

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE
SAN LUIS POTOSI

FACULTAD DE CIENCIAS

CARACTERIZACION DE NIVELES
PROFUNDOS EN ESTRUCTURAS SCHOTTKY

TRABAJO
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
(FISICA)

PRESENTA
SOFIA ELIZABETH ACOSTA ORTIZ

A MIS PADRES
Enrique y Sofía.

AGRADEZCO

A DIOS

Por todo.

Al Dr. Felipe de J. Rábago Bernal, por su asesoría en el presente trabajo, por estar siempre dispuesto a aclarar mis dudas y - sobre todo, por su paciencia y su amistad.

Al Dr. Jesús Urías Hermosillo, por dirigirme en los primeros pasos y orientarme con ideas y consejos a lo largo de todo el trabajo.

Al Dr. Alfonso Lastras Martínez, por facilitar las partes del crióstató, por interesarse continuamente en el desarrollo de mi trabajo y por motivarme a seguir adelante.

A mis Maestros, por sus enseñanzas y su sencillez.

A la Comisión de Apoyo a la Docencia, COSNET S.E.P. y al - - CONACYT por brindarme el apoyo económico.

A la Srta. Ma. de Jesús Segura Jahuey por ser tan accesible al mecanografiar este trabajo.

AGRADEZCO

A MIS PADRES

Por su amor, sus consejos y su confianza.

A MIS HERMANOS

Por su cariño y apoyo constantes.

A JOSE ALBERTO

Por su alegría y comprensión.

A MIS AMIGOS

Por hacerme la vida más agradable.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue el de implementar un sistema para la medición de energías de ionización y secciones eficaces de captura de niveles profundos de semiconductores, por la técnica de medición de Transitorios de Capacitancia como función de la Temperatura (DLTS, por sus siglas en inglés).

El sistema que nosotros implementamos tiene ventajas sobre los sistemas de DLTS más comunmente empleados, siendo su principal característica la de poder reconstruir el transitorio de capacitancia y de este modo obtener la información deseada, con una sola medición a diferentes temperaturas. Es decir, que con un solo barrido en temperatura, se hacen las mediciones de capacitancia y se almacenan en el cassette de la computadora todos los datos para posteriormente trabajar solamente con los datos almacenados, cambiando posiciones de la "ventana de rapidez" a lo largo de todo el transitorio sin necesidad de volver a realizar mediciones experimentales. Esto representa un gran ahorro en tiempo y una forma muy cómoda de recorrer la "ventana de rapidez" a lo largo del transitorio de capacitancia, que es la base del método de DLTS.

Se caracterizaron dos muestras: una de Silicio policristalino tipo-p, que ya había sido caracterizada con un sistema DLTS manual, demostrándose que se obtienen buenos resultados con nuestro sistema, al encontrarse prácticamente los mismos valores para los parámetros.

Se encontraron tres niveles con energías de ionización de 360, 37 y 93 meV, con sus respectivas concentraciones de - - - 1.013×10^{16} , 1.75×10^{15} y $2.78 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

La segunda muestra, de ZnSe tipo-n, no había sido caracterizada y se encontraron en ella dos niveles con energías de ionización de 56 y 35 meV.

I N D I C E

	Pág.
LISTA DE SIMBOLOS	1
INTRODUCCION	2
CAPITULO I METODOS DE CARACTERIZACION DE NIVELES PROFUNDOS.	3
1.1 Introducción	3
1.2 Métodos de una sola inyección	3
1.3 Métodos de estado estacionario	5
1.4 Métodos de transitorio	6
1.5 Conclusiones.	21
CAPITULO II TRABAJO EXPERIMENTAL	23
2.1 Montaje experimental	24
2.2 Modo de operación	24
2.3 Resultados experimentales	27
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS .	50
ANEXO 1 PROGRAMA DE COMPUTACION.	

Lista de Símbolos

ΔE	Energía de ionización
N_T	Concentración de portadores de la trampa
e_p	Rapidez de emisión térmica de huecos
e_n	Rapidez de emisión térmica de electrones
N_∞	Población de estado estacionario de trampas cargadas
σ_1	Sección transversal de captura de portadores minoritarios.
$\langle v_1 \rangle$	Velocidad térmica media de portadores minoritarios
N_{D1}	Densidad efectiva de estados en la banda de portadores minoritarios
g_1	Degenerancia del nivel de la trampa
ΔE_1	Separación en energía entre el nivel de la trampa y la banda de portadores minoritarios
e_1	Rapidez de emisión térmica de portadores minoritarios
e_2	Rapidez de emisión térmica de portadores mayoritarios
k	Constante de Boltzmann
T	Temperatura absoluta
C	Capacitancia
τ	Constante de tiempo de relajación
t	tiempo
$S(T)$	Señal de DLTS normalizada
$\Delta C(0)$	Cambio de capacitancia debido al pulso a $t = 0$
N_A	Concentración de niveles aceptores
N_D	Concentración de niveles donadores
C_∞	Capacitancia bajo polarización inversa.

INTRODUCCION

El presente trabajo surge de la necesidad de desarrollar métodos de caracterización eléctrica de materiales semiconductores.

Si observamos laboratorios similares en otros lugares, podemos ver que encontramos en muchos sitios la existencia de sistemas para medir niveles profundos, esto lo podemos constatar por las publicaciones que sobre el tema aparecen.

Por otro lado, por razones de ahorro de tiempo y esfuerzo encontramos cada vez más sistemas automatizados de medición, de ahí que hemos introducido la computadora en nuestro sistema.

Con el fin de ubicar el método de Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos, en el conjunto de métodos experimentales que existen para caracterizar niveles profundos en materiales semiconductores, en el primer capítulo se hace una breve referencia a los distintos métodos existentes y se trata la teoría de DLTS, así como sus ventajas respecto a las técnicas anteriores.

En el segundo capítulo se presenta el trabajo experimental desarrollado y los resultados obtenidos para dos muestras diferentes.

Al final se incluyen los programas de computación.

C A P I T U L O I

METODOS DE CARACTERIZACION DE NIVELES PROFUNDOS.

1.1 INTRODUCCION.

Existen diferentes métodos para caracterizar niveles profundos en materiales semiconductores.

Estos métodos experimentales se pueden dividir en tres grupos: Métodos de una sola inyección, Métodos de estado estacionario y Métodos de Transitorio. Se hablará brevemente de cada uno de ellos y se dará un ejemplo de alguna técnica particular dentro de cada grupo, haciendo énfasis en la técnica de Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos, que es el centro del presente trabajo.

1.2 METODOS DE UNA SOLA INYECCION.

Cuando un sistema en equilibrio, o en estado estacionario, se perturba y luego se deja que regrese a su estado original, se puede obtener información de las propiedades físicas del sistema, analizando su relajación. Una medición de este tipo recibe el nombre de medición de una sola inyección.

Dentro de este grupo se encuentra el método de Capacitancia Térmicamente Estimulada (TSCAP por sus siglas en inglés)⁽¹⁾. En términos generales, la técnica consiste en polarizar inversamente la unión con un voltaje de polarización fijo y entonces enfriar la muestra, posteriormente se reduce la polarización por un breve periodo de tiempo y luego se regresa la polariza-

ción a su valor original. Como resultado de los cambios de polarización, cambia la ocupación de las trampas y al mismo tiempo, cambia el valor de la capacitancia de la unión. Si ahora se aumenta lentamente la temperatura y al mismo tiempo se examina el cambio en la capacitancia, se obtendrá una gráfica de capacitancia contra temperatura que consiste esencialmente de una línea horizontal con un salto. La posición del salto, da información de ΔE , mientras que la magnitud del salto permite la determinación de N_T . El método es simple, sensible y puede dar alguna información del perfil de las trampas si se repite para un rango de voltajes de polarización.

También se encuentra dentro de este grupo el método de Fotocapacitancia⁽²⁾. Así como el TSCAP, el método de Fotocapacitancia es un método de mediciones paramétricas, es decir, se tiene información del llenado y vaciado de las trampas, gracias al efecto que este llenado o vaciado tiene sobre un parámetro del sistema, en este caso, de la capacitancia.

El método puede ser extremadamente útil para proporcionar información directa de secciones transversales ópticas en dispositivos optoelectrónicos.

El método de Corriente Estimulada Térmicamente (TSC)⁽³⁾, permite observar la liberación de la carga atrapada "directamente". Este método es virtualmente idéntico a TSCAP, excepto en que el dispositivo se conecta a un voltmetro en lugar de a un puente de capacitancias. Al alcanzar la temperatura a la cual

la carga atrapada es liberada a una rapidez significativa, se obtiene un aumento temporal en la corriente. El tiempo total de esta corriente adicional es igual a la cantidad total de carga atrapada.

El método de Fotocorriente C.D.⁽⁴⁾ se relaciona al de TSC, de la misma manera en que el de Fotocapacitancia se relaciona al de TSCAP. Aquí, el vaciado y llenado de las trampas se muestra midiendo directamente la carga (a diferencia de los métodos paramétricos en los que ésta se mide de manera indirecta), conforme la muestra es iluminada por un monocromador.

1.3 METODOS DE ESTADO ESTACIONARIO.

Los métodos de estado estacionario involucran mediciones bajo una excitación esencialmente continua.

El método más simple de estado estacionario para examinar un nivel en la región prohibida de una unión polarizada inversamente, es el de Espectroscopía de Admitancia⁽⁵⁾. En este método, los niveles de interés son recargados en cada mitad del ciclo de una pequeña señal de C.A.

Dentro del grupo de métodos de estado estacionario, se encuentra también el método de Fotocapacitancia Diferencial de Doble Fuente (DSDP)⁽⁵⁾, el cual es parecido al de Fotocapacitancia, pero utiliza una fuente separada de luz para proporcionar una iluminación estable de luz, de energía un poco menor --

que el ancho de banda prohibida. El método DSDP tiene una respuesta más rápida que el de Fotocapacitancia. Esto se debe a que la población de la trampa está controlada por la suma de los efectos de la fuente estable y la fuente variable.

Sin embargo, es menos sensible y los datos son más difíciles de interpretar que en el método de Fotocapacitancia. Además, se debe cuidar constantemente la estabilidad de la fuente de luz que no varía.

1.4 METODOS DE TRANSITORIOS.

Al discutir los métodos de transitorio, es conveniente introducir algunos términos: se define un pulso de portador mayoritario como aquel que llena las trampas reduciendo temporalmente la polarización de una unión p-n polarizada inversamente.

La población de estado estacionario de las trampas cargadas, está determinada por la rapidez de emisión electrónica y de huecos y tiende al valor límite:

$$(1.4.1) \quad N_{\infty} = \frac{e_p}{e_n + e_p} N_T$$

En las mediciones de transitorio, es posible analizar independientemente los parámetros temporal y espacial de semiconductores. Mientras que en Espectroscopía de Admitancia, los tiempos de llenado y vaciado de las trampas son iguales, en las mediciones de transitorios uno tiene la libertad de asignar estos

tiempos independientemente.

La información de interés en todos los experimentos que -- involucran transitorios de capacitancia, es el cambio dependiente del tiempo, en el valor de un capacitor.

Podemos ver qué sucede en los diagramas de bandas. En la fig. 1.1 mostramos las diferentes situaciones para una estructura metal-semiconductor tipo-n con un solo nivel profundo, a la que se aplican pulsos de polarización como los que se mues-- tran en la fig. 1.2.

Inicialmente tenemos la estructura en polarización inversa - con las trampas ionizadas sobre el nivel de Fermi, cuando cam-- biamos a cero o polarización positiva se altera el nivel de - - Fermi por lo tanto se modifica la ocupación en las trampas, es - decir, se llenan estados de tal manera que cuando regresamos al estado inicial las trampas se vacían para finalmente retornar al estado inicial de polarización inversa.

El método más importante dentro de este grupo es el método de Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos (DLTS)⁽⁶⁾. Este es un método para examinar transitorios térmicos de capacitancia a altas frecuencias y permite observar una amplia variedad de trampas en semiconductores.

Es un método muy sensible, rápido y fácil de analizar.

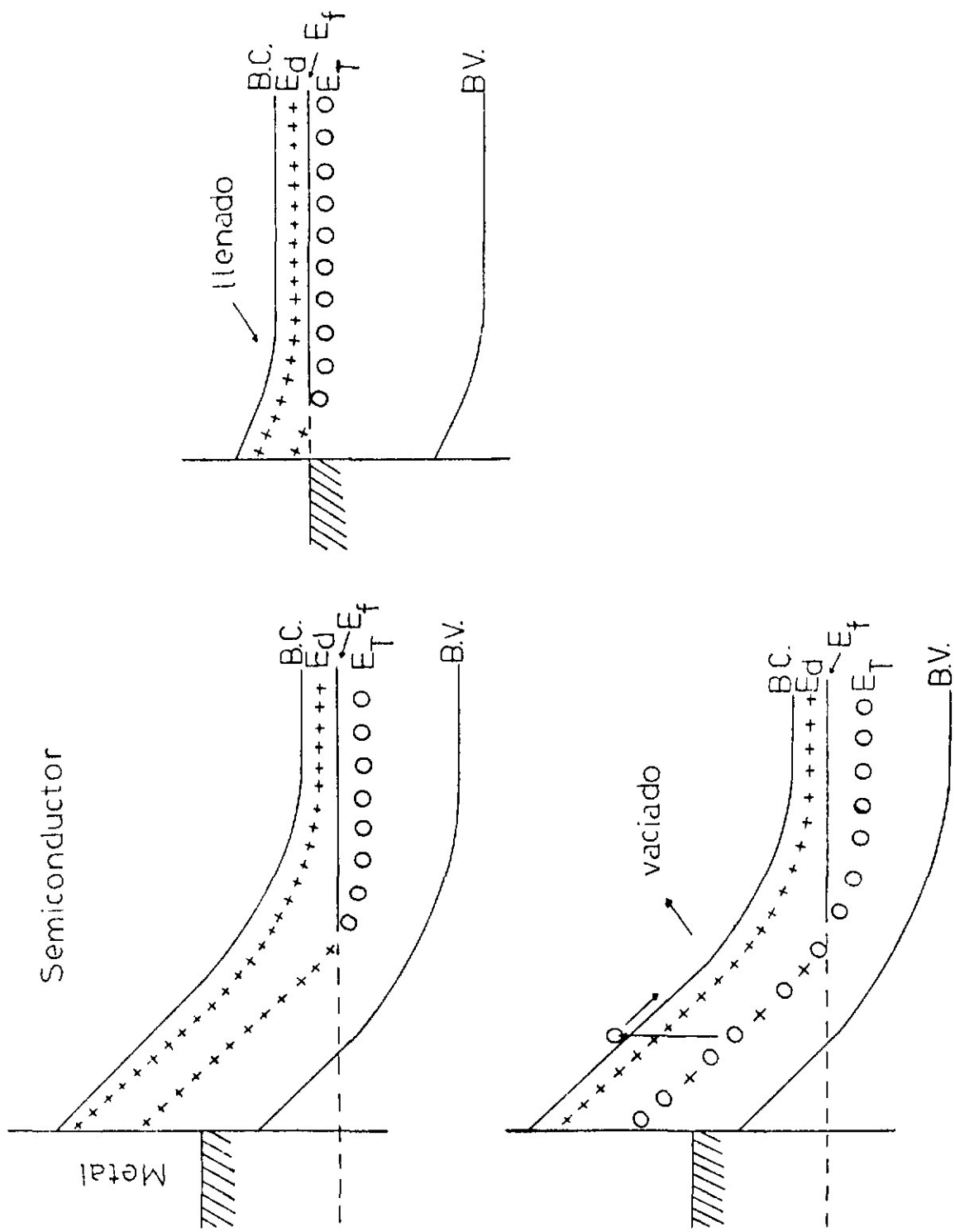


Fig. 1.1] Diferentes situaciones del diodo Schottky.

