

**CONDUCTIVIDAD TERMICAMENTE ESTIMULADA (CTE) EN UNA PELICULA
POLICRISTALINA DE CdTe**

R. Ramírez Bon,* F. J. Espinoza Beltrán,* H. Arizpe Chavez,* F. Sánchez
Sinencio** y O. Zelaya Angel**

* Centro de Investigación en Física. Universidad de Sonora
Apartado Postal 5-88, 83190 Hermosillo, Sonora

** Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
Apartado Postal 14-740, 07000 México, D.F.

Se estudian las características de las trampas de portadores eléctricos mediante la técnica de CTE en una película delgada policristalina de CdTe, crecida por transporte de vapor en espacio reducido (CSVT). Ajustando las curvas experimentales con el modelo de Dussel-Bube se determinan las energías de activación de los niveles de trampas observados.

INTRODUCCION

El atrapamiento de carga es un fenómeno que aparece en la mayor parte de los cristales, debido a sus imperfecciones e impurezas. Para estudiar las características de este atrapamiento se han implementado distintas técnicas experimentales entre las que destacan la CTE. Esta técnica consiste en el llenado de trampas mediante excitación con luz (o algún otro tipo de energía) a una temperatura suficientemente baja, en la cual la energía térmica de los portadores no es suficiente para que se liberen. En otras palabras, al bajar la temperatura el nivel de Fermi se acerca a la banda de conducción, dejando debajo los niveles de trampas que son llenados por la fotoexcitación. Al elevarse la temperatura (y bajar el nivel de Fermi), los portadores de carga son liberados a la banda de conducción contribuyendo a la conductividad hasta que son reatrapados o se recombinan con el portador de signo opuesto. De esta manera, durante el calentamiento del cristal aparece una corriente que en un cristal sin fotoexcitar no ocurre (Fig. 3). La conductividad medida al calentar el cristal previamente fotoexcitado es llamada conductividad térmicamente estimulada. En este trabajo aplicamos esta técnica para determinar los niveles de trampas en una película policristalina de CdTe. Encontramos tres niveles de trampas, dos de ellos han sido encontrados mediante la misma técnica en CdTe monocristalino, y en nuestro caso el tercero podría ser debido a los efectos de las fronteras de grano.

TEORIA

Los parámetros principales del atrapamiento de carga son la profundidad de los niveles de trampas respecto a la banda de conducción, su densidad y sección de captura. El cálculo de estos parámetros a partir de las curvas de CTE

puede hacerse mediante un modelo teórico ampliamente aceptado que es el de Dussel y Bube [1].

Este modelo, en su forma más simple, propone un nivel de trampas para electrones además de un centro de recombinación y un nivel de trampas profundas (Fig. 1). Las ecuaciones que describen la dinámica de la densidad de portadores son:

$$\dot{n} = -n_t - \gamma n p \quad (1)$$

$$\dot{n}_t = \beta n (N_t - n_t) - n_t \beta N_c \exp(-E_t/kT) \quad (2)$$

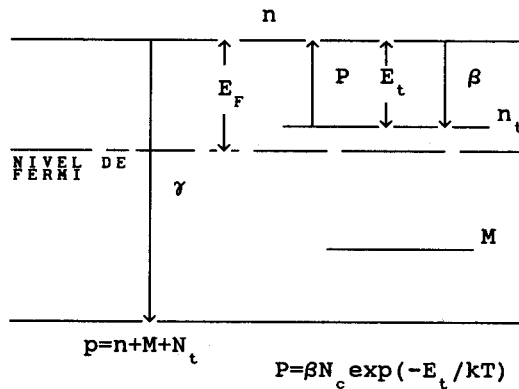


Fig. 1 : Diagrama de niveles de energía en el modelo de Dussel-Bube.

en donde:

- n : densidad de electrones en la banda de conducción.
- p : densidad de huecos en la banda de valencia.
- N_t : densidad de trampas de profundidad E_t .

- n_t : densidad de electrones en la trampa E_t .
- M : densidad de electrones en trampas profundas.
- N_c : densidad efectiva de estados en la banda de conducción.
- γ : probabilidad de recombinación.
- β : probabilidad de atrapamiento.

