

CARACTERIZACION DE FOTODIODOS DE JUNTURA p-n EN BASE A SILICIO MONOCRISTALINO

M. García, S. Aguilera, A. Martell, G. Santana, J. Almeida y O. Lam
Instituto de Materiales y Reactivos para la Electrónica,
Universidad de La Habana

RESUMEN

En este trabajo se presenta la secuencia tecnológica utilizada en la obtención de fotodiodos de silicio monocristalino de juntura p-n. Además, se analizan dichos dispositivos por curvas I-V en condiciones de oscuridad y por respuesta espectral, observándose que sus características son similares a las de los fotodiodos comerciales del mismo material de partida.

ABSTRACT

The technological sequence used to obtain p-n junction of monocristaline Si photodiodes is presented. The obtained devices are analysed by I-V curves under conditions of darkness and its spectral response; the shown characteristics are similar to those of commercial photodiodes made from the same starting material.

I. INTRODUCCIÓN

En el campo de la automatización y la mecanización de la industria, los dispositivos optoelectrónicos supervisan y regulan todo tipo de procesos, tales como llenado, conteo, colocación, protección, vigilancia, etc. Los detectores más utilizados para estos fines reaccionan a la luz visible y/o infrarroja. Otra aplicación importante está en las comunicaciones ópticas,

la cual puede ser llevada a cabo acoplando un LASER o un LED a un fotodetector, ambos alojados en una misma cápsula.

Los dispositivos fotodetectores se caracterizan por diferentes parámetros ópticos y eléctricos que determinan su posible aplicación. Estos están relacionados con su eficiencia, su sensibilidad espectral, su tiempo de respuesta a la radiación a la cual es sensible, así como con su voltaje de ruptura, que puede obtenerse a partir de sus características volt-ampéricas, y que permite conocer el rango de trabajo de los fotodiodos polarizados en inversa.

En nuestro país se ha centrado interés en el desarrollo de la electrónica y entre los aspectos abordados juega un papel decisivo la fabricación de dispositivos fotodetectores y, en particular, los fotodiodos de silicio que constituyen el objetivo de nuestro trabajo.

II. RESULTADO

2.1. TECNOLOGÍA DE OBTENCIÓN DE LA JUNTURA p-n

La juntura p-n se obtiene por difusión de boro, a partir de una fuente sólida de B_2O_3 sobre un sustrato de silicio tipo n de orientación $\langle 100 \rangle$ y resistividad 7,5 - 15 ohm-cm. La superficie de la oblea fue atacada selectivamente con una solución de KOH adecuada [1] para disminuir las pérdidas por reflexión especular en la superficie.

La estructura tecnológica utilizada en nuestro laboratorio para la obtención de fotodiodos de juntura p-n de silicio se muestra en las figuras 1a y 1b. Ambos esquemas difieren por la utilización de una capa n^+ en el segundo caso, la cual se realizó por difusión de fósforo a partir de una fuente líquida de $POCl_3$.

2.2. CARACTERÍSTICAS VOLT-AMPÉRICAS

Las características volt-ampéricas, ya sea bajo iluminación o en condiciones de oscuridad, son ampliamente utilizadas para analizar el comportamiento de un fotodiodo [2,3]. En el presente trabajo el análisis se realiza en condiciones de oscuridad conectando el dispositivo a una fuente establecida de voltaje. La corriente medida (I) para cada voltaje aplicado (V) responde a la siguiente expresión:

$$I = I_0 \cdot \{ \exp [(q/kT) (V + I R_s)] - 1 \}$$

Las características volt-ampéricas medidas en directa y en inversa permiten calcular las resistencias serie (R_s) y paralelo (R_p) del dispositivo. Para este fin se elaboró un programa de computación, el cual da también información sobre otros parámetros del dispositivo tales como densidad de corriente de recombinación I_r y de difusión I_d , factor de perfeccionamiento de la rama recombinativa A_r y de la difusiva A_d y el voltaje hasta el cual predomina la recombinación, con solo introducirse los valores de corriente y de voltaje medidos.

2.3. RESPUESTA ESPECTRAL

Para la determinación experimental de respuesta espectral (R.E.) de fotodetectores de silicio monocristalino se utilizó el método de corriente directa, que se basa en la incidencia de la luz continua de longitud de onda conocida sobre el fotodiodo.

Para las mediciones de fotocorriente se utilizó un electrómetro *TAKEDA RIKEN*, que permite detectar corrientes del orden de pA, acoplado convenientemente a un espectrofotómetro *CF-26*, cuyo rango espectral está entre los 200 y 1200 nm, y al cual hubo que hacerle algunas adaptaciones ópticas y eléctricas que permitieran un perfecto aislamiento.

Para realizar las mediciones se utilizó como referencia un fotodiodo comercial de silicio monocristalino, de respuesta y sensibilidad espectral conocidas, con el fin de calcular y comparar las R.E. y la sensibilidad de los fotodiodos fabricados en nuestro laboratorio.

La respuesta espectral del fotodiodo de prueba se calculó a partir de la expresión

$$RE_p(\lambda) = RE_r(\lambda) \langle I_p/I_r \rangle (A_r/A_p)$$

y su sensibilidad a partir de

$$S_p(\lambda) = S_r(\lambda) \langle I_p/I_r \rangle (A_r/A_p)$$

donde I_p es la fotocorriente medida del fotodiodo de prueba y S_r , I_r y RE_r la sensibilidad, la fotocorriente y la R.E. del fotodiodo de referencia, en el rango de 400 a 1200 nm.

Los resultados obtenidos fueron procesados también por métodos computacionales.

III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS ELÉCTRICO

Para analizar eléctricamente los fotodiodos de juntura p-n obtenidos en nuestro laboratorio se utilizó el método de mediciones en la oscuridad propuesto por Neugroschel [2].

La Figura 2 muestra las características I-V oscuras típicas de los fotodiodos estudiados, sin y con capa n^+ . A partir de ellas se puede calcular la resistencia serie (R_s) por la pendiente de la curva a altos valores de corriente y la resistencia paralelo (R_p) por la pendiente de la curva para bajos valores de polarización.

En esta figura también se puede apreciar como se incrementa notablemente el voltaje de ruptura V_r para los fotodiodos con capa n^+ [4].

Las Figuras 3 y 4 permiten observar los mecanismos de conducción que están presentes, encontrar el voltaje límite entre la rama recombinativa

y la difusiva y hallar las densidades de corriente y los factores de perfeccionamiento de las mismas.

En la Tabla I se presentan los valores obtenidos de resistencia serie y paralelo para fotodiodos sin y con capa n^+ . En ella se aprecia que R_s no cambia sensiblemente, manteniéndose en el mismo orden de magnitud, mientras que R_p es mayor, en un orden, para los dispositivos que tienen capa n^+ .

3.2. ANÁLISIS ÓPTICO

La fotocorriente coleccionada para cada longitud de onda, relativa al número de fotones incidentes sobre la superficie del dispositivo a esa longitud de onda, determina la respuesta espectral. Ésta, a su vez, se puede expresar numéricamente en función de parámetros tales como la eficiencia cuántica externa y la sensibilidad.

La Figura 5 presenta las curvas de eficiencia cuántica externa en función de la longitud de onda para un fotodiodo típico sin y con capa n^+ , respectivamente. Al compararlas se observa que la eficiencia alcanza valores mayores para el caso de los fotodiodos que tienen capa n^+ .

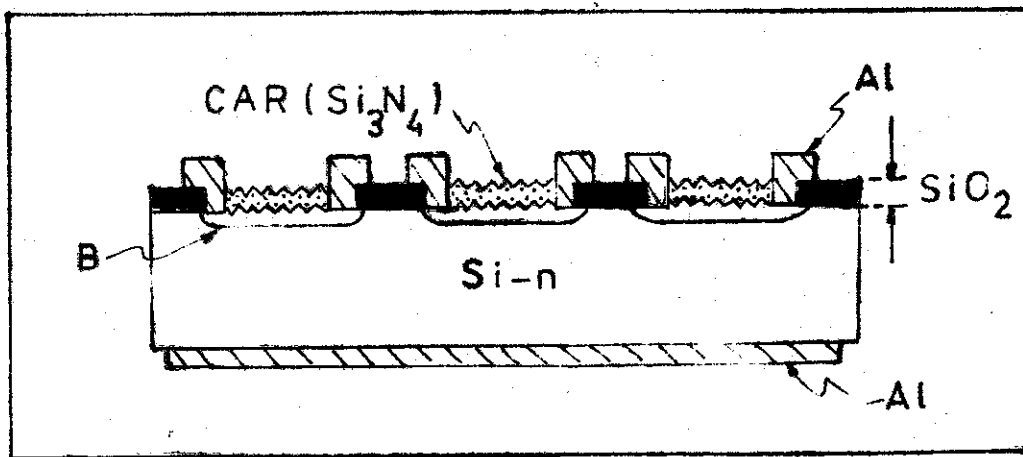
La Figura 6 muestra las curvas de sensibilidad espectral de ambos dispositivos. Es notable el incremento de la sensibilidad en los fotodiodos que presentan capa n^+ , alcanzándose valores de hasta 0,55 A/W para una longitud de onda de 800 nm. Este resultado coincide con lo reportado por la literatura relacionada con fotodiodos de silicio comerciales [5-7].

CONCLUSIONES

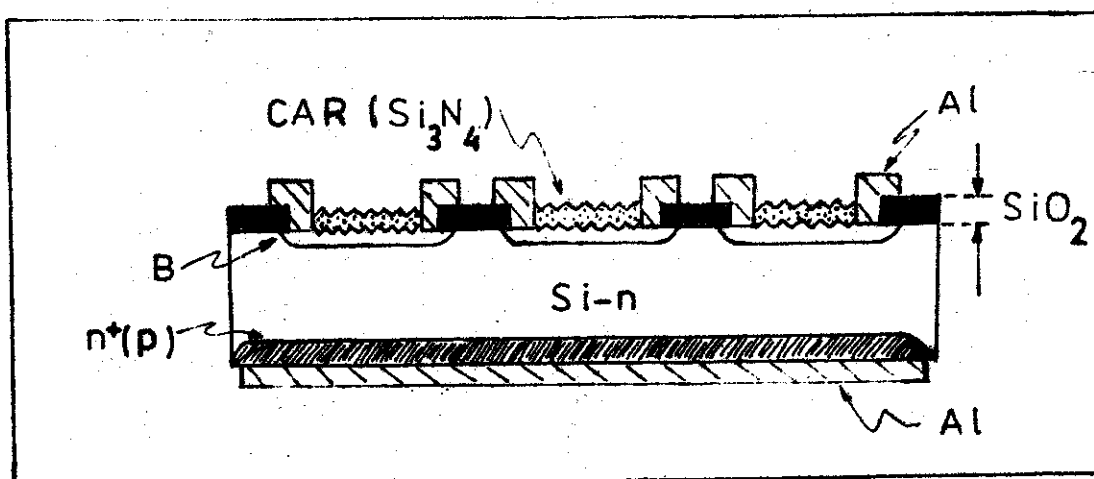
1. La resistencia paralelo se incrementa con la presencia de la capa n^+ , mientras que la resistencia serie no varía sensiblemente.
2. El voltaje de ruptura se incrementa con la presencia de la capa n^+ .
3. La eficiencia cuántica externa y la sensibilidad alcanzan mayores valores en los dispositivos con capa n^+ para λ más altas.
4. Los resultados obtenidos permiten reconocer la puesta a punto de la tecnología de obtención de fotodiodos de Si en nuestros laboratorios.

TABLA I

FOTODIODO	$R_s (\Omega)$	$R_p (\Omega)$
Sin capa n^+	9,4 $\pm$ 0,63	$1,70 \cdot 10^5 \pm 0,17 \cdot 10^5$
Con capa n^+	34,9 $\pm$ 1,04	$6,47 \cdot 10^6 \pm 0,21 \cdot 10^6$



(a)



(b)

Figura 1. Estructura tecnológica de los fotodiodos de juntura p-n estudiados: (a) sin capa n^+ ; (b) con capa n^+ .

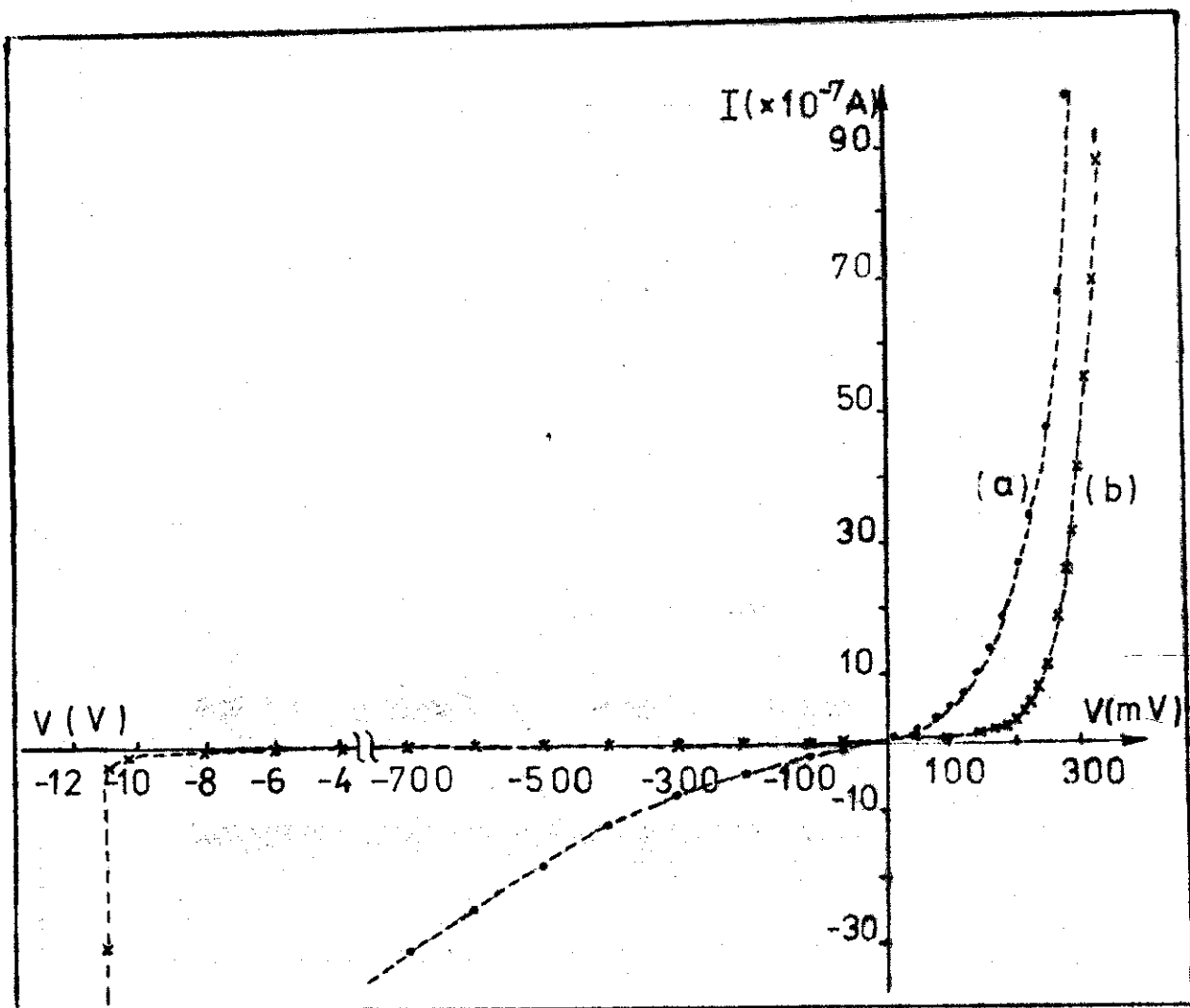


Figura 2. Características I-V típicas en condiciones de oscuridad de los fotodiodos estudiados: (a) sin capa n^+ ; (b) con capa n^+ .

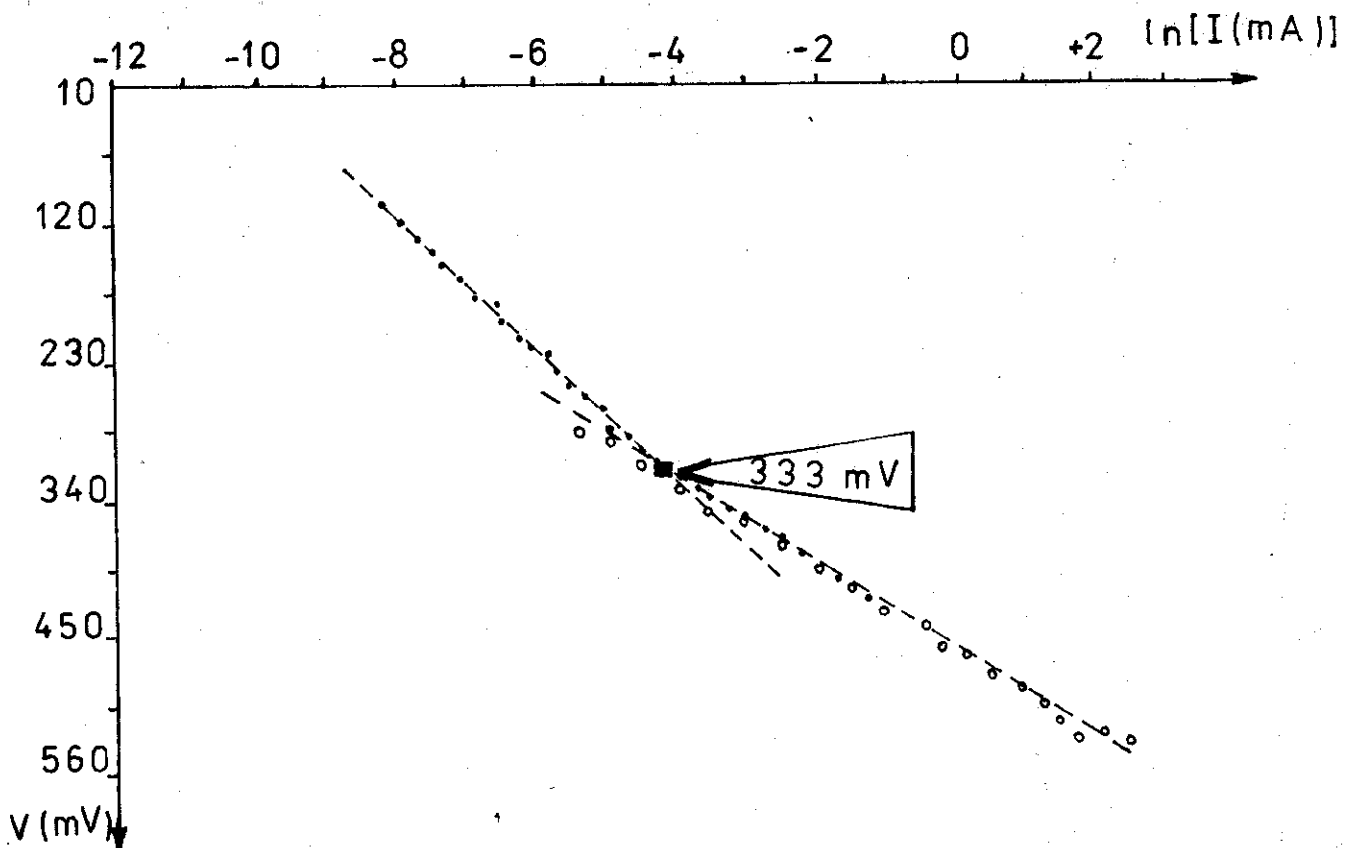


Figura 3. Dependencia del $\ln I$ vs V de un fotodiodo típico sin capa n^+ .

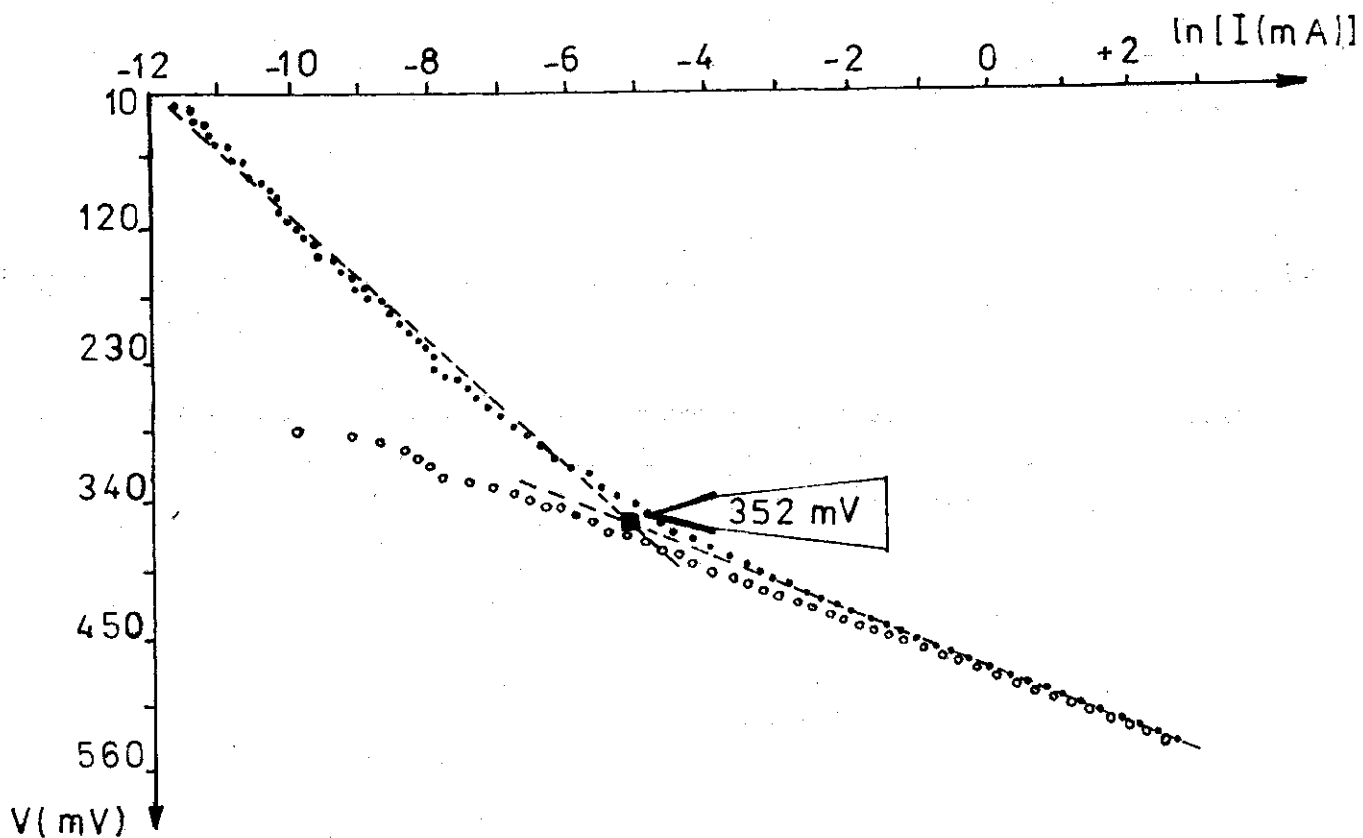


Figura 4. Dependencia del $\ln I$ vs V de un fotodiodo típico con capa n^+ .