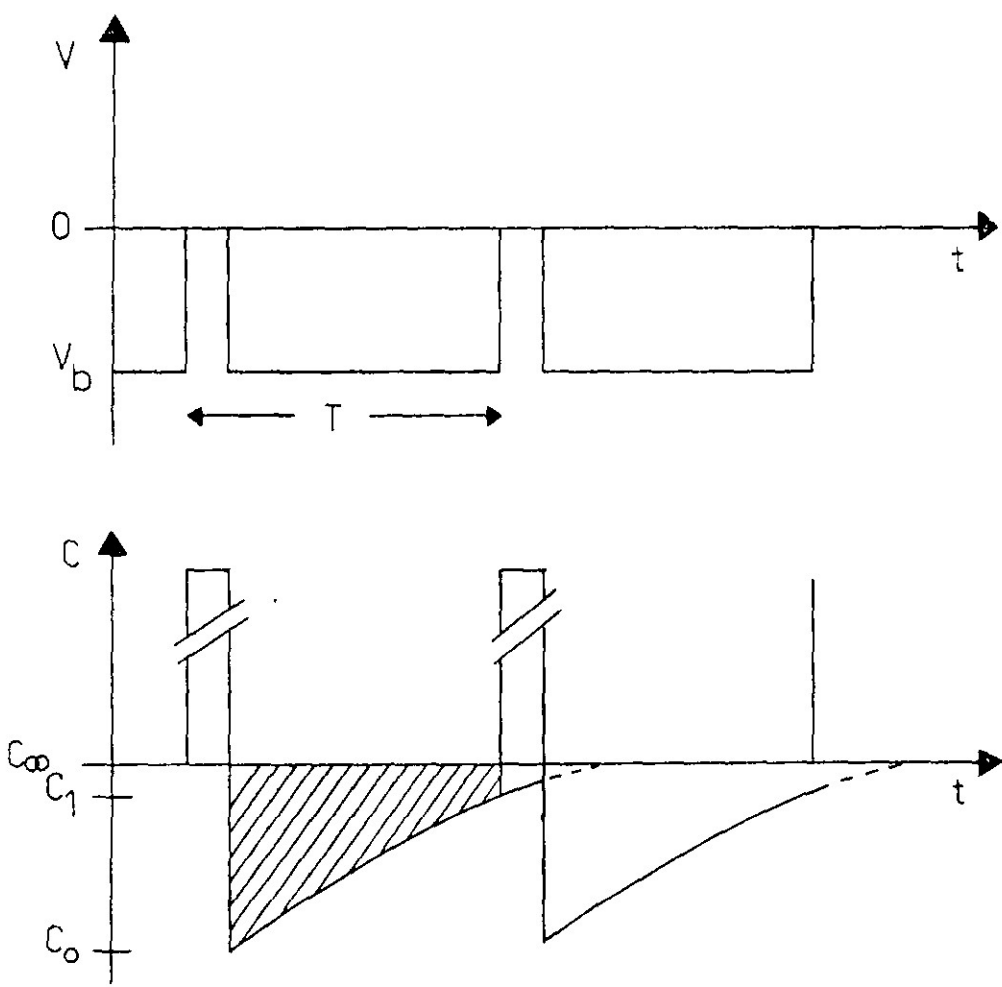


Fig. 1.2 Pulsos de polarización.

Muestra el espectro de trampas en un cristal, en forma de picos positivos o negativos sobre una línea de base, como una función de la temperatura, de manera que es posible determinar si la trampa es de portadores mayoritarios o minoritarios. La posición, en temperatura, del pico nos da información de las propiedades de emisión térmica de la trampa.

El método nos permite medir la energía de activación de los niveles, así como sus concentraciones, el perfil de concentración y las secciones transversales de captura de electrones y de huecos para cada trampa.

Es una técnica espectroscópica, es decir, permite distinguir señales debidas a trampas diferentes. Es un método de alta frecuencia (rango de MHz.) y como tal, tiene ventajas sobre métodos de corriente estimulada térmicamente (TSC) en vista de su mayor inmunidad al ruido y su habilidad para distinguir trampas de portadores mayoritarios, de trampas de portadores minoritarios. Es más versátil que la técnica de espectroscopía de admitancia, ya que no está limitada a trampas de portadores mayoritarios.

En términos generales, el sistema de medición tradicional consiste en un aparato sensible de medición de capacitancia (décimas de pf.) con buena respuesta de transitorio (del orden de milisegundos), uno o dos generadores de pulso para hacer cambios rápidos en la polarización del diodo, un integrador de señal, un graficador X-Y y un crióstato de temperatura variable.

La presencia de cada trampa, está indicada por un pico positivo o negativo sobre una línea base plana graficada como una función de la temperatura. El signo de cada pico indica si es debido a una trampa de portadores mayoritarios o a una de portadores minoritarios. Las alturas de los picos son proporcionales a sus concentraciones de trampas respectivas y las posiciones de los picos son determinadas simple y únicamente por las posiciones de ventana del integrador y las propiedades de emisión térmica de las trampas respectivas. Eligiendo adecuadamente los parámetros experimentales, es posible medir la rapidez de emisión térmica, la energía de activación, el perfil de concentración y la rapidez de captura de cada trampa.

El método de DLTS introduce una técnica muy útil para medir la constante de tiempo de decaimiento de señales de salida. Esta técnica se basa en la llamada "ventana de rapidez" (rate window); el funcionamiento de la cual se explica a continuación.

Consideraremos inicialmente la implementación de una ventana de rapidez tal como fué implementada originalmente por D.Lang utilizando un integrador boxcar doble⁽⁶⁾. Este aparato toma muestras de una señal de entrada a dos tiempos t_1 y t_2 , asignados previamente y produce una salida proporcional a su diferencia promedio. Este método de procesar la señal, produce el efecto de la ventana de rapidez deseado, como se muestra en la fig. 1.3.

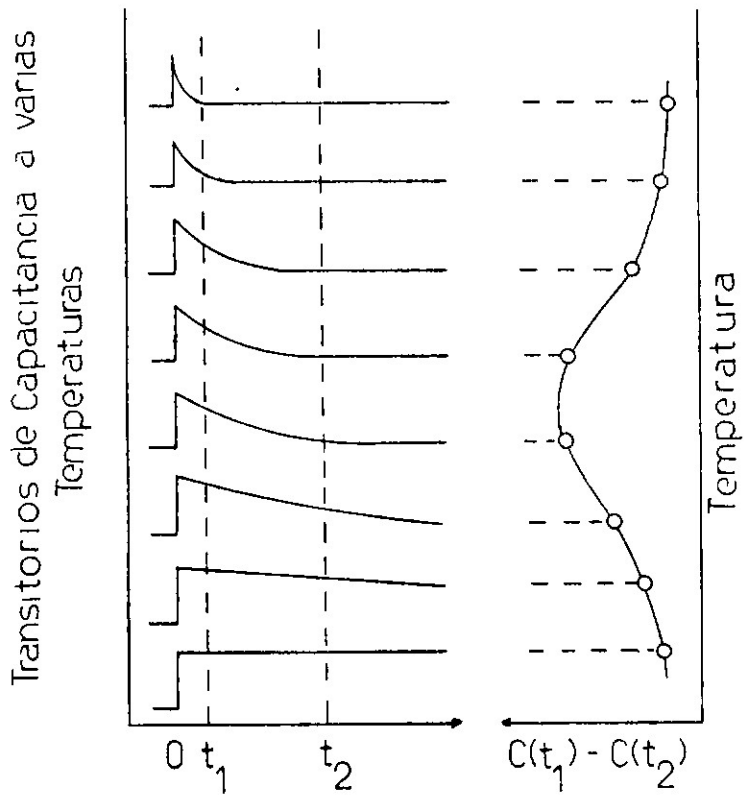


Fig. 1.3 Implementación de una ventana de rapidez por medio de un integrador boxcar doble. Las salidas corresponden a la diferencia (promedio) de las amplitudes en los tiempos t_1 y t_2 . Fig. tomada de la ref. 6.

La característica esencial de DLTS, es precisamente su habilidad para poner una ventana de rapidez de emisión, tal que el aparato de medición responda solamente cuando vea un transitorio con una rapidez de emisión dentro de esta ventana. Así, si se varía la rapidez de emisión de una trampa, variando la temperatura de la muestra, el instrumento mostrará un pico de respuesta a la temperatura donde la rapidez de emisión de la trampa está dentro de la ventana.

La rapidez de emisión es activada térmicamente y, por el principio de balance detallado⁽⁵⁾, está dada por:

$$(1.4.2) \quad e_1 = \sigma_1 \langle v_1 \rangle \frac{N_{D1}}{g_1} \exp(-\Delta E_1/kT)$$

donde σ_1 es la sección transversal de captura de portador minoritario, $\langle v_1 \rangle$ es la velocidad térmica media de portadores minoritarios, N_{D1} es la densidad efectiva de estados en la banda de portador minoritario, g_1 es la degenerancia del nivel de la trampa y ΔE_1 es la separación en energía, entre el nivel de la trampa y la banda de portadores minoritarios. Se tiene una ecuación similar para e_2 con todos los índices cambiados de 1 a 2 y con todas las cantidades referidas a portadores mayoritarios.

En el presente trabajo, nos referiremos a uniones metal-semiconductor, de manera que las cantidades importantes serán las que se refieren a portadores mayoritarios.

Una manera de determinar la profundidad de la trampa es --

construir una gráfica de $\ln(e_2)$ contra $1/T$ y medir la pendiente de la línea recta resultante, la cual está relacionada con la energía de activación de la trampa. Por supuesto, esta cantidad será igual a ΔE solamente si los prefactores en la ecuación (1.4.2) son independientes de la temperatura.

Existe una variedad de métodos de implementar la ventana de rapidez, diferentes de la del uso de un promediador boxcar doble. Uno de estos métodos usa un amplificador lock-in⁽⁵⁾.

Una señal repetitiva transitoria de capacitancia, como cualquier otra señal repetitiva, se puede analizar en series de Fourier en sus componentes de frecuencia. Ya que un amplificador lock-in no es más que un analizador de Fourier sintonizable de una componente, se puede utilizar tal amplificador como una manera alternativa de implementar la ventana de rapidez.

La capacitancia de la unión se observa en un puente RF, mientras que la polarización es perturbada periódicamente en sincronismo con la referencia del amplificador lock-in. Es muy importante la elección de la fase de la señal de referencia.

Conforme la constante de tiempo de relajación cambia con la temperatura de la muestra, la componente fundamental de la señal llega a un máximo a la temperatura a la cual el recíproco de la constante de tiempo de relajación se aproxima a la frecuencia del lock-in. Esto implementa una ventana de rapidez.

Como en todos los métodos de implementación de la ventana de rapidez en DLTS, el cambio en la temperatura de la muestra o en el ancho de la ventana de rapidez, hace que los picos del espectro de DLTS cambien de posición. En el método de lock-in, la ventana de rapidez está dada por la elección de la frecuencia de operación del lock-in.

Con este método se obtiene una gráfica como la de la figura 1.4, mientras que con el método de boxcar, la gráfica es como se muestra en la figura 1.5.

En el presente trabajo, en el que la caracterización se realizó a través de un sistema computarizado, fue posible eliminar el uso del boxcar o el lock-in, gracias a la versatilidad del puente de capacitancia, que permite programar las mediciones a través de la computadora y almacenar los datos medidos por el aparato. De esta manera, es posible hacer el experimento barriendo una sola vez en temperatura y almacenando todas las mediciones, de capacitancia en función del tiempo, $C(t)$, para después poder implementar la ventana de rapidez con sólo leer las mediciones grabadas a los tiempos deseados. En vista de que el principio es el mismo que el utilizado con un boxcar, seguiremos el análisis de D.V Lang⁽⁶⁾, que fué quien introdujo la técnica de DLTS y empleó en sus experimentos un boxcar doble.

Para encontrar el valor de $\tau_{m\acute{a}x}$, el valor de la constante de tiempo de relajación en el máximo de $C(t_2) - C(t_1)$ en función de los tiempos t_1 y t_2 , supondremos que la anchura de la

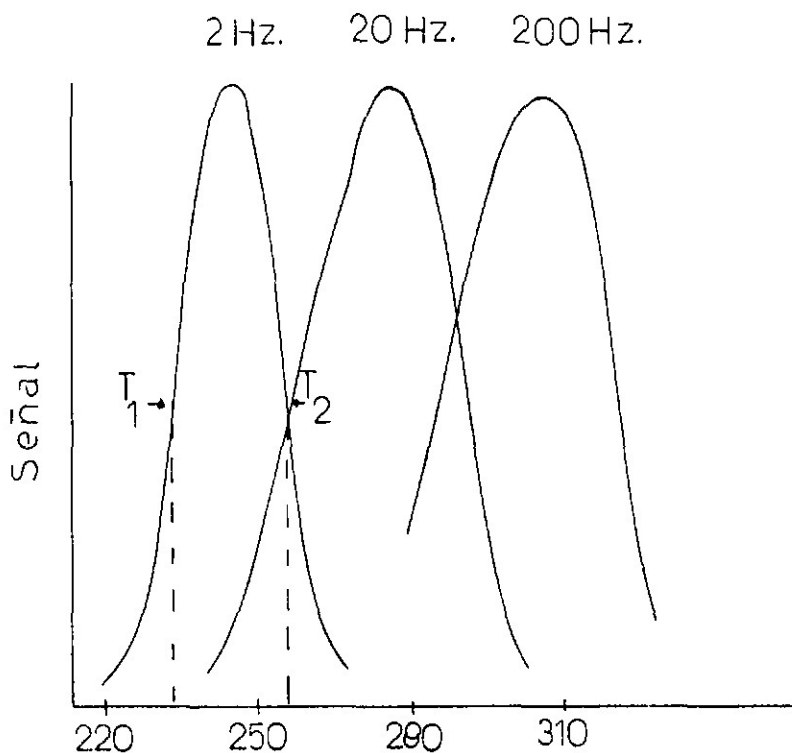


Fig. 1.4 Espectro de DLTS con amplificador lock-in, como una función de la temperatura y la frecuencia central del lock-in. Tomado de la ref. 5.

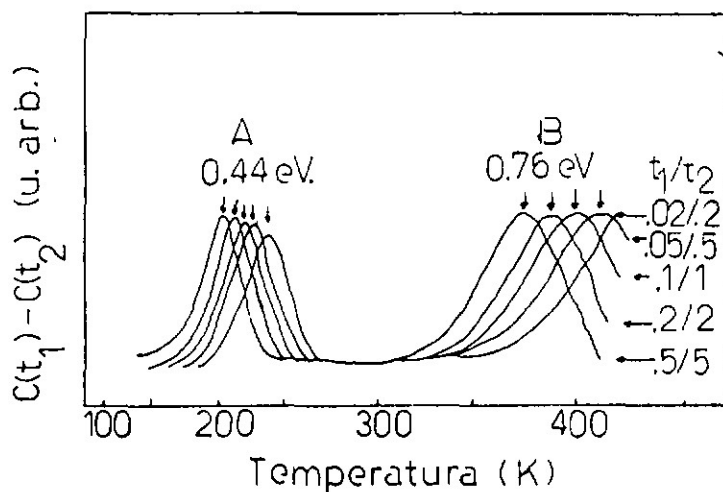


Fig. 1.5 Espectro típico de DLTS para trampas de huecos en n-GaAs. Se muestran cinco espectros diferentes que corresponden a cinco ventanas de rapidez determinadas por los valores de t_1 y t_2 . Tomado de la ref. 6.

ventana es infinitesimal. El resultado será aproximadamente válido para anchuras de ventana finitas, que definan un cambio pequeño en la capacitancia (menor, por ejemplo al 1%). La ventana de rapidez se define precisamente como τ_{\max}^{-1} .

Definamos la señal DLTS normalizada, $S(T)$, que se muestra en el lado derecho de la fig. 1.3, como:

$$(1.4.3) \quad S(T) = \frac{C(t_1) - C(t_2)}{\Delta C(0)}$$

donde $\Delta C(0)$ es el cambio de capacitancia debido al pulso a $t = 0$. Para transitorios exponenciales tenemos:

$$(1.4.4) \quad S(T) = e^{-\frac{t_1}{\tau}} - e^{-\frac{t_2}{\tau}}$$

donde la dependencia de temperatura de $\tau = e^{-1}$ está dada por la ecuación (1.4.2). La relación entre τ_{\max} y t_1 y t_2 , se determina diferenciando $S(T)$ con respecto a τ e igualando el resultado a cero. Se obtiene la expresión:

$$(1.4.5) \quad \tau_{\max} = (t_1 - t_2) \left[\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \right]^{-1}$$

Así, la rapidez de emisión correspondiente al máximo del pico de la trampa observado en un examen térmico de DLTS, es una cantidad bien definida y puede usarse, junto con la temperatura correspondiente al pico máximo, en la construcción de una gráfica semilogarítmica de la energía de activación, tal como

la de la fig. 1.6. Es decir, en el máximo de la señal de DLTS, se puede medir la temperatura y calcular τ_{max} con la ayuda de la ecuación (1.4.5), para obtener un punto de la gráfica de $-\ln(e_2)$ contra $1/T$. Se pueden obtener los otros puntos, haciendo exámenes similares con diferentes posiciones de la ventana, es decir, con diferentes valores de t_1 y t_2 , obteniéndose así, diferentes valores de τ_{max} a diferentes temperaturas.