Las ecuaciones (1) y (2) describen los procesos de emisión térmica ($\beta n_t N_c \exp(-E_t/kT)$), reatrapamiento ($\beta n (N_t - n_t)$) y recombinación ($\gamma n p$), simultáneamente.

Una vez llena la trampa, durante el proceso de calentamiento de la muestra, el efecto de CTE se observa cuando los portadores atrapados comienzan a liberarse. En esta etapa la emisión térmica domina al atrapamiento y recombinación, haciéndolos despreciables, de manera que (1) y (2) pueden expresarse como:

$$\dot{n} = -n_t \quad (3)$$

$$\dot{n}_t = -n_t \beta N_c \exp(-E_t/kT) \quad (4)$$

sustituyendo (4) en (3),

$$\dot{n} = \beta n_t N_c \exp(-E_t/kT) \quad (5)$$

usando la regla de la cadena para expresar (5) en términos de la variación de la temperatura,

$$\dot{n} = T \frac{dn}{dT} = \beta n_t N_c \exp(-E_t/kT) \quad (6)$$

Para integrar esta ecuación consideraremos una región de temperaturas en el inicio del desatrapamiento en la cual n_t aún no se ve afectada y la podemos suponer constante. También supondremos una razón de calentamiento constante,

$T = C$. Con ésto, integrando (6) se obtiene:

$$n = \beta n_t N_c k T^2 / C E_t \exp(-E_t / k T) \quad (7)$$

y finalmente, considerando que el término exponencial en la temperatura domina sobre el cuadrático, la ecuación (8) se reduce a,

$$n = A \exp(-E_t / k T) \quad (8)$$

donde A es una constante. De aquí que graficando $\ln n$ vs. $1/kT$ obtenemos E_t , a través de la pendiente de la recta. A este método se le conoce como "método de subida inicial". Como veremos en la parte experimental, la ecuación (8) ajusta muy bien los datos experimentales en una pequeña región de temperaturas por lo que es de suponer que todas las consideraciones hechas para llegar a ella son cumplidas en esta región.

Al aumentar más la temperatura, las trampas comienzan a reatrapar carga al mismo tiempo que

la recombinación aumenta. Se observa entonces que la razón de crecimiento de n disminuye a cero y después se hace negativa con la consecuente caída de la corriente. De esta manera se ha definido un pico de CTE. Con el método de la subida inicial se calcula uno de los parámetros involucrados en la solución de (1) y (2), pero, en general no es posible determinarlos todos usando solo información de CTE, sino que es necesario hacer experimentos adicionales, tales como luminiscencia térmicamente estimulada [2], o en su defecto dar estimaciones de algunos parámetros y determinar el resto resolviendo numéricamente (1) y (2).

EXPERIMENTO

El arreglo experimental se muestra en la Fig. 2. La muestra es una película policristalina de CdTe de 1.5 cm^2 de área por 30 micras de espesor, crecida mediante la técnica de CSVT. El tamaño promedio de los granos que forman la película es de 20 micras, medido por microscopía electrónica de barrido. Esta se coloca en el dedo frío de un criostato de nitrógeno líquido el cual es evacuado hasta una presión de 10^{-4} torr. El llenado de las trampas se hace iluminando la muestra con una lámpara de tungsteno a una temperatura cercana a la de nitrógeno líquido. Para evitar el calentamiento de la muestra, la luz de la lámpara es filtrada a través de una solución de sulfato de cobre con agua destilada. El voltaje se aplica sobre contactos evaporados de indio de 1 mm de ancho y separados 1 cm. Para asegurar que estos contactos tuvieran un comportamiento ohmico, se les dió un tratamiento térmico durante dos horas a 150°C en una atmósfera de 98% de Nitrógeno y 2% de Hidrógeno. Mediciones en varios ordenes de magnitud de corriente contra voltaje a través de estos contactos mostraron su ohmicidad. El calentamiento de la muestra se realiza por contacto térmico con un resistor conectado a un