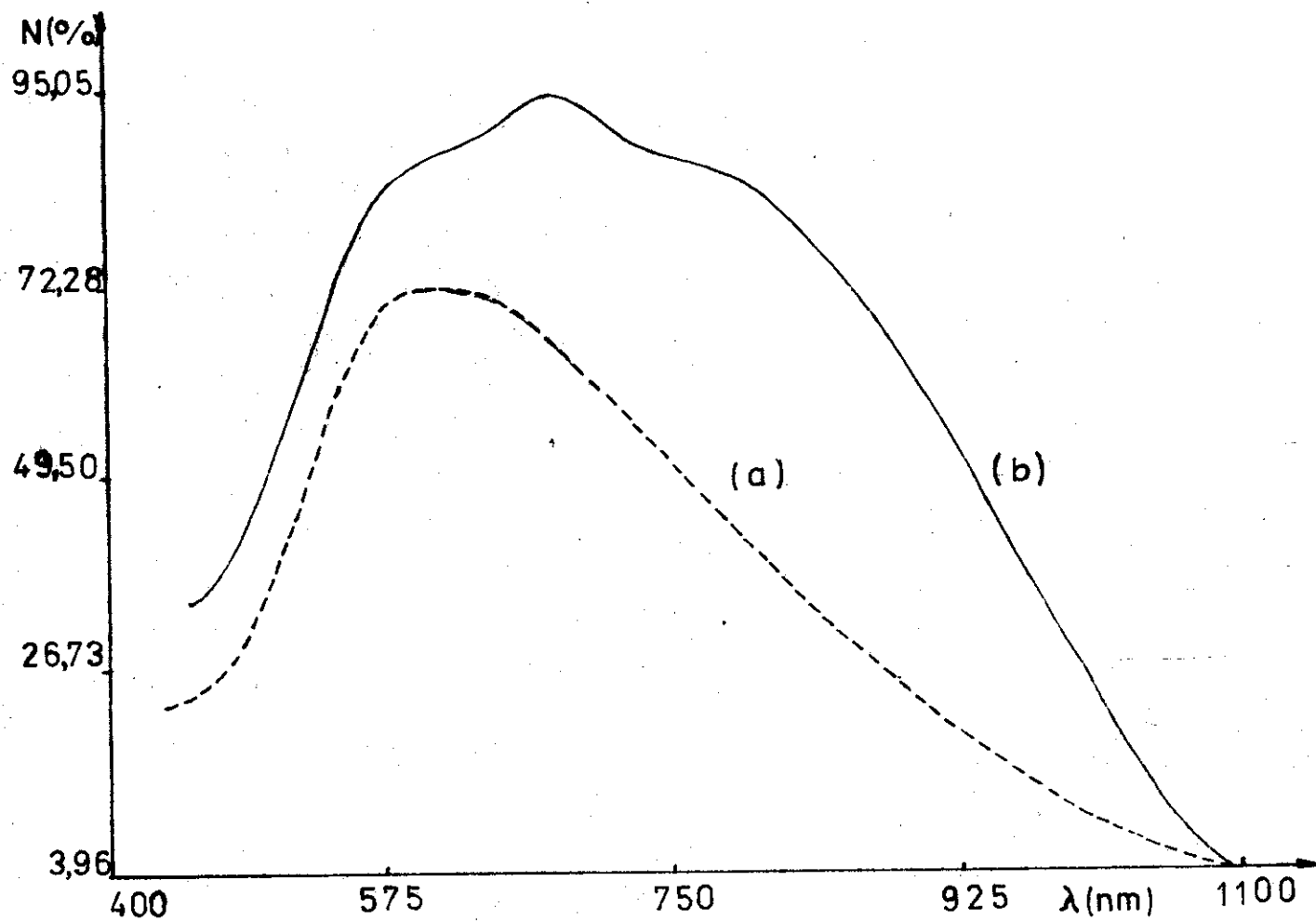


Figura 5. Eficiencia cuántica externa en función de la longitud de onda de la radiación incidente de los fotodiodos estudiados:
 (a) sin capa n^+ ; (b) con capa n^+ .

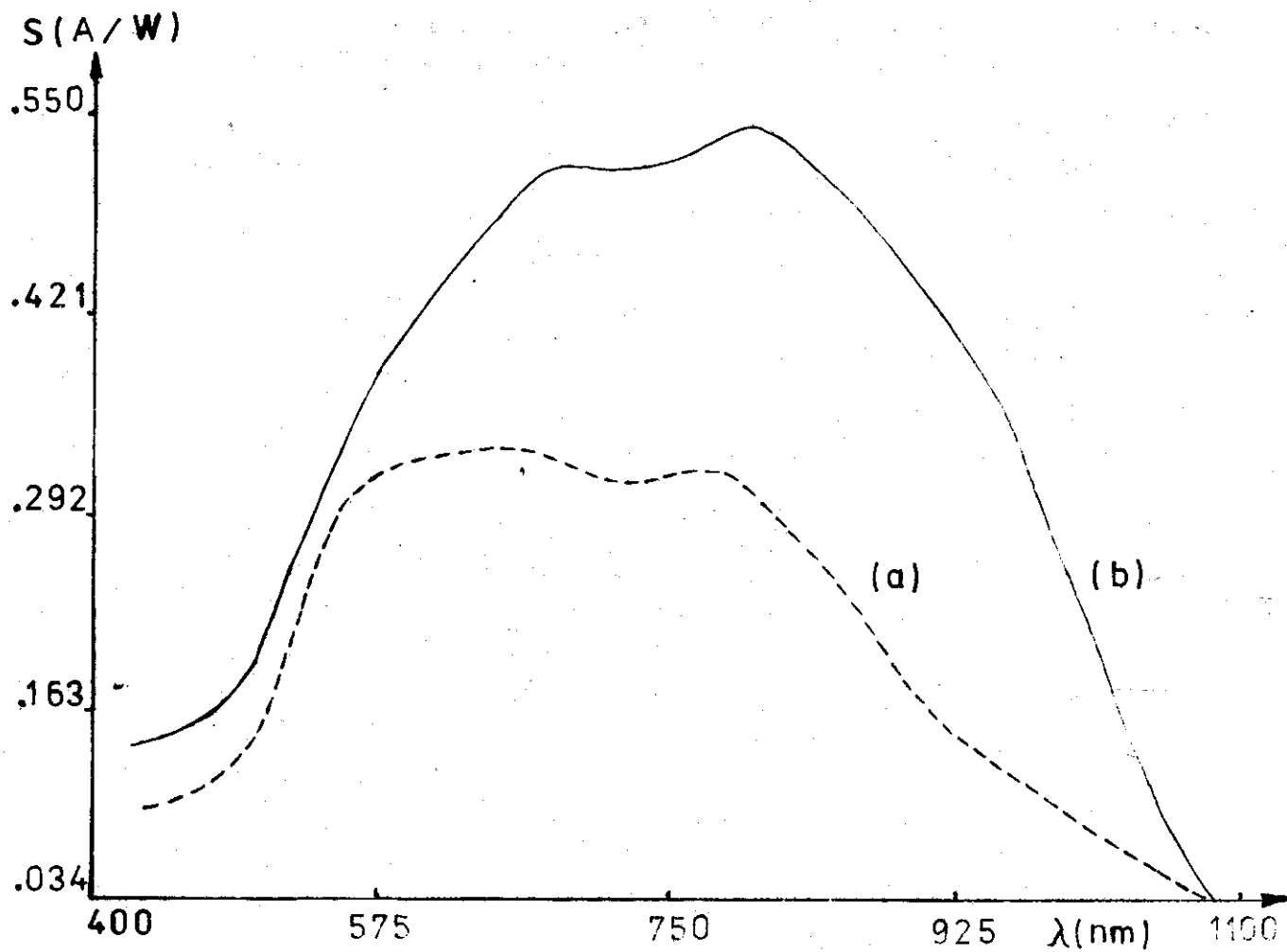


Figura 6. Sensibilidad espectral típica de los fotodiodos estudiados:
(a) sin capa n^+ ; (b) con capa n^+ .

REFERENCIAS

- 1 García. M.; A. Rodríguez Papa
Física y Tecnología de Semiconductores. Vol. II, No 2, 1985,
127-137.
- 2 Neugroschel, A. y CH. Lindholm F
IEEE Transactions on Electron Devices, ED-24, 6.
- 3 Martell, A.; S. Aguilera; N. Safronova y M. García
Cryst. Res. Technol., 20 (1985), 9, 1261-1269.
- 4 Stofieva, V.I.
Poluprovodnikovie fotopriemniki, Moskva, Radio y Sviaz (1984).
- 5 Sze
Physics of Semiconductors Devices, (1985).
- 6 De Sah, Noyce y Shockley
Proc. IRE, 45, (1957), 1228-43.
- 7 Carter, H. y M. Donker
Optoelectrónica Aplicada, Biblioteca Técnica Phillips, Madrid, (1981).

INCREMENTO DE LA SENSIBILIDAD DE FOTODIODOS M.I.S. EN BASE A SI MONOCRISTALINO, UTILIZANDO CAPAS ANTIRREFLECTANTES (CAR) DE TiO_2

S. Aguilera, G. Santana, A. Martell y M. García
DIEES-IMRE, Universidad de La Habana

RESUMEN

La utilización de capas anti-reflectantes de TiO_2 , obtenidas por la técnica de "spin - on", permite el aumento de la sensibilidad de 0.42 a 0.60 A/W para la longitud de onda de 900 nm. Esto hace factible la comparación de estos dispositivos con los fotodiodos comerciales del mismo material de origen, cuya sensibilidad es del orden de 0.5 A/W.

ABSTRACT

An increase of sensibility from 0,42 to 0,60 A/W for the wavelenght of 900 nm was obtained by using anti-reflecting coats of TiO_2 , which were made by a "spin - on" technique. This increased sensibility is comparable to the sensibility of about 0,5 A/W of monocrystalline Si commercial photodiodes.

1. INTRODUCCIÓN

Es sabido que la estructura M.I.S. está formada por metal-aislante-semiconductor y que su superficie refleja aproximadamente el 40 % de los incidentes. Esto hace necesario el uso de una capa anti-reflectante (CAR) que disminuya considerablemente las pérdidas por reflexión [1-4].

El TiO_2 es un material que presenta buenas características químicas, dieléctricas y ópticas para ser usado como CAR en fotodiodos de estructura M.I.S. de Silicio. Los estudios realizados sobre este material [3] permiten apreciar que la utilización de monocapas de bióxido de Titanio sobre Silicio pueden arrojar resultados satisfactorios comparables con los reportados por la literatura para otros materiales [2,3]. Además, estas capas son fácilmente obtenidas con repetibilidad, con buenas propiedades eléctricas y ópticas utilizando la técnica de "spin - on" existente en nuestro laboratorio.

El objetivo de este trabajo es caracterizar estas capas de bióxido de Titanio obtenidas por la técnica señalada, por reflectancia espectral y evaluar la influencia que su presencia ejerce en las características ópticas de fotodiodos de estructura M.I.S.

2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

2.1. DEPOSICIÓN DE CAPAS ANTI-REFLECTANTES DE TiO_2 POR LA TÉCNICA DE "SPIN - ON" Y SU CARACTERIZACIÓN POR REFLECTANCIA ESPECTRAL

En nuestro laboratorio, para la deposición de capas anti-reflectantes sobre dispositivos de estructuras M.I.S., se han utilizado diversas técnicas convencionales, tales como: Pulverización catódica reactiva de SiO_2 , Si_3Na_4 y deposición térmica de SiO_x , pero los resultados obtenidos no fueron satisfactorios.

Recientemente se ha desarrollado un nuevo proceso tecnológico para fabricar dispositivos fotovoltaicos de Si, llamado de las capas gruesas, a partir de la descomposición pirolítica de metalorgánicos. Uno de los pasos de este proceso lo constituye la deposición de capas anti-reflectantes de TiO_2 por la técnica de "spin - on".

Con el objetivo de obtener CAR de TiO_2 con buen acople óptico en el intervalo de longitudes de onda de 800 - 900 nm, que es el intervalo donde las estructuras M.I.S. de Si presentan la máxima fotorrespuesta [4-6], se realizaron una serie de pruebas.

La Figura 1 muestra el comportamiento de la reflectancia espectral de la capa de TiO_2 sobre nuestros dispositivos. En ella se observa que para la longitud de onda de 875 nm la reflectancia es menor que el 1 %. Este resultado hace posible el uso de esta CAR en la fabricación de fotodiodos de estructura M.I.S.

2.2. INFLUENCIA DE LA CAPA ANTI-REFLECTANTE DE TiO_2 EN LAS CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS DEL FOTODIODO M.I.S. DE SILICIO

Desde el punto de vista óptico un fotodiodo se caracteriza por la curva de respuesta espectral relativa y por la sensibilidad espectral para una longitud de onda dada, que se expresa en A/W. Para el procesamiento de

los datos fueron utilizados métodos computacionales aplicando la siguiente relación:

$$SE(\lambda)_p = SE(\lambda)_r \frac{I_p}{I_r}$$

donde $SE(\lambda)_p$, $SE(\lambda)_r$, I_p e I_r representan la sensibilidad espectral y las fotocorrientes generadas por los fotodiodos de prueba y de referencia, respectivamente.

La Figura 2a representa la sensibilidad espectral típica de los fotodiodos sin CAR fabricados en nuestro laboratorio. La Figura 2b muestra el mismo parámetro para estos dispositivos con CAR de TiO_2 .

Si comparamos ambas curvas, como se puede observar en la Figura 2, el incremento de la sensibilidad con la presencia de la CAR es apreciable, lo cual significa que, en general, las características ópticas del dispositivo mejoran sustancialmente con el uso de la misma.

Este notorio aumento de la sensibilidad hace factible la comparación entre estos dispositivos y los convencionales de juntura p-n del mismo material de partida, cuya sensibilidad es del orden de 0.5 A/W.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron capas anti-reflectantes de TiO_2 por la técnica de "Spin - on" con buen acople óptico con el dispositivo de estructura M.I.S. de Silicio.
2. La CAR de TiO_2 aumenta la sensibilidad del fotodiodo M.I.S. de Silicio de 0.42 a 0.6 A/W para la longitud de onda de 900 nm, lo que hace posible su comparación con los fotodiodos convencionales comerciales del mismo material de partida ($SE(\lambda) \sim 0.5$ A/W).
3. La técnica de "spin - on" permite obtener una CAR adecuada para nuestros dispositivos por un método más sencillo, más rápido y más económico que las técnicas convencionales de pulverización catódica reactiva o de deposición térmica también utilizadas en nuestros laboratorios para formar una CAR de Si_3N_4 o SiO_2 .

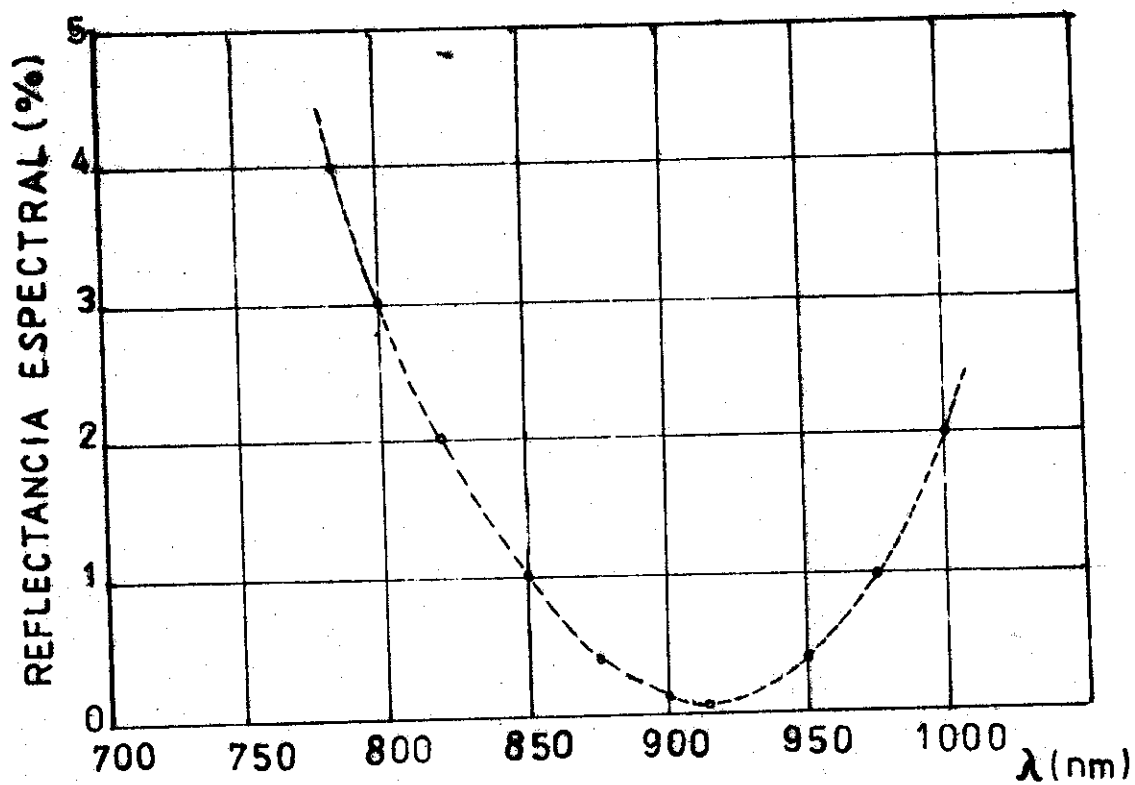


Figura 1. Reflectancia espectral de la capa de TiO_2 sobre silicio.

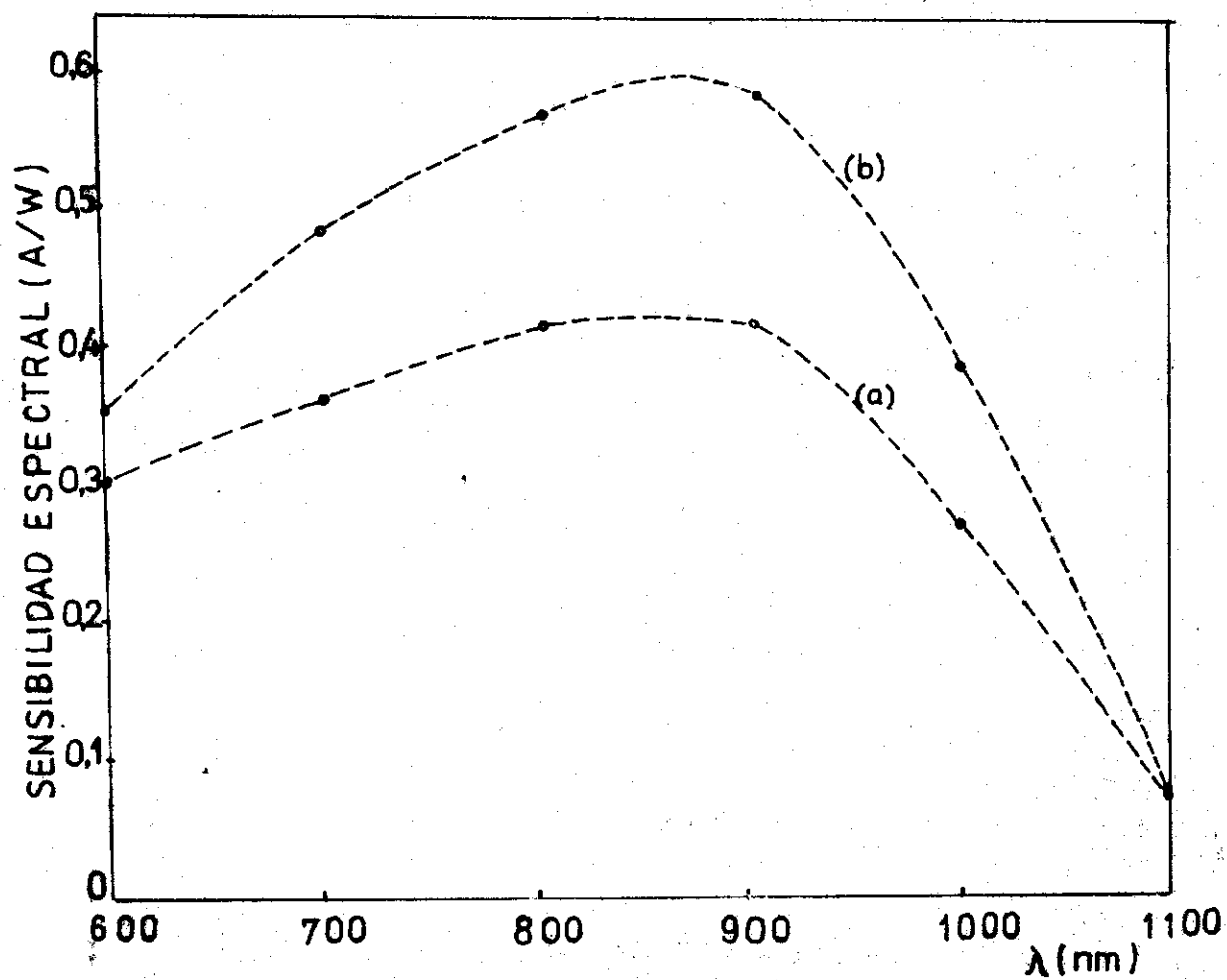


Figura 2. Sensibilidad espectral típica de los fotodiodos MIS fabricados en nuestro laboratorio: a) sin CAR; b) con CAR de TiO_2 .

REFERENCIAS

1. López, M.E., S. Aguilera, R. Figueroa
• *Estudio y obtención de Celdas Solares de estructura M.I.S. de Silicio. Memorias del 1er Forum Científico-Técnico, SIME, Cuba (dic. 1984).*
2. Koltun, M.M.
Selektionie opticheskie poverjnosti preobrezovateley solnechnoy energy. Nauke (1979).
3. Hovel, H.J.
Semiconductors and Semimetals. Vol. 11. Solar Cell (1975).
4. Kuriev, V.A., V.S. Popov
Fotoelectrichiskie MDP privori. Moskva Radio Sviaz (1983).
5. Stofieva, H.
Poluprovodnikovie fotopriomniki. Moskva (1984).
6. Alonso, L., S. Aguilera
Caracterización de fotodiodos M.I.S. en base al Silicio monocristalino. Trabajo de Diploma, Facultad de Física, U.H., Habana, Cuba (1967).

VOLUMEN DE POROS EN SUELOS ARCILLOSOS DE HOLGUIN Y SANTIAGO DE CUBA

Livia Fernández Pérez, Andrés Lau Quan y Alejandro González Álvarez
Departamento de Física, Instituto Superior de Ciencias Agropecuarias
de La Habana

RESUMEN

Se determina el volumen de poros y la distribución de sus radios en muestras de suelo pertenecientes a las áreas cañeras de las provincias de Holguín y Santiago de Cuba, por el método de porosimetría de mercurio utilizando un porosímetro de mercurio Carlo Erba, cuyo funcionamiento se basa en la depresión capilar y está regido por la ecuación de Young-Laplace.

ABSTRACT

It was determined the pores volumen and the distribution of their radii and the porosity of four profiles of the soils in the areas where sugar cane is grown in Holguín and Santiago de Cuba Provinces, by mercury porosimetric method, using Carlo Erba's mercury porosimeter which function is based on the capillary depression and the application of the Young-Laplace's equation.

INTRODUCCIÓN

Los suelos Oscuros Plásticos (Vertisuelos) se encuentran entre los principales suelos para los cuales se proyectan actualmente medidas de recuperación y mejoramiento.