La concentración de una trampa se puede obtener directamente del cambio de capacitancia correspondiente al llenado completo de la trampa con un pulso de portador mayoritario de duración lo más grande posible (en el caso de una trampa de portador mayoritario). La relación para una trampa electrónica en una unión n^+p es: (6)

$$(1.4.6) \quad N_T = 2 \left(\frac{\Delta C(0)}{C} \right) (N_A - N_D)$$

donde N_T es la concentración de la trampa, $\Delta C(0)$ es el cambio de capacitancia al tiempo $t = 0$ debido al pulso aplicado, C es la capacitancia del diodo bajo condiciones de polarización inversa y $N_A - N_D$ es la concentración neta de aceptores en el lado p de la unión, donde se observa la trampa.

También es fácil obtener las concentraciones de las trampas a través de un examen térmico de DLTS. Ya que se conoce τ_{max} de la posición de t_1 y t_2 , se puede usar la ecuación (1.4.4) junto con la ecuación (1.4.3), para obtener $\Delta C(0)$ en el máximo del pico de la trampa. Entonces, si el pulso de

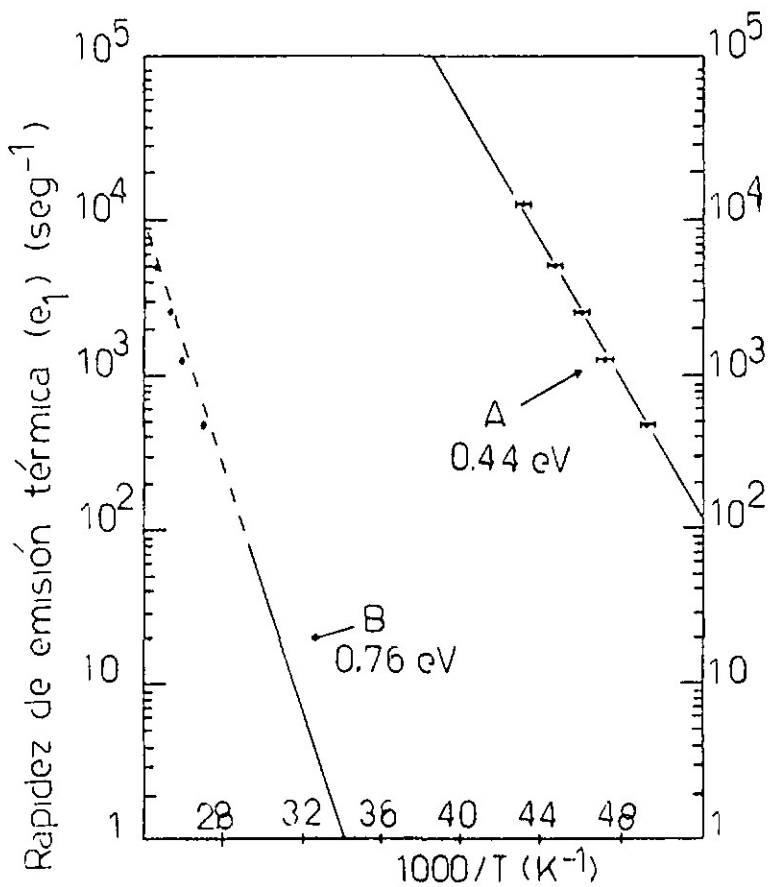


Fig. 1.6 Rapidez de emisión térmica vs $1000/T$ determinada del espectro de DLTS de la fig. 1.5. Las barras de error representan la incertidumbre en la localización de los picos en el espectro. Tomada de la Ref. 6.

portador mayoritario es lo suficientemente grande y largo para llenar completamente la trampa, podemos usar la ecuación (1.4.6) para obtener la concentración de trampas. Esta última condición se puede checar fácilmente, haciendo varios exámenes aumentando a pulsos mayores y más largos hasta que el pico de la trampa ya no crezca.

La rapidez de captura se determina midiendo la altura del pico de la trampa, como una función de la anchura del pulso de inyección de portadores mayoritarios.

Además, variando la anchura del pulso se pueden observar trampas lentas o rápidas, dependiendo de cuáles sean más importantes para el dispositivo que se está analizando.

El análisis anterior es estrictamente válido sólo en el caso de trampas con transitorios exponenciales. El método de DLTS trabaja muy bien todavía para transitorios no exponenciales, pero se debe tener cuidado en la obtención de los parámetros absolutos de la trampa. El comportamiento no exponencial se debe a variaciones espaciales en la rapidez de emisión de una trampa⁽⁶⁾, causadas por la variación espacial en el campo eléctrico de la unión; se puede observar este tipo de inhomogeneidad en un examen de DLTS, variando el voltaje del pulso de portador mayoritario. Si la forma y la posición del pico cambian al variar el voltaje del pulso, esto es señal de que hay inhomogeneidad.

Al tratar de determinar las energías de activación, se deben variar t_1 y t_2 para obtener diferentes ventanas de rapidez. Esta variación se puede hacer de las siguientes maneras:

- 1) t_1 fija, t_2 variable;
- 2) t_2 fija, t_1 variable;
- 3) t_1/t_2 fijo, t_1 y t_2 variables.

De estas tres, la última alternativa es la más conveniente, ya que entonces, la forma y la altura del pico casi no cambian, variando sólo la posición, de manera que es más fácil identificar los picos que corresponden a la misma trampa, cuando hay -- otros picos cercanos.

El método de DLTS es aplicable tanto a transitorios de capacitancia como a transitorios de corriente.

1.5 CONCLUSIONES.

El método de Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos se puede ver como una versión mejorada de TSCAP, que tiene las siguientes ventajas:

- a) sensibilidad mucho mayor
- b) rango mayor de profundidades de trampas observables
- c) mucho más fácil de usar e interpretar.

Otras dos características de DLTS que lo hacen un progre-

so sobre TSCAP son la independencia de la rapidez de barrido -
término y la facilidad con la cual se puede variar la ventana -
de rapidez para analizar energías de activación.

Los únicos centros que no se pueden detectar por DLTS son
los niveles muy poco profundos, tales como donadores y acepto--
res, los cuales pueden, sin embargo, ser detectados fácilmente
por luminiscencia. El método de DLTS se extiende entonces al
rango de trampas intermedias y profundas perdidas por luminis--
cencia, especialmente los centros no radiativos.

C A P I T U L O I I

TRABAJO EXPERIMENTAL

El objetivo de esta tesis fué el de implementar un sistema experimental para la caracterización de niveles profundos en se miconductores por la técnica de Espectroscopía de Transitorios de Capacitancia (DLTS), cuya teoría se explicó en el capítulo anterior. A diferencia de los sistemas tradicionales de DLTS, los cuales están basados en el uso de un amplificador "lock-in" o de un integrador "boxcar" para la medición de la señal de DLTS, nuestro sistema no emplea ninguno de estos dos instrumentos, sino que directamente mide la capacitancia de la muestra en función del tiempo, obteniéndose de esta manera, la forma precisa del transitorio de capacitancia. Esto se ha logrado por medio de un sistema computarizado, que nos da gran flexibilidad y que nos permite almacenar los datos experimentales en una cinta magnética.

Con nuestro sistema se obtienen ventajas considerables sobre los sistemas tradicionales de DLTS. En efecto, al tener la forma precisa del transitorio de capacitancia, es posible, en base a una sola medición a cada temperatura, obtener toda la in formación necesaria para la determinación de la energía de ioni zación y de la concentración de las trampas en cuestión. Es de cir, que con un solo barrido en temperatura, se hacen las mediciones de capacitancia y se almacenan en el cassette de la computadora todos los datos para posteriormente trabajar sólo con los datos almacenados, cambiando posiciones de la ventana

de rapidez a lo largo de todo el transitorio, sin necesidad de volver a realizar mediciones experimentales.

2.1 MONTAJE EXPERIMENTAL.

Empleamos un sistema automatizado que consta de:

- Capacímetro C-V Plotter Modelo PAR410 ,
- Interfaz C-V Modelo PAR4108
- Computadora Tektronix Modelo 4051
- Graficador Tektronix Modelo 4662
- Voltmetro Keithley Modelo 177 con interfaz
- Crióstato con sistema de enfriamiento a base de nitrógeno líquido.

En la fig. 2.1 se muestra el diagrama de bloques del sistema. Cabe señalar que las conexiones de los equipos con la computadora se efectuaron a través de la interfaz GPIB IEEE488.

La computadora controla los pulsos de polarización, ordena a los aparatos periféricos la posición de sus controles y captura los resultados.

La temperatura se midió con una resistencia de platino marca Lake Shore que tiene un comportamiento lineal en el rango de temperatura (80 K - 300 K) en que trabajamos.

2.2 MODO DE OPERACION.

En general la manera clásica de realizar mediciones de DLTS

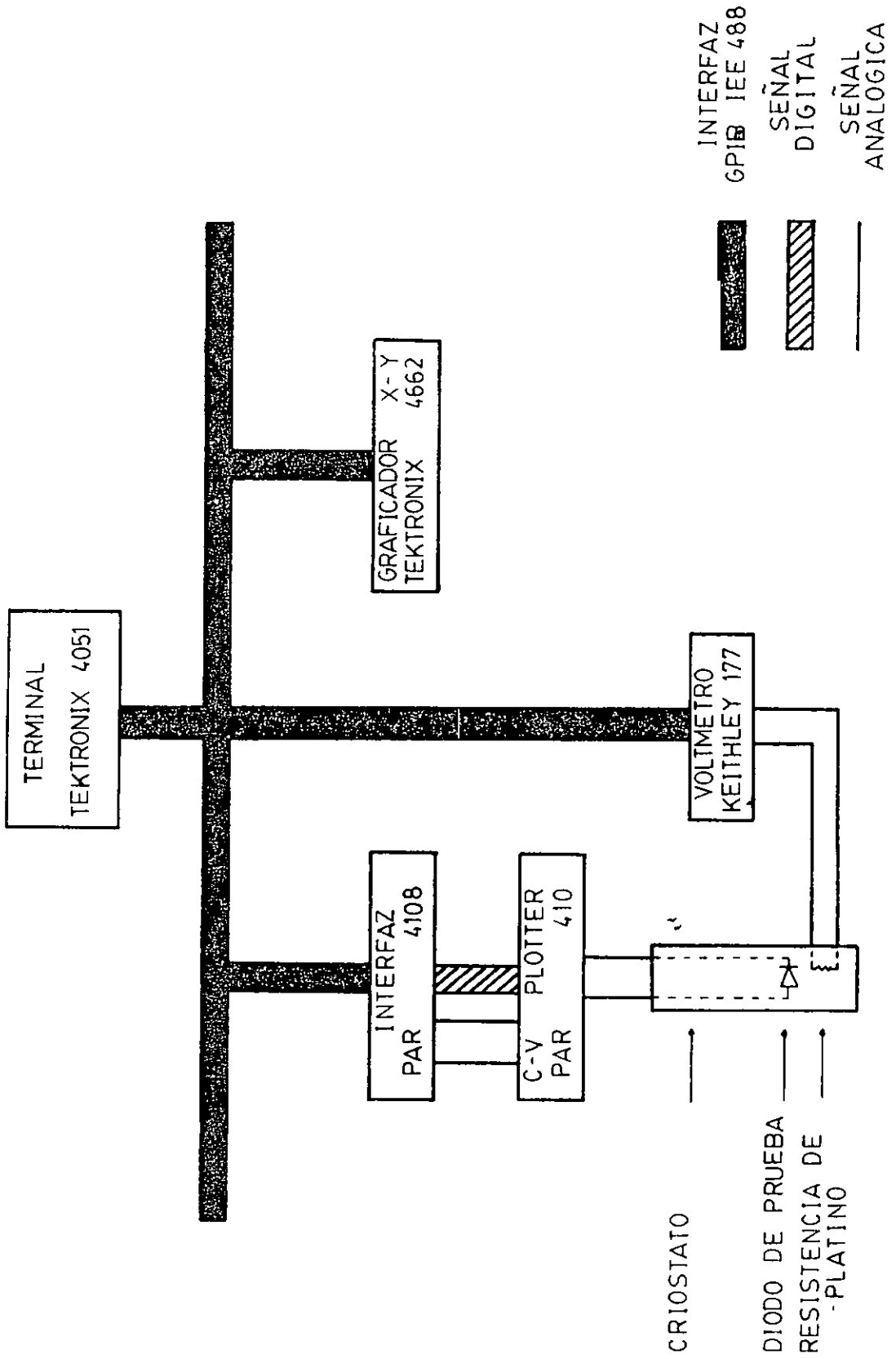


Fig. 2.1 Diagrama de bloques del sistema.

consiste en polarizar el dispositivo en cuestión de manera inversa y con una cierta frecuencia, aplicarle pulsos de polarización directa o cero polarización que alteren su situación de estado estacionario, esto se muestra en la fig. 1.2.

Desde el punto de vista de la capacitancia, ésta tiene un valor C_{∞} en polarización inversa, cuando se altera la polarización se modifica la carga en la región de carga espacial, por lo que varía la capacitancia; la capacitancia en el periodo de alteración de la polarización no interesa, lo que sí interesa es de qué manera regresa a su valor estacionario pues este transitorio, que se muestra en la fig. 1.2, nos da información de los niveles profundos.

En nuestro sistema, la computadora ordena los pulsos de polarización a la interfaz C-V y ésta a la vez, los pasa al capacitómetro para polarizar la muestra. Los valores de capacitancia son enviados a la computadora a través de dicha interfaz.

El capacitómetro es capaz de hacer mediciones cada 75 μ seg., necesitando un tiempo de 450 μ seg. después de aplicado el pulso, para hacer la primera medición y puede almacenar en la interfaz hasta 4000 datos.

Además, es posible hacer varias mediciones de transitorios de capacitancia a la misma temperatura y almacenar los datos en diferentes sitios de la memoria de la interfaz C-V, para después pasarlos a la computadora y promediarlos, logrando así

eliminar gran parte del ruido. De esta manera, se tiene una información más amplia de la forma del transitorio.

En nuestro caso promediamos 10 mediciones de transitorios a cada temperatura y almacenamos el promedio en cassettes (desde luego, también se pueden almacenar en discos) para su tratamiento posterior.

Al mismo tiempo, se mide la temperatura de la muestra con la ayuda del vóltmetro, el cual también está controlado por la computadora. Antes y después de hacer las mediciones, se le ordena al vóltmetro que tome la lectura y que promedie los dos datos, para que en caso de que haya variado un poco la temperatura, se tome la lectura más cercana al valor real. Este último dato también se almacena en el cassette junto con las mediciones del transitorio de capacitancia correspondiente.

Así mismo, se guardan los datos de las posiciones de los controles del capacímetro y del tipo de muestra con que se está trabajando. De esta manera, se tiene almacenada toda la información necesaria y es posible trabajar posteriormente con los datos almacenados, olvidándose por completo de la muestra.

2.3 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Se hicieron mediciones de DLTS sobre dos diodos Schottky. El primero es un diodo de Silicio policristalino tipo-p, recocido en plasma de hidrógeno durante 15 min. a 500°C, el cual se fabricó en las instalaciones del Depto. de Ing. Eléctrica del de

CINVESTAV-IPN. El diagrama del diodo se muestra en la figura -
2.2. El área del contacto Schottky es de $4.56 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$.

El segundo diodo es un cristal de ZnSe al cual se le im-
plantó Ga. Dicho diodo se fabricó en los laboratorios del CNRS
en Meudon, Francia. El esquema de este dispositivo se muestra
en la fig. 2.3. El área del contacto Schottky es de 10^{-2} cm^2 .

Se describirán primeramente los resultados obtenidos para
la muestra de Silicio policristalino.

En este caso se aplicó al diodo una polarización inversa -
de 2 volts. Los transitorios de capacitancia se introdujeron -
aplicando un tren de pulsos de voltaje, con frecuencia de - - -
25 Hz, de tal manera que la polarización de la muestra conmu-
taba entre entre 0 y -2 volts.

En la fig. 2.4 se muestra un ejemplo de 10 mediciones de
transitorios de capacitancia a una temperatura de 270 K y en
la fig. 2.5 aparece el promedio de estas mediciones.

Enseguida vamos enfriando la muestra agregando nitrógeno
líquido al crióstató y efectuamos mediciones a diversas tempera-
turas. En la fig. 2.6 se muestra una de estas mediciones y en
la fig. 2.7 su respectivo promedio. Por último tenemos en la
fig. 2.8, una medición a baja temperatura y su promedio en la
fig. 2.9.

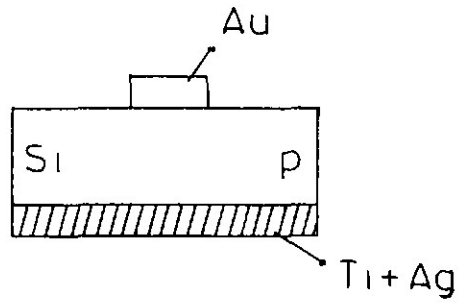


Fig. 2.2 Esquema del diodo de Silicio policristalino.

