

Epitaxia de semiconductores por la técnica de transporte en fase vapor a corta distancia: teoría básica general y resultados experimentales para GaAs

J. Mimila-Arroyo. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del I.P.N.
Dpto. de Ingeniería Eléctrica, México

RESUMEN

En este trabajo se revisan detalladamente los principios básicos de la técnica de epitaxia de semiconductores por transporte en fase vapor a corta distancia, sus ventajas y desventajas, la teoría general para el transporte de masa que en ella ocurre y los resultados experimentales obtenidos en algunos semiconductores mismos que han permitido obtener en forma muy sencilla dispositivos como transistores MES FET, uniones P-N, celdas solares y otros. Se discuten también las perspectivas de la técnica.

ABSTRACT

In this work a detailed review of the fundamentals on which the Close Spaced Vapor Transport (CSVT) technic is based is presented. As well as some of the advantages that it has over the classical technics. The general theory for its mass transport kinetics. And experimental results obtained on several semiconductors on: growth rate, electrical, optical and deep levels obtained on CSVT materials. Which have permitted to realize on an easy way electronic devices as Field-Effect Transistors, diodes, solar cells and others. The perspectives of the technic are also discussed.

INTRODUCCIÓN

Tanto en las actividades de investigación como en las de procesamiento industrial de materiales, estructuras y dispositivos semiconductores, las técnicas de crecimiento epitaxial de películas semiconductoras son indispensables. En general estas películas desempeñan una gran variedad de funciones que pueden ir desde películas de transición relativamente pasivas hasta películas activas eléctricas u ópticamente o bien realizar otras funciones, según la tarea específica que deben satisfacer. Así, para ser útil, una técnica de crecimiento epitaxial debe permitir un buen control, al menos de los siguientes aspectos del proceso mismo de epitaxia: razón de crecimiento, espesor, calidad cristalina y morfología superficial de las películas, así como una razonable homogeneidad de las diferentes propiedades de la película, a través de toda ésta. Al mismo tiempo, una técnica de crecimiento epitaxial debe también asegurar un buen control sobre las propiedades físicas de las películas que son determinantes para el buen funcionamiento de la estructura o dispositivo electrónico del que forman parte, tales como: el transporte de carga a través de portadores y minoritarios, longitud de difusión y tiempo de vida de minoritarios, propiedades de foto y electroluminiscencia y otras que a menudo son impuestas o gobernadas por los defectos puntuales que pueda tener la película. Una técnica de epitaxia debe también poder ofrecer la posibilidad de obtener material de alta pureza así como de ambos tipos de conductividad N y P en un amplio rango de valores, esto mediante la incorporación controlada de impurezas o defectos apropiados durante el crecimiento del material. Dado que el proceso de epitaxia se utiliza para realizar estructuras de complejidad variable que comúnmente incluyen varias películas de propiedades muy diferentes, se requiere que las interfaces entre esas películas sean abruptas y libres de defectos de toda naturaleza.

Actualmente hay varias técnicas de epitaxia que consiguen satisfacer hasta cierto punto la mayoría de los requerimientos anteriores, las más utilizadas y mejor conocidas son las de epitaxia en fase: líquida, vapor y haces moleculares. La elección de la mejor técnica para la solución de un problema particular depende del problema mismo, por ejemplo, en las actividades de investigación se requiere de un sistema de crecimiento con una gran flexibilidad, mientras que el trabajo rutinario típico de una línea de producción, requiere de un sistema más rígido y robusto. Sin embargo, todas las técnicas mencionadas, aún en sus esquemas de funcionamiento más simples tienen una característica común: el altísimo costo del equipo requerido para implementarlas y el de los materiales necesarios para su operación, así como el frecuente manejo de materiales peligrosos. En realidad, es frecuente que las etapas de epitaxia requeridas en algún dispositivo sean relativamente sencillas, en estos casos es deseable evitar el

uso de técnicas y equipos de epitaxia demasiado sofisticados, por lo que es interesante explorar otras técnicas menos complicadas más económicas que las ahora comunes, tal como la técnica de epitaxia por transporte en fase vapor a corta distancia (CSVT).