La conformación del suelo por partículas de diferentes tamaños lleva implícito la presencia de espacios porosos a causa de los intersticios entre las partículas del suelo y de los existentes en la superficie de las propias partículas; su determinación es fundamental al estar la fertilidad de los suelos relacionada con los fenómenos de superficie y no bastar un medio nutricional adecuado para lograr la transformación. Para ciertos elementos nutricios es preciso contar con la mayor superficie posible, siendo evidente que la accesibilidad a estos sitios activos es favorecida por la distribución del radio de poros (8),

Entre los trabajos de porosimetría aplicando las técnicas tradicionales realizadas en los suelos Oscuros Plásticos del país se reportan; Agafonov y col (1) realizaron determinaciones de la porosidad total y de aireación en estado seco y con una humedad próxima a la capacidad de campo; Klimes y col (10) se dirigieron fundamentalmente al estudio de la porosidad diferenciada y, Cairo y col (2), estudiaron el problema de la aireación de los suelos pesados junto a otras propiedades del suelo, entre ellas la porosidad.

En el presente trabajo se determina por primera vez en el país aplicando las técnicas de porosimetría de mercurio, la estructura porosa de perfiles representativos de los suelos Oscuros Plásticos de las provincias de Holguín y Santiago de Cuba, dedicados al cultivo de la caña de azúcar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se seleccionaron cuatro perfiles de suelos clasificados (7) como:

Oscuro Plástico Gleyzoso negro (849), Holguín.

Oscuro Plástico Gleyzado gris (850), Holguín.

Oscuro Plástico no Gleyzado pardo oscuro (885), Santiago de Cuba.

Oscuro Plástico Gleyzoso gris amarillento (1241), Holguín.

Las descripciones de estos perfiles fueron reportadas por el Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar (6).

Los análisis realizados fueron:

Densidad real por el método picnométrico (9).

Composición granulométrica por el método de Kachinskii (8).

Porosimetría de mercurio con un porosímetro automático Carlo Erba modelo 820 en el rango 1-80 MPa sobre la presión atmosférica, para determinar el volumen de poros de las muestras para radios comprendidos entre $9,3 \cdot 10^{-9}$ y $7,5 \cdot 10^{-6}$ m. Se considera que los poros de las muestras de suelos son cilíndricos, $\gamma = 480 \text{ mN/m}$ (13,3, 14) y $\theta = 141,3^\circ$ (3).

La distribución del radio de poros para la unidad de masa (gramo) fue obtenida por las variaciones del volumen de mercurio, que penetra a

diferentes presiones cada vez mayores en las muestras peletizadas y secadas durante 2 h a un vacío de 10,6 Pa.

Las variaciones en el volumen de mercurio se midieron directamente usando un porosímetro para poros de diámetro $9,3 \cdot 10^{-9}$ a $7,5 \cdot 10^{-6}$ m y representa la porosidad medida. El volumen de los poros de diámetro menores que $9,3 \cdot 10^{-9}$ m no se determinó, por lo que los valores de porosidad calculados representan solamente el volumen total de poros mayores que $9,3 \cdot 10^{-9}$ m y no la porosidad total.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Washburn (14) propuso por primera vez utilizar el mercurio para determinar el tamaño de poros de las estructuras porosas fundamentándose en la ecuación de Young-Laplace:

$$P_b - P_a = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

donde

$P_b = P_{Hg}$: presión en la fase líquida del mercurio.

$P_a = P_g$: presión en la fase gaseosa.

r_1 y r_2 : radios del menisco.

γ : coeficiente de tensión superficial del líquido.

Para poros cilíndricos, donde r_p sea el radio de poros:

$$r_1 = r_2 = r_p \cos \theta$$

θ : ángulo de contacto.

y tras pequeñas transformaciones, Washburn obtuvo la ecuación:

$$r_p = \frac{-2\gamma \cos \theta}{\Delta p}$$

donde

$$\Delta p = P_{Hg} - P_g$$

La determinación del tamaño de los poros por la penetración del mercurio se fundamenta en el comportamiento de los líquidos que no mojan los capilares. Un líquido no penetra espontáneamente en poros pequeños con ángulo de contacto de más de 90° a causa de la tensión superficial (depresión capilar); esta resistencia se vence ejerciendo una determinada presión externa la cual será función del tamaño de los poros.

En 1945, Ritter y Drake (13) publicaron por primera vez la descripción del método y propusieron un equipo construido por ellos para su determinación a altas presiones.

En la actualidad se utilizan porosímetros automáticos para la determinación de las estructuras porosas por inclusión de mercurio, pudiéndose determinar (5), los tamaños de los poros de radios comprendidos entre $1,5 \cdot 10^{-9}$ m hasta aproximadamente $7,5 \cdot 10^{-6}$ m para un rango de presiones de 500 MPa sobre la presión atmosférica.

Olson (12), realizó la determinación en suelos arenosos ejerciendo presiones de hasta 10,35 MPa para determinar radios de poros de $1,7 \cdot 10^{-7}$ m a $2,0 \cdot 10^{-4}$ m.

Los suelos investigados son suelos arcillosos a lo largo del perfil como evidencia la composición granulométrica que se muestra en la Tabla 1; no existen variaciones bruscas de la textura en los perfiles genéticos y sólo se observa en ocasiones un incremento en la fracción arcilla y en la arcilla física en los horizontes intermedios, tal y como ocurren en casi todos los suelos vérticos del mundo y de Cuba.

Los volúmenes de poros de los horizontes A (Tabla 2) presentan valores variados pero se cumple tanto para los poros mayores y menores que $7,5 \cdot 10^{-6}$ m, que los volúmenes de poros de los suelos Oscuros Plásticos:

No Gleyzado pardo oscuro > Gleyzado gris > Gleyzoso negro > Gleyzoso gris amarillento.

La Figura 1 muestra la relación entre el volumen de los poros (cm^3/g) y el radio de los poros de las muestras estudiadas para $9,3 \cdot 10^{-9}$ m < r < $7,5 \cdot 10^{-6}$ m y r > $7,5 \cdot 10^{-6}$ m y la Figura 2 para r > $9,3 \cdot 10^{-9}$ m.

Como se observa, la contribución al volumen de poros de los poros de radios mayores de $7,5 \cdot 10^{-6}$ m es insignificante al compararse con los menores de $7,5 \cdot 10^{-6}$ m (Figura 1); la totalidad de la porosidad de las muestras está determinada por poros con esos radios. Además, los perfiles estudiados muestran una tendencia al aumento de esta porosidad en los horizontes C respecto a los A.

Las Figuras 3 y 4 nos permiten afirmar que para el rango de los poros estudiados en los horizontes A y C, la estructura porosa de las muestras estudiadas es polidispersa, por presentar varios máximos, facilitando los procesos de difusión que ocurren en el interior de las partículas (11). El comportamiento de las muestras es similar con excepción del perfil gris amarillento, por el predominio de poros de radios de 3 a $4 \cdot 10^{-8}$ m, dado que los datos de la mineralogía primaria (4) y de los análisis granulométricos en la Tabla 1, no muestran diferencias que lo justifiquen; puede suponerse que presentan un comportamiento de *cuello de botella*, tal y como encontraron Dullien y col (citado por Gregg y Sing, (5)), en las arenas estudiadas por el método estereoscópico y por el método de porosimetría de mercurio cuyos picos resultaban ser muy amplios.

Tabla 1. Composición granulométrica

perfil	Horizonte	Profundidad (m)	Límites de los diámetros de las partículas (mm)					
			1,00-0,05	0,05-0,02	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001	$\Sigma < 0,01$
Por ciento de cada fracción								
Gleyzoso negro (849)	A	0,00-0,25	2,42	14,36	5,66	8,29	61,67	75,62
	B	0,25-0,50	1,58	12,54	2,75	8,49	69,17	80,41
	C	0,63-0,95	0,52	4,47	3,27	4,76	60,31	68,34
Gleyzado gris (850)	Ao	0,00-0,21	15,81	3,13	4,95	3,90	57,25	66,10
	A1	0,21-0,45	0,37	8,78	5,42	6,07	54,73	66,22
	AB	0,45-0,90	0,35	8,30	5,31	13,24	48,88	67,43
	C	0,90-1,10	0,38	12,88	5,17	11,00	45,36	61,53
No Gleyzado pardo oscuro (885)	A	0,00-0,20	2,86	4,63	2,83	18,96	64,29	86,08
	B	0,20-0,45	2,16	7,46	2,36	19,26	65,47	87,09
	C	0,45-1,05	3,49	5,36	6,70	15,14	60,25	82,09
Gleyzoso gris amarillento (1241)	A	0,00-0,28	1,36	5,06	0,02	9,89	73,75	83,66
	AB	0,28-0,67	0,89	4,04	0,61	11,40	72,69	84,70
	B	0,67-1,12	0,85	4,38	1,10	11,07	57,13	69,30
	BC	1,12-1,47	0,00	0,69	4,06	13,99	57,98	76,03
	C	1,47-1,90	0,11	0,43	4,40	12,11	61,04	77,55

Tabla 2. Volúmenes de poros en el horizonte A (cm³/g)

Suelo	Horizonte	Profundidad (m)	Volúmenes de poros		
			r < 7 500 nm	r > 7 500 nm	Total
Gleyzoso negro (849)	A	0,00-0,25	0,0652	0,0015	0,0667
Gleyzado gris (850)	Ao	0,00-0,21	0,0993	0,0021	0,1014
No Gleyzado pardo oscuro (850)	A	0,00-0,20	0,1063	0,0030	0,1093
Gleyzoso gris amarillento (1241)	A	0,00-0,28	0,0269	0,0006	0,0275

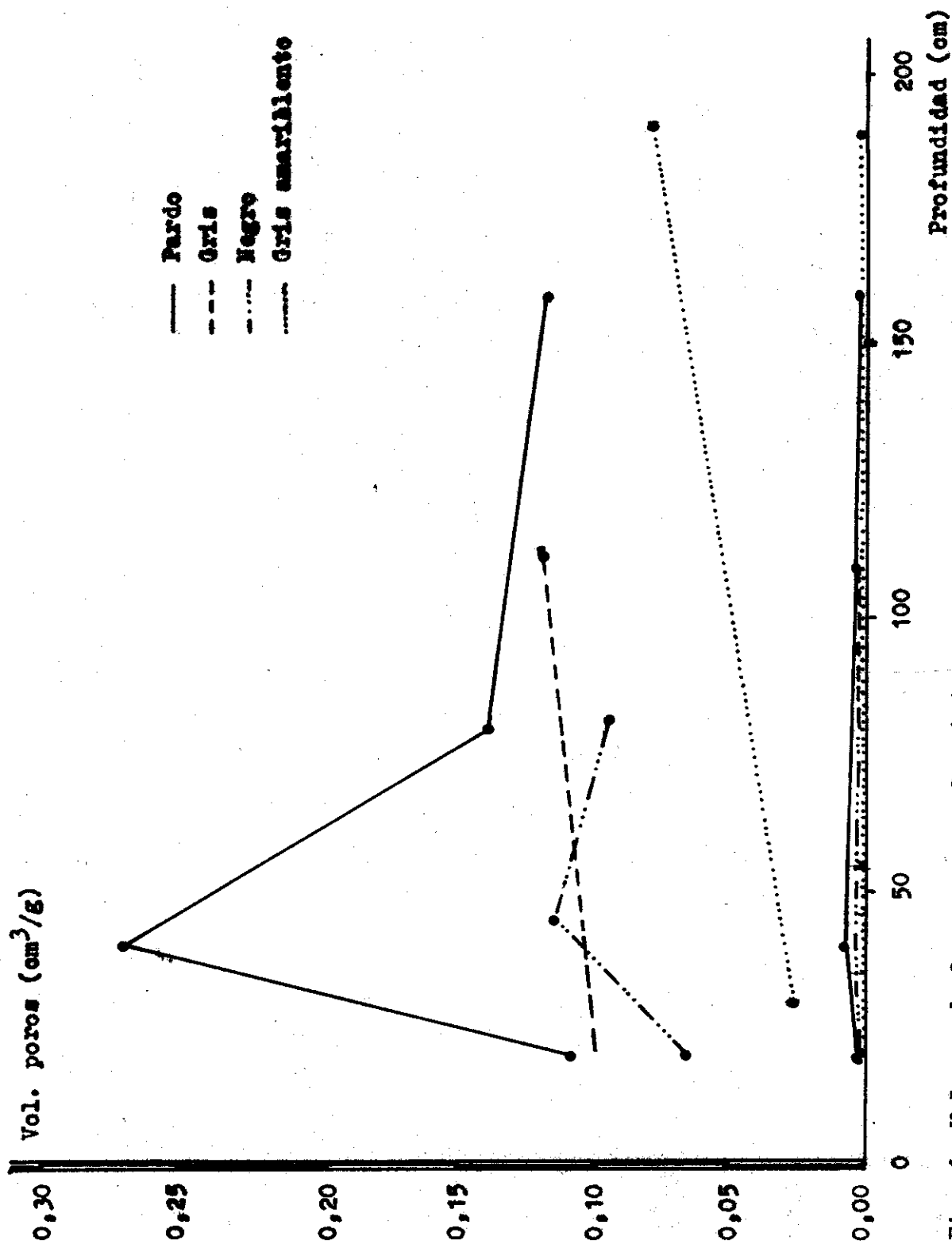


Fig. 1. Volumen de los poros en los intervalos:
 $9,3 \cdot 10^{-9} \text{ m} < r < 7,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$. (grupo superior de curvas)
 $r < 9,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}$. (grupo inferior de curvas)

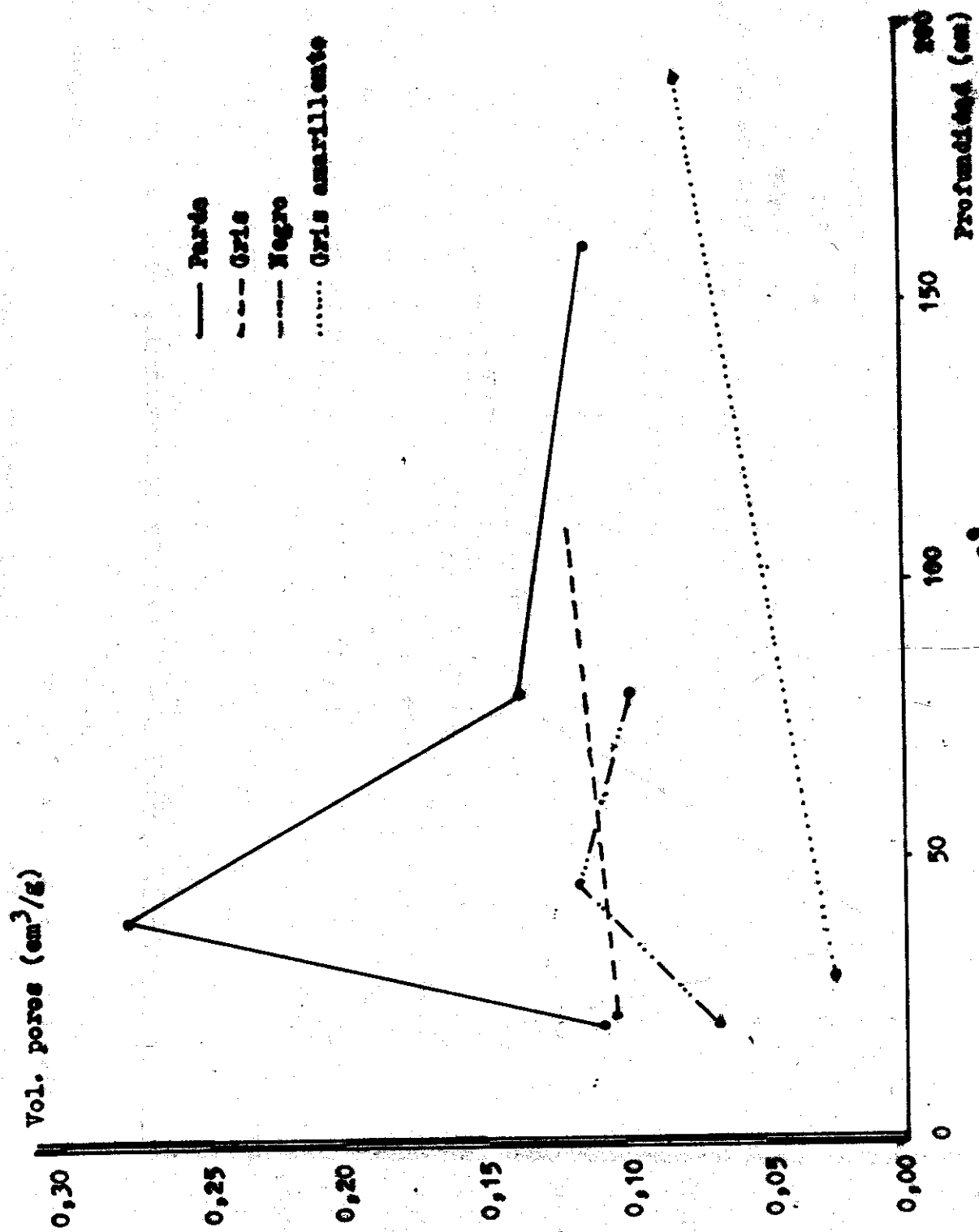
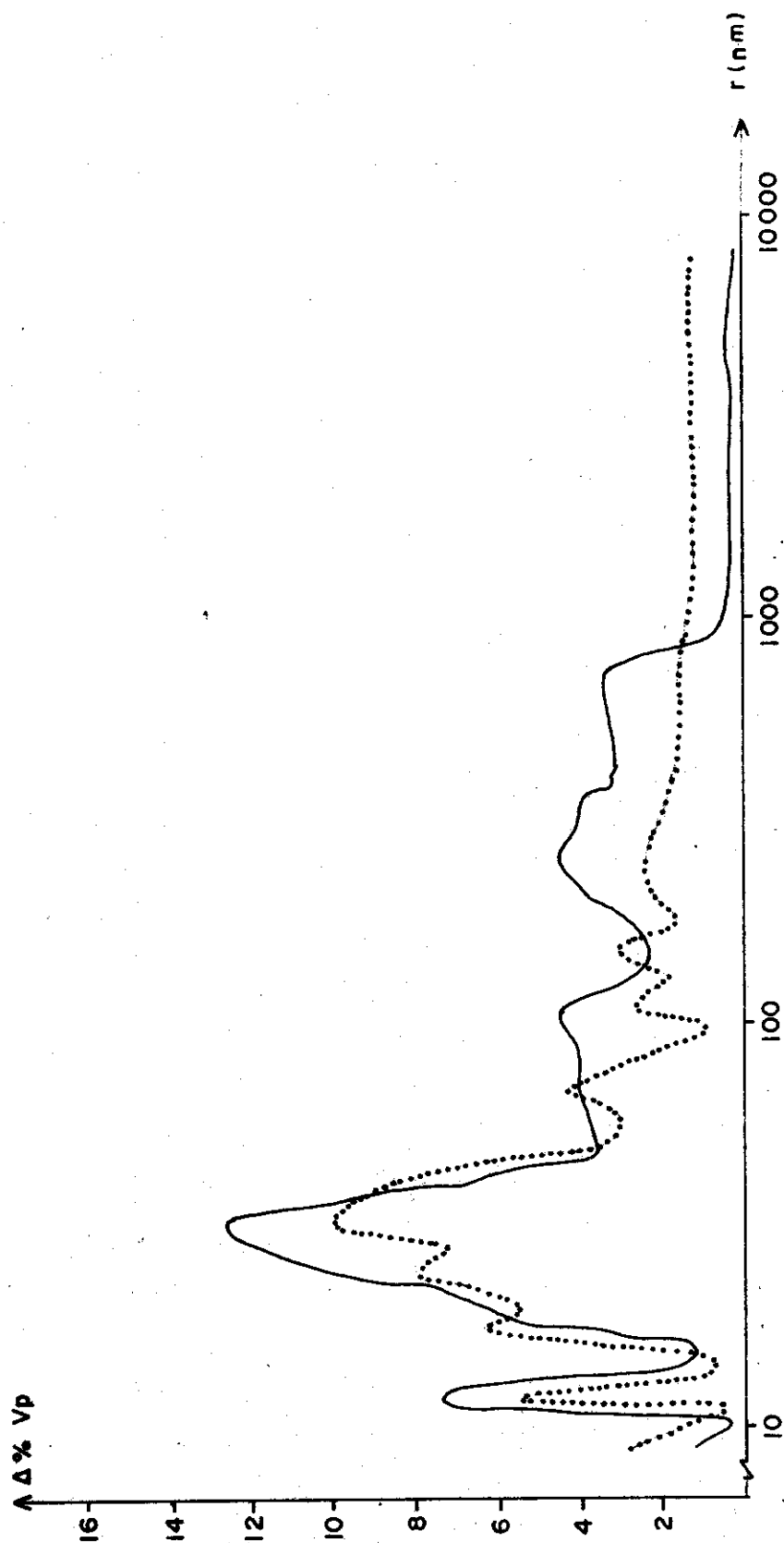
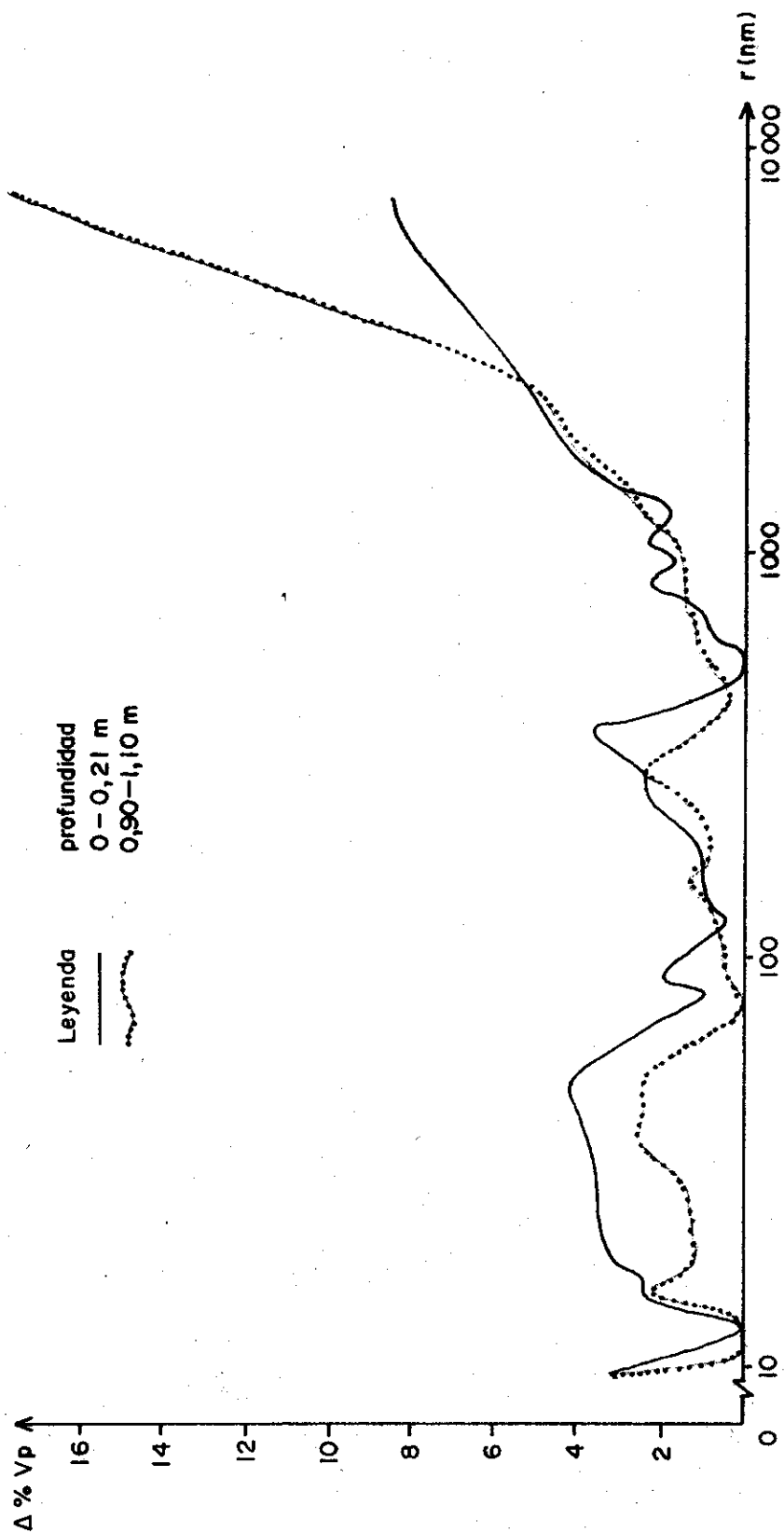


Fig. 2. Volumen total de poros, $r > 9,3 \times 10^{-9}$ m.