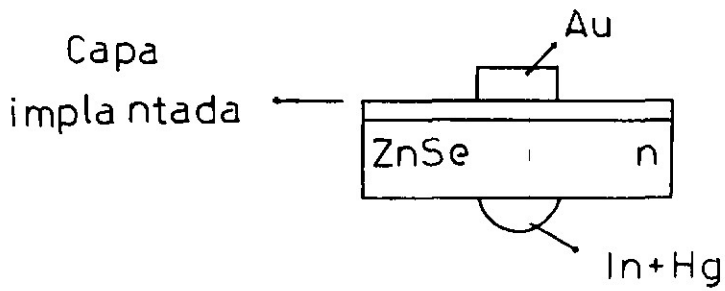


Fig. 2.3 Esquema del diodo de ZnSe.

Tipo de Muestra : SILICIO

Temperatura (abs.) = 269.96

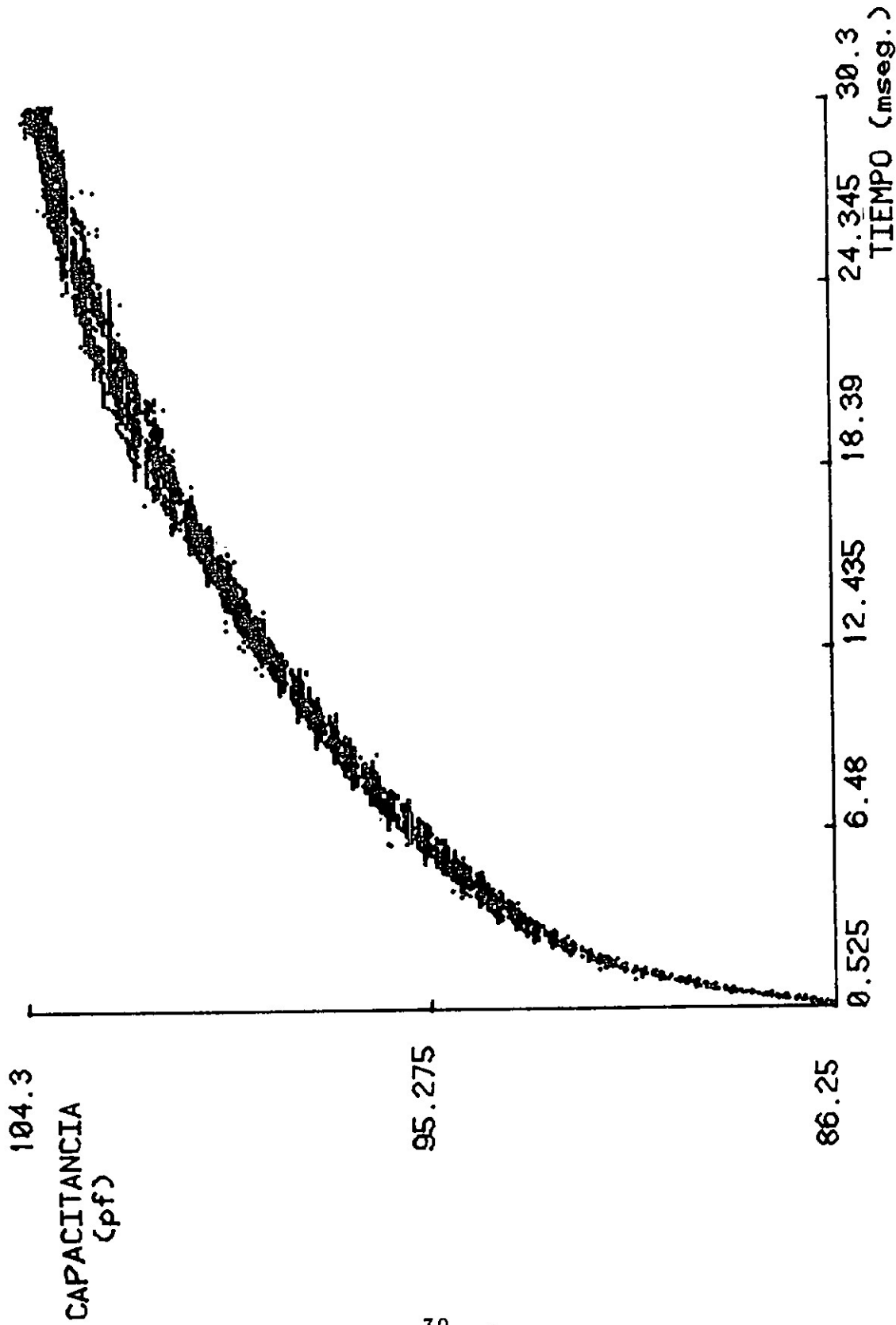


Fig. 2.4 Transitorios de capacitancia a temperatura de 270 K para una muestra de Silicio policristalino.

Tipo de Muestra : SILICIO

Temperatura (abs.) = 269.96

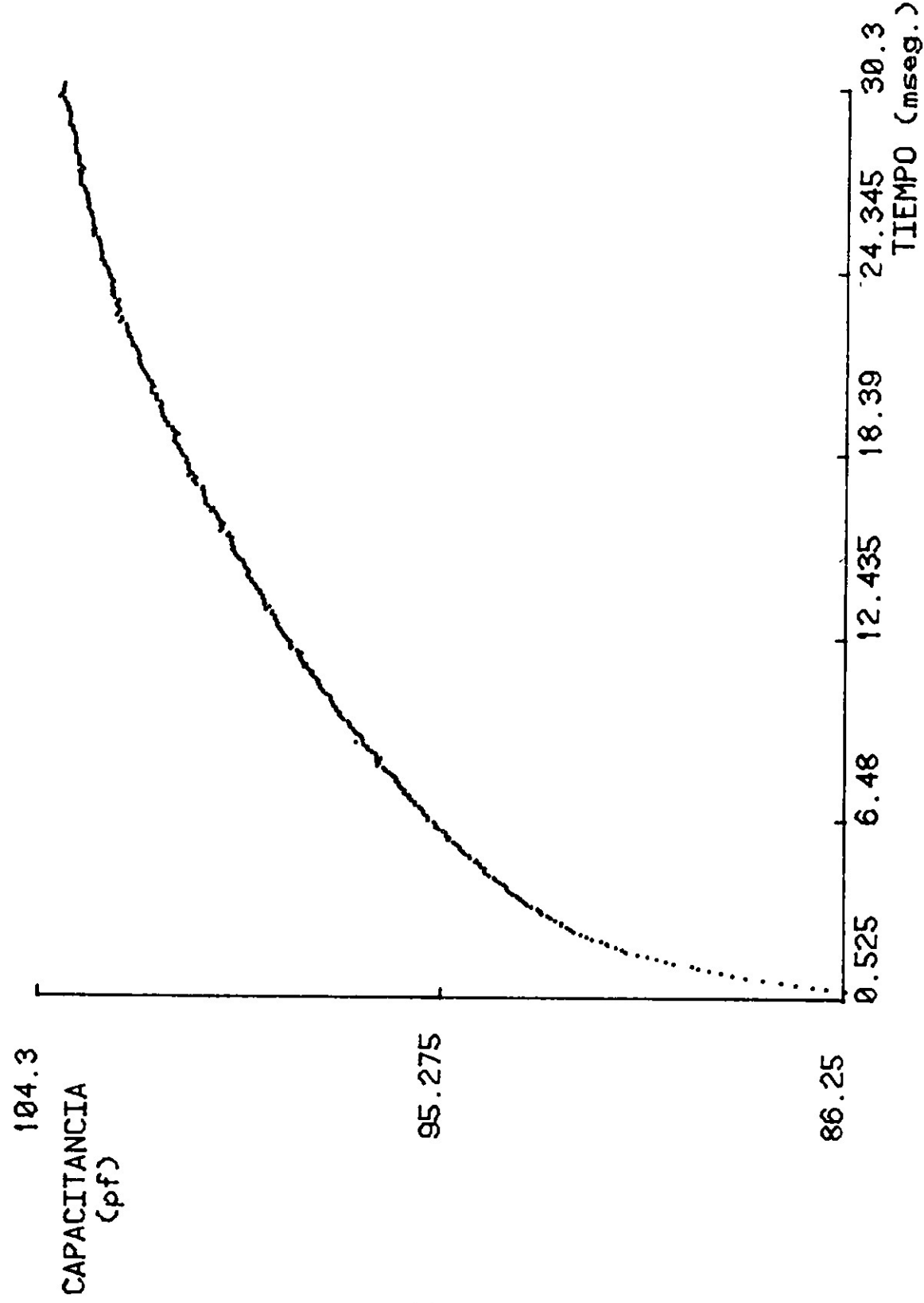


Fig. 2.5 Promedio de las mediciones que aparecen en la fig. 2.4.

Tipo de Muestra: SILICIO

Temperatura (abs.) = 221.6

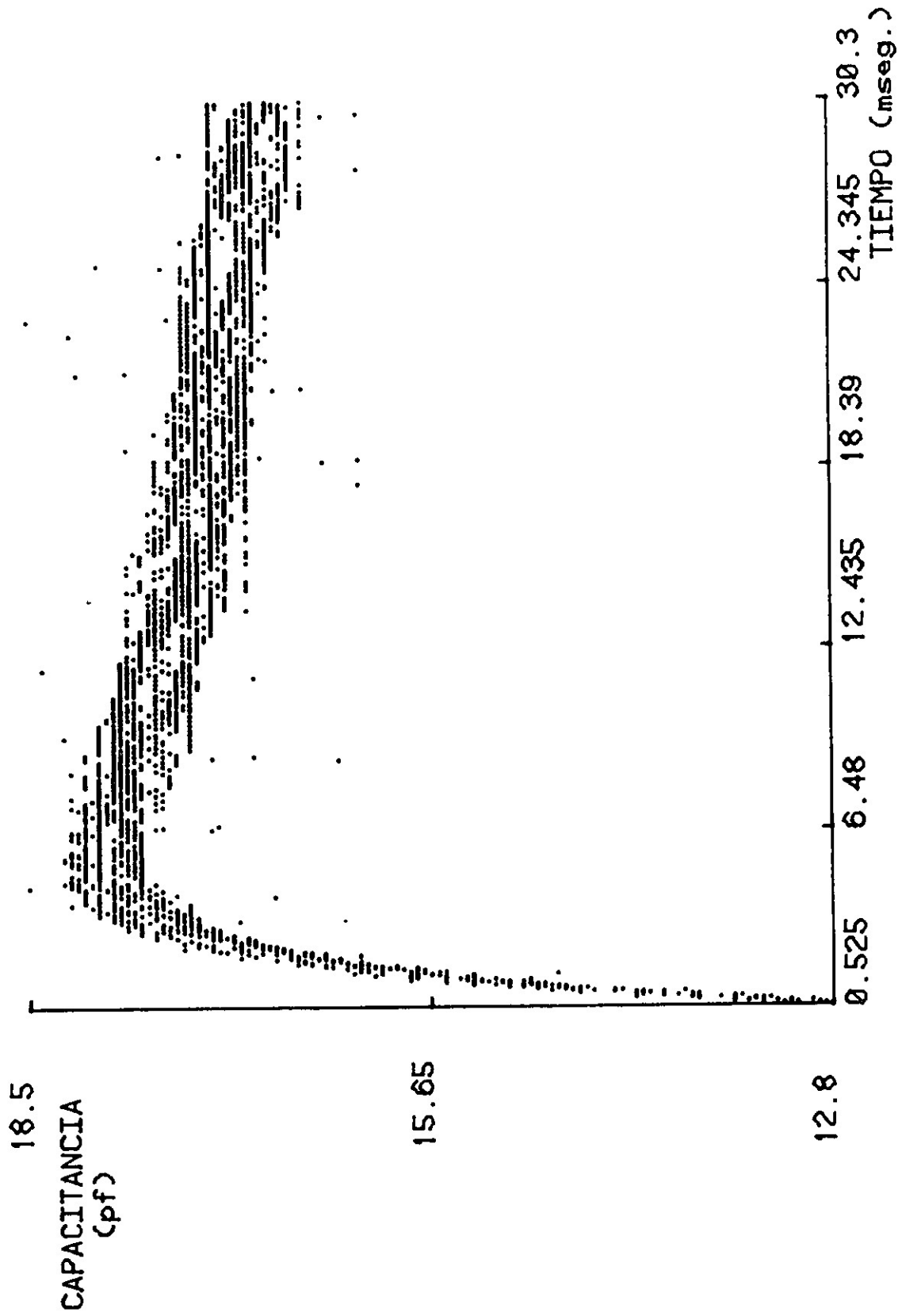


Fig. 2.6 Transitorios de capacitancia a temperatura de 221.6 K.

Tipo de Muestra: SILICIO

Temperatura (abs.) = 221.6

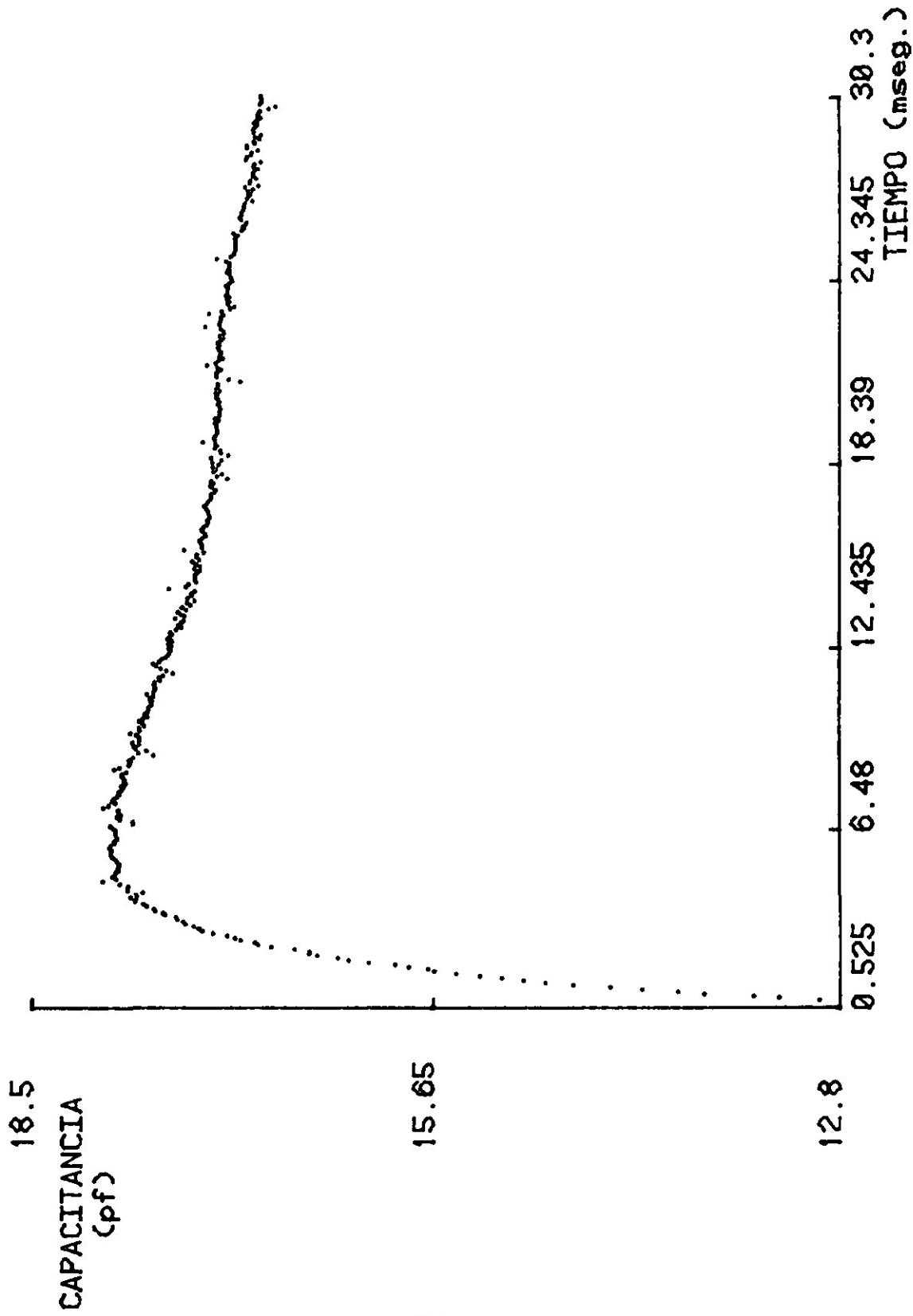


Fig. 2.7 Promedio de los transitorios de capacitancia que se muestran en la fig. 2.6.