En la técnica de CSVT el material crecido epitaxialmente se toma de una fuente sólida colocada muy cerca del sustrato y se transporta mediante un gas, haciendo intervenir al menos una reacción química en la superficie de la fuente y otra en la del sustrato. Por lo que la técnica requiere como insumos de operación únicamente: el sustrato, una fuente del material semiconductor que se desea epitaxiar en forma sólida, (puede ser polvo o material policristalino), un gas transportador de masa [H_2O , HCl , $I_2 \dots$] y un gas vector [H_2 , N_2 , Ar , \dots] y como equipo una cámara hermética adecuada para trabajar a temperaturas medias a presión atmosférica, que pueda contener dos calentadores independientes y finalmente los controles de temperatura.

La técnica consiste en colocar los materiales que constituyen el sustrato y el material fuente frente a frente, separados por una pequeña distancia. El espacio entre ellos se llena con una mezcla de los gases transportador y vector, para que el transporte de masa tenga lugar se calientan ambos materiales simultáneamente pero a temperaturas diferentes, aquí, el gas transportador reacciona con los materiales fuente y sustrato produciendo compuestos volátiles, los cuáles establecen respectivas presiones parciales de equilibrio sobre cada una de esas superficies. Los valores de esas presiones parciales en las superficies de los materiales fuente y sustrato son función de sus respectivas temperaturas, considerando que todo otro parámetro experimental es el mismo para ambas superficies, dado que sus temperaturas son diferentes, aparece un gradiente de los productos de la reacción, dando lugar a una difusión gaseosa de estos hacia la superficie con menos presión parcial, lo que impone una presión parcial de los compuestos volátiles mayor que su valor de equilibrio que corresponde a esta última superficie. Entonces bajo estas circunstancias, el sentido de la reacción se invierte y los compuestos volátiles se descomponen regenerando el semiconductor del que se originaron, lo que da lugar al depósito de este sobre el sustrato. Mediante este simple proceso se consigue el transporte de masa.

De la descripción anterior, del principio en el cual se basa esta técnica es claro que en ella intervienen sólo cinco parámetros experimentales: las temperaturas de los materiales fuente (T) y sustrato (θ), la distancia entre ellos (d), la presión parcial del gas transportador (p) y la presión total en la cámara de crecimiento (P).

Por lo tanto, necesariamente estos parámetros gobiernan todos los aspectos básicos del proceso de epitaxia, por ejemplo; la razón de crecimiento

y de las propiedades físicas del material que se obtiene por esta técnica. Como en general d y P se fijan en valores adecuados, para todo propósito práctico las leyes que gobiernan los aspectos básicos antes mencionados dependen únicamente de los tres parámetros restantes. De aquí, se puede ver que la técnica tiene varias ventajas y algunas limitaciones con respecto a las técnicas comunes, entre las primeras se pueden mencionar las siguientes: El equipo es simple y económico, no se necesita de vacío pues trabaja todo el tiempo a presión atmosférica, comparada con las técnicas en fase vapor comunes la geometría de la cámara de epitaxia no tiene ningún efecto en la homogeneidad de las propiedades de la película, mientras las temperaturas de los materiales fuente y sustrato sean homogéneas a través de todas las superficies respectivas durante el crecimiento de la película.

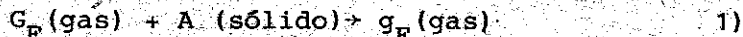
En su operación no intervienen materiales tóxicos ni como insumo ni como subproductos. La eficiencia de transporte de masa, es decir, la razón entre la masa del material removido de la fuente es muy alta, comparada con las técnicas comunes, típicamente entre 50 y 90 % según las condiciones de crecimiento. Además, como el material fuente no se contamina durante el crecimiento, éste puede utilizarse para crecer tantas películas como se desee, mientras provea material suficiente para tener el espesor deseado de la película. Otra ventaja muy importante de esta técnica es que no es intensiva en uso de tiempo, pues ni el equilibrio ni los materiales requieren ser degasados y su cargado y descargado es sencillo y muy rápido.