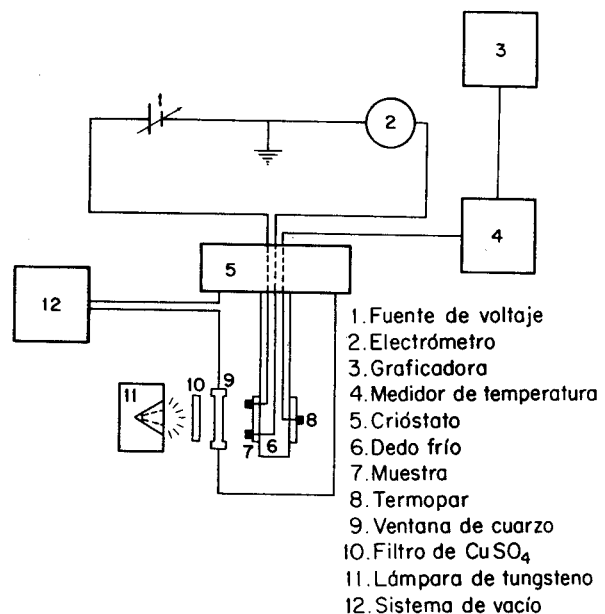


Fig. 2 : Arreglo experimental de la técnica de CTE.

variac para poder disponer de distintas razones de calentamiento. La temperatura es medida con un termopar de cobre-constantan.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Fig. 3 se muestra la curva I vs. T de la película sin fotoexcitación previa.

En esta gráfica se aprecia solo la contribución intrínseca a la conductividad. La Fig. 4 muestra los picos de CTE de la muestra. Esta curva, al igual que las que se muestran más adelante, se obtuvo fotoexcitando durante 5 min., aplicando 1 V. de voltaje y con una razón de calentamiento de 0.5 K/seg. En ésta se observan tres picos A, B y C, además de la parte intrínseca I. Las temperaturas de los picos son 133, 153 y 188 K respectivamente.

La energía de activación de la trampa asociada al pico A se obtiene inmediatamente ajustando la subida inicial a una exponencial, como se muestra en la Fig. 7a. El ajuste da un valor $E_A = 0.18\text{eV}$.

Como el espectro de CTE de esta muestra consiste de tres picos superpuestos, es necesario aislarlos mediante una "limpieza térmica". Esta limpieza consiste en calentar la muestra, una vez fotoexcitado el cristal, hasta una temperatura en la cual se han liberado los portadores de la trampa (o trampas) que produce el pico (los picos) que se quiere desaparecer del espectro de CTE. Con esto, al volver a enfriar la muestra y calentar en lo oscuro, la contribución a la corriente será solo por parte de los portadores que se encuentran en las trampas asociadas con los picos de mayor temperatura que a la que se había calentado previamente.

La Fig. 5 muestra el espectro de CTE en donde se ha eliminado el pico A. Esta gráfica se obtuvo calentando previamente hasta 143 K. Ajustando la subida inicial de esta gráfica (Fig. 7b), obtenemos la profundidad de la trampa asociada al pico B, $E_B = 0.29\text{eV}$. Calentando previamente hasta 163 K se logra eliminar los picos A y B, aislando el pico C como se observa en la Fig. 6. La profundidad de esta trampa es 0.32 eV como lo muestra el ajuste en la Fig. 7c.

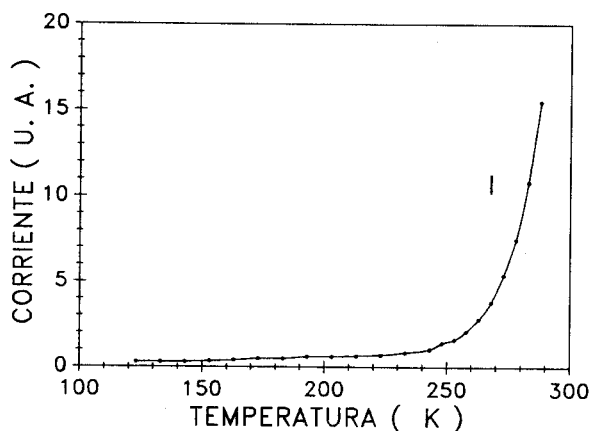


Fig. 3 : Gráfica de I vs. T de la muestra sin fotoexcitar previamente.