Tiplo de Muestra : SILICIO

Temperatura (abs.) = 87.25

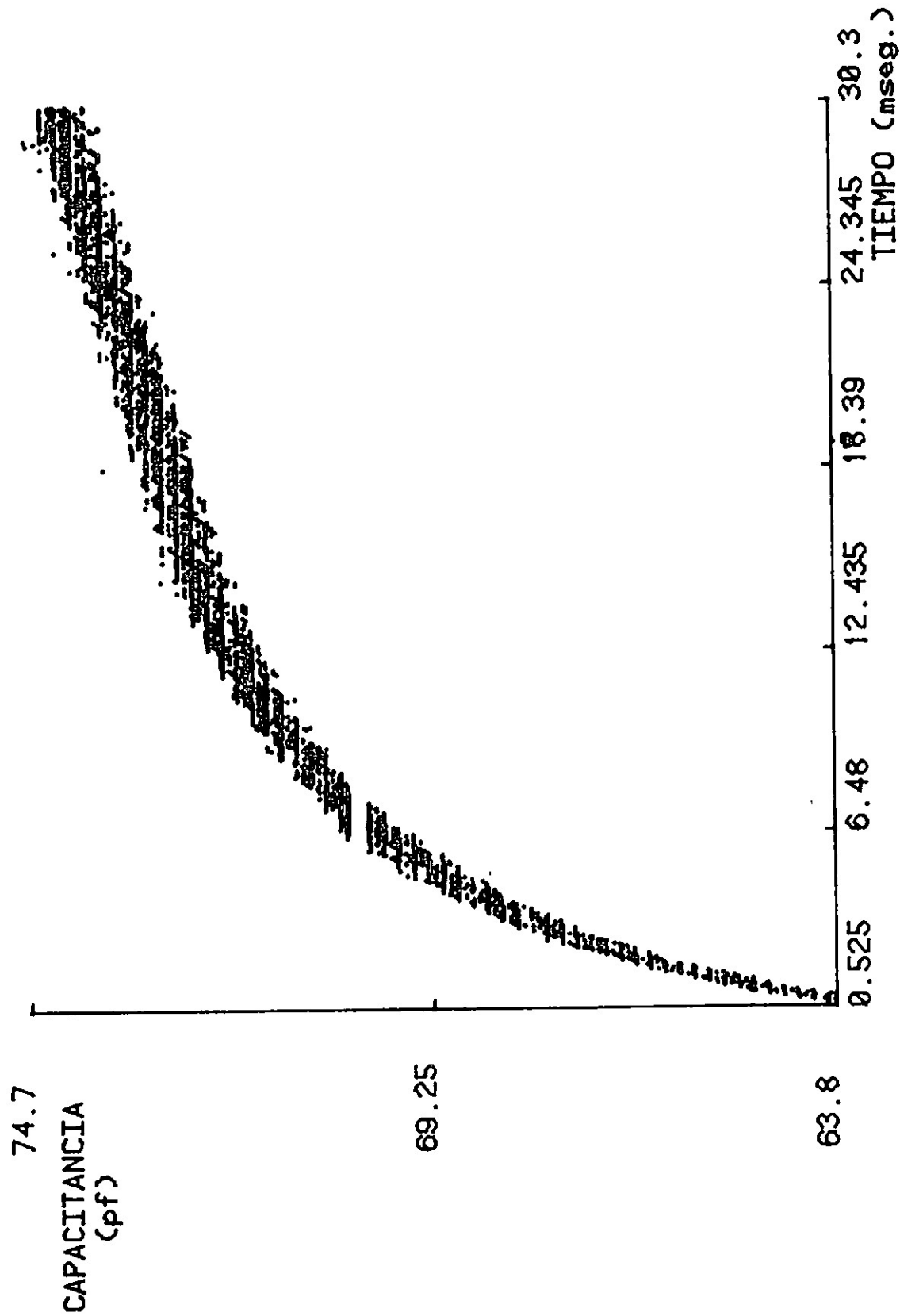


Fig. 2.8 Transitorios de capacitancia a baja temperatura.

Tipo de Muestra: SILLICIO

Temperatura (abs.) = 97.25

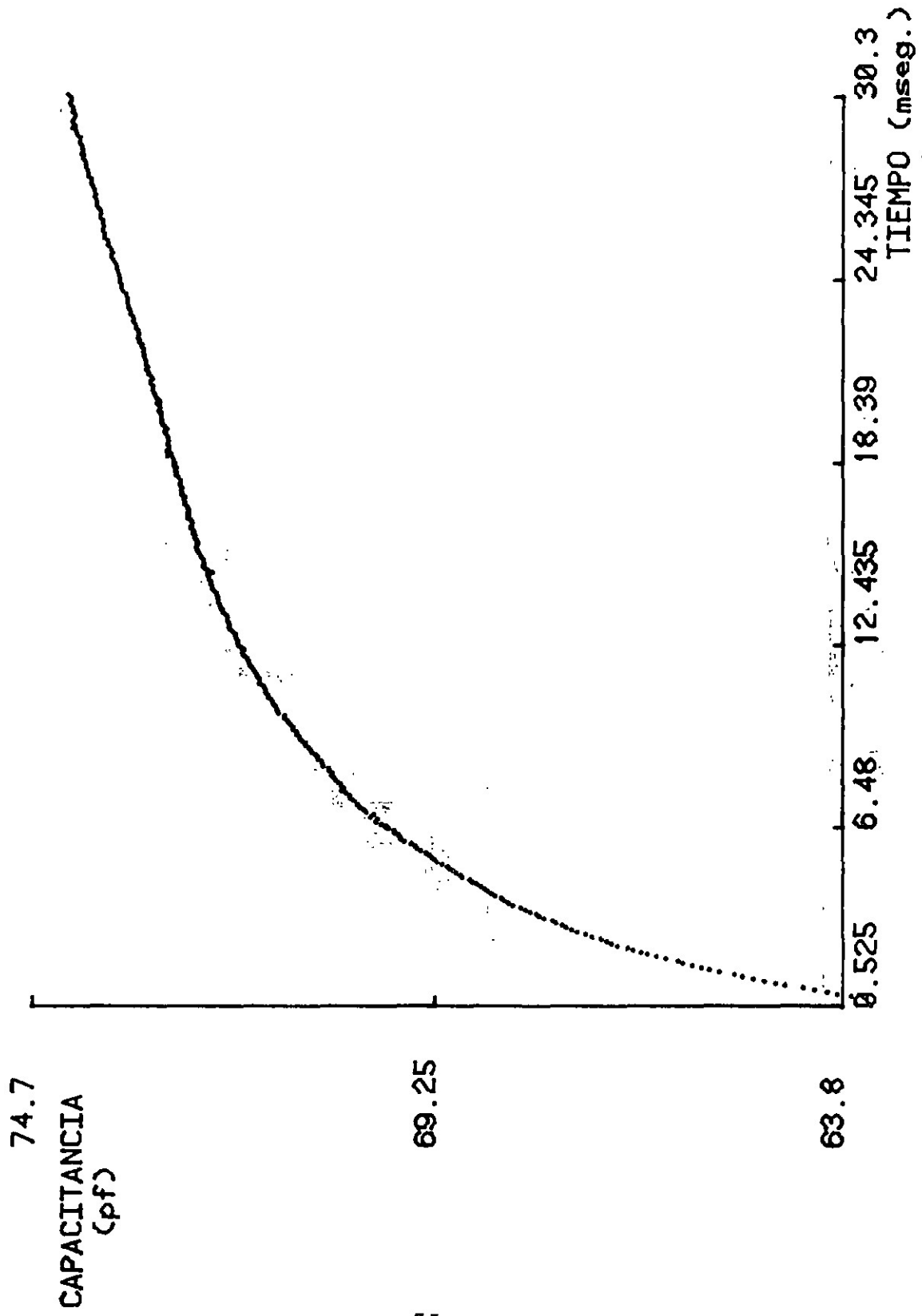


Fig. 2.9. Promedio de los transitorios de capacitancia que aparecen en la fig. 2.8.

Hemos querido mostrar al menos tres mediciones para que se pueda observar que el transitorio de capacitancia no es el mismo a diversas temperaturas, sino que está variando con la temperatura lo cual evidencia la presencia de niveles profundos en el semiconductor.

El siguiente paso fué el procesamiento de los datos que se encuentran almacenados en el cassette de la computadora, datos de capacitancia en función del tiempo a diferentes temperaturas.

Se tomó el valor de la capacitancia a un tiempo t_1 , denotada como $C(t_1)$ y la capacitancia a un tiempo t_2 igual a $C(t_2)$, tomamos la diferencia $C(t_2) - C(t_1)$ y graficamos dicha diferencia en función de la temperatura. Si la gráfica muestra un máximo, se pueden variar los tiempos t_1 y t_2 para lograr un corrimiento del pico.

Hicimos lo anterior, manteniendo t_1/t_2 constante, para nuestra muestra de Silicio policristalino y encontramos tres picos a diversas temperaturas y, variando t_1 y t_2 obtuvimos el corrimiento de estos máximos; esto se muestra en las gráficas de las figs. 2.10, 2.11 y 2.12.

Mediante la aplicación de la fórmula que se obtuvo en el capítulo I:

$$(1.4.5) \quad \tau_{\max} = (t_1 - t_2) \left[\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \right]^{-1}$$

t1/t2 (mseg.)

- 0.8/1.2
- # 1.2/1.8
- + 1.6/2.4

Tipo de Muestra : SILICIO

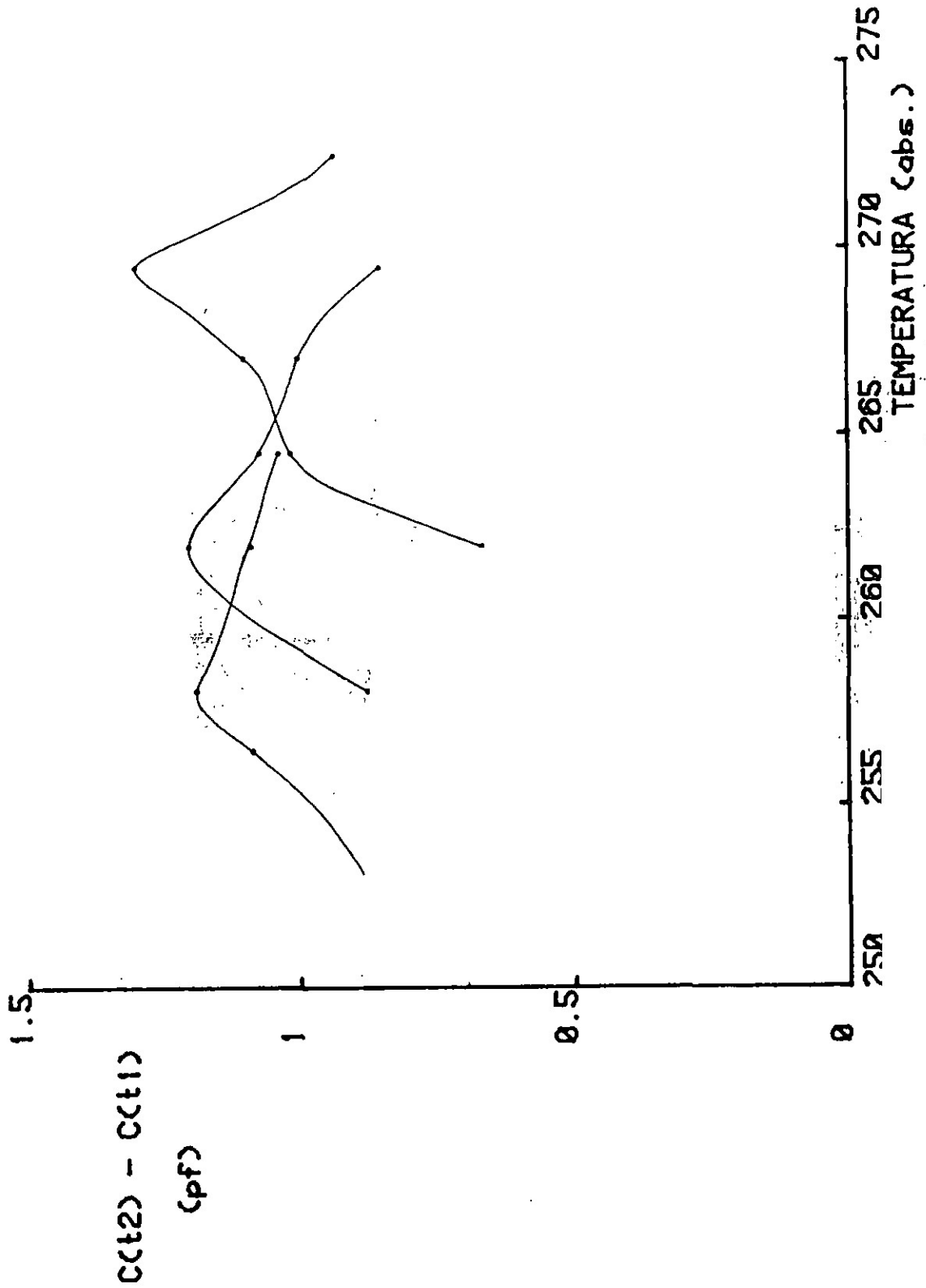


Fig. 2.10 Gráfica que muestra la diferencia en capacitancia para diferentes ventanas de rapidez en función de la temperatura para altas temperaturas.

t1/t2 (mseg.)

· 5/7.5

* 6/9

+ 7/10.5

x 8/12

& 10/15

Tipo de Muestra : SILICIO

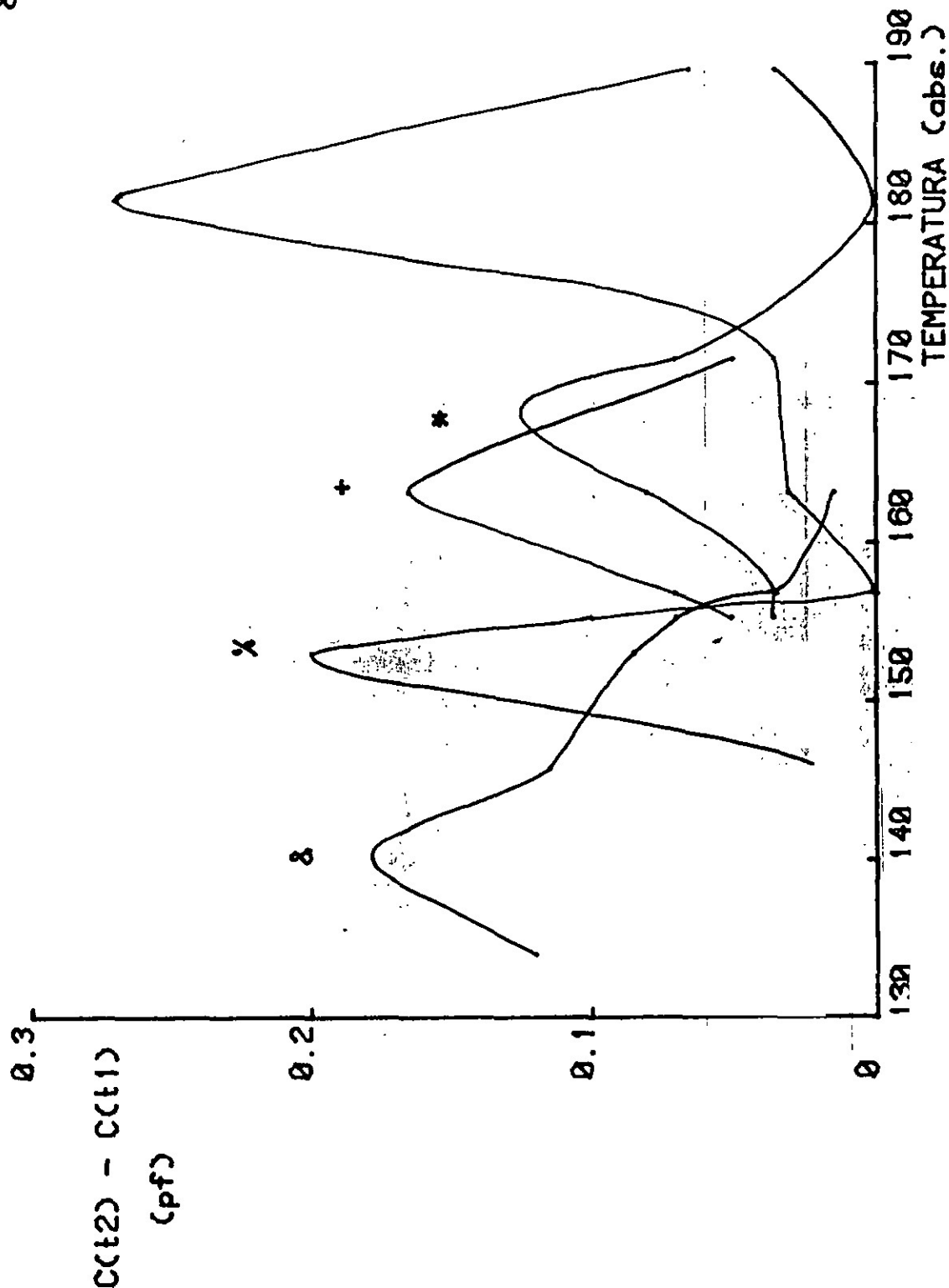


Fig. 2.11 Gráfica que muestra la diferencia en capacitancia para diferentes ventanas de rapidez en función de la temperatura para temperaturas intermedias (130-190 K).