Leyenda: Profundidad (m.)
 — 0-0,28
 1,47-1,90



Distribución del radio de poros, Oscuro Plástico Gleyoso Gris Amarillento.



Distribución del radio de poros, Oscuro Plástico Gleyzado gris (850)

En las microfotografías de las muestras de Gregg y Sing (5) se ven claramente franjas amplias con sus entradas más estrechas; esto significa que por porosimetría de mercurio se determina no el radio de las franjas sino el de las entradas o del *cuello de botella*.

Los horizontes A y C investigados tienden a una disminución en la variación (Δ) del % del volumen de poros en el rango de 1 a $7,5 \cdot 10^{-5}$ m para los perfiles Oscuros Plásticos en sus variantes no Gleyzado pardo oscuro y Gleyzoso negro, mientras que para los perfiles gris amarillento y gris ocurre un incremento para este rango de radio de poros.

CONCLUSIONES

En los suelos Oscuros Plásticos, el mayor volumen de poros lo tienen los no Gleyzado pardo oscuro, siguiéndoles en orden decreciente, el Gleyzado gris, el Gleyzoso negro y el Gleyzoso gris amarillento.

Para radio de poros mayores que $9,3 \cdot 10^{-9}$ m, en los horizontes A y C, la estructura porosa de las muestras es polidispersa.

La porosidad total de las muestras está dada por los poros de radios menores que $7,5 \cdot 10^{-6}$ m.

REFERENCIAS

- (1) Agafonov, G.; R. Delgado; L. Rivero; G. Tatevosian
Propiedades físicas de los Vertisuelos de Cuba relacionadas con las particularidades de su génesis. Cienc. Agri., 2: 47-80, 1975.
- (2) Cairo, P.; C. Vela; N. Ramírez
El problema de la aireación en los suelos pesados y su vinculación con otras propiedades. Centro Agrícola 9 (3): 49-61, 1982.
- (3) Carlos Erba
Definitions and Testing Procedures 29 p., 1975.
- (4) Fernández, Livia; Alina Fundora; Yanet Ruiz; A. Obregón
Composición mineralógica de la fracción arenosa de los principales suelos Oscuros Plásticos de la región oriental de Cuba cultivados con caña de azúcar. VI Seminario Científico, I.N.C.A., 1987.
- (5) Gregg, S.J.; K.S. Sing
Adsorption, Surface Area and Porosity. Moscú, Mir, 310 pp., 1984.
- (6) Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, Departamento de Suelos: Descripción de perfiles de la red geográfica experimental; Ministerio del Azúcar, 1986.
- (7) Instituto de Suelos
2. Clasificación genética de los suelos de Cuba. Rev. Agr. 8(1): 1-8, 1975.

- (8) Kachinskii, N.A.
Preparation of soil for microaggregate and texture analysis.
Mechanical and Microaggregate composition of soils, ANSSSR,
Moscow, 1958.
- (9) Kaurichev, I.S.; N.P. Panov; M.V. Stratonovic; I.P. Grechin;
V.I. Savich; N.F. Ganzhara; A.P. Merzhin
Prácticas de Edafología, Ed. Mir, Moscow 287 p: 1984.
- (10) Klimes Szmick, A.; O. Suárez; A. Mora; J. Peña
Suelos de Cuba, Tomo II, Ed. Orbe, La Habana, 303 p., 1980.
- (11) Miquel, J.; M. Hernández; J. Herce
Bases para la preparación y empleo de catalizadores sólidos.
Universidad Autónoma de México, 243 p., 1983.
- (12) Olson, K.
Characterization of pore size distributions within soils by
mercury intrusion and water-release methods. Soil Science.
Vol. 139, No. 5, 400-404; 1985.
- (13) Ritter, H.L.; D.L. Drake
Pore size distribution in porous materials. Ind. Eng. Chem.
Analytic. Ed. 17, 782-791, 1945.
- (14) Washburn, E.W.
Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 7, 115, 1921.

LA PERMANENCIA COMO PROPIEDAD GENERAL DE LAS VARIABLES METEOROLOGICAS I. RESULTADOS PRELIMINARES

Lourdes Alvarez Escudero y Rosendo Alvarez Morales, Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba

RESUMEN

Se definen los conceptos de permanencia: *cantidad de horas consecutivas que una variable meteorológica se mantiene dentro de un determinado rango de valores*, y unidad de permanencia: *rango de valores que puede recorrer una variable siendo considerada dentro de la misma clase*. Se analiza la permanencia de 12 variables meteorológicas: punto de rocío, temperatura de bulbo húmedo, temperatura, presión, tensión de vapor, humedad relativa, déficit de saturación, nubosidad, tendencia de la presión, módulo de la tendencia de la presión, rapidez del viento, dirección del viento y calmas. Se seleccionan las unidades de permanencia para cada una de estas variables. Se procesan los datos de permanencia en frecuencia y se obtienen distribuciones óptimas que en todos los casos se presentan con exponenciales del tipo $y = A \exp(-x) + B$, donde A varía entre 0.2 y 0.9 y B: entre 0.002 y 0.04; con coeficientes de determinación entre 0.940 y 0.998 y error estándar entre 0.004 y 0.06. Se determina la ecuación general para todas las variables que se corresponde con $A = 1.5$ y $B = 0.01$. Se dan conclusiones y recomendaciones.

ABSTRACT

Permanence was defined as: *quantity of consecutive hours that a meteorological variable remains in a given values rank*; and permanence unity was defined as:

value rank that could be reach by a variable as it is considered inside the same class. Permanence of 12 meteorological variables were analyzed: dew point temperature, wet bulb temperature, dry bulb temperature, pressure, vapor pressure, relative humidity, saturation deficit, cloudness, pressure tendence, pressure tendence modulus, wind speed, wind direction and calms. Permanence units for each one of this variables were selected. Permanence frequency was obtained from one year hourly observations data and the best distribution in all cases were represented by exponential functions of type $y = A \exp(-x) + B$, where $0.2 < A < 0.9$ and $0.002 < B < 0.04$; with determination coefficient between 0.94 and 0.998 and standard error between 0.004 and 0.06. General equation for all variables is found with $A = 1.5$ and $B = 0.01$. Conclusions and recommendations are given.

INTRODUCCIÓN

En el año 1985, como trabajo de curso, fue presentado un estudio de la permanencia del viento [1] que contaba con el análisis de dos series de 5 años y una de 10 años de datos de viento en observaciones horarias (87 600 datos). En este trabajo se definió la permanencia del viento como *la cantidad de horas consecutivas que el viento se mantiene del mismo rumbo*. En él se construía una curva representativa de la distribución de la permanencia del viento y se deducía la fórmula:

$$y = \beta x^{-\alpha} \quad (1)$$

como representativa del proceso con un coeficiente de correlación de 0.98. La aplicación de esta ecuación al cálculo de la dispersión de contaminantes se hacía inmediata, ya que esta nos explica la cantidad de horas consecutivas que una región puede ser afectada por las emisiones de una fuente desde el punto de vista climatológico.

Más tarde en 1988, fue presentado un trabajo similar, pero con la característica de que se automatizaban todos los procedimientos de cálculo obteniéndose mediante programas numéricos cartas y superficies características [2].

A partir de esos resultados, los autores decidieron comprobar si alguna otra variable meteorológica cumplía con esta propiedad, redefiniendo el concepto de permanencia en general de la siguiente manera:

Llamaremos permanencia a la cantidad de horas consecutivas que una variable meteorológica se mantiene dentro de un determinado rango de valores.

También es necesario incluir el concepto de unidad de permanencia de la siguiente forma:

Se entiende por unidad de permanencia el rango de valores que puede recorrer una variable siendo considerada dentro de la misma clase.

MATERIALES Y METODOS

Para acometer el presente trabajo se procesó la serie de datos horarios de la estación Casablanca correspondiente al año 1982 (8 760 datos) de la siguiente manera:

1. Se separaron los datos de cada variable meteorológica por permanencias entre 1 y 18 horas y se tomaron valores de frecuencia hasta la décima de por ciento. Las variables analizadas fueron: la temperatura de punto de rocío, temperatura de bulbo húmedo, temperatura, presión, tensión de vapor, humedad relativa, déficit de saturación, nubosidad, tendencia de la presión, módulo de la tendencia de la presión, rapidez del viento, dirección del viento y las calmas.

2. Se determinó el número de casos para cada variable.

3. Se seleccionaron empíricamente los rangos de valores de las variables que constituirían una unidad de permanencia.

4. Se aplicó el programa PANT (I. Borrajero, comun. pers.), de uso en el Instituto de Meteorología para obtener las mejores aproximaciones de las curvas de distribución donde la variable y representa la frecuencia y la variable x las horas de permanencia.

RESULTADOS

Del procesamiento de la información se obtuvo que todas las variables tienen una curva de distribución en forma de J [3] que puede ser aproximada por una exponencial negativa del tipo $\exp(-x)$ con coeficientes de determinación que varían entre 0.94 y 0.998.

En la *Tabla 1* pueden verse las mejores aproximaciones de las curvas de distribución para cada variable meteorológica.

De acuerdo con los resultados obtenidos se determinó hallar una ecuación general de permanencia considerando todos los valores de frecuencia y todos los de permanencia, obteniéndose:

$$y = 1.5 \exp(-x) + 0.01$$

con un coeficiente de determinación de 0.956 y error estándar de 0.04.

Comparando la ecuación general con cada una de las ecuaciones obtenidas para las diferentes variables vemos que los coeficientes difieren poco. Las diferencias entre los términos constantes para la ecuación general y para los de cada una de las variables meteorológicas son muy pequeñas con excepción de las variables presión y rapidez del viento. Esto nos hace pensar que el rango escogido para determinar la unidad de permanencia no es el apropiado para esas variables.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De lo anteriormente expuesto se concluye que:

1. Escogiendo la unidad apropiada la permanencia se comporta como una propiedad general para las variables meteorológicas principales.

2. La ecuación general:

$$\text{Frecuencia} = 1.5 \exp [-(\text{horas de permanencia})] + 0.01$$
 es una buena aproximación de las ecuaciones particulares para cada una de las variables meteorológicas, considerando excepciones la presión y la rapidez del viento que deben recibir un nuevo tratamiento.

3. Las definiciones de permanencia y unidad de permanencia resultan válidas para la descripción de este fenómeno.

Se recomienda:

1. Realizar un estudio para determinar el mejor valor de la unidad de permanencia en los casos de las variables presión y rapidez del viento.

2. La creación de un sistema automatizado de procesamiento de datos para la extensión de esta metodología a otras estaciones meteorológicas del país.

3. Ampliar el período de análisis a una serie de datos a 5 años para aumentar su certidumbre climatológica.

Tabla 1. Ecuaciones de las curvas de distribución para la permanencia de cada una de las variables meteorológicas principales y sus coeficientes estadísticos.

Variable	Unidad de permanencia	Ecuación	Coefficiente de determinación	Error estándar
Temperatura de punto de rocío	1 °C	$y = 1.3 \exp(-x) + 0.02$	0.987	0.01
Temperatura de bulbo húmedo	1 °C	$y = 1.1 \exp(-x) + 0.02$	0.948	0.02
Temperatura	1 °C	$y = 1.4 \exp(-x) + 0.01$	0.989	0.02
Presión	100 Pa	$y = 0.13 \exp(-x) + 0.002$	0.940	0.004
Tensión de vapor	100 Pa	$y = 1.4 \exp(-x) + 0.01$	0.990	0.01
Humedad relativa	5 %	$y = 1.5 \exp(-x) + 0.01$	0.997	0.01
Déficit de saturación	100 Pa	$y = 1.8 \exp(-x) - 0.004$	0.991	0.02
Nubosidad	1/8	$y = 1.6 \exp(-x) + 0.004$	0.996	0.01
Tendencia de la presión	10 Pa	$y = 1.9 \exp(-x) - 0.01$	0.994	0.02
Modulo de la tendencia de la presión	10 Pa	$y = 1.8 \exp(-x) - 0.003$	0.998	0.009
Rapidez del viento	1 Km/h	$y = 0.2 \exp(-x) - 0.04$	0.961	0.06
Dirección del viento	22.5 °	$y = 1.5 \exp(-x) + 0.007$	0.996	0.01
Calmas	1 hora	$y = 1.5 \exp(-x) + 0.009$	0.991	0.02

REFERENCIAS

- Alvarez, L., C. Fernández y R. Alvarez (1986): "Estudio de la permanencia del viento para su aplicación a los problemas de la contaminación del aire I. Resultados preliminares, (inédito), incluido en el informe del tema 311.08 del DICA, Instituto de Meteorología.
- Alvarez, L., C. Fernández y R. Alvarez (1988): "Estudio de la permanencia del viento para su aplicación a los problemas de la contaminación del aire II. Automatización de los resultados". (inédito), incluido en el informe del tema 311.08 del DICA, Instituto de Meteorología.
- Spiegel, M. R. (1966): "Teoría y problemas de estadística, Ediciones Revolucionarias, La Habana, 359 pp.

NIVELES DE ENERGIA DE UN POZO CUANTICO DELTA DOPADO

L. M. Gaggero Sager (1), R. Pérez Alvarez (1,2) y Ch. B. Sommers (2)

(1) Departamento de Física Teórica, Universidad de La Habana, Cuba

(2) Laboratoire de Physique des Solides, Bat. 510, Centre d'Orsay, Université Paris Sud, Orsay, Francia.

RESUMEN

Se presentan cálculos cuasiclásicos y en la aproximación de Thomas Fermi de los niveles de energía electrónicos de un pozo cuántico obtenido por dopamiento con impurezas donoras de una capa de un semiconductor intrínseco. Se discute la solución de la ecuación de Poisson para este sistema. Se calculan por primera vez estos niveles en estas aproximaciones para todas las concentraciones de interés práctico. Se discute la información que se puede obtener de la aproximación cuasiclásica en la suposición de que la de Thomas Fermi es correcta.

ABSTRACT

The calculation of the energy levels of a delta doping quantum well is presented using the quasiclassical and Thomas Fermi approximations. The solutions of the Poisson equation in this system is considered. The energy levels as a function of the impurity concentration are given for the first time using in the calculation the above mentioned approximations in the range of concentration of practical interest. Supposing the Thomas Fermi

approximation is correct the discussion of what to expect for the quasiclassical is given.

1. INTRODUCCIÓN

A partir de los inicios de la década del 70 y teniendo como premisa básica la aparición de nuevos métodos de crecimiento de capas ultrafinas de semiconductores, ha tenido un vertiginoso desarrollo el estudio de sistemas de baja dimensionalidad sobre la base de semiconductores. Recientemente, ha aparecido una nueva clase de sistemas artificiales de esta naturaleza, creados por el dopamiento de una, o unas pocas capas atómicas [1-16]. El caso modelo (y prácticamente el único estudiado hasta el momento) es el de GaAs con una capa dopada con Si.

En [1-16] se reportan el crecimiento y algunas propiedades de transporte en este sistema. También se reportan cálculos de los niveles energéticos de electrones de conducción en el marco de diferentes modelos entre los cuales resaltan: 1) la aproximación cuasiclásica tomando el potencial como una poligonal [4], 2) la aproximación Thomas Fermi (TF) [15]. La primera de estas sólo puede ser considerada como una primera aproximación al asunto y debe discutirse qué se puede obtener de ella. La segunda sólo fue aplicada al caso en que la concentración de impurezas es de $5,13 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, caso en el cual coincidió muy bien con cálculos autoconsistentes de Hartree. Aún cuando se considere correcto este enfoque, resta por calcular para otras concentraciones.

Es de resaltar el interés que tiene profundizar en los métodos de cálculo de los niveles electrónicos en estos sistemas, pues al tener varios niveles ocupados se hace prácticamente imprescindible un cálculo autoconsistente, o al menos que se modele convenientemente el potencial.

En el presente trabajo abordamos el estudio de la estructura electrónica del GaAs con una capa atómica dopada de impurezas donoras. En esta dirección los objetivos específicos son:

- a) Describir el potencial electrostático generado por las impurezas, sus formas asintóticas y otras.
- b) Plantear el problema de los estados confinados en el marco de la Teoría de Masa Efectiva a una banda (la de conducción del GaAs).
- c) Estudiar la solución del problema de los estados confinados más bajos con la aproximación cuasiclásica sin tomar el potencial poligonal.
- d) Calcular los niveles de energía con la aproximación TF para todo el rango de concentraciones de interés.

2. MODELO

Usaremos un modelo de función envolvente a una sola banda y masa efectiva no dependiente de la posición [17], es decir:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 F(z)}{dz^2} + V(z) F(z) = \epsilon F(z) \quad (1)$$

donde m es la masa efectiva, $\hbar$ es la constante de Planck, z la dirección de crecimiento y $F(z)$ la envolvente asociada a la banda en cuestión. El autovalor ϵ está relacionado con el borde de la banda E_0 , la energía tridimensional E y el vector bidimensional de onda $\vec{k}$ del movimiento paralelo a las capas dopadas a través de la relación

$$\epsilon = E - E_0 - \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (2)$$

El potencial puede ser considerado como función sólo de z si la densidad de impurezas es suficientemente alta, es decir si $a_0 > n_{2d}^{-1/2}$, donde a_0 es el radio de Bohr efectivo. Si $a_0 \approx 100 \text{ \AA}$, entonces $n_{2d} > 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. En los casos vistos experimentalmente n_{2d} está entre 10^{12} cm^{-2} y 10^{13} cm^{-2} [18].

El análisis de la ecuación de Poisson para este sistema conduce a las siguientes consideraciones [19]:

- El potencial es simétrico. Los estados acotados tendrán, entonces, paridad definida respecto de la capa de impurezas.
- El potencial tiene una parte electrostática y otra proveniente de efectos de muchos cuerpos.
- En cuanto a la parte electrostática podemos separar la contribución de las cargas fijas y las móviles. Sus formas asintóticas en $\pm \infty$ se anulan. En un entorno del origen domina la contribución de la carga fija.
- Lo anterior se expresa matemáticamente como que el potencial electrostático tiene el siguiente desarrollo alrededor del origen:

$$V(z) = V_0 + F|z| + \beta z^2 + \gamma z^4 + \dots \quad (3)$$

donde V_0 es el valor del potencial en el origen y

$$F = \frac{2\pi e^2}{\epsilon_r} n_{2d} \quad (4)$$

- Los coeficientes β , γ , y otros se pueden escribir como derivadas sucesivas de la densidad de carga móvil, y por lo tanto, en términos de las envolventes y sus primeras derivadas. Así, por ejemplo:

$$\beta = -\frac{2\pi es}{\epsilon_r} \rho_s(0) \quad (5)$$

$$\gamma = -\frac{1}{6} \frac{\pi es}{\epsilon_r} \left. \frac{d^2 \rho_s(z)}{dz^2} \right|_{z=0} \quad (6)$$

s es el signo de la carga de los portadores, e es la carga del positrón, ϵ_r es la constante dieléctrica relativa del material, ρ_s es la densidad volumétrica de carga.

f. Para el potencial son válidas las siguientes expresiones:

$$V(z) = V_0 + \frac{2\pi e^2 \eta}{\epsilon_r} n_{2d} |z| + \frac{4\pi e \eta}{\epsilon_r} \int_0^z d\xi \int_0^\xi d\zeta \rho_s(\zeta) \quad (7)$$

$$V(z) = V_0 + \frac{4\pi s e \eta}{\epsilon_r} \int_0^\infty d\xi \int_\xi^\infty d\zeta \rho_s(\zeta) - \frac{4\pi s e \eta}{\epsilon_r} \int_z^\infty d\xi \int_\xi^\infty d\zeta \rho_s(\zeta) \quad (8)$$

De la primera se aprecia fácilmente la forma lineal del potencial en un entorno del origen. La segunda es más útil para analizar el comportamiento en $\pm \infty$.

Estas consideraciones nos permiten elaborar un modelo con potencial lineal ($V(z)=V_0+F|z|$) o parabólico ($V(z)=V_0+F|z|+\beta z^2$) que utilizaremos en el marco de la aproximación cuasiclásica.

Como expresamos en la Introducción, el otro enfoque que nos interesa es el del modelo TF elaborado por Ioratti [15] para estos sistemas. Según su trabajo, el potencial total ahora tendrá efectos de muchos cuerpos y se podrá expresar analíticamente como

$$V(z) = - \frac{\alpha^2}{(\alpha|x|+x_0)^4} \quad (9)$$

donde $\alpha = 2/15\pi$ y $x_0 = (\alpha^3/\pi n_{2d})^{1/5}$. Note que V dado por (9) es el potencial expresado en unidades del Rydberg efectivo, mientras que x está en unidades del radio de Bohr efectivo; en el GaAs estos tienen, respectivamente, los valores 5.83 meV y 98.7 Å.

Consideraremos que la temperatura es igual al cero absoluto. Esto nos permite fácilmente llegar a las siguientes expresiones para la densidad de carga y el nivel de Fermi en términos de los autovalores y autofunciones de nuestro problema:

$$\rho_s(z) = - \frac{2em}{2\pi\hbar^2} \sum_{i=1}^{\infty} |F_i(z)|^2 (E_f - \epsilon_i) \theta(E_f - \epsilon_i) \quad (10)$$

$$E_f = \frac{1}{p} \sum_{i=0}^{p-1} \epsilon_i + \frac{2\pi\hbar^2}{2mp} n_{2d} \quad (11)$$

donde p es el número de minibandas ocupadas.

3. APROXIMACIÓN CUASICLÁSICA

Trabajaremos en la aproximación cuasiclásica de primer orden haciendo uso de la regla de Bohr-Sommerfeld [20].

Para el potencial lineal se obtiene, entonces:

$$\epsilon = (3\pi/4)^{2/3} (\hbar^2 F^2 / (2m))^{1/3} (n+1/2)^{2/3} \quad (12)$$

Para el potencial parabólico el resultado es:

$$(\epsilon/\epsilon_t)^{3/2} = 1 / \left[1 + 3 \sum_{j=1}^{\infty} \delta^j (\epsilon/\epsilon_t)^j / ((2j+1)(2j+3)) \right] \quad (13)$$

ϵ_t son los niveles de energía del potencial lineal (pozo triangular) y $\delta = 4\beta\epsilon_t/F^2$. En estas expresiones las energías están referidas al fondo del pozo.

Utilizando las fórmulas conocidas [20] para las funciones de ondas cuasiclásicas y sus derivadas, se pueden evaluar estas magnitudes en el origen y obtener así expresiones para β , γ .

Sustituida la correspondiente a β en la fórmula anterior, esta expresión nos permite tener una ecuación para los niveles de energía del potencial parabólico. Dentro del marco de la aproximación cuasiclásica y de la clase de potenciales parabólicos, los niveles así obtenidos son autoconsistentes.

En [19] se presenta un análisis de la validez de la aproximación cuasiclásica en estos sistemas y modelos.