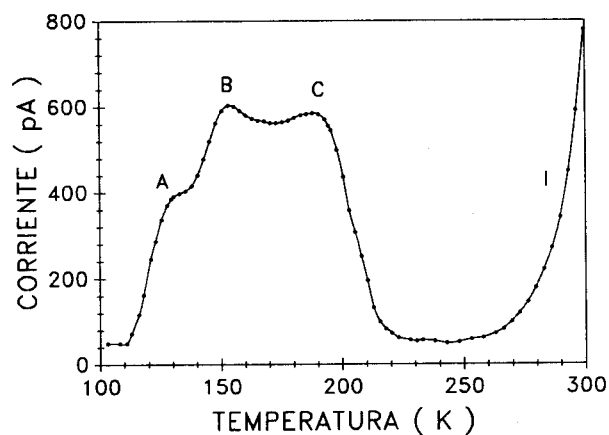


Fig. 4 : Espectro de CTE obtenido fotoexcitando durante 5 min., aplicando 1 V. y con una razón de calentamiento de 0.5 K/seg.

Mediante CTE se han determinado niveles de energía de trampas, tanto de electrones como de huecos, dentro de la banda de energías prohibidas de CdTe monocristalino. El origen físico de estas trampas ha sido determinado para algunas de ellas, pero para otras se desconoce completamente [3,4,5,6,7,8]. La trampa asociada con el pico A, con energía de activación de 0.18 eV, ha sido identificada como una trampa de huecos, aunque su origen no ha sido determinado [6,7,8]. La trampa con energía de activación de 0.29eV la podemos relacionar con el nivel en 0.3 eV asociado con huecos atrapados en impurezas localizadas en sitios de Cd [6,7]. Una trampa localizada en 0.33 eV ha sido observada por Cotal et al. en CdTe:Mn [8], pero sin identificación. Todas las mediciones citadas fueron realizadas en monocristales. Con las medidas de CTE realizadas en nuestra película no podemos determinar si la trampa en 0.32 eV representa una trampa para electrones o huecos, ubicada en las fronteras de grano, posiblemente sea el mismo nivel observado en CdTe:Mn en 0.33eV. Los niveles de trampas

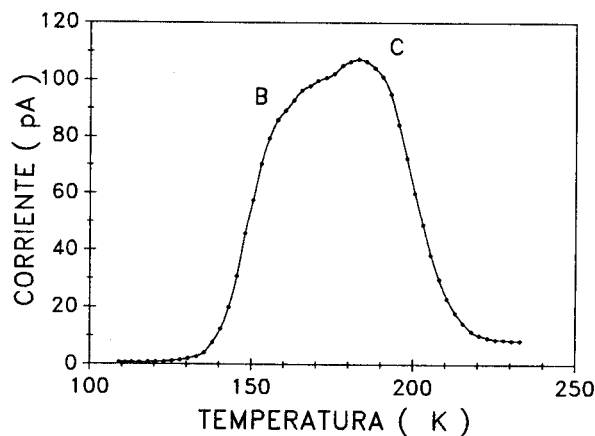


Fig. 5 : Espectro de CTE en donde se han limpiado los picos B y C. Se obtuvo fotoexcitando durante 5 min., aplicando 1 V, calentando a razón de 0.5 K y calentando previamente hasta 143 K.

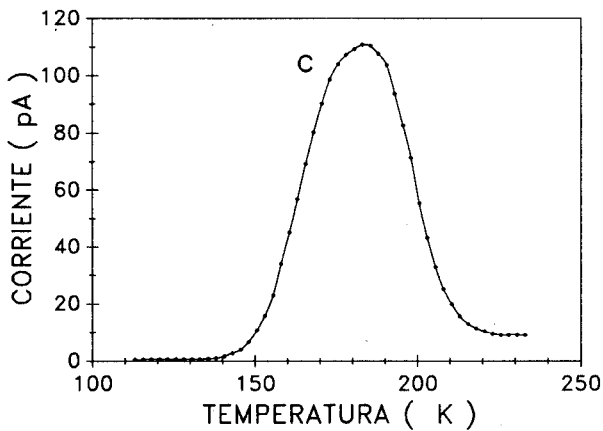


FIG. 6 : Espectro de CTE en donde por limpieza térmica se ha aislado al pico C. Se obtuvo fotoexcitando durante 5 min., aplicando 1 V, calentando a razón de 0.5 K/seg y subiendo la temperatura previamente hasta 163 K.