Tipo de Muestra : SILICIO

t1/t2 (mseg.)

- 4/8
- * 2/4
- + 1/2

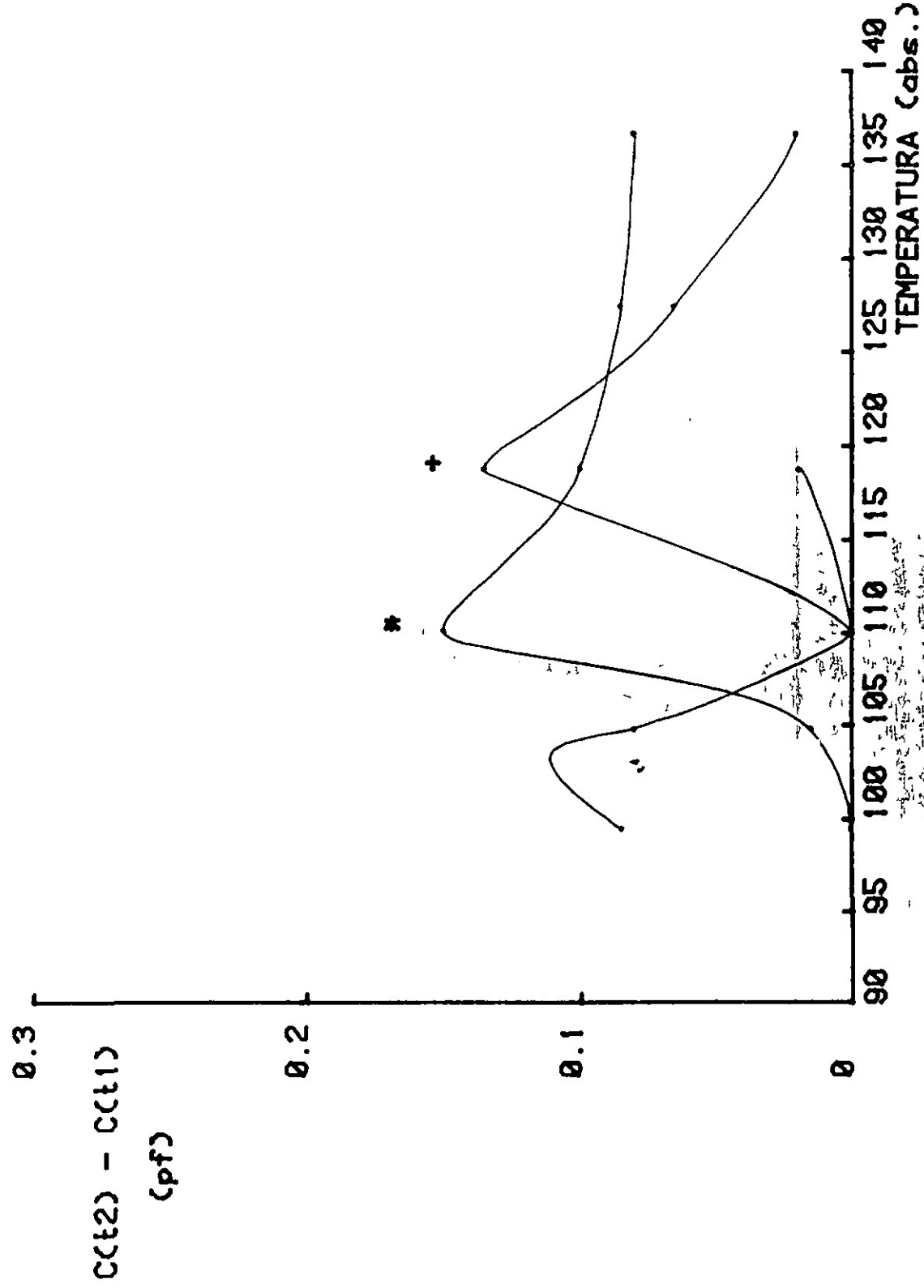


Fig. 2.12 Gráfica que muestra la diferencia en capacitancia para diferentes ventanas de rapidez en función de la temperatura a bajas temperaturas.

encontramos la rapidez de emisión correspondiente al máximo del pico observado en el examen térmico de DLTS.

En las figs. 2.13, 2.14 y 2.15, aparecen las correspondientes gráficas semilogarítmicas de la rapidez de emisión térmica contra $1/T$, los puntos obtenidos caen en una recta y mediante la aplicación de la fórmula

$$(1.4.2) \quad e = \sigma \langle v \rangle \frac{N_D}{g} e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

obtenemos la energía de activación que, como aparece en las gráficas, es de 360, 37 y 93 meV., respectivamente.

Ya que la muestra es de tipo-p, los picos corresponden a trampas de huecos y la energía de activación que aparece en cada gráfica es la diferencia en energía entre el borde de la banda de valencia y el nivel de la trampa, es decir $E_T - E_V$.

Por último, para la muestra de Si policristalino calculamos la concentración de portadores del nivel en cuestión, mediante la aplicación de la fórmula:

$$(1.4.6) \quad N_T = \frac{2}{C} \left[\frac{C(t_1) - C(t_2)}{e^{-\frac{t_1}{\tau_{\max}}} - e^{-\frac{t_2}{\tau_{\max}}}} \right] N$$

que se mencionó en el primer capítulo y obtenemos para los niveles que encontramos, las concentraciones respectivas de - - -

MUESTRA DE : SILICIO

$E(\text{act.}) = 360.3 \text{ meV.}$

RAPIDEZ DE EMISION TERMICA (a), (seg.⁻¹)

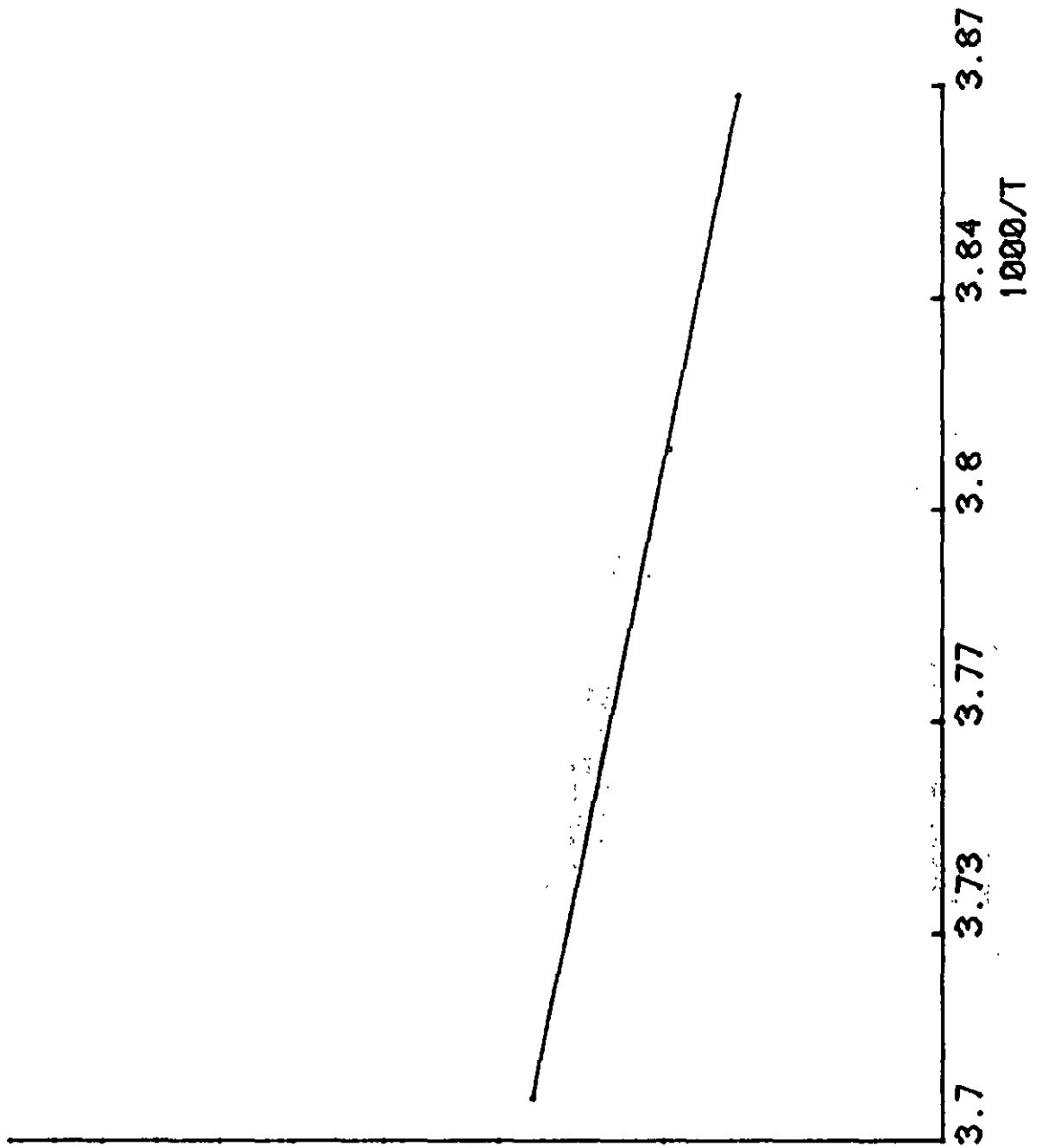


Fig. 2.13 Nivel profundo detectado a altas temperaturas.

MUESTRA DE : SILICIO

$E(\text{act.}) = 36.66 \text{ meV.}$

RAPIDEZ DE EMISION TERMICA (e), (eeg. ~-1)

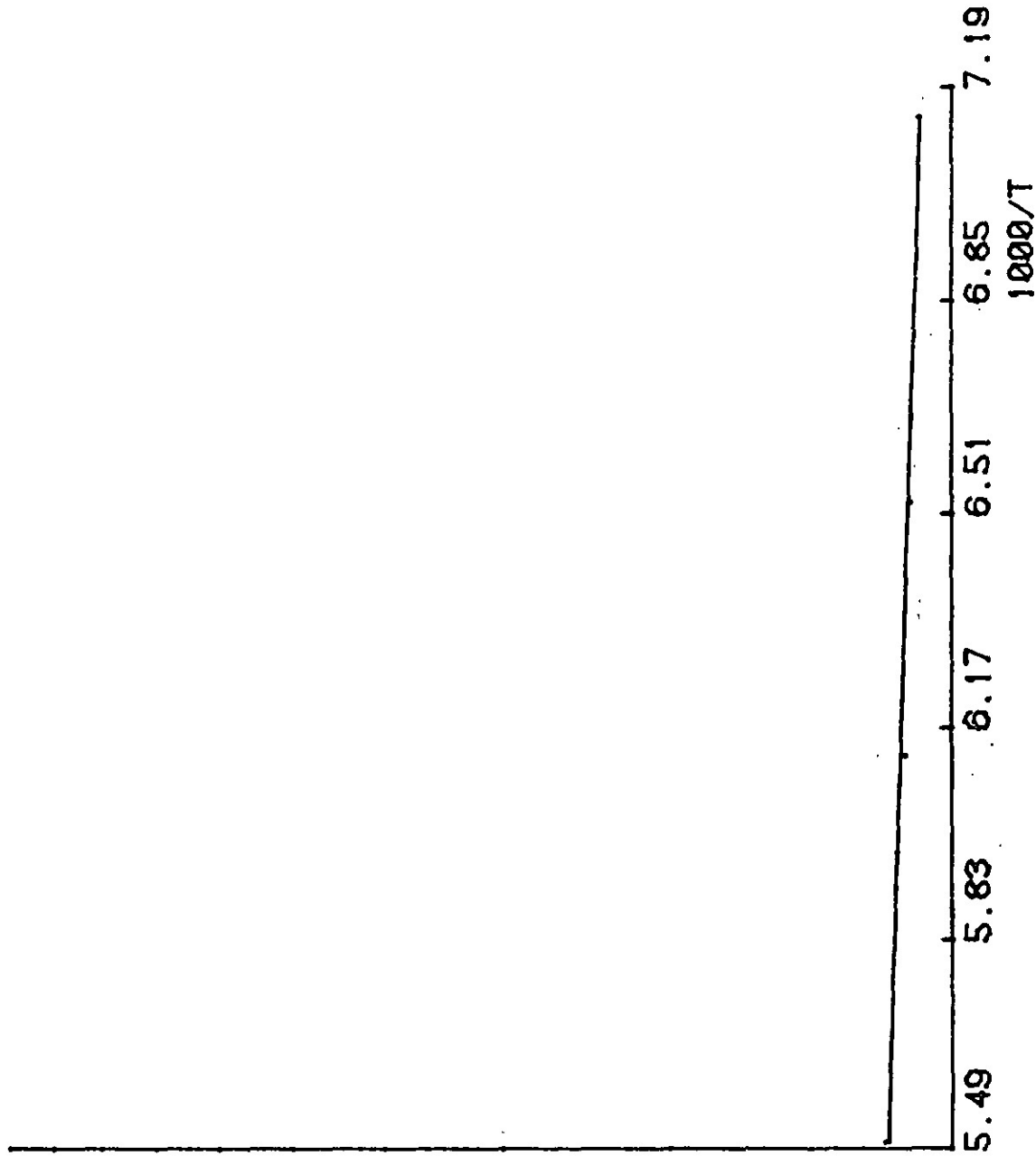


Fig. 2.14 Determinación de ΔE para el espectro DLTS de la fig. 2.11.

MUESTRA DE : SILICIO

$E_{\text{act.}} = 92.76 \text{ meV.}$

RAPIDEZ DE EMISION TERMICA (\odot), (seg.^{-1})

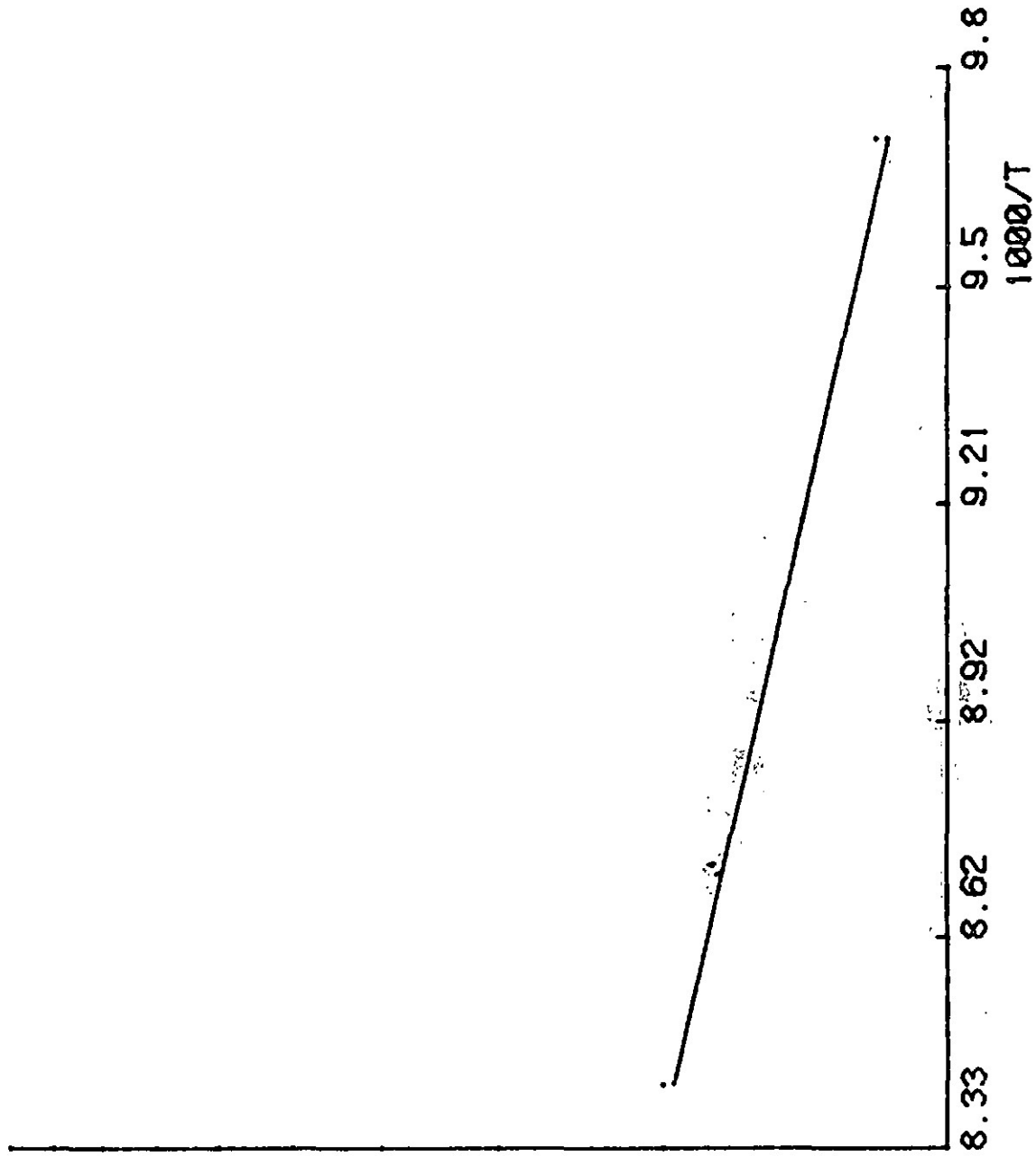


Fig. 2.15. Energia de activación obtenida para un nivel en Silicio policristalino.