4. APROXIMACION DE THOMAS FERMI

Para calcular los niveles de energía en esta aproximación hay que acudir a métodos numéricos. En nuestro caso usamos el formalismo de la matriz de transferencia [21]. Para calcularla empleamos una rutina especial de solución de ecuaciones diferenciales que tiene en cuenta la posibilidad de que el problema sea de tipo *stiff* [22]. Este detalle es importante pues nuestro potencial hace que la ecuación de Schrödinger tenga esta característica, lo cual dificulta su solución por cualquier vía.

5. CONCLUSIONES

En las Figuras 1, 2 y 3 se presentan respectivamente los resultados para el estado básico, el primer estado excitado y el nivel de Fermi en función de la concentración de impurezas. Para los cálculos empleamos valores reconocidos de los parámetros del GaAs ($m=0.067 m_0$, $\epsilon_r=12.5$). Las cuatro curvas de cada gráfico corresponden a los siguientes casos:

- a) Aproximación cuasiclásica con potencial lineal.
- b) Aproximación cuasiclásica con potencial parabólico.
- c) Aproximación cuasiclásica con potencial poligonal [4]
- d) Aproximación TF [15]. En este último caso, E_f coincide con el borde superior del pozo.

Supondremos que la aproximación TF da correctamente los niveles de energía autoconsistentes. Lo anterior fue mostrado por Ioratti para la concentración $5.13 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Dado el hecho de que el rango de concentraciones de interés es relativamente estrecho, y está alrededor de este valor, es presumible que TF funcionará correctamente en todo este intervalo de concentraciones. En cualquier caso, está en marcha el cálculo autoconsistente para todas las concentraciones de interés.

Es de notar que nuestros resultados cuasiclásicos coinciden en una buena medida con los de [4] a pesar de que se maneja de manera distinta con el potencial que se usa en la aproximación cuasiclásica. Es difícil discernir cuál de estas variantes es mejor pues en [4] no se dan detalles; no obstante, podemos decir que nuestra opción es implementable en una PC y que los tiempos de cálculo son de sólo algunos minutos. Una dificultad de nuestra variante es que no permite calcular los niveles por encima del primer nivel excitado, lo que hace que dé un valor más inexacto del nivel de Fermi (ver fórmula (11)).

Las variaciones del potencial tan rápidas cerca del borde del pozo hacen que sea necesario conocerlo de manera precisa para tener buenos valores de los niveles cercanos a este borde. Esto explica que distintos trabajos reporten distintos números de niveles ocupados con electrones. La solución de esta dificultad debe lograrse con cálculos autoconsistentes. De todas formas, la cantidad de electrones en estos niveles es pequeña, por lo que no ha de ser determinante su cálculo exacto para describir correctamente la mayor parte de las magnitudes físicas observables.

En general se aprecia de los gráficos que la Aproximación Cuasiclásica mejora en la medida en que empleamos potenciales más elaborados. Es de esperar entonces que se pueda usar exitosamente en otros sistemas similares como, por ejemplo, el δ -FET [4].

Agradecemos esclarecedoras y estimulantes discusiones con los colegas F. García Moliner, Víctor Velasco y L. Chico, del CSIC, España; así como a L. Alvarez, del ICIMAF de la ACC, por proveernos del programa de solución de ecuaciones diferenciales.

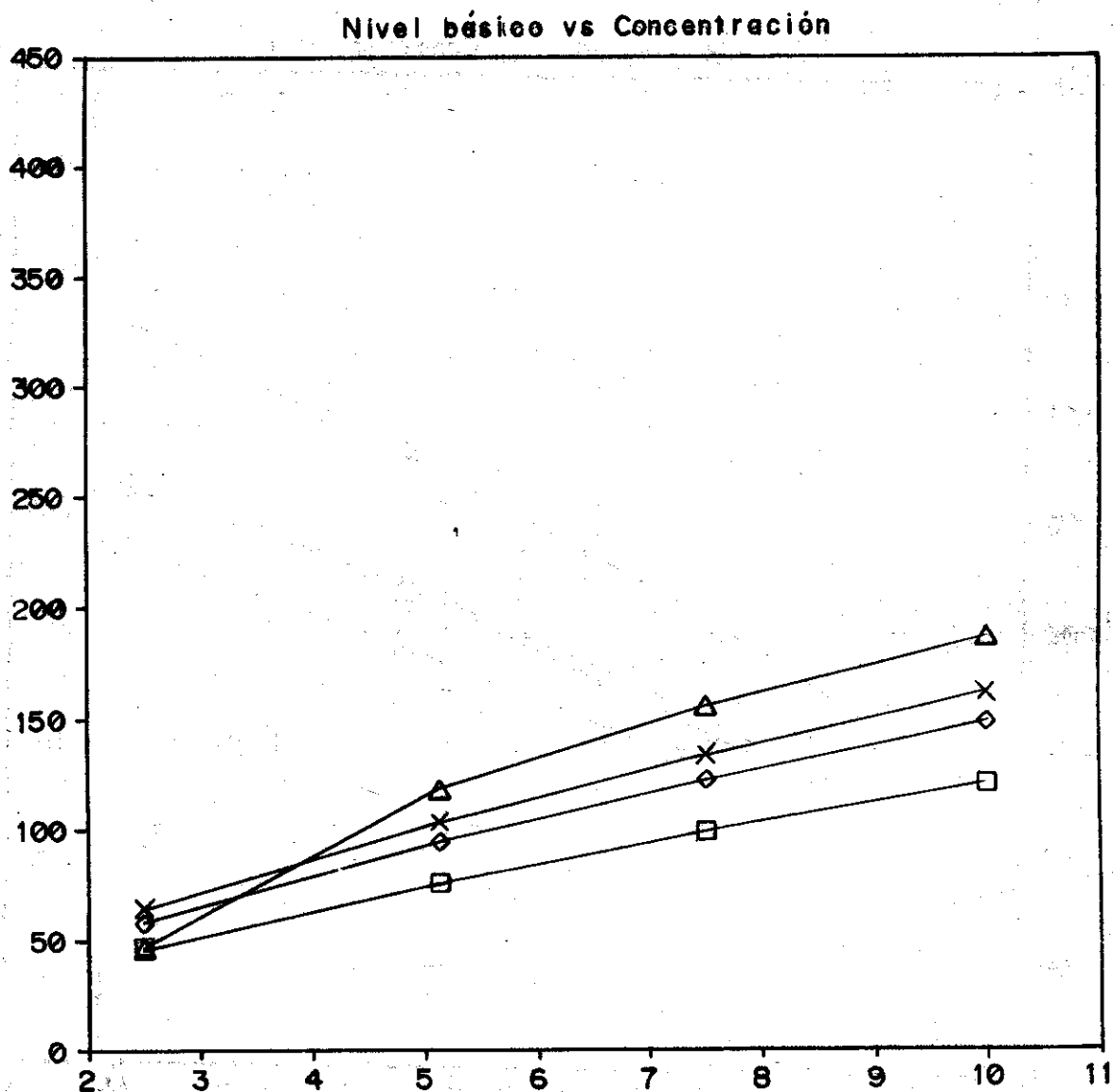


Figura 1. Dependencia de la energía del estado básico con la concentración de impurezas en la capa. La curva con cruces representa el cálculo cuasiclásico con el potencial lineal; los rombos se han usado para los resultados cuasiclásicos con el potencial parabólico; los triángulos sirven para señalar el cálculo también cuasiclásico pero con potencial poligonal; por último, los cuadrados representan la aproximación de TF. Las energías están en meV; las densidades en 10^{12} cm^{-2} .

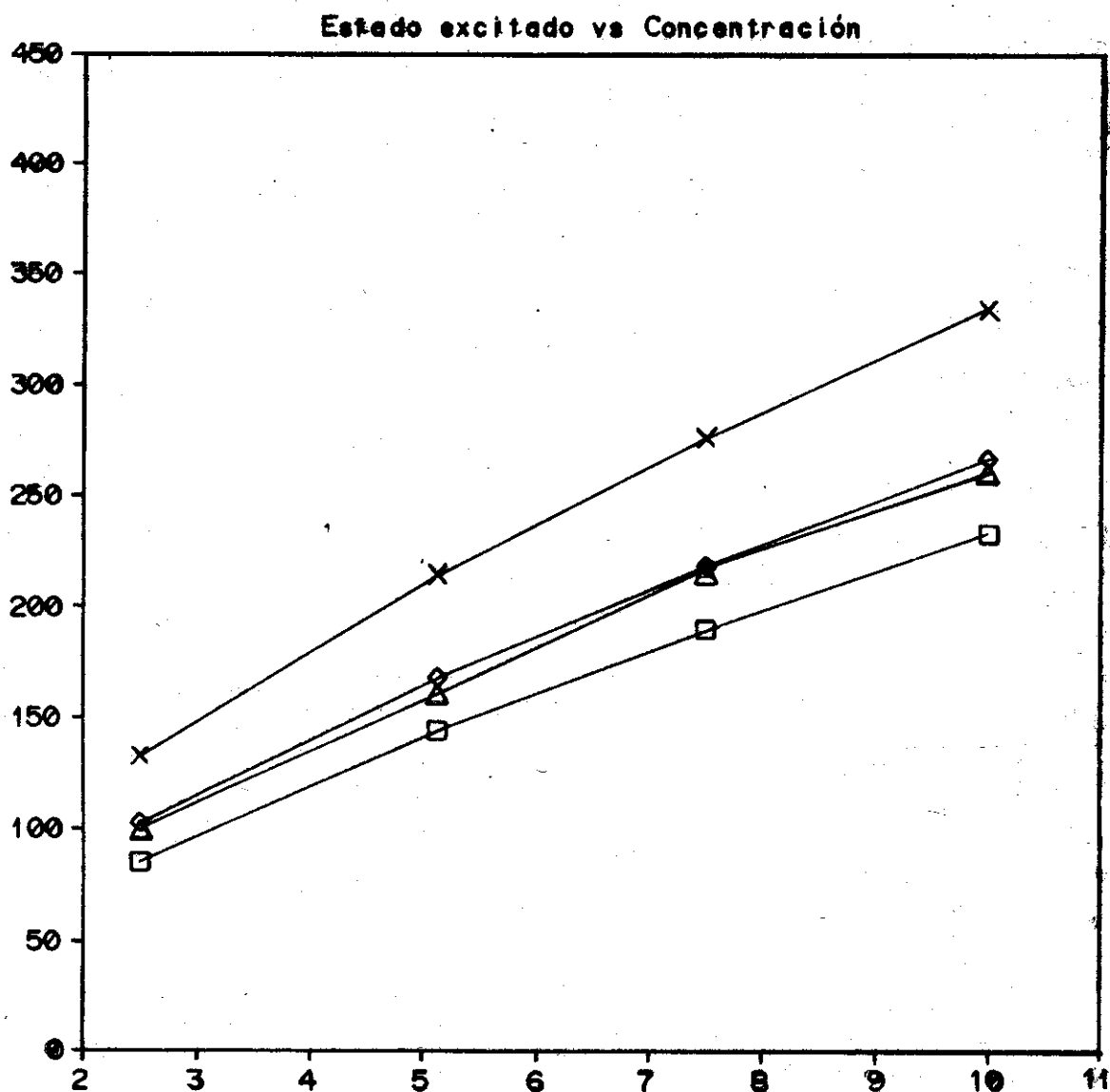


Figura 2. Dependencia de la energía del primer estado excitado con la concentración de impurezas en la capa. La curva con cruces representa el cálculo cuasiclásico con el potencial lineal; los rombos se han usado para los resultados cuasiclásicos con el potencial parabólico; los triángulos sirven para señalar el cálculo también cuasiclásico pero con potencial poligonal; por último, los cuadrados representan la aproximación de TF. Las energías están en meV; las densidades en 10^{12} cm^{-2} .

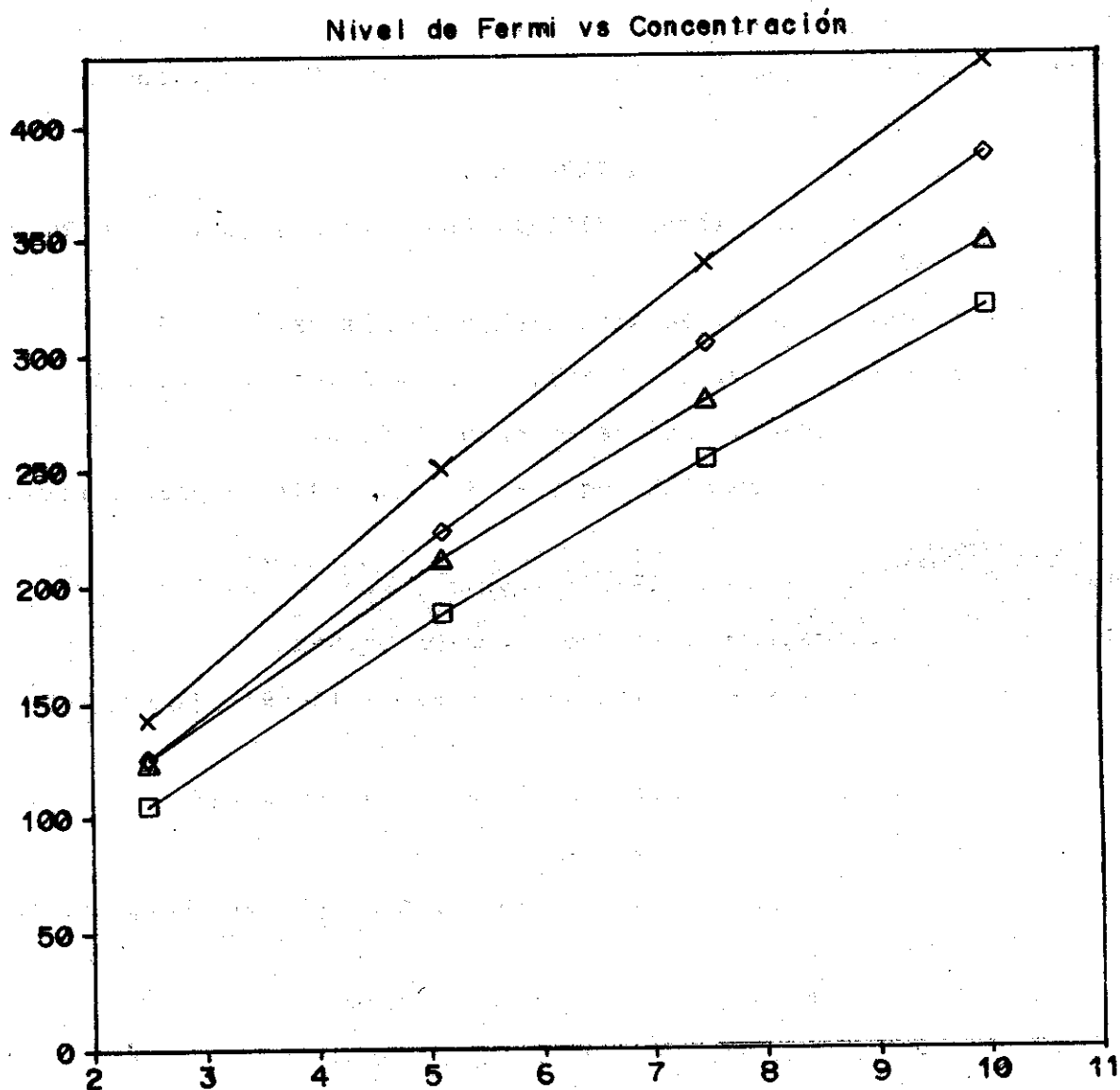


Figura 3. Dependencia de la energía del nivel de Fermi con la concentración de impurezas en la capa. La curva con cruces representa el cálculo cuasiclásico con el potencial lineal; los rombos se han usado para los resultados cuasiclásicos con el potencial parabólico; los triángulos sirven para señalar el cálculo también cuasiclásico pero con potencial poligonal; por último, los cuadrados representan la aproximación del TF. Las energías están en meV; las densidades en 10^{12} cm^{-2} .

REFERENCIAS

- Dohler, G. (1978): Surface Science 73, 97.
- Schubert, E. F. y K. Ploog (1985): Japanese Journal of Applied Physics 24, L608.
- _____ (1985): IEEE Transactions on Electronics Devices, ED32, 1868.
- Schubert, E. F., A. Fisher y K. Ploog (1986): IEEE Transactions on Electronics Devices, ED33, 625.
- Ploog, K. (1987): Physica Scripta T19: 136.
- Ploog, K., M. Hauser y A. Fischer (1987): Inst. Phys., Conf. Ser. N. 91: Chapter 1: 27.
- Juarez, A. y A. Zehe (1987): Revista Cubana de Física, VII: 41.
- Zrenner, A., F. Koch y K. Ploog (1988): Surface Science, 196: 671.
- Perry, C. H. et al. (1988): Surface Science, 196, 677.
- Richter, J. H. Sigg, K. Von Klitzing y K. Ploog (1989): Physical Review, B 39, 6268.
- Arsenault, C. J. y M. Meunier (1989): Physical Review, B. 39, 8739.
- Peeters, F. M. y P. Vasilopoulos: Comunicación privada.
- Bendling, S., C. Zhang, K. V. Klitzing y K. Ploog (1989): Physical Review B 39, 1097.
- Wagner, J., A. Fischer y K. Ploog (1989): Physycal Review B 42, 7280.
- Ioratti, I. (1990): Physical Review B 41, 8340.
- Trott, M., S. Trott, G. Teichmann y Ch. Schnittler (1990): Phys. Stat. Sol. (b) 161, K15.
- Luttinger, J. M. y W. Kohn (1955): Physical Review 97, 869.
- Ploog, K., M. Hauser y A. Fisher (1987): Appl. Phys. A, 5.
- Gaggero Sager, L. M. (1990): Tesis de Diploma, Facultad de Física, U.H.
- Davydov, A. S. (1969): Quantum Mechanics, edición R., Cuba.
- Pérez Alvarez, R. y H. Rodríguez Coppola (1988): Phys. Stat. Sol. (b) 145, 493.
- Shampine, L. F. y M. K. Gordon (1975): Computer Solution of Ordinary Differential Equations, W. H. Freeman and Company, San Francisco.

Recibido: 1/7/91

PROGRAMA MSX-BASIC PARA EL PROCESAMIENTO AUTOMATICO DE ESPECTROS DE RADIACION GAMMA

R. Soto, E. Marín y M. Hernández, Departamento de Física General, Facultad de Física, Universidad de La Habana

RESUMEN

Se describe un programa desarrollado en lenguaje MSX-Basic, denominado ESPEC-2, que realiza la evaluación analítica de espectros e incorpora facilidades de suavizamiento, localización de picos mediante la transformada rectangular de área nula y la técnica de ajuste gaussiano de estos. Por su fácil manipulación se hace muy apropiado para los usos demostrativos y del laboratorio docente.

ABSTRACT

A MSX-Basic language program, called "ESPEC-2", which carries out the analytical evaluation of gamma spectrum and involves an smoothing routine, a zero area rectangular transform to locate peaks, and a Gaussian fitting technique for the peaks, is described. The program provides the performance needed for demonstrative uses, and ease of operation for the laboratory classroom.

INTRODUCCIÓN

La gran cantidad de información sobre las peculiaridades de la desintegración radiactiva y la interacción de la radiación con la sustancia, capaz de ser obtenida mediante el uso de detectores de radiación tales como los de centelleo o de materiales semiconductores, sólo puede ser

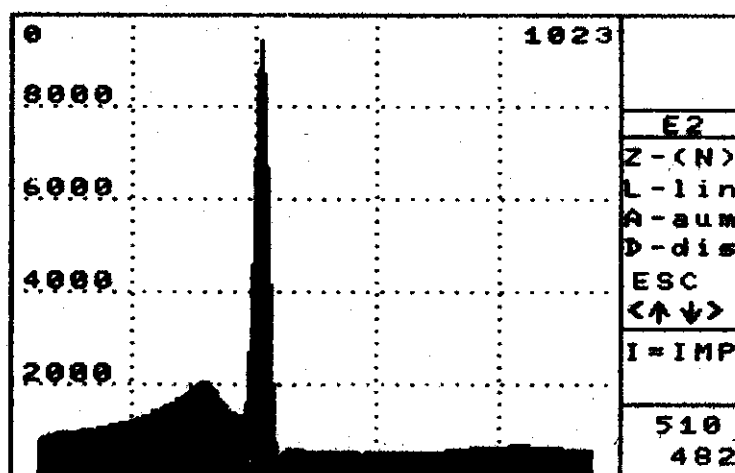


Figura 1. Espectro de ^{137}Cs suavizado con cantidad variable de puntos hasta un máximo de 21.

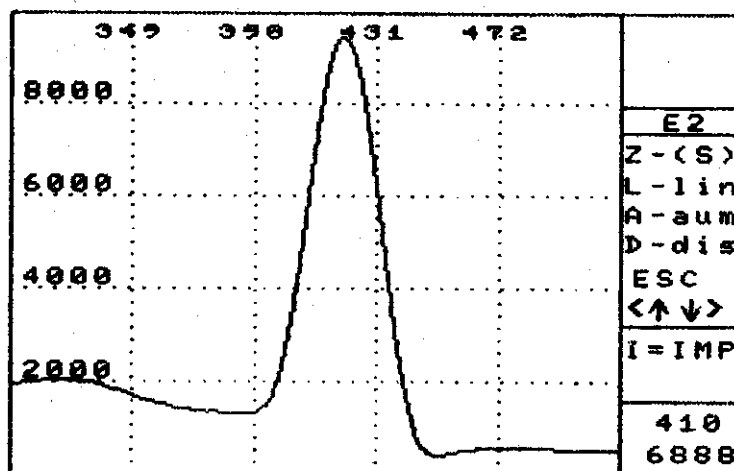


Figura 2. Expansión del espectro representado en la Figura 1 donde se observa el contorno del pico sin las notables dispersiones de origen estadístico que aparecen en los no suavizados.

b) Procesamiento del espectro:

Una vez que todo el espectro o parte de este ha sido suavizado, se procede a procesarlo con una transformada rectangular de área nula y ancho seleccionable T_0 , dada por:

$$S_3(j) = \left[S(j) - 0.5 * \left(S_1(j) + S_2(j) \right) \right] \dots\dots\dots (1)$$

donde

$$S(j) = \sum_{i=j-w}^{i=j+w} C(i) \dots\dots\dots (2)$$

$$S_1(j) = \sum_{i=j-3w-1}^{i=j-w-1} C(i) \dots\dots\dots (3)$$

y

$$S_2(j) = \sum_{i=j+w+1}^{i=j+3w+1} C(i) \dots\dots\dots (4)$$

siendo $C(i)$ el conteo en cada canal para el espectro suavizado y $w=2T_0 + 1$. Se aclara que las expresiones (2), (3) y (4) ya han corregido convenientemente el aparente error tipográfico existente en el empleo de la transformada rectangular de área nula hecho en /8/.

Este tipo de transformada ha resultado ser un filtro digital muy simple y conveniente para delinear la estructura de los datos /6/, /7/. La Figura 3 muestra el resultado de aplicar la transformada descrita al espectro del radioisótopo ^{137}Cs .

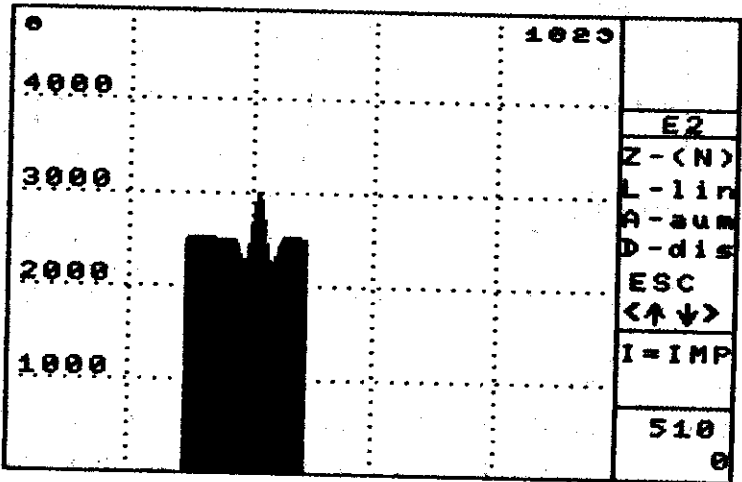


Figura 3. Resultados de la aplicación de la transformada de área nula al espectro del ^{137}Cs mostrado en la Figura 1.

