a cabo entre los estados superficiales y los estados de volumen del semiconductor. Como es bien conocido [8], dicho intercambio es necesario a fin de que la superficie y el volumen del material alcancen su equilibrio termodinámico.

Despreciando términos de orden superior al segundo en el campo eléctrico, la componente electroóptica del espectro de anisotropía para un cristal de zincblenda se puede escribir como [9]

$$\frac{\Delta R}{R} = 2(akl + bhl + chk)P_{44}|\mathbf{E}| + [Q_{12} + (Q_{11} - Q_{12})(a^2h^2 + b^2k^2 + c^2l^2) + Q_{44}(bckl + calh + abhk)]|\mathbf{E}|^2, \quad (1)$$

donde (a, b, c) y (h, k, l) son los cosenos direccionales del campo eléctrico aplicado

y del vector de polarización de la luz incidente, respectivamente; \mathbf{E} es el campo eléctrico aplicado y P y Q son tensores de tercero y cuarto rango, respectivamente.

Considerando incidencia normal sobre una superficie (110) y un campo eléctrico perpendicular a la misma, como es el caso de los experimentos descritos en este artículo, el término lineal en E en la ecuación (1) resulta ser cero. De esta manera, la componente electroóptica de los espectros de la Fig. 2 es puramente cuadrática en E . Esto contrasta con lo observado para la superficie (001) de GaAs, en donde el efecto electroóptico importante es el efecto lineal en E [5,6]. El carácter cuadrático de la componente electroóptica de los espectros de la Fig. 2 puede deducirse de la comparación de las formas de línea de $\Delta R/R$ para las muestras contaminadas con Si (tipo n) y con Zn (tipo p). En efecto, considerando el rango de energía alrededor de las transiciones E_1 y $E_1 + \Delta_1$, se puede ver de la Fig. 2 que un cambio en el tipo de conductividad del GaAs no conduce a una inversión de la componente electroóptica de los espectros. La diferencia fundamental, en este rango de energía, entre el espectro intermedio y el espectro inferior de la Fig. 2, es solamente un pequeño corrimiento en energía entre las dos formas de línea. Este corrimiento se piensa que está asociado a la diferencia en niveles de contaminación de las dos muestras empleadas. Por otro lado, para la cara (001) la componente electroóptica de $\Delta R/R$ se invierte con el tipo de conductividad del semiconductor, revelando en este caso su origen electroóptico lineal [5,6].

Para la muestra semiaislante contaminada con Cr el campo eléctrico superficial debe ser cercano a cero. De esta manera, el espectro superior de la Fig. 2 debe corresponder a la componente no electroóptica de $\Delta R/R$. Aunque no existe de momento una evidencia experimental concluyente, se piensa que esta componente se origina por fenómenos superficiales que ocurren en las primeras monocapas del semiconductor. Esto, en contraste con la anisotropía originada por el efecto electroóptico, la cual constituye un fenómeno volumétrico que tiene lugar en centenares de capas atómicas, por debajo de la superficie.

Para comprobar el origen electroóptico cuadrático de la componente dependiente de la impurificación de los espectros de la Fig. 2, se llevaron a cabo experimentos de electrorreflectancia con muestras tipo n contaminadas con Si. Para esto, se fabricaron barreras de Schottky evaporando una película semitransparente de Au sobre una oblea de GaAs con las mismas características que la muestra del espectro intermedio de la Fig. 2. El espectro de electrorreflectancia obtenido en la región de energías alrededor de E_1 y $E_1 + \Delta_1$, se muestra en la Fig. 3 (curva continua). En esta misma figura se muestra (curva a trazos) el espectro obtenido sustrayendo el espectro superior del espectro intermedio en la Fig. 2. De acuerdo con lo expresado en el párrafo anterior, el espectro diferencial así obtenido debe corresponder a la componente electroóptica de $\Delta R/R$. Como puede observarse en la Fig. 3, los dos espectros coinciden en forma notable, demostrando el origen electroóptico del espectro de la línea a trazos. Además de lo anterior, es un hecho conocido que en el límite de campo bajo el espectro de electrorreflectancia tiene una dependencia cuadrática en el campo eléctrico [10]; esto es, la coincidencia de los dos espectros de la Fig. 3 demuestra el origen electroóptico cuadrático de la componente de volumen del espectro de anisotropía obtenido para GaAs (110).