1.013×10^{16} , 1.75×10^{15} y $2.78 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 1.

T (K)	$E_T - E_V$ (meV)	N_T (cm^{-3})
270	360	1.013×10^{16}
182	37	1.75×10^{15}
119	93	2.78×10^{14}

Tabla 1. Resultados experimentales para Silicio policristalino.

Esta muestra ya había sido caracterizada anteriormente, lo que nos permitió comprobar la eficiencia de nuestro sistema de medición, al obtener resultados similares a los obtenidos sobre la misma muestra con un sistema completamente diferente al nuestro y empleando distintos aparatos de medición.

Dicho en otras palabras, el diodo de Si policristalino ya había sido medido en DLTS utilizando un montaje manual y un amplificador Lock-in, esto se hizo en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV-IPN⁽⁷⁾ y se reportó por ejemplo, para el pico a alta temperatura, una energía de activación de 354 meV y con nuestro montaje automatizado obtuvimos 360 meV.

Por un procedimiento similar al descrito para la muestra de Si policristalino, medimos un diodo de ZnSe cuyo esquema se muestra en la fig. 2.4.

Encontramos dos niveles a temperaturas alrededor de 207 K y 127 K para ventanas de rapidez de $t_1 = .8$, $t_2 = 8.72$ mseg. y $t_1 = .65$, $t_2 = 3.54$ mseg., respectivamente. En las figs. 2.16 y 2.17 se muestran las correspondientes gráficas de la rapidez de emisión térmica en función de $1/T$, las energías de ionización obtenidas son de 56 y 35 meV. Por tratarse de una muestra tipo-n, la energía de ionización encontrada es la diferencia -- entre el borde de la banda de conducción y el nivel de la trampa $E_C - E_T$.

MUESTRA DE: ZnSe

$E(\text{act.}) = 56.42 \text{ meV.}$

RAPIDEZ DE EMISION TERMICA (a), (seg.⁻¹)

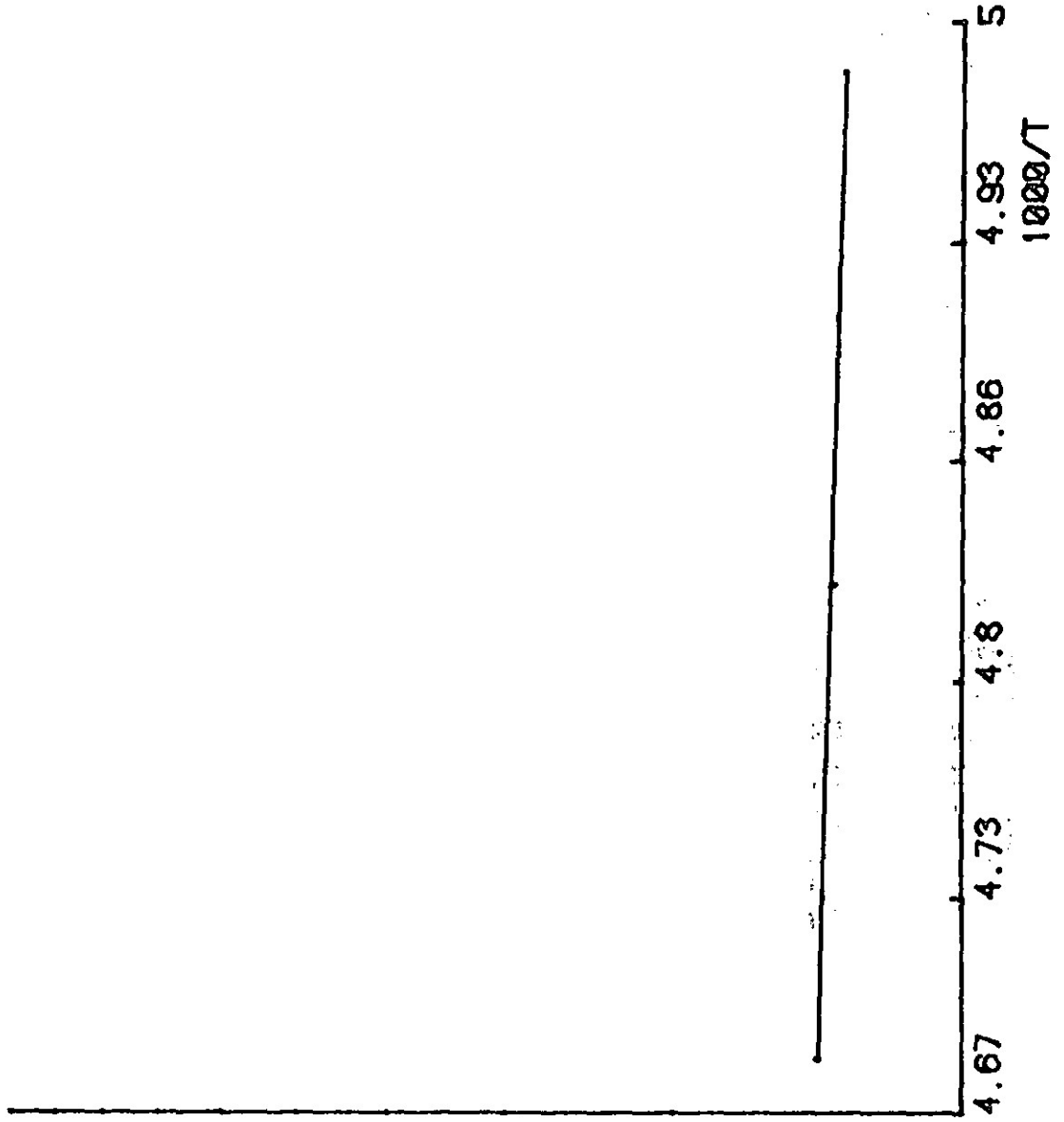


Fig. 2.16 Energía de ionización para un nivel en una muestra de ZnSe.

MUESTRA: ZnSe

$E(\text{act.}) = 35.47 \text{ meV.}$

RAPIDEZ DE EMISION TERMICA (s), (seg. ~ 1)

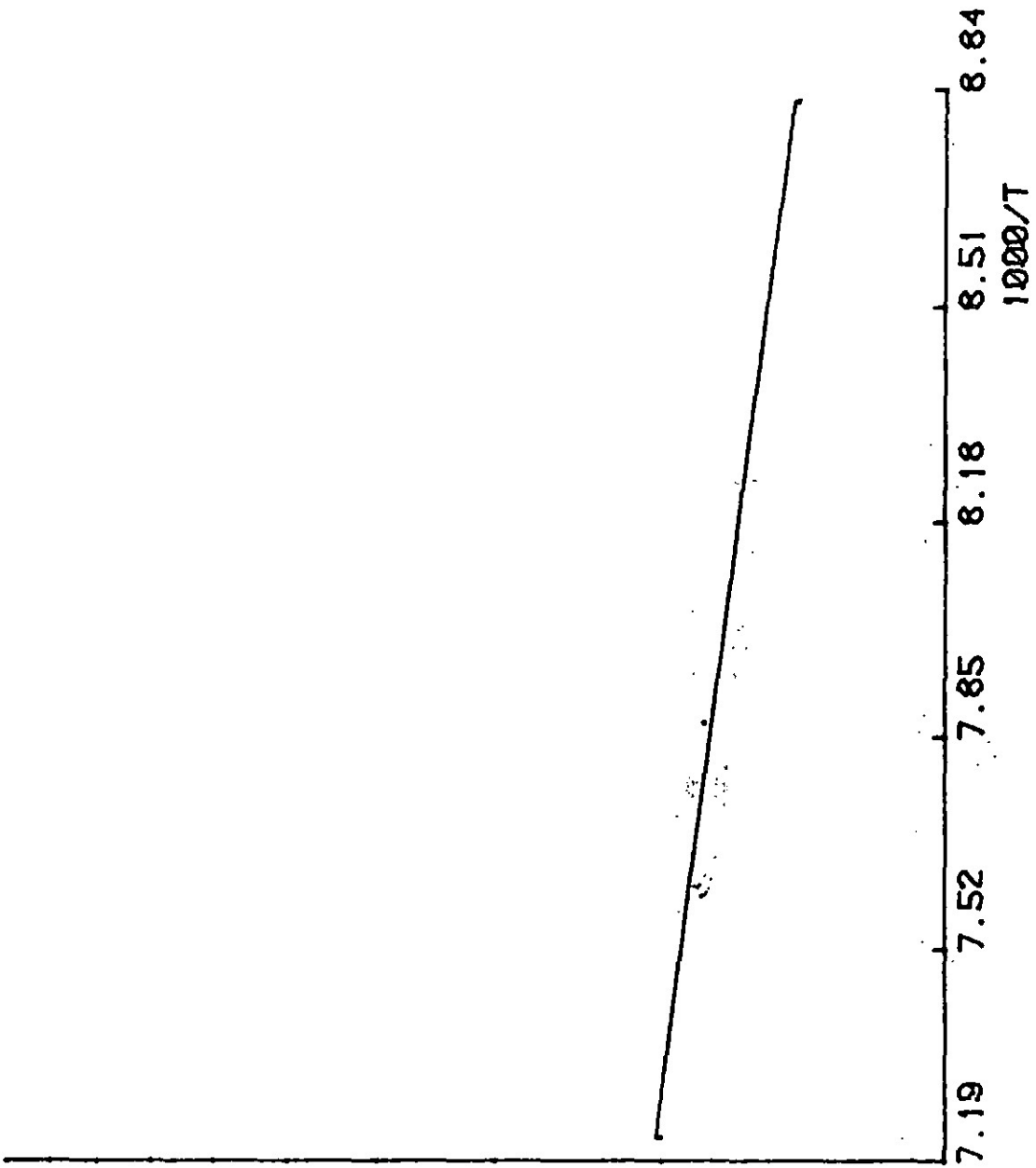


Fig. 2.17 Determinación de ΔE por la técnica de DLTS para ZnSe.

CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo, se ha implementado un sistema para la caracterización de niveles profundos en semiconductores por la técnica de Espectroscopía de Transitorios de Niveles Profundos (DLTS). El sistema implementado tiene ventajas considerables sobre los sistemas tradicionales de DLTS (los cuales emplean un amplificador "lock-in" o un integrador "boxcar" para la medición de la señal de DLTS), al eliminar el uso de estos dos instrumentos, midiendo directamente el transitorio de capacitancia de la muestra a estudiar, a diferentes temperaturas y almacenándolo en una cinta magnética para su posterior manipulación.

Las ventajas de nuestro sistema sobre los sistemas tradicionales, pueden resumirse como sigue:

- 1) Se emplean menos aparatos de medición
- 2) Representa un ahorro considerable en tiempo al requerirse solamente una medición del transitorio de capacitancia a cada temperatura, para obtener la energía de ionización y la concentración de cada trampa.

Además de lo anterior, se obtienen las ventajas que todo sistema computarizado representa: facilidad de operación, facilidad de manipulación de los datos experimentales y el almacenamiento de los mismos en cinta magnética.

Se llevaron a cabo mediciones sobre dos muestras prepara--

das en la forma de estructuras Schottky: una muestra de Silicio policristalino y una muestra de ZnSe. En el caso de la muestra de Si policristalino se detectaron tres niveles con energías de ionización de 360, 37 y 93 meV. En el caso de la muestra de ZnSe se detectaron dos niveles con energías de ionización de 56 y 35 meV.

Para el caso de la muestra de Silicio policristalino, los resultados experimentales concuerdan con buena aproximación, -- con resultados obtenidos anteriormente con la misma muestra utilizando un sistema experimental basado en un amplificador -- -- "lock-in".

REFERENCIAS

- 1.- Thermally Stimulated Capacity (TSCAP) in p-n junctions.
C.T. Sah, W.W. Chan, H.S. Fu y J.W. Walker
App. Phys. Lett., 20, (1972), 193.
- 2.- H. Kukimoto, C.H. Henry y F.R. Merritt.
Phys. Rev., B7, (1973), 2486.
- 3.- Deep Impurities in Semiconductors.
A.G. Milnes
Wiley, New York (1973).
- 4.- Photoconductivity of Solids.
R.H. Bube
Wiley, New York (1974).
- 5.- Capacitance Transient Spectroscopy.
G.L. Miller, D.V. Lang y L.C. Kimerling
Ann. Rev. Mater. Sci., 7, (1977), 377.
- 6.- Deep-level Transient Spectroscopy: A new method to
characterize traps in semiconductors.
D.V. Lang
J. Appl. Phys., 45, (1974), 3023.
- 7.- F. Rábago
Comunicación privada.

ANEXO 1

PROGRAMA DE COMPUTACION.

```

2 0=29
3 GO TO 100
4 REM *PERMITE CAMBIAR LOS PARAMETROS C - 1*
5 GO TO 200
8 REM *HACE LAS MEDICIONES*
9 GO TO 1200
12 REM *GRAFICA C - 1*
13 GO TO 1330
16 REM *LISTA LAS MEDICIONES C - 1*
17 GO TO 3200
20 REM *GRAFICA DEL PROMEDIO DE C - 1*
21 GO TO 3500
24 REM *PROGRAMA PARA GRABAR MEDICIONES DE C - 1*
25 GO TO 4000
28 REM *PROGRAMA PARA LEER DATOS*
29 GO TO 5000
32 REM *GRAFICA C(t2) - C(t1) contra TEMPERATURA*
33 GO TO 6300
36 REM *AJUSTE A RECTA DE LOS MAXIMOS DE C(t2) - C(t1)*
37 GO TO 6700
100 PRINT @0:"AKN"
110 PAGE
120 AB=1
130 VIEWPORT 30,120,10,80
140 PRINT *CAPACITANCIA DE COMPENSACION = *;
150 INPUT Q
160 PRINT *TIPO DE MUESTRA = *;
170 INPUT U$
180 PRINT "JJJJ" PISE TECLA 1 PARA CONTINUAR
190 END
200 REM *DA LA POSICION DE LOS PARAMETROS C - 1 Y PERMITE CAMBIARLOS*
210 PAGE
220 PRINT @0:"RS"
230 INPUT @0:A$,A1,A2,A3,A4,A5,A6,A7
240 PRINT *RS = *;A$
250 GOSUB 1900
260 PRINT "-----PROGRAMAR PARAMETROS C - 1-----"
270 PRINT
280 PRINT *Si desea conservar algun valor ; PRESTONE RETURN*
290 PRINT *J*;*SENSITIVIDAD (*;A1$*) = *;
300 INPUT M$
310 IF LEN(M$)=0 THEN 350
320 A1=VAL(M$)
330 J$="SS"
340 GOSUB 2300
350 PRINT *MULTIPLICADOR DE BANDA (*;A2$*) = *;
360 INPUT M$
370 IF LEN(M$)=0 THEN 590
380 A2=VAL(M$)
390 J$="SRM"
400 GOSUB 2300
590 PRINT *VALOR DEL SALTO (*;A3$*) # de 10 a 100 = *;
600 INPUT M$
610 IF LEN(M$)=0 THEN 650
620 AB=VAL(M$)
630 J$="STP"