A partir de aquí el programa calcula la varianza de la transformada resultante para eliminar los posibles picos espurios; con esta operación, determina en qué intervalo de canales la transformada posee significación estadística.

Ello se logra analizando canal a canal donde se cumple la condición:

$$S_3(j) < 2.0 * \left[S(j) + \left(\frac{S_1(j) + S_2(j)}{4} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

en cuyo caso, se asigna el valor cero a la transformada estadísticamente significativa, $S_4(j)$, lo que facilita posteriormente la búsqueda de las zonas del espectro donde existen picos reales. Seguidamente, se determina la localización del pico en dicho arreglo de datos, según se cumpla simultáneamente que:

$$S_4(j-1) > 0, S_4(j) > 0, S_4(j+1) > 0$$

Y $\dots\dots\dots (6)$

$$S_4(j-1) < S_4(j) > S_4(j+1)$$

Los límites del pico se determinan encontrando los mínimos a ambos lados del máximo ubicado según (6). Este paso se convierte en un proceso de localización inequívoco, como puede observarse en la Figura 4.

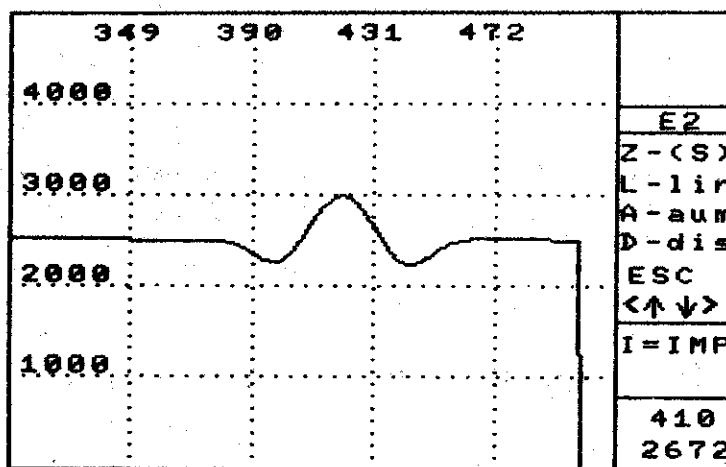


Figura 4. Representación del espectro transformado utilizando la opción "ZOOM".

Se incluye la determinación de la línea base mediante el método de mínimos cuadrados con cantidad seleccionable de pares de valores en el entorno de las cotas del pico encontradas previamente, luego, se calcula el ancho a la media altura, el área neta, la integral, el fondo, los errores, así como el canal del centroide y los límites anterior y posterior del pico, utilizando la linealización de una función gaussiana simple

/9/ y un ajuste convencional por mínimos cuadrados ponderados, donde los factores de ponderación W_i , se obtienen según la expresión:

$$W_i = \left[\frac{1}{Y(x_i-1)} + \frac{2 \cdot F(x_i-1)}{[Y(x_i-1)]^2} + \frac{1}{Y(x_i+1)} + \frac{2 \cdot F(x_i+1)}{[Y(x_i+1)]^2} \right]^{-1} \dots\dots (7)$$

Los resultados de aplicar el algoritmo de cálculo descrito, al espectro del ^{137}Cs que aparece en la Figura 1 se resumen a continuación:

- * Pico #1: Canal inicial:397 Canal final:443 Centroide:420
- * FWHM:20
- * Integral:270655
- * Area neta:197130
- * Error (%):0.15
- * Fondo:73524

III. CONCEPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA:

La organización parte de un programa principal que contiene los menús correspondientes; además, da la posibilidad de limpiar los sectores de memoria a voluntad, pues debido a la reducida capacidad de la computadora utilizada, se hace necesario almacenar el espectro suavizado, su transformada y la que resulta de analizar la significación estadística de los picos en segmentos diferentes de esta, por consiguiente, antes de procesar un nuevo espectro debe acudir a la subrutina de borrado. El diagrama de utilización de los segmentos de memoria se muestra en la Figura 5.

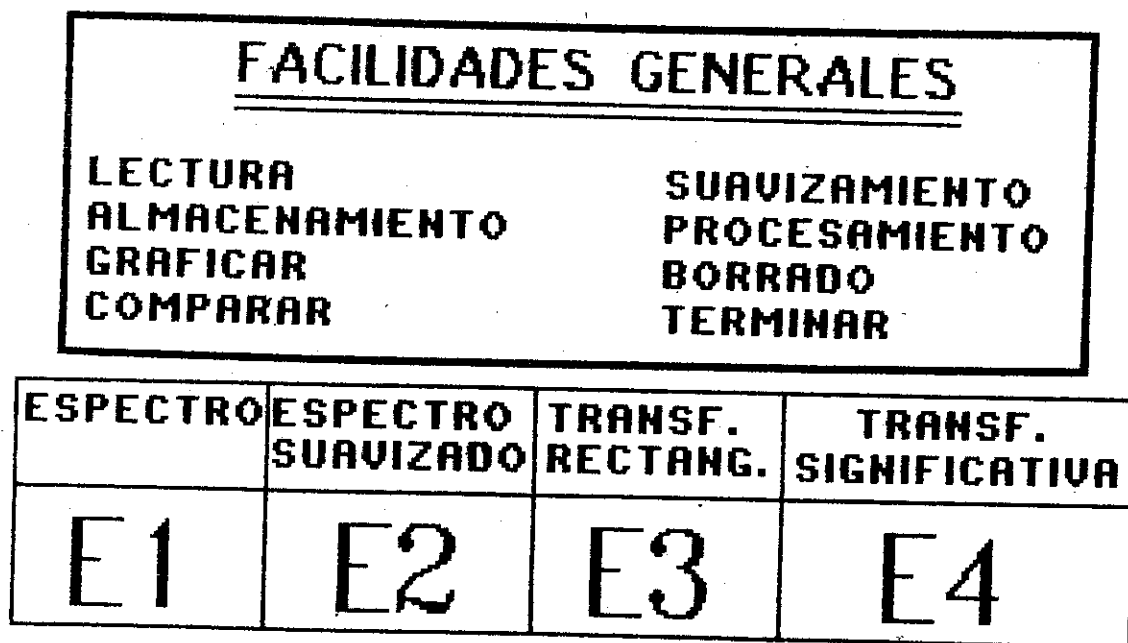


Figura 5. Diagrama de utilización de los segmentos de memoria para el programa Espec-2.

Por otra parte, como el programa está orientado hacia las aplicaciones docentes, hace continua previsión de los posibles errores de manipulación del estudiante, evitando así la necesidad de abortar el trabajo.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa MSX-Basic Compatible para la operatoria básica concerniente al procesamiento analítico de los espectros de radiación gamma, el cual ha sido concebido con el propósito de completar el trabajo de laboratorio /3/.

Las variables utilizadas para el centroide, el límite anterior y el posterior se declaran en arreglos por lo que el programa recurre al mismo proceso de delimitación del pico y cálculo de magnitudes de importancia para el trabajo espectrométrico tantas veces como picos haya en cantidad inferior a 10.

El uso del software descrito posibilita que se incorpore al sistema de conocimientos y habilidades de los estudiantes los rudimentos de la espectrometría gamma, sin que por ello sea necesario realizar grandes inversiones ni utilizar instrumentación mayormente destinada a las investigaciones.

Por su versatilidad y alta velocidad de corrida, se hace útil no sólo en el laboratorio docente, sino también en usos demostrativos que propician la motivación vocacional y profesional de los estudiantes.

REFERENCIAS

- Quittner, P. (1972). "Gamma-Ray Spectroscopy", Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Sato, T., P. Mapstone e I. Muriel (1988). "MSX Guía del Programador y Manual de Referencia". Ed. Revolucionaria.
- Marín, E., M. Hernández y R. Soto. "Programa MSX-Basic para el análisis de espectros de radiación gamma", Rev. Cub. Física, en prensa.
- Savitzky, A. and M. Golay (1964). Anal. Chem., 36, 1627.
- Yule, H. (1967). Nucl. Instr., 54, 61.
- Robertson, A., W. Prestwich and T. Kennett (1972). Nucl. Instr., 100, 317-324.
- Von Meerwall, E. and M. Gawlik (1973). Comp. Phy. Comm. 5, 309-313.
- Wilson, W. (1978). "Tropical Conference on Computers in Activation Analysis and Gamma-Ray Spectroscopy", Puerto Rico.
- Helmer, R., R. Heath, M. Punam and D. Gibson (1967). Nucl. Instr. 56, 6.

PROGRAMA MSX-BASIC PARA EL ANALISIS DE ESPECTROS DE RADIACION GAMMA

E. Marín, M. Hernández y R. Soto, Dpto. de Física General, Facultad de Física, Universidad de La Habana

RESUMEN

Se describe un programa desarrollado en lenguaje MSX-Basic, denominado ESPEC-1, que realiza la evaluación de magnitudes espectrométricas características de la emisión radioisotópica gamma y su interacción con la sustancia. Por su fácil manipulación se hace muy apropiado para usos demostrativos y del laboratorio docente.

ABSTRACT

A MSX-Basic language program, called "ESPEC-1", which provides a very flexible data reduction facility during gamma spectrum analysis applications, is described. The program provides the performance needed for demonstrative uses, and ease of operation for the laboratory classroom.

INTRODUCCIÓN

A pesar de que los analizadores multicanales modernos /1/, han devenido instrumentos esenciales en el campo de la Física Nuclear aplicada, por su avanzada tecnología y flexibilidad, tanto en la adquisición como en el procesamiento preliminar de las distribuciones de alturas de pulsos y el alto grado de integración de funciones afines con los requerimientos de la espectrometría gamma, resulta cada vez más atractivo, desde el punto de vista instrumental y de costos, el montaje de espectrómetros multica-

nales basados en el esquema: "PC--CONVERTIDOR--ANALO-DIGITAL--DETECTOR", apoyado en complejos, pero versátiles programas de adquisición y procesamiento de espectros /2/, /3/, /4/.

En este trabajo se presenta un programa desarrollado en lenguaje MSX-Basic compatible /5/ destinado a dotar los laboratorios docentes, de las facilidades de análisis y procesamiento de espectros como paso previo a la aplicación de procedimientos analíticos de mayor complejidad cognoscitiva y especificidad.

DESARROLLO:

I. FACILIDADES GENERALES:

El programa mantiene facilidades ya descritas /6/, tales como entrada y salida de información (almacenamiento y/o lectura) en cassette, representación gráfica de espectros y comparación de dos sectores cualesquiera de la memoria.

II. OPERACIONES ESPECIALES:

El programa preve el registro permanente de cuatro espectros en la memoria de la PC, por ello, se incorporan totalmente protegidas contra cualquier error de manipulación de los datos las siguientes operaciones:

a) Calibración energética y en eficiencias de detección:

Se incorpora el ajuste por mínimos cuadrados con número seleccionable de puntos y criterio estadístico x-cuadrado normalizado para obtener los coeficientes de un polinomio de primer o segundo grado, según sea o no lineal la relación energía-canal.

Para el ajuste de eficiencias se utiliza el mismo método, pero tomando en cuenta que el polinomio es en general de tercer orden (pudiendo ser de orden superior) y adopta la forma:

$$E = \exp \left[A_0 + A_1 * \ln(e) + A_2 * (\ln(e))^2 + A_3 * (\ln(e))^3 + \dots \right] \dots (1)$$

donde:

E es la eficiencia de detección, e la energía de la radiación y A₀, A₁, A₂, A₃, etc., son los coeficientes de ajuste. /7/

b) Suavizamiento de espectros: Como el programa está orientado hacia las aplicaciones docentes, incluye facilidades de suavizamiento espectral /8/ con 3, 5 y cantidad variable de puntos hasta un valor máximo de 13. En este último caso, se incorporan criterios estadísticos /9/ que posibilitan trabajar con el 68 ó el 95 % de los puntos con que deben ser promediados los datos de cada canal. Las Figuras 1, 2 y 3 muestran el efecto del suavizamiento con 3, 5 y 13 puntos respectivamente sobre el espectro de ¹³⁷Cs adquirido en modo PHA y tiempo de medición igual a 1200 S, /6/.

Figura 1.

Espectro de ^{137}Cs suavizado con tres puntos. Modo de adquisición PHA y tiempo de medición corregido de 1200 S.

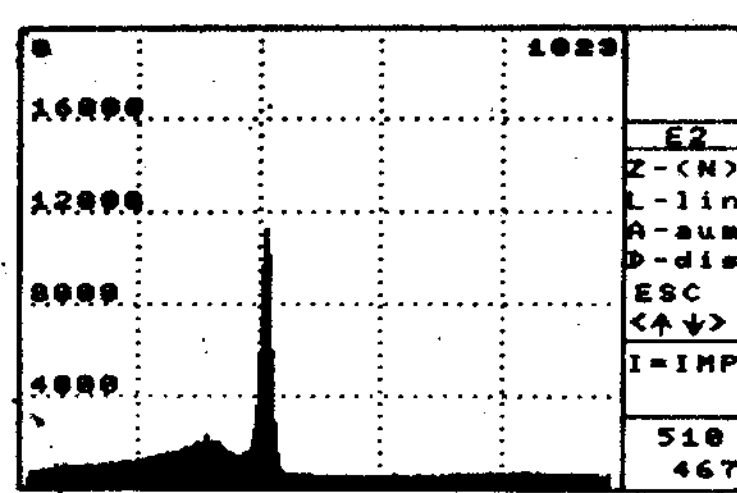


Figura 2.

Espectro de ^{137}Cs suavizado con cinco puntos obtenido bajo las mismas condiciones experimentales que el de la Figura 1.

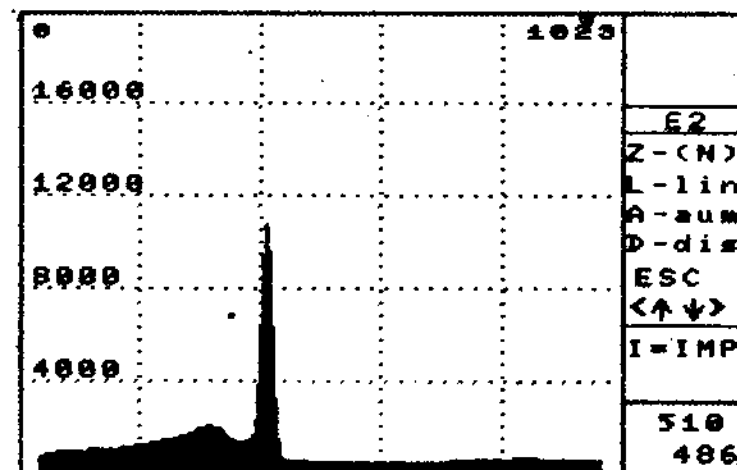
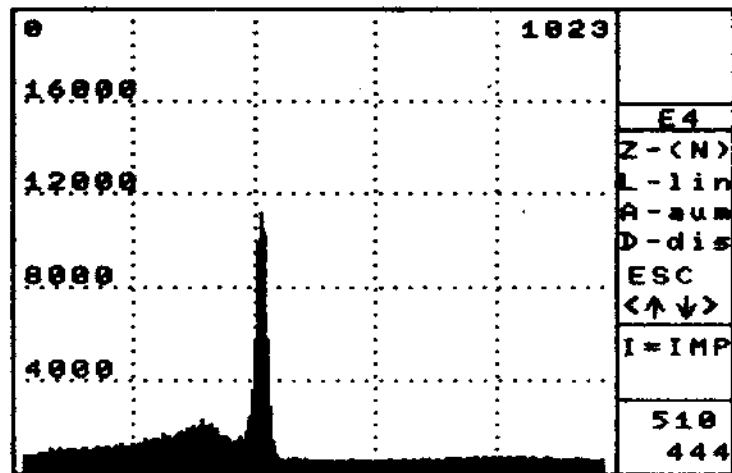


Figura 3.

Espectro de ^{137}Cs suavizado con cantidad variable de puntos hasta un máximo de trece.

El mejoramiento estadístico de los espectros utilizando el tratamiento matemático de los promedios móviles, implícito en el procedimiento de suavizamiento de estos, se puede apreciar en las Figuras 4, 5 y 6, las cuales muestran los respectivos fotopicos expandidos alrededor del máximo.

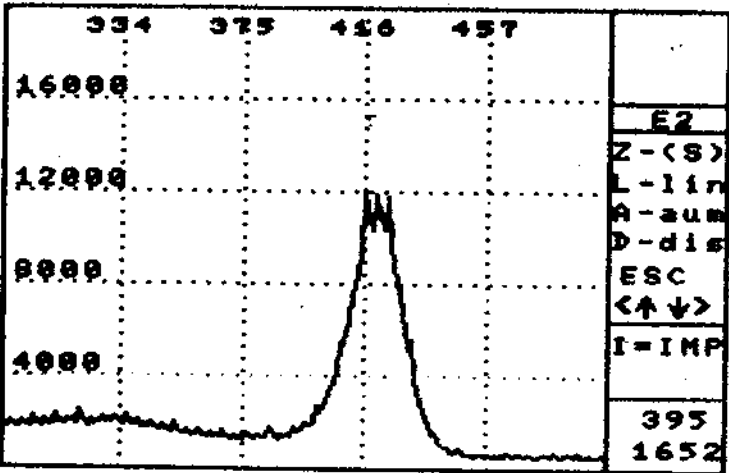


Figura 4.
Fotopico del ¹³⁷Cs expandido en el entorno del canal 420 donde se localiza a simple vista el máximo del espectro.

Figura 5.
Fotopico del ¹³⁷Cs suavizado con cinco puntos. Se aprecia que este suavizamiento prácticamente no mejora el perfil del espectro.

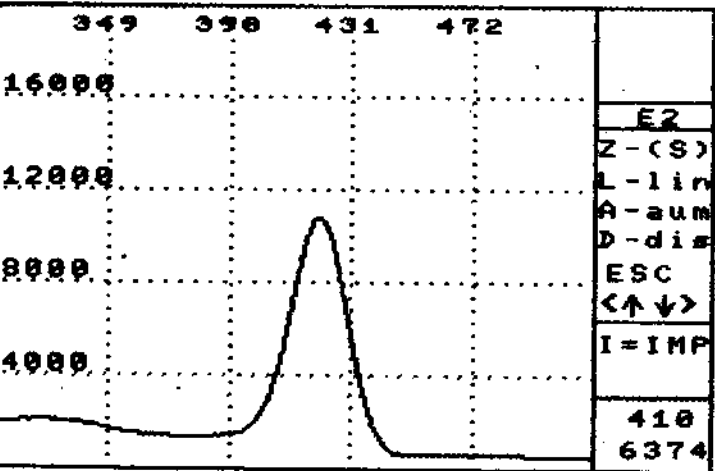
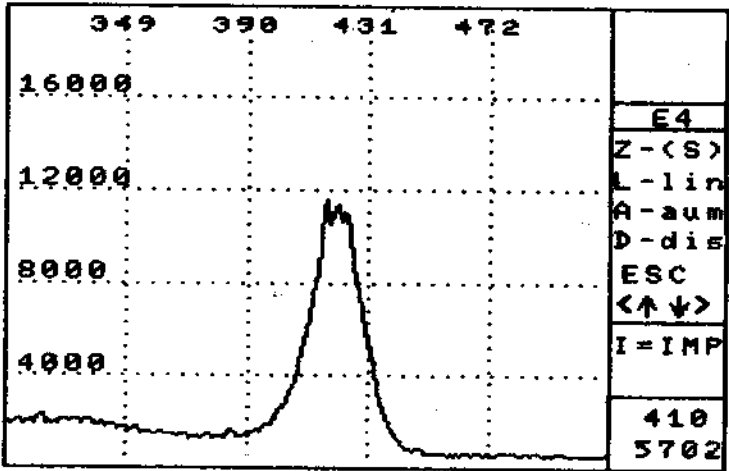


Figura 6.
La utilización de la subrutina de suavizamiento con cantidad variable de puntos beneficia notablemente el perfil del fotopico del ¹³⁷Cs representado en expansión de 50 canales alrededor del máximo.

c) Procesamiento del espectro:

Una vez seleccionada la banda del espectro, es decir, el pico a investigar (uno cada vez), el programa calcula la integral, el área neta por el método de los trapecios, su error, el fondo (habiendo ajustado la línea base mediante el método de mínimos cuadrados con cantidad seleccionable de puntos), el canal del centroide, su energía, el valor de la eficiencia que le corresponde, el intervalo de canales donde realiza los cálculos, el ancho del pico a su media altura, la resolución, y antes de pasar a una segunda tabla de resultados, solicita el intervalo de energías en torno del cual deberá localizar, de acuerdo con la calibración hecha y con los datos almacenados, el posible radioisótopo al que corresponde.

En una segunda tabla de resultados reporta la actividad en μCi , incluyendo su corrección por el tiempo de decaimiento de la fuente radiactiva, la actividad mínima detectable, la posición del borde Compton en (Kev), la velocidad de conteo en (cps), su error en por ciento, la dosis de radiación correspondiente expresada en (mR/h) y los coeficientes de ajuste para la energía /10/, /11/, /12/.

A continuación se reportan los resultados obtenidos al efectuar el procesamiento del fotopico del ^{137}Cs , entre los canales 394 y 445, con 5 puntos para el ajuste de fondo y 0.20 m de distancia fuente-detector:

- * Canal del Centroide: 414
- * Energía (Mev): 0.653
- * FWHM: 33.7
- * Resolución: 9.3 %
- * Eficiencia: 0.4463

y en forma comparativa, el resto de las magnitudes, para diferente cantidad de puntos tomados en el suavizamiento:

SUAVIZAMIENTO

MAGNITUDES REPORTADAS	3 PUNTOS	5 PUNTOS	13 PUNTOS
Integral	272746	272747	273610
Area neta	212693	213561	215572
Error (%)	0.630	0.625	0.614
Fondo	60052	59185	50038
Actividad (μCi)	126.27	126.78	126.99
Actividad corregida (μCi)	128.38	128.90	129.01
Actividad mínima detectable	0.436	0.433	0.422
Borde Compton (Kev)	469.45	469.56	455.70
Velocidad de conteo (c/S)	177.24	177.97	179.64
Error (%)	0.36	0.36	0.36
Dosis (mR/h)	0.0011	0.0011	0.0012

Coeficientes de ajuste energético:

$$A_0=0.1992478$$

$$A_1=0.0007731$$

$$A_2=0.0000008$$

$$A_3=0$$

III. CONCEPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA

La organización parte de un programa principal que contiene los menús correspondientes, además, posibilita limpiar los sectores de memoria a voluntad, pues debido a la reducida capacidad de memoria de la computadora, se hace necesario almacenar el espectro suavizado en uno de los segmentos, por consiguiente, antes de procesar un nuevo espectro debe acudir a la subrutina de borrado.

Por otra parte, como el programa está orientado hacia las aplicaciones docentes, hace continua previsión de los posibles errores de manipulación del estudiante evitando así la necesidad de abortar el trabajo.

CONCLUSIONES

Se desarrolló un programa MSX-Basic compatible para la operatoria básica previa al procesamiento analítico de los espectros de radiación gamma, el cual incluye, además de la identificación cualitativa del isótopo estudiado, el cálculo de las magnitudes más relevantes empleadas en la caracterización cuantitativa de los mismos.