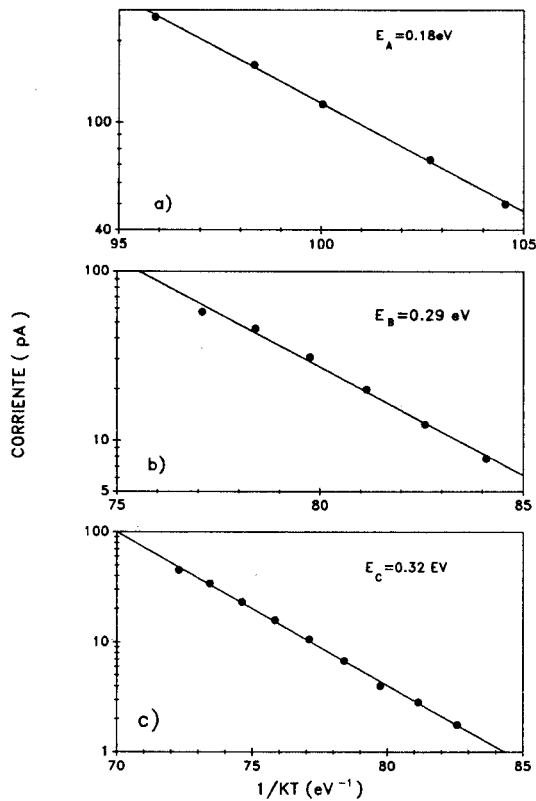


Fig. 7 : Gráficas semi-log de las subidas iniciales a) del pico A (Fig.4); b) del pico B (Fig. 5) y c) del pico C (Fig. 6). Las pendientes de las rectas tienen los valores $E_A = 0.18$ eV, $E_B = 0.29$ eV y $E_C = 0.32$ eV respectivamente.

asociados con los picos A, B y C se encuentran a una mayor profundidad que los detectados, en este mismo tipo de película, mediante la técnica de fotoluminiscencia [9]. En el caso particular de esta película, su espectro de fotoluminiscencia muestra una banda asociada con vacancias de cadmio centrada en 1.54 eV y una banda ancha asociada con defectos centrada en 1.46 eV aparece con baja intensidad, además la emisión asociada con el excitón es bastante intensa. De acuerdo a otros autores, estas dos últimas características del espectro de emisión nos aseguran que la película es de buena calidad cristalina, con relativamente pocos defecto [10, 11].

En conclusión, usando la técnica de CTE y aplicando el modelo de Dussel y Bube hemos encontrado los niveles de energía de tres tipos de trampas de portadores observadas en una película policristalina de CdTe. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla I.

TABLA I

PICO	T_p (°K)	E_t (eV)
A	133	0.18
B	153	0.29
C	188	0.32

REFERENCIAS

- [1] G. A. Dussel y R. H. Bube Phys. Rev. B (1967) 155, 3764.
- [2] P. Kelly, M. J. Laubitz y P. Braunlich, Phys. Rev. B, (1971), 4, 6, 1960.
- [3] E.N. Arkad'eva, Soviet Phys. Semicon., 4, 798 (1964).
- [4] N.V. Agrinaskaya, E.N. Arkad'eva, O.A. Matveev, y Yu. V. Rud', Soviet Phys. Semicond., 2, 776 (1969).
- [5] C.E. Barnes y K.R. Zanio, J. Appl. Phys., 46, 3959 (1975).
- [6] G.M. Martin, E. Fabre y E. Fogarassy, J. Appl. Phys., 47, 264 (1976).
- [7] G.M. Martin, E. Fabre, E. Fogarassy, C. Belin y Ngo-Tich-Phuoc IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-23, 154 (1976).
- [8] H.L. Cotal, A.C. Lewandosky, B.G. Markey, S.W.S. McKeever, E. Cantwell y J. Alridge, J. Appl. Phys., 67, 975 (1990).
- [9] J. M. Figueroa, F. Sánchez-Sinencio, J.G. Mendoza-Alvarez, O. Zelaya, G. Contreras-Puente y A. Díaz-Góngora, J. Crystal Growth, 106, 651 (1990).
- [10] R.N. Bicknell, T.H. Myers, y J.F. Schetzina, J. Vacuum Technol., A2, 423 (1984).
- [11] J.G. Mendoza-Alvarez, J. Gonzalez-Hernandez, F. Sanchez-Sinencio, O. Zelaya y S.S. Chao, J. Cryst. Growth, 86, 391 (1988).