```

```

640 GOSUB 2300
650 PRINT "TIEMPO TRANSITORIO (*B1* usec. * de 75 a 10000) = "
660 INPUT M$
670 IF LEN(M$)=0 THEN 710
680 B1=VAL(M$)
690 J$="TT "
700 GOSUB 2300
710 PRINT "BASE DEL PULSO (*A2*(1-B5/2000)* volts) = "
720 INPUT M$
730 IF LEN(M$)=0 THEN 890
740 B5=VAL(M$)
742 B5=INT(2000*(1-B5/A2))
744 M$=STR(B5)
750 J$="PB "
760 GOSUB 2300
890 PRINT "SALTO TRANSITORIO (*A2*(1-B2/2000)* volts) = "
900 INPUT M$
910 IF LEN(M$)=0 THEN 950
920 B2=VAL(M$)
925 B2=INT(2000*(1-B2/A2))
926 M$=STR(B2)
930 J$="TS "
940 GOSUB 2300
950 PRINT "JJ          PISE TECLA 2 PARA HACER LA MEDICION"
960 END
1200 REM"-----INICIALIZA Y HACE LA MEDICION-----"
1210 PAGE
1211 PRINT @0:"SEP 0"
1212 INPUT @0:J$
1213 A3=0
1214 PRINT @0:"SLF 3999"
1215 INPUT @0:J$
1216 A4=3999
1220 DELETE Y,I$
1230 I$="T"
1240 GOSUB 2320
1250 I$="NC"
1260 GOSUB 2320
1265 M=INT(ABS((A3-A4)/A8))
1270 DIM Y(400)
1271 PRINT "MEDICION No. ; "
1272 INPUT I$
1273 INPUT @14:T7
1275 PRINT "PAUSA ENTRE TRANSITORIOS (mseg. * de 1 a 32767) = "
1280 INPUT R
1285 FOR J=1 TO A8
1290 M$=STR(R)
1292 J$="P "
1300 GOSUB 2300
1302 I$="NC"
1304 GOSUB 2320
1305 I$="TR"
1310 GOSUB 2320
1315 I$="WCD"
1316 GOSUB 2320
1318 A3=A3+1
1319 M$=STR(A3)

```

```

1320 J$='SFP'
1321 GOSUB 2300
1322 NEXT J
1323 PRINT 'PRESIONE RETURN'
1324 INPUT M$
1325 INPUT @14:T9
1326 PRINT 'TEMP. INICIAL : 'T9,'TEMP. FINAL : 'T9
1327 PRINT 'JJJ PRESIONE : TECLA 3 PARA GRAFICA C - T'
1328 PRINT 'J          TECLA 4 PARA LISTAR MEDICIONES C - T'
1329 END
1330 REM '-----GRAFICA C - T-----'
1332 A3=0
1333 Y=0
1335 L=1
1340 FOR I=A3 TO A4-A8 STEP A8
1350 J$='DP'
1360 M$=STR(I)
1370 GOSUB 2300
1380 INPUT @0:Y3
1390 Y(L)=Y3
1400 L=L+1
1410 NEXT I
1420 I$='MIN'
1430 GOSUB 2320
1440 INPUT @0:X1,Y1
1450 I$='MAX'
1460 GOSUB 2320
1470 INPUT @0:X2,Y2
1480 X1=A3 MIN A4
1490 X2=A3 MAX A4
1500 D2=(Y2-Y1)/2
1510 GO TO 2510
1900 REM'----LECTURA DE PARAMETROS EN C - T'
1910 PRINT @0:'RTS'
1920 INPUT @0:A$,B1,B2
1930 PRINT @0:'RFS'
1940 INPUT @0:A$,B4,B3,B5
2000 REM'-----POSICION ACTUAL DE LOS PARAMETROS-----'
2010 PRINT '-----POSICION ACTUAL DE LOS PARAMETROS C - T-----'
2020 PRINT
2030 PRINT 'SENSITIVIDAD = 'A1
2040 PRINT 'MULTIPLICADOR DE RANEA = 'A2
2050 PRINT 'PRIMER PUNTO = 'A3
2060 PRINT 'ULTIMO PUNTO = 'A4
2140 PRINT 'VALOR DEL SALTO = 'A8
2170 PRINT 'TIEMPO TRANSITORIO = 'B1:' uses.'
2180 PRINT 'BASE DEL PULSO = 'A2*(1-B5/2000):' volts'
2210 PRINT 'SALTO TRANSITORIO = 'A2*(1-B2/2000):' volts'
2230 RETURN
2300 REM'-----ENVIA COMANDOS-----'
2310 I$=J$&M$
2320 PRINT @0:I$
2330 INPUT @0:J$
2340 RETURN
2510 GOSUB 3000
2530 PAGE
2550 WINDOW X1,X2,Y1,Y2

```

```

2560 D1=(X2-X1)/5
2590 AXIS @B0:D1,D2,X1,Y1
2600 L=1
2610 FOR I=A3 TO A4-A8 STEP A8
2620 MOVE @B0:I,Y(L)
2630 DRAW @B0:I,Y(L)
2640 L=L+1
2650 NEXT I
2660 GOSUB 2670
2665 GO TO 2880
2670 REM "-----SUBROUTINA LETREROS-----"
2675 R$="CAPACITANCIA"
2680 S$=" (Pf)"
2690 T$="TIEMPO (mseg.)"
2700 MOVE @B0:X1-700,Y1
2710 PRINT @B0:Y1*A1/4000+Q
2720 IF D2=0 THEN 2762
2730 FOR I=1 TO INT((Y2-Y1)/D2)
2740 MOVE @B0:X1-700,Y1+I*D2
2750 PRINT @B0:(Y1+I*D2)*A1/4000+Q
2760 NEXT I
2762 FOR K=0 TO 5
2763 MOVE @B0:D1*K,Y1
2764 PRINT @B0:"J";(450+R1+(450+(M-1)*R1-(450+R1))/5*K)*A1/4000+Q
2765 NEXT K
2770 IF D2<>0 THEN 2800
2780 MOVE @B0:X1-700,Y2
2790 PRINT @B0:Y2*A1/4000+Q
2800 HOME @B0:
2810 PRINT @B0:"JJJJJJJJ";R$
2820 PRINT @B0:"J";S$
2830 MOVE @B0:X2-700,Y1
2840 PRINT @B0:"JJ";T$
2850 HOME @B0:
2860 PRINT @B0:"IIIIIIIIII" Tipo de Muestra: "U$
2862 HOME @B0:
2863 T=INT(((T7+T9)/2*0.01+10.416128469)/0.40529918336*100)/100
2864 PRINT @B0:"IIIIIIIIII" Temperatura (abs.) = "T
2870 RETURN
2880 A3=1
2890 FOR J=1 TO A8-1
2895 L=1
2910 FOR I=A3 TO A4-A8 STEP A8
2920 J$="DF"
2930 M$=STR(I)
2940 GOSUB 2300
2950 INPUT @0:Y3
2960 Y(L)=Y3+Y(L)
2970 MOVE @B0:I,Y3
2980 DRAW @B0:I,Y3
2990 L=L+1
2991 NEXT I
2992 A3=A3+1
2993 NEXT J
2994 END
3000 REM*PERMITE GRAFICAR EN LA PANTALLA O EN EL GRAFICADOR*
3010 PAGE

```

```

3020 PRINT "GRAFICADOR ? (SI,NO) ";
3030 INPUT C$
3040 IF C$="SI" THEN 3070
3050 B0=32
3060 GO TO 3080
3070 B0=1
3080 RETURN
3100 PRINT "CON QUE SIMBOLO DESEA GRAFICAR ? : ";
3110 INPUT B$
3120 PRINT "DESEA LOS MISMOS EJES ? (SI,NO) : ";
3130 INPUT C$
3140 RETURN
3200 REM*LISTA LAS MEDICIONES C - T*
3210 PAGE
3220 DELETE G
3230 DIM G(M),Y(M)
3250 A3=0
3260 FOR J=1 TO A8
3265 L=1
3270 N=0
3280 Y=0
3290 G=0
3300 FOR I=A3 TO A4-A8 STEP A8
3310 J$="DF "
3320 M$=STR(I)
3330 GOSUB 2300
3340 INPUT @0:Y3
3350 Y(L)=Y3*A1/4000+Q
3360 G(L)=450+N*B1
3370 PRINT "C = ";Y(L); " P", "T = ";G(L); " used."
3380 L=L+1
3390 N=N+1
3400 NEXT I
3410 A3=A3+1
3420 NEXT J
3430 END
3500 REM*GRAFICA DEL PROMEDIO DE LAS BARRIDAS DE C - T*
3510 GOSUB 3000
3520 GOSUB 3100
3530 PAGE
3540 IF C$="SI" THEN 3575
3550 WINDOW X1,X2,Y1,Y2
3560 AXIS @B0:D1,D2,X1,Y1
3575 A3=0
3576 L=1
3580 FOR I=A3 TO A4-A8 STEP A8
3590 MOVE @B0:I,Y(L)/A8
3600 PRINT @B0:B$
3610 L=L+1
3620 NEXT I
3630 IF C$="SI" THEN 3650
3640 GOSUB 2670
3650 END
4000 REM *PROGRAMA PARA GRABAR MEDICIONES L - L*
4010 PAGE
4160 D$="*"
4170 T1=450

```

```

4180 T2=450+(M-1)*R1
4190 T3=A1/4000
4200 T4=A2*(1-B5/2000)
4210 T5=A2*(1-B2/2000)
4220 L$="**"
4230 FIND 11
4240 FOR I=1 TO 4
4250 READ @33:F$
4260 NEXT I
4270 READ @33:H$
4280 PRINT H$
4290 IF T8>1 THEN 4390
4300 WRITE "TIEMPO INICIAL",T1
4310 WRITE "TIEMPO FINAL",T2
4320 WRITE "INTERVALO DE TIEMPO",R1
4330 WRITE "FACTOR DE CONVERSION A CAPACITANCIA",L3
4340 WRITE "# DE BARRIDAS PROMEDIADAS",A8
4350 WRITE "BASE DEL PULSO",T4
4360 WRITE "ALTURA DEL PULSO",T5
4362 WRITE "CAPACITANCIA DE COMPENSACION",N
4364 WRITE "TIPO DE MUESTRA",H$
4370 WRITE L$
4380 GO TO 4505
4390 FOR I=1 TO 8
4400 READ @33:P$,Z
4410 NEXT I
4415 READ @33:P$,K$
4420 READ @33:E$
4430 PRINT E$
4440 FOR J=2 TO T8
4445 DELETE X,W
4446 DIM X(220)
4450 FOR I=1 TO 201
4460 READ @33:X(I)
4470 NEXT I
4480 READ @33:W,E$
4490 PRINT W;E$
4500 NEXT J
4505 GOSUB 4600
4506 T7=(T7+T9)/2
4510 WRITE T7
4520 FOR I=1 TO 200
4525 Y(I)=INT(Y(I)/A8*10)/10
4530 WRITE Y(I)
4540 NEXT I
4550 WRITE T8,D$
4560 PRINT "ESTAN GRABADOS LOS DATOS DE LA MEDICION NO. : ";T8
4590 CLOSE
4595 END
4600 PRINT "J SE VAN A GRABAR LOS DATOS DE LA MEDICION No. ";T8
4610 PRINT "J PRESIONE RETURN";
4620 INPUT M$
4630 IF LEN(M$)=0 THEN 4650
4640 END
4650 RETURN
5000 REM "PROGRAMA PARA LEER LOS DATOS GRABADOS EN LA FICHA 11"
5010 REM "DEL CASSETTE 'BIBLIOTECA'"

```



```

5015 DELETE T,W
5020 PAGE
5030 FIND 11
5040 FOR I=1 TO 5
5050 READ @33:P$,F$
5060 PRINT "          " ;F$
5070 NEXT I
5080 PRINT
5090 FOR I=1 TO 3
5100 READ @33:P$,W
5110 PRINT P$;" = ";W;" uses,"
5115 W=W*1.0E-3
5120 PRINT
5130 NEXT I
5140 READ @33:P$,N
5150 PRINT P$;" = ";N
5155 PRINT
5160 READ @33:P$,M
5170 PRINT P$;" = ";M
5180 PRINT
5190 FOR I=1 TO 2
5200 READ @33:P$,B
5210 PRINT P$;" = ";B;" volts"
5220 PRINT
5230 NEXT I
5240 READ @33:P$,B
5250 PRINT P$;" = ";B;" picofaradios"
5260 PRINT
5270 READ @33:Q$,U$
5280 PRINT Q$;" : ";U$
5290 PRINT
5300 READ @33:F$
5310 PRINT F$
5320 PRINT
5322 PRINT "t1(msec.) = ";
5323 INPUT G1
5324 PRINT "t2(msec.) = ";
5325 INPUT G2
5326 DELETE X,H,F
5330 FOR J=1 TO 29
5335 DIM X(400),F(29),H(29)
5340 PRINT
5350 READ @33:T
5360 PRINT "TEMPERATURA ABSOLUTA = ";(T*0.01+10.416128469)/0.4052991837
5370 PRINT
5380 FOR I=1 TO 200
5390 READ @33:X(I)
5410 NEXT I
5411 A=INT((G1-0.45)/W)+1
5412 PRINT "C(t1) = ";X(A)*N
5413 B=INT((G2-0.45)/W)+1
5414 PRINT "C(t2) = ";X(B)*N,"C(t2) - C(t1) = ";(X(B)-X(A))*N
5415 F(J)=ABS((X(B)-X(A))*N)
5420 PRINT
5430 READ @33:C,A$
5440 PRINT C;" " ;A$
5450 PRINT

```

```

5455 H(J)=INT((T*0.01+10.416128469)/0.40529918336*100)/100
5460 NEXT J
5465 END
6300 REM*GRAFICA C(t2) - C(t1) contra TEMPERATURA*
6310 PAGE
6320 GOSUR 3000
6330 GOSUB 3100
6335 PAGE
6336 IF C#="SI" THEN 6370
6340 VIEWPORT 30,120,10,80
6350 WINDOW 90,310,0,3
6360 AXIS @B0:20,0,5,90,0
6370 DIM F(29),H(29)
6380 FOR I=1 TO 29
6390 MOVE @B0:H(I),F(I)
6400 PRINT @B0:B#
6410 NEXT I
6415 IF C#="SI" THEN 6587
6420 MOVE @B0:90,0
6430 PRINT @B0:"J";90
6440 FOR J=1 TO 11
6450 RMOVE @B0:20,0
6460 PRINT @B0:"J";J*20+90
6470 NEXT J
6480 MOVE @B0:220,0
6490 PRINT @B0:"JJ TEMPERATURA (abs.)"
6500 MOVE @B0:70,0
6510 PRINT @B0:0
6520 FOR I=1 TO 3
6530 MOVE @B0:70,1*I
6540 PRINT @B0:1*I
6550 NEXT I
6560 MOVE @B0:30,2,7
6570 PRINT @B0:"C(t2) - C(t1)"
6575 PRINT @B0:"JJ";" (Pf)"
6580 HOME @B0:
6582 PRINT @B0:"IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII MUESTRA DE: ZnSe"
6583 HOME @B0:
6584 PRINT @B0:"IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII";
6586 PRINT @B0:"IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII t1/t2 (mses.)"
6587 HOME @B0:
6588 PRINT @B0:"IIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIIII";
6590 PRINT @B0:"IIIIIIIIIIIIIIIIIIII";B#;" ";616;"/";660
6600 END
6700 GO TO 6720
6710 GO TO 6940
6720 REM "AJUSTE A RECTA"
6730 PAGE
6740 PRINT "NUMERO DE PUNTOS = ";
6750 INPUT F
6760 DELETE I,W,Z
6770 DELETE A,B,C
6780 DELETE D,M,N
6790 DIM W(F),Z(F),I(F)
6800 FOR I=1 TO F
6810 PRINT "T(;"I;") = ";
6820 INPUT I(I)

```


7400 F1=F1+X(I)/P
7410 F2=F2+Y(I)/P
7420 F3=F3+X(I)*Y(I)/P
7430 F4=F4+X(I)**2/P
7440 NEXT I
7450 M=(F1*F2-F3)/(F1**2-F4)
7460 IF D=2 THEN 7590
7470 N=F2-M*F1
7480 FOR J=X(1) TO X(P) STEP (X(P)-X(1))/4/P
7490 C=M*J+N
7500 IF J<>X(1) THEN 7520
7510 MOVE @R0:J,C
7520 DRAW @B0:J,C
7530 NEXT J
7540 FOR I=1 TO P
7550 Y(I)=LOG(Y(I))
7560 NEXT I
7570 D=2
7580 GO TO 7350
7590 RETURN

EX LIBRIS



SISTEMA DE
BIBLIOTECAS
U.A.S.L.P.

No. DE REG.