El uso del software descrito posibilita que se incorpore al sistema de conocimientos y habilidades de los estudiantes los rudimentos de la espectrometría gamma, sin que por ello haya que realizar grandes inversiones ni que utilizar instrumentación mayormente destinada a las investigaciones.

Por su versatilidad y alta velocidad de corrida, se hace útil no sólo en el laboratorio docente, sino también en usos demostrativos que propician la motivación vocacional y profesional de los estudiantes.

REFERENCIAS

- Camberra, "Catálogo sobre Instrumentación Nuclear", 7ma Edición.
- Knoll, G. (1978): "Radiation Detection and Measurement", John Wiley & Sons, N.Y.
- De Soete, D., R. Gijbels and J. Hoste (1972); "Neutron Activation Analysis", Volume 34 on Chemical Analysis: A Series of Monographs on Analytical Chemistry and its Applications. John Wiley & Sons. N.Y.
- Quittner, P. (1972): "Gamma-Ray Spectroscopy", Akadémiai Kiadó, Budapest.
- Sato, T., P. Mapstone e I. Muriel (1989): "MSX Guía del programador y Manual de referencia". Editora Revolucionaria.
- Hernández, M., E. Marín y R. Soto. "Diseño y Caracterización de una Interface para la Adquisición de Espectros de Radiación Gamma" [inédito].
- Raics, P. (1982): "Radiation Detectors. IEAE Training Course on utilization of Neutron Generators, Debrecen.
- Savitzky, A. and M. Golay (1964): Anal. Chem. 36, 1627.
- Yule, H. (1967): Nucl. Instr., 54, 61.
- Siegbahn, L. (ed.) (1955): "Beta and Gamma Ray Spectroscopy", North-Holland, Amsterdam.
- England, B. (1974): "Techniques in Nuclear Structure Analysis", MacMillan, London.
- Gunnink, R. and J. Niday (1972): "Computerized Quantitative Analysis by Gamma-Ray Spectrometry", TID-4500, UC-4, Lawrence Livermore Laboratory.

CERAMICA DE ALTA RESISTIVIDAD ELECTRICA PARA ALTAS TEMPERATURAS

A. González Arias, A. del Cueto y L. Jara, Departamento de Física Aplicada, Facultad de Física, Universidad de La Habana

RESUMEN

Se muestran los resultados obtenidos al estudiar la influencia del CaO y BaO como aditivos y de las temperaturas de calcinación y sinterización en la resistividad eléctrica a alta temperatura de la cerámica de esteatita de composición 56 % SiO_2 , 40 % MgO y 4 % Al_2O_3 . Se obtuvo como resultado que las mejores propiedades se encuentran para una adición conjunta de 2 % BaO y 0.4 % CaO, calcinando a 650 °C y sinterizando a 1250 °C. Estos parámetros proporcionan una resistividad de $10^4 \Omega\text{m}$ a 800 °C.

ABSTRACT

Results are shown about the effect of CaO and BaO as additives and the calcination and sintering temperatures in the electric resistivity at high temperature of the esteatite ceramic, with molar composition 56 % SiO_2 , 40 % MgO and Al_2O_3 . The better properties are found for a joined addition of 2 % BaO y 0.4 % CaO, calcinating at 650 °C and sintering at 1250 °C. These parameters provide a resistivity of $10^4 \Omega\text{m}$ at 800 °C.

INTRODUCCIÓN

Entre los materiales cerámicos utilizados como aislantes eléctricos a altas temperaturas se encuentran los del sistema ternario Al_2O_3 - SiO_2 -MgO. Sus características eléctricas son casi comparables a las de las mejores

cerámicas utilizadas para este fin (alta alúmina), con la ventaja de que las temperaturas de cocción necesarias para formar la cerámica son mucho menores.

Una cifra de mérito utilizada para valorar la efectividad de cualquier cerámica como aislante eléctrico a altas temperaturas es el valor de la temperatura característica T_0 , en que la resistividad del material disminuye por debajo de $1 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$ ($10^4 \Omega\text{m}$). Para la alúmina al 90 % de pureza $T_0 = 700^\circ\text{C}$, mientras que para el 95 % de pureza, $T_0 = 850^\circ\text{C}$. Para la cerámica de esteatita de composición molar representativa 56 % SiO_2 , 40 % MgO y 4 % Al_2O_3 , con óxidos de bario y calcio como aditivos se reportan valores de T_0 de hasta 800°C .

A bajas temperaturas la porosidad de las muestras adquiere una influencia preponderante, a causa de la absorción del agua de la atmósfera en los poros y del consiguiente carácter electrolítico de la conducción eléctrica. En las muestras porosas la resistividad aumenta bruscamente en el rango de temperaturas cercanas a la ambiente y su valor depende de la humedad relativa presente en la atmósfera que rodea a la muestra.

Las composiciones de la cerámica de esteatita también se pueden lograr a partir de mezclas de talco y caolín en la proporción adecuada. Es común el uso de estos dos minerales como materia prima para obtener este tipo de cerámica.

La adición de Ba y Ca inhibe el proceso natural de envejecimiento en la cerámica de esteatita, proceso que trae aparejado la aparición de rajaduras y el deterioro de las propiedades con el transcurso del tiempo. La cerámica de esteatita con aditivos se utiliza comúnmente para construir protectores de termopares, revestimiento de muflas y otros /1,2,3,4/.

En el presente artículo se exponen algunos resultados obtenidos al estudiar la variación de la resistividad a alta T en función de la cantidad de aditivos y de las temperaturas de cocción en cerámicas del tipo esteatita.

PARTE EXPERIMENTAL

a) PREPARACION DE LAS MUESTRAS

Las muestras se prepararon mediante técnicas cerámicas convencionales, a partir de óxido de silicio, hidróxido de aluminio y carbonatos de calcio, bario y magnesio de grado p.p.a., marca REACHIM. Con el fin de garantizar la estequiometría, todos los reactivos se sometieron a análisis gravimétrico en una termobalanza Metler, estableciéndose la pérdida de CO_2 y agua en cada caso. Es de notar que se observaron diferencias notables entre los valores esperados (de acuerdo con lo reportado por el fabricante) y los obtenidos experimentalmente.

Los polvos, mezclados por vía húmeda en molino de bolas de ágata, se calcinaron a temperaturas T_c de 650 y 900 °C, se molieron por 2da vez y fueron conformados en tabletas de 20 mm de diámetro y 1.5 mm de espesor, con ayuda de un aglutinante. Las tabletas se sinterizaron en el rango de temperaturas máximas T_s de 1200-1300 °C, manteniendo la máxima temperatura 1 hora. Posteriormente, a cada tableta se le adicionaron electrodos con pintura de plata, sometiéndose las muestras a un tratamiento final a 600 °C para lograr la evaporación de los componentes volátiles y la correspondiente fijación de la plata a la superficie de la tableta.

Las composiciones estudiadas fueron, en composición molar, del 56 % SiO_2 , 40 % MgO y 4 % Al_2O_3 , con adiciones de 1,2 y 3 % molar de BaO y 0,2, 0,4 y 0.6 % de CaO .

b) MEDICIONES

Para medir la resistencia (R) de las muestras a alta temperatura se construyó un sistema compuesto de electrodos de níquel recubiertos con plata, adosados a un soporte de fibra de vidrio como muestra la Figura 1.

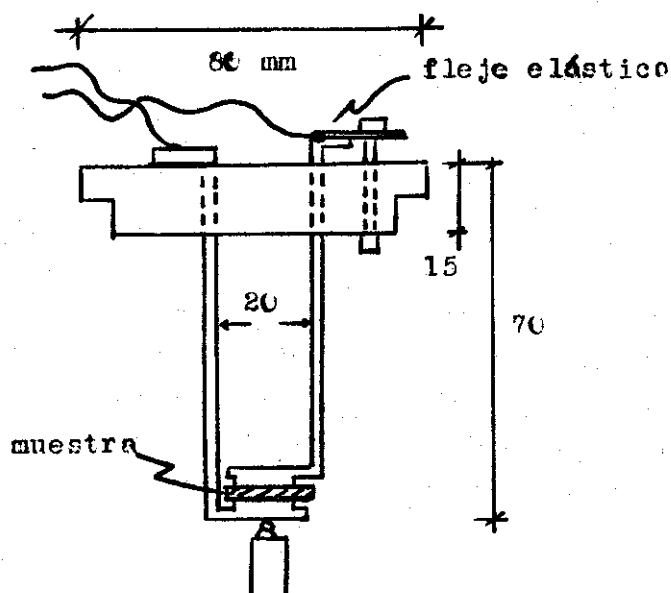


Figura 1

Este soporte va ubicado en un horno vertical que se controla mediante un programador mecánico de temperaturas /5/. Las curvas de resistencia vs. T se obtuvieron en forma automática utilizando un metro TESLA BM-509 a la frecuencia de 1 kHz, adaptado con salida a un registrador tipo xy. Los valores de resistividad (r) se obtuvieron de la expresión $r = RA/l$, siendo conocidos el área A y el espesor l de las tabletas. La temperatura se determinó utilizando un termopar de chromel-alumel en contacto con la muestra. Con este sistema fue posible obtener los gráficos de $\log(r)$ vs T

hasta la temperatura de 500 - 600 °C y extrapolar las curvas hasta temperaturas más altas, gracias a la dependencia lineal que ellas muestran. Como complemento a estas determinaciones se midió la densidad aparente de todas las tabletas y se obtuvo la porosidad de las muestras más significativas utilizando un porosímetro de mercurio marca Carlo Erba, de presión máxima 0.8 Ton/cm²/6/.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla I muestra la influencia del contenido de Ba en la densidad aparente (D) de las muestras para distintas temperaturas de calcinación (T_c) y sinterización (T_s). Todos los resultados representan el promedio de varias muestras.

TABLA I

T _c (°C)	D(g/cm ³) %CaO = 0			
	T _s = 1200 °C			
	% BaO			
	0	1	2	3
650	1.60	1.45	1.48	1.50
950	1.76	1.74	1.76	1.76
T _s = 1250 °C				
650	1.94	1.94	1.95	1.82
950	1.83	1.84	1.79	1.73

Las tabletas sinterizadas a 1300 °C con BaO por encima del 1 % se pegaron al substrato del horno, mostrando síntomas de fusión parcial. En la Figura 2 se observa la dependencia de la densidad aparente en función del CaO añadido, para muestras con 2 % de BaO.

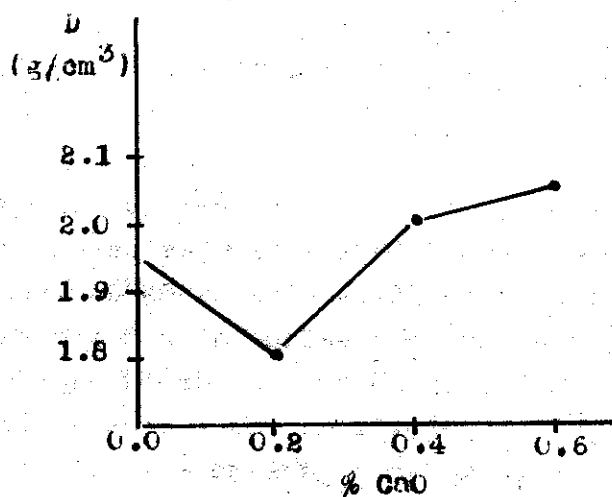


Figura 2

Las muestras calcinadas a 950 °C son muy porosas, prácticamente no contraen durante la sinterización y presentan alta conductividad eléctrica a baja temperatura. En las muestras calcinadas a 650 °C y sinterizadas a 1250 °C, además de un aumento de la densidad, se observa un mejor comportamiento en las curvas de $\log(r)$ vs T. En la Figura 3 se ve que la adición de 1-2 % de BaO mejora notablemente la resistividad de las muestras a alta temperatura, mientras que por encima del 2 % la resistividad se deteriora. El cambio de pendiente que se observa alrededor de los 375 °C no ha sido explicado satisfactoriamente.

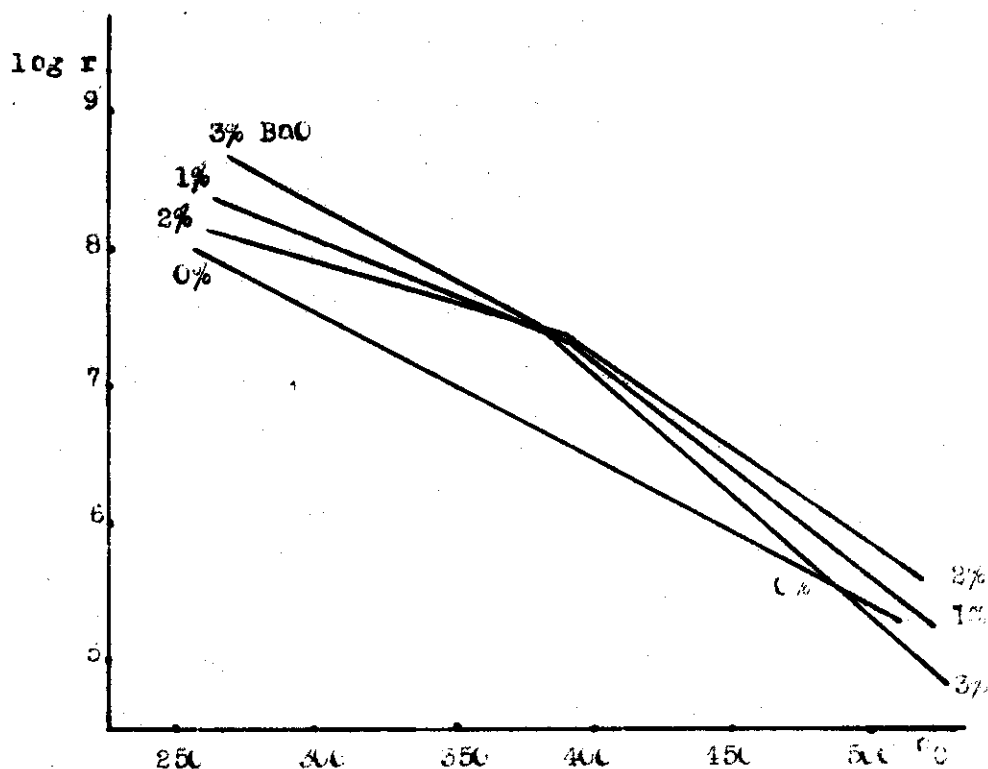


Figura 3

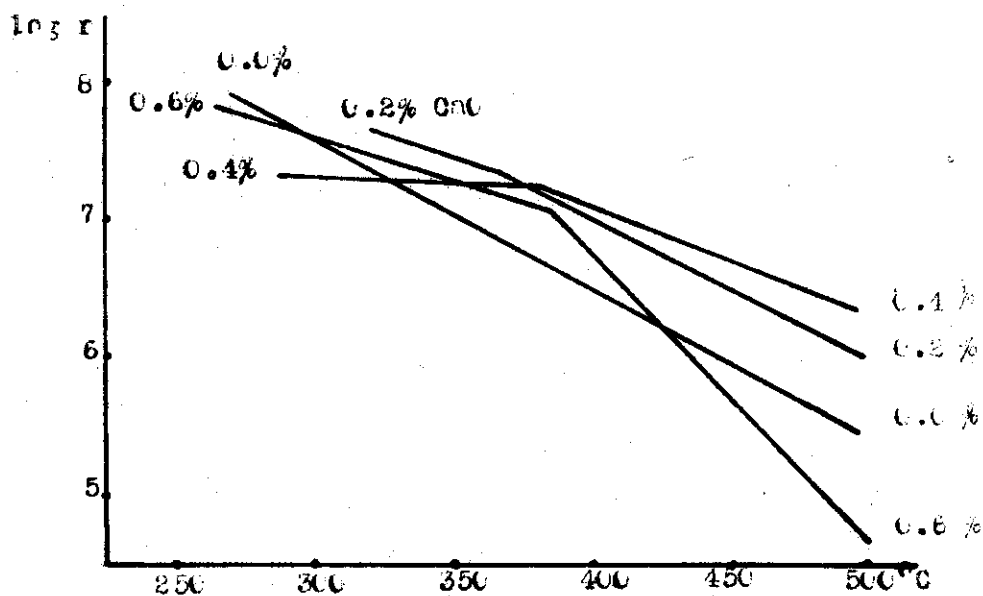


Figura 4

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos al añadir CaO a las muestras con 0.2 % de BaO, donde se observa un incremento de resistividad a alta temperatura para las muestras con 0.2 % de CaO y el deterioro de la misma a concentraciones mayores de 0.4 %.

Ajustando los valores experimentales por encima de 400 °C a una recta del tipo $\log(r) = aT + b$, y extrapolando hasta el valor $r = 10^4$ fue posible determinar los valores de T_0 para cada una de las muestras. Los resultados aparecen en la Tabla II para las muestras con $T_c = 650$ °C, $T_s = 1250$ °C y 2 % BaO.

TABLA 2

%CaO	T_0 (°C)
0.0	660
0.2	690
0.4	800
0.6	530

Es decir, la máxima T_0 se obtiene para la composición con 0.4 % de CaO y el valor de T_0 se deteriora rápidamente para mayor contenido de CaO. La densidad de las muestras - y por ende, su resistividad a baja temperatura - también aumenta con la adición de CaO; la contracción lineal de las tabletas con 0.4 % durante la sinterización fue del 16 %. El máximo valor de densidad obtenido correspondió a las muestras con 0.6 % de CaO (2.0 g/cm³) que, sin embargo, dan lugar al peor valor de T_0 . La porosimetría de mercurio proporcionó para la muestra con 0.4 % de CaO un volumen específico total de poros de 0.27 cm³/g, lo que sugiere la posibilidad de mejorar este valor con un control más fino de la temperatura T_s entre 1250 y 1300 °C.

Es de notar que, para las muestras preparadas sin adición de CaO, con $T_c = 950$ °C y $T_s = 1250$ °C, se obtienen resultados de T_0 del orden de 700 - 750 °C. No obstante, la alta porosidad de estas muestras da lugar a resistividades extremadamente bajas a temperatura ambiente. En estas tabletas, la contracción durante la sinterización fue prácticamente nula.

CONCLUSIONES

- Controlando el contenido de BaO y CaO añadido a la cerámica de esteatita en los rangos 1-2 % y 0.2-04 % respectivamente es posible lograr una cerámica comparable a la de alta alúmina en su comportamiento eléctrico a alta temperatura ($r=10^4$ Ωm a 800 °C).
- Las muestras con mejores características eléctricas y de densidad fueron las de composición molar 56 % SiO₂, 40 % MgO y 4 % Al₂O₃, con adición de 2 % de BaO y 0.4 % de CaO.

- Dada la sensibilidad de las propiedades eléctricas a la composición del material y a la variabilidad de las materias primas, es necesario tomar precauciones para garantizar la correcta estequiometría de las muestras.

- No es recomendable utilizar la densidad de las muestras como criterio de su efectividad como aislante eléctrico en la región de altas temperaturas.

REFERENCIAS

Bogoródzki, N.P., V.V. Pasinkov y B.M. Teréiev (1979). "Materiales Electrotécnicos", Ed. Mir, Moscú.

Waye, B. (1967). "Introduction to Technical Ceramics", Ed. Maclaren.

Laurent, R. (1960). "Materiales Electrotécnicos Modernos", Ed. Gili, Barcelona, España.

Levin, E.M., H.F. Mc Murdie and F.P. Hall (1956). "Phase Diagrams for Ceramists, Ed. by the American Ceram. Soc.

González Arias, A. and J.L. Díaz (1988). J. of Thermal An. 34, 1223.

Colaboración con el Centro Inv. Químicas, Ciudad de La Habana.

OBTENCION Y CARACTERIZACION MORFOLOGICO-ESTRUCTURAL DE CAPAS DE PbS POLICRISTALINAS

O. Calzadilla, O. de Melo, R. Font, J. Fuentes, L. Rodríguez, A. Serra y R. Zabala, Facultad de Física-IMRE, Universidad de La Habana

J. Blanco-Prieto, Facultad de Química, Universidad de La Habana

Resumen

Por medio de las técnicas de difracción de Rayos-X y microscopía electrónica de barrido (MEB) se hizo una evaluación de capas de PbS obtenidas por dos métodos diferentes: el spray y el químico o mojado. Estas técnicas permitieron relacionar los parámetros de crecimiento y las condiciones de tratamientos térmicos con la morfología y la estructura de las capas obtenidas y por ende, optimizar el método de obtención con la eliminación de fases indeseables en las capas y un tamaño de grano óptimo para la obtención de una fotoconductividad acorde con los requerimientos para su uso práctico.

ABSTRACT

Lead sulfide thin films have been grown for to methods: spray and chemical deposition. X-ray diffraction and scanning electron microscopy (SEM) techniques have been used to investigate structural and morphological properties in order to control some fundamental growth parameter: crystallite size, annealing condition and phases composition. These films have good characteristic and can be use in the photodetectors manufacture.

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales sensibles a la radiación infrarroja continúan presentando un costo relativamente elevado a pesar de estar en el mercado desde hace un buen número de años. Ellos presentan una amplia gama de utilización que incluye el diagnóstico en medicina, el control de la contaminación ambiental y gran número de aplicaciones en la esfera militar lo cual les confiere un carácter estratégico. Esto dificulta su fácil adquisición en el mercado por una parte y el acceso a la bibliografía detallada referente a la tecnología de obtención por otra, a pesar de las grandes inversiones que se hacen cada año a nivel internacional en la obtención y estudio de los mismos. Uno de estos materiales es el PbS. Las capas delgadas policristalinas de PbS han sido utilizadas con éxito como fotodetectores desde mediados de la década de los años 50.

A partir de datos muy generales y dispersos en varios trabajos los autores determinaron las condiciones óptimas de obtención de capas de PbS fotorresistivas. En el trabajo además se discuten algunas hipótesis sobre la relación entre las características morfológico-estructurales y las propiedades fotoconductoras de las capas.

En la literatura aparecen reportados dos métodos de obtención de películas de PbS [1-4]: evaporación térmica al vacío y deposición química. El primer método presenta la dificultad de la poca adherencia de las capas al sustrato y por esto es que el segundo ha encontrado un uso más amplio. A pesar de su sencillez el desarrollo del segundo método enfrenta la dificultad de encontrar el tipo y la cantidad justa de impurezas necesarias para activar la película confiriendo una buena fotoconductividad, además de reportarse genéricamente en la literatura como oxidantes [5].

Por otra parte en [6] se plantea la viabilidad de obtener capas policristalinas de PbS utilizando el método de spray (pulverizado químico) como una posibilidad pero sin ofrecer resultados experimentales concretos.

Con estas premisas se escogieron en este trabajo los métodos de spray y deposición química con el objetivo de obtener las capas fotorresistoras.

2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

a) OBTENCIÓN DE LAS CAPAS

Método de spray. Este método ha sido muy utilizado [6] para obtener capas de CdS, a partir de la pulverización de una solución sobre un sustrato caliente. En este trabajo se generalizó el método para obtener las capas de PbS por primera vez.

Una solución 0,1 M de $Pb(NO_3)_2$ y tiourea se pulverizó con una corriente de N_2 sobre los sustratos calientes a diferentes temperaturas.

Deposición Química. Sustratos de vidrio con gérmenes de PbS previamente sembrados [7], fueron sumergidos en una solución de tiourea, $Pb(NO_3)_2$ y

NaOH cuyas concentraciones se variaron partiendo de valores iniciales similares a aquellos reportados en [7,8] para obtener las condiciones óptimas y en intervalos de tiempo entre algunos minutos y varias horas.