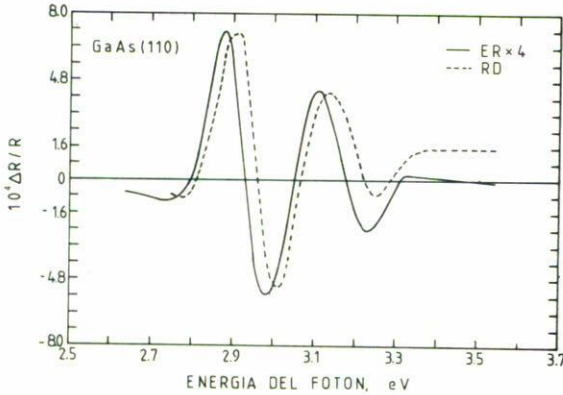


FIGURA 3. Línea continua: espectro de electrorreflectancia para una muestra de GaAs (110). Línea punteada: componente electroóptica del espectro de anisotropía de la superficie (110) de GaAs.

En conclusión, en este artículo se reporta el espectro de anisotropía de la reflectividad óptica de la superficie (110) de GaAs, medido con una técnica de reflectividad diferencial usando luz linealmente polarizada. Los espectros se midieron en el rango de energía 1.0–5.5 eV. Dentro de este rango de energía se encuentran las transiciones E_0 , $E_0 + \Delta_0$, E_1 , $E_1 + \Delta_1$, E' y E_2 . Los espectros de anisotropía alrededor de E_0 se reportan por vez primera. De la comparación de los espectros de anisotropía para muestras con diferentes niveles de impurificación y tipo de conductividad, se concluye que los mismos están formados por dos componentes con un diferente origen físico. Una de las componentes tiene un origen electroóptico cuadrático. El campo eléctrico responsable del efecto electroóptico es el campo superficial que en forma natural existe en una superficie de GaAs oxidada. La otra componente del espectro de anisotropía tiene probablemente un origen superficial.

Reconocimientos

Los autores quisieran expresar su agradecimiento a W.L. Mochán y R.G. Barrera por sus importantes comentarios en torno a este trabajo. El trabajo fue parcialmente apoyado por CONACYT, (DADC, DADT, DAAI y DAFRHU), PRDCYT-OEA, SEP-PRONAES y FONEIN.

Referencias

1. D. E. Aspnes y A.A. Studna, *Phys. Rev. Lett.* **54** (1985) 1956.
2. D. E. Aspnes, *J. Vac. Sci. Technol.* **B3** (1985) 1138; D.E. Aspnes, *J. Vac. Sci. Technol.* **B3(5)** (1985) 1498.
3. W.L. Mochán y R.G. Barrera, *J. de Physique* **C5 Suppl. 45** (1984) 207; W.L. Mochán y R.G. Barrera, *Phys. Rev. Lett.* **55** (1985) 1192.

4. V.L. Berkovits, I.V. Makarenko, T.A. Minashvili, y V.I. Safarov, *Sov. Phys. Semicon.* **20(6)** (1986) 654.
5. S.E. Acosta-Ortiz y A. Lastras-Martínez, *Solid State Commun.* **64** (1987) 809.
6. S.E. Acosta Ortiz y A. Lastras Martínez, *Electrodynamics of Interfaces and Composite systems* (World Scientific Advanced Series in Surface Science Vol. 4 (1987), editado por R.G. Barrera y W.L. Mochán); S.E. Acosta Ortiz y A. Lastras Martínez, *Acta Científica Potosina* Vol. IX, No. 2, (1987); S.E. Acosta-Ortiz and A. Lastras-Martínez, *Phys. Rev. B* (en prensa).
7. D.E. Aspnes y A.A. Studna, *J. Vac. Sci. Technol.* **5(4)** (1987) 546.
8. W. Monch, *Surf. Sci.* **132** (1983) 92.
9. S.E. Acosta-Ortiz, tesis doctoral, Universidad Autónoma de San Luis Potosí (1988). J.F. Nye, *Physical Properties of Crystals* (Oxford, London, 1957).
10. D.E. Aspnes, en *Handbook on Semiconductors*, editado por M. Balkanski, North Holland, Amsterdam, (1980), p.109.

Abstract. Measurements of anisotropies in the reflectivity spectrum of (110) GaAs, in the energy range of 1.0–5.5 eV are reported. We found that, as for the (001) surface of GaAs, the anisotropy spectrum has two components: a first one with a quadratic electro-optic origin and a second one which probably arises from the surface. The electric field which is responsible for the electro-optic effect is a surface field due to the pinning of the Fermi level at the surface states of the semiconductor.