Un conjunto de diez grupos de crecimientos se diseñaron para lograr una capa óptima. El primer subgrupo (del uno al tres) en los cuales se siguió la técnica descrita en [7], se obtuvieron capas con una respuesta fotoconductiva baja. En el segundo subgrupo (del cuatro al siete) se ajustaron parámetros correspondientes a la concentración de H_2S en la solución de sembrado y de $Cu(NO_3)_2$ en la solución alcalina, sin una mejora sensible en la respuesta fotoconductiva pero sin dañar la calidad morfológica alcanzada.

A partir del crecimiento ocho se ajustaron las concentraciones de iones hidroxilo al esquema dado en [8], obteniéndose capas con menor tamaño de grano, como se observa en la Figura 4 b) y una buena respuesta fotoconductiva.

Tal y como aparece reportado en la literatura [2], las capas necesitan un tratamiento térmico posterior a su obtención con vistas a activar la fotoconductividad. Estos tratamientos han sido de tipos muy diferentes incluyendo aquellos al aire, en atmósfera de O_2 e incluso en vacío, en todos los casos a temperaturas relativamente bajas y períodos de tiempo cortos. En este trabajo se ha logrado activar la fotoconductividad utilizando para ello tratamientos térmicos en vacío mecánico en una estufa de secado a $90\text{ }^{\circ}C$ durante 1 h.

b) CARACTERIZACIÓN

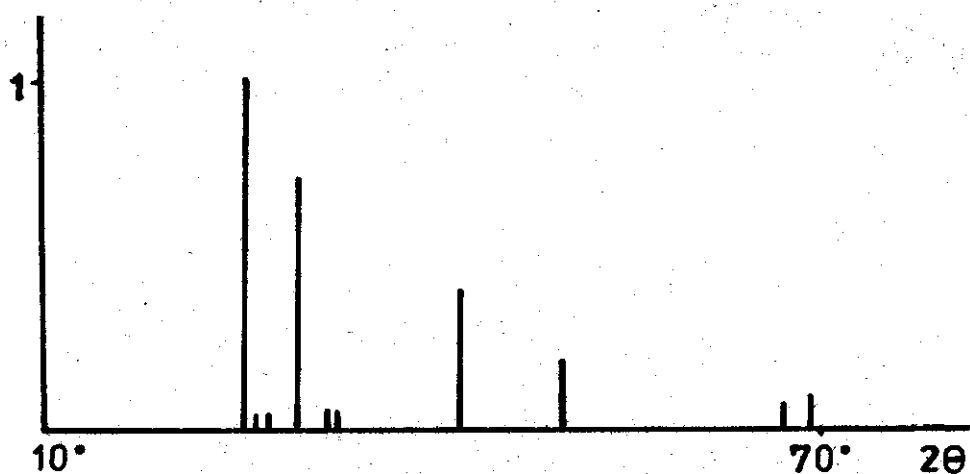
Las capas obtenidas fueron caracterizadas desde el punto de vista morfológico utilizando un microscopio electrónico de barrido (MEB), mientras la estructura cristalina fue determinada y estudiada por medio de la difracción de Rayos X.

Se realizaron mediciones preliminares de fotoconductividad utilizando una lámpara de filamento y midiendo la variación de corriente a voltaje constante con y sin iluminación. Aunque no se realizaron mediciones absolutas de detectividad o responsividad, los valores de las variaciones obtenidas en la resistencia de las muestras fotorresistoras fueron comparadas en todos los casos, con los de un detector comercial de buena calidad medido en las mismas condiciones, presentando características similares.

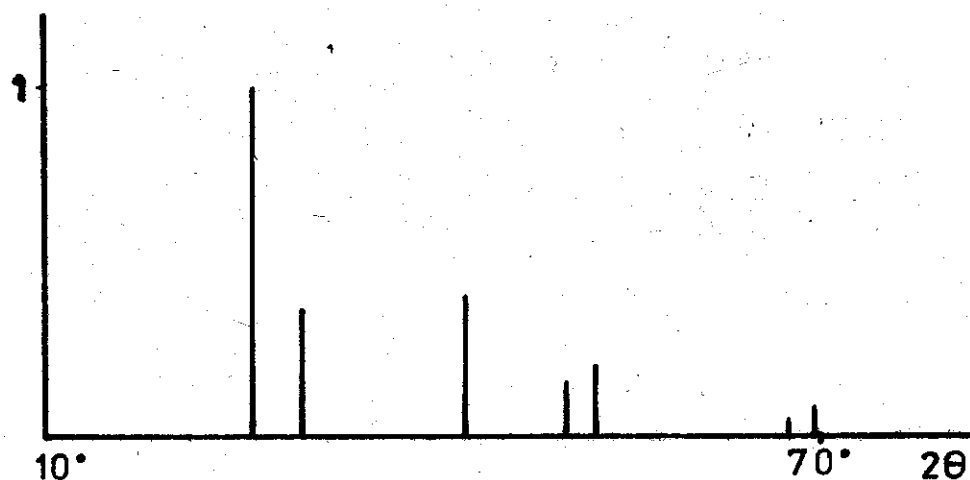
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 1 se observan diagramas esquemáticos de los difractogramas de dos muestras obtenidas por spray a diferentes temperaturas del sustrato, así como del patrón ASTM del PbS puro. Como puede observarse, existen líneas que denotan la presencia de fases espúreas cuya intensidad

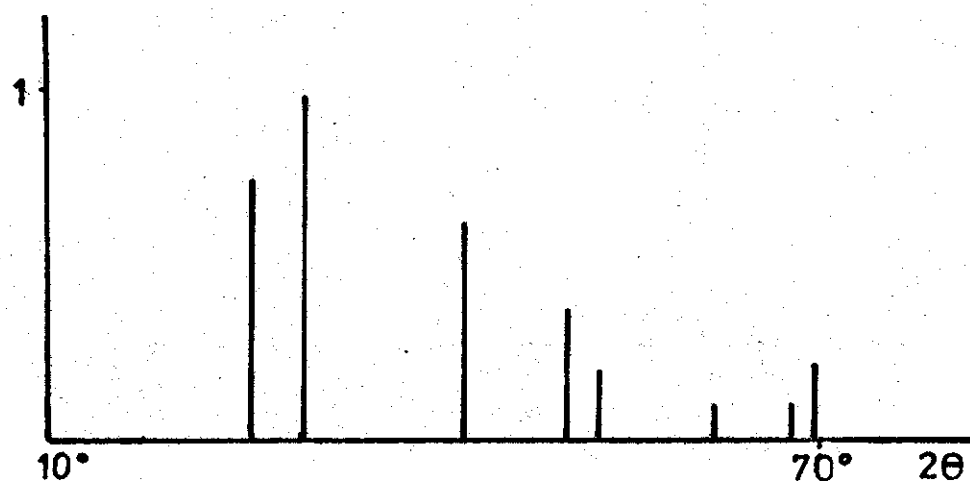
disminuye con el aumento de la temperatura del sustrato. Un ulterior aumento de la temperatura con el objetivo de eliminar estas fases inhibió el crecimiento de PbS obteniéndose en su lugar, un precipitado blanco.



a)



b)



c)

Figura 1. Difractogramas de dos muestras obtenidas por el método de spray. a) $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$; b) $T=170\text{ }^{\circ}\text{C}$ y c) el correspondiente espectro ASTM del PbS.

En la Figura 2 se observa una micrografía de una muestra crecida por spray a una temperatura de 200 °C. En esta foto se pone de manifiesto la inhomogeneidad en el tamaño de los granos los cuales son superiores a 1 μm . Estas muestras crecidas por spray presentaron una alta resistencia y poco cambio en los valores de esta al ser iluminada, incluso después del tratamiento térmico. Como ha sido reportado en la literatura [1] tanto la existencia de fases espúreas como la imposibilidad de obtener capas de granos inferiores a 1 μm pueden ser responsables de la falta de sensibilidad en estas capas.

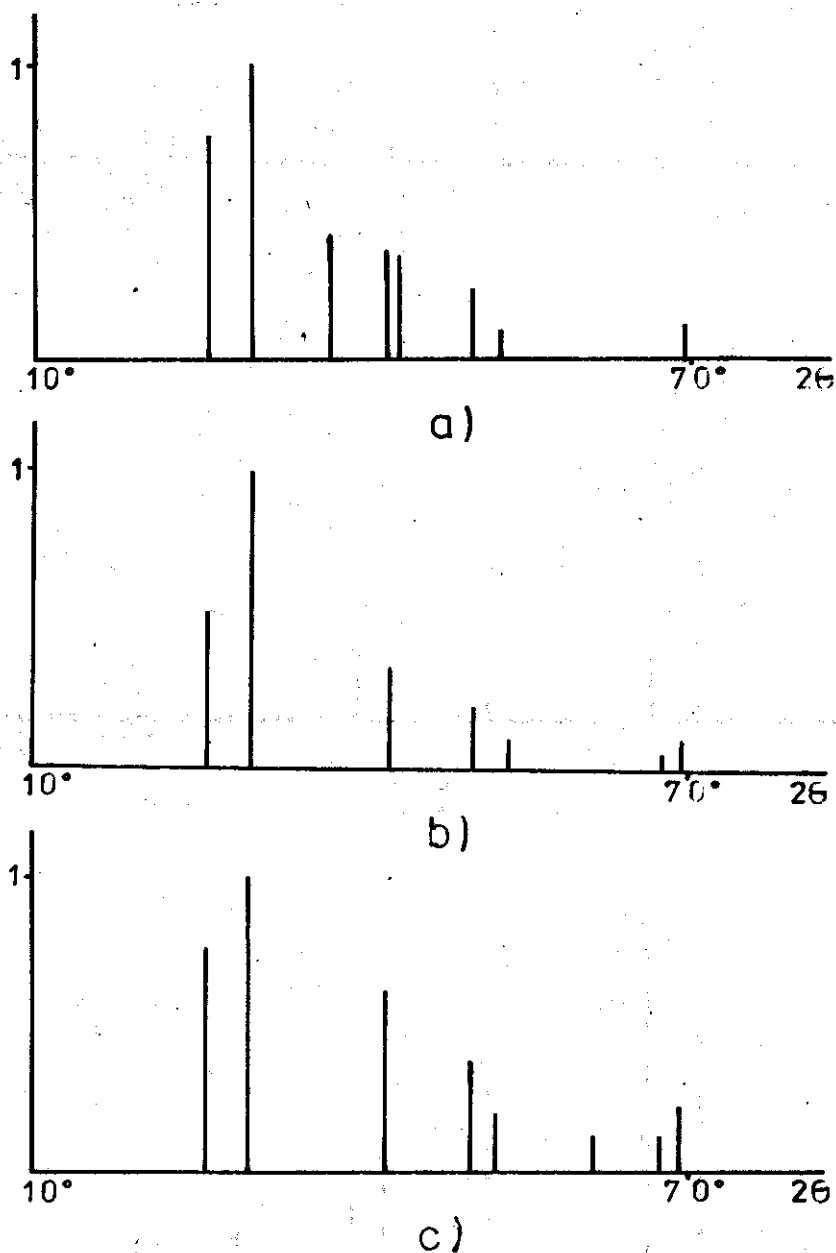
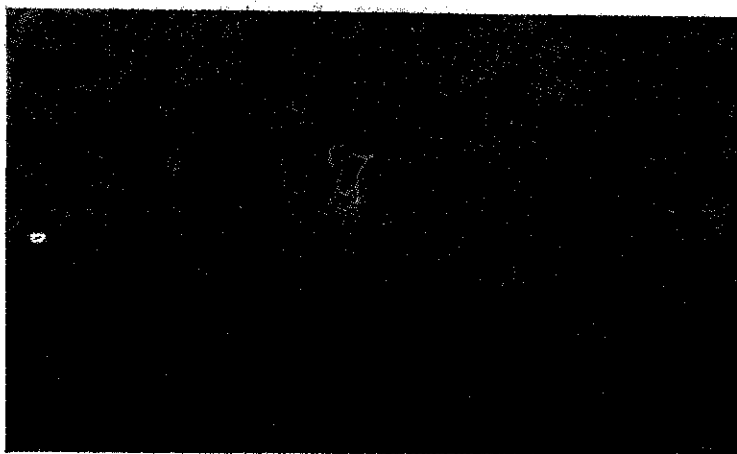


Figura 2. Micrografía de una muestra de PbS obtenida por el método de spray.

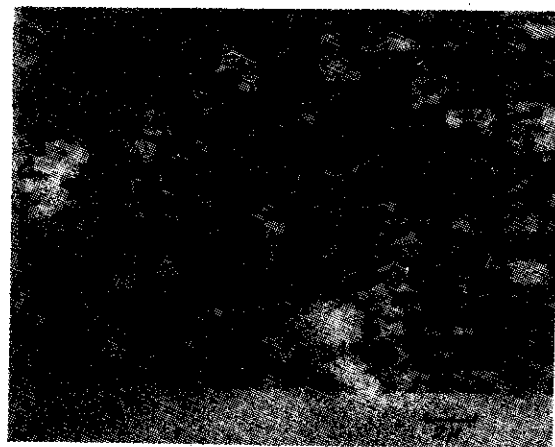
En la Figura 3 se observan diagramas esquemáticos de los difractogramas obtenidos de dos muestras depositadas químicamente, de ellos es evidente la disminución drástica en un caso y la eliminación dentro de los límites de resolución de la técnica de los Rayos X de las líneas correspondientes a las fases espúreas observadas en el método de spray. Estas muestras presentaron granos del orden de $1\text{ }\mu\text{m}$ como se puede observar en la Figura 4 a) y b). La muestra, cuya micrografía se presenta en 4b) y que no posee la fase espúrea, tuvo una respuesta fotoconductiva alta después del tratamiento térmico, similar a la del detector comercial.



Figura 3. Difractogramas de dos muestras obtenidas por el método químico; a) crecimiento 7; b) crecimiento 8 y c) espectro ASTM del Pbs.



(a)



(b)

Figura 4. Micrografía de las muestras obtenidas por el método químico; a) crecimiento 3; b) crecimiento 9.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha optimizado la metodología para la obtención de capas de PbS policristalinas con propiedades fotoconductoras similares a detectores comerciales de alta calidad. En el transcurso del mismo se determinó que el método de spray permitió la obtención de capas del material deseado pero no con valores razonables de fotoconductividad. Los análisis de morfología y estructura realizados evidenciaron que esto era debido a la existencia de fases distintas al PbS en concentración apreciable y a la obtención con este método de granos con dimensiones superiores a aquellas permisibles para producir la fotoconductividad en el material. Esto puede estar en correspondencia con la alta temperatura necesaria para el crecimiento que daría lugar a una excesiva oxidación o contaminación y por otra parte al tamaño de la gota obtenida del pulverizador.

Sin embargo, por medio del método químico, se logró obtener capas con propiedades similares a la de detectores comerciales, no detectándose en las mismas las fases observadas anteriormente y obteniéndose granos de dimensiones adecuadas

REFERENCIAS

- Moss, T.S. (1955): Proceedings of the IRE, 43, 1869.
- Mahlman, G.W. (1956): Phys. Rev. 103, 1619.
- Sameh Said, M. y J.N. Zemel (1976): J. Appl. Phys. 47, 866.
- Neustroev, L.N. y V.V. Osipov (1986): Phys. Tech. Semic. 20, 59.
- Blount, G.H., P.J. Schreiber, D.K. Smith y R.T. Yamada (1973): J. Appl. Phys. 44, 978.
- Chamberlin, R.R. y J.S. Skarman (1966): J. Electroch. Soc. 113, 86.
- Bianchetti, M., et al. (1984): Rev. Teleg. Elect., marzo, 194.
- Kicinski, F. (1948): Chemistry and Industry 17, 54.

COMUNICACION CORTA MOVIMIENTO DE LOS EXTREMOS ENERGETICOS EN ALEACIONES MONOCRISTALINAS DE $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.12$)

G.A. Ivanov, Instituto Estatal Pedagógico "A.I. Hertsen, Leningrado

J.A. Capó Sánchez, Instituto Superior Pedagógico "Frank País García"

RESUMEN

Se calcula la posición de los principales extremos en aleaciones de $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.12$) relativos a la escala energética tomando como nivel de referencia nulo la energía potencial del electrón libre.

ABSTRACT

It is estimated the position of the main edges in $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.12$) alloys relative to the energetic scale, taping as a null reference level the potential energy of the free electron.

Los resultados obtenidos en (1) demostraron que el nivel de Fermi en el Bismuto se encuentra a diferente profundidad con respecto al Antimonio. Determinándose que para el Bismuto, el trabajo de salida $A = 4.31$ eV, mientras que para el Antimonio $A = 4,58$ eV.

En (2) se determinó el desplazamiento del nivel de Fermi en aleaciones puras de Bismuto-Antimonio, demostrándose que este desplazamiento en aleaciones de hasta 12 % atómico de Antimonio no se puede obtener por interpolación de la posición del nivel de Fermi en el Bismuto y Antimonio en estados puros.

La posición del nivel de Fermi, relativa a los extremos de las bandas de energías en las aleaciones de Bismuto-Antimonio, se puede determinar resolviendo la ecuación de neutralidad. Se obtiene una relación entre las integrales de Fermi y las densidades de masa efectivas:

$$n = p$$

donde

$$n = \frac{(2m_e KT)^{3/2}}{h} {}_0L_0^{3/2}(E^*-x;\beta)$$

$$p = \frac{(2m_h KT)^{3/2}}{3\pi^2 h^3} F_{3/2}(x)$$

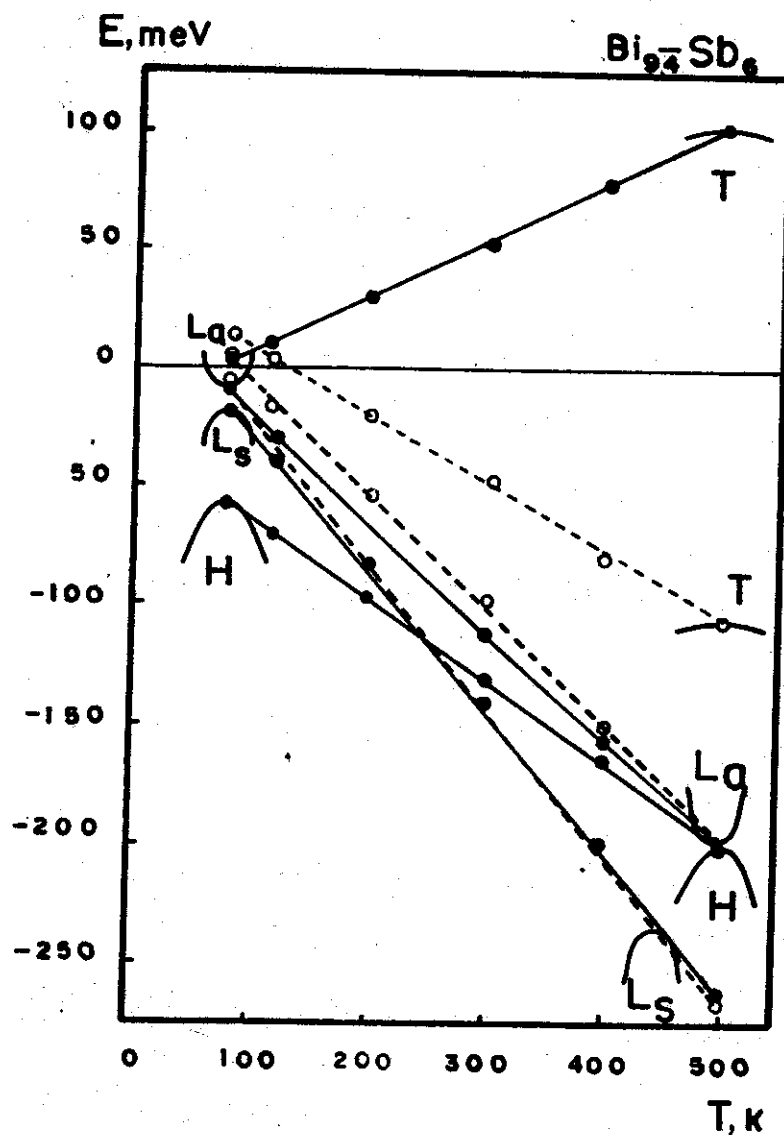
donde: ${}_0L_0^{3/2}$ y $F_{3/2}$ son las integrales bi y monoparamétricas de Fermi (3), x es la posición del nivel de Fermi en unidades reducidas con respecto a la zona L; y E^* el valor de la energía reducida del solapamiento entre los extremos L y T.

Resolviendo la ecuación de neutralidad se obtiene el valor de x en un amplio intervalo de temperaturas y de concentraciones de Antimonio.

Como ejemplo se muestran las posiciones del nivel de Fermi y de los principales extremos de las bandas en la aleación monocristalina de $\text{Bi}_{94}\text{Sb}_6$.

En la Figura 1 se observa que el extremo de la zona T cambia débilmente su posición relativa al nivel de Fermi, mientras que el extremo L lo hace significativamente en dirección contraria.

Conociendo las masas efectivas $m_e = 0,7621 \cdot 10^{-2} m_0$, $m_h = 0,127 m_0$ (4) y calculando la posición del nivel de Fermi en cada zona a una temperatura dada, se determina la concentración de electrones y huecos en esta aleación. Para las aleaciones de 4 % y 6 % atómico de Antimonio hasta la temperatura de 500 K se determinó una concentración de portadores de carga muy similar a la obtenida experimentalmente en el trabajo (5), lo cual demuestra la veracidad del método utilizado al calcular el desplazamiento de los principales extremos energéticos en función de la temperatura obtenido en (6).



REFERENCIAS

1. Arjipov, A.
Autoreferat dic...kand. fis.-mat. Nauk. Leningrado, 16 pág. 1976.
2. Ykovleva, T.
Obchaia i eksperimentavnaia fizika. Leningrado, 65 pág. 1971.
3. Askerov, B.M.
Elektronnie iavlenia perenosa v poluprovodnikax, Nauka, 318 pág., 1985.
4. Ponomariov, Y.G.
Autoreferat dic...dr. fiz.-mat. Nauk. Moscú, 55 pág., 1984.
5. Ivanov, G.A.; Y. Levitskii; S. Lankin
Polumetalli i poluprovodniki. Leningrado, 85 pág., 1975.
6. Capó Sánchez, J.
Dvizhenie ekstremumov zon b splavax $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 \leq x \leq 0.12$) b chirokom temperaturnom intervale. Leningrado, 158 pág., 1985.

NOTA PARA CONOCIMIENTO DE LOS LECTORES

En fecha 20/12/83 la Revista Cubana de Física recibió un trabajo monográfico sobre "Implantación Iónica" del C. Dr. Alejandro Fonseca. Por su extensión nos hemos visto imposibilitados de publicarlo en su totalidad, por lo que sólo se publicó las generalidades del trabajo.

El resto se encuentra ubicado en la Biblioteca de la Facultad de Física de la Universidad de La Habana.

El trabajo contiene:

- 1. "La implantación de iones I. Generalidades". Publicado en el número 3 del 84.*
- 2. La implantación de iones II. Pérdidas energéticas en la interacción ión-sólido".*
- 3. "La implantación de iones III. Distribución de impurezas y Formación de Defectos".*
- 4. "La implantación de iones IV. Efecto canal. Erosión superficial".*
- 5. "La implantación de iones V. Redistribución de átomos y defectos".*
- 6. "La implantación de iones VI. Solubilidad en estado sólido".*
- 7. "La implantación de iones VII. Dielectricos".*
- 8. "La implantación de iones VIII. Semiconductores".*
- 9. "La implantación de iones IX. Metales".*
- 10. "La implantación de iones X. Metales de transición".*
- 11. "La implantación de iones XI. Análisis superficial por Rayos X".*
- 12. "La implantación de iones XII. El acelerador de iones".*