A pesar de todas estas ventajas potenciales y de los primeros intentos más o menos exitosos de crecer mediante CSVT diversos materiales semiconductores tanto elementales; Si, Ge, como compuestos de las familias III-V y II-VI [1-2], sólo hasta recientemente ha alcanzado el desarrollo teórico y experimental que le permite realmente entrar al campo de las aplicaciones. Así a continuación se presentará la teoría más simple para el análisis del transporte de masa y los resultados experimentales en este aspecto, luego se presentarán las diferentes propiedades que se les han estudiado a los materiales obtenidos con esta técnica, como: calidad cristalina, transporte eléctrico, fotoluminiscencia y defectos puntuales entre otras.

TEORÍA DE LA CINÉTICA DEL TRANSPORTE DE MASA

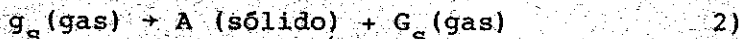
En esta sección se realizará un análisis teórico simple de los fenómenos básicos que ocurren durante el transporte de masa, con el fin de tratar de establecer a partir de ellos una ley en función de los parámetros experimentales asociados, que gobierne ese transporte. De la descripción fenomenológica del principio básico en el que descansa esta técnica, se tiene que los procesos esenciales que intervienen para que el transporte tenga lugar son tres:

a) Reacción química en la superficie del material fuente.



b) Difusión gaseosa de los productos de esta reacción hacia el sustrato.

c) Reacción de depósito en la superficie del sustrato.



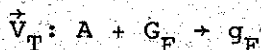
donde G es el gas transportador y g los productos de la reacción en la fuente y A el sólido que se desea transportar. Estos procesos se esquematan en la Fig.1.

La presencia de estas reacciones ha sido ampliamente demostrada en forma experimental y lo que es muy claro también es que son esas reacciones las que gobiernan el transporte, además, no se requiere conocer cuáles son los productos de la primera reacción para poder llevar a cabo un análisis teórico del proceso de crecimiento completo. El transporte hacia el sustrato, de los productos volátiles de la reacción en la fuente, se lleva a cabo mediante difusión gaseosa, ya que la pequeña separación que existe entre fuente y sustrato no da lugar a la convección. Mediante la reacción que ocurre en el sustrato, se recuperan el sólido y el gas originales, este último, nuevamente por difusión regresa a la superficie de la fuente para continuar el proceso de transporte de masa.

Las razones con las que ocurren los procesos a) y c) son funciones de las presiones parciales de los gases que intervienen en las reacciones respectivas, la temperatura a la que ocurre cada reacción y los coeficientes de estequiometría de las mismas. El proceso b) depende de la presión total en el volumen donde ocurre la difusión, la temperatura a la cual se lleva a cabo y el coeficiente de difusión de la especie difundiendo. A continuación se analizan en forma simple cada uno de esos procesos.

Fuente.

La razón neta de la reacción en la superficie del material fuente; V_T [mol/cm²-seg] y que ocurre a una temperatura T, puede expresarse como la diferencia de las razones de dos reacciones que ocurren en esa superficie; una que a partir del sólido y el gas iniciales genera los productos volátiles, que es la representada antes por la ecuación (1).



cuya razón está dada por [1]:



donde k_{1T} es el coeficiente cinético de esta reacción y ϕ_F es una función de la presión parcial de G_F , el subíndice F se refiere a la fuente. Y otra reacción que del gas volátil regenera el sólido.



que está gobernada por una ley equivalente:

$$\dot{V}_T = k_{2T} \psi_F \quad 4)$$

donde k_{2T} es el coeficiente cinético respectivo y ψ_F es una función de la presión parcial de g en esta superficie. Entonces la velocidad neta de la reacción en la superficie de la fuente está dada por:

$$V_T = \dot{V}_T - \dot{V}_T = k_{1T} \phi_F - k_{2T} \psi_F \quad 5)$$

Pero dado que k_{1T} y k_{2T} están relacionadas a través de la constante de equilibrio de la reacción, es decir

$$\frac{k_{1T}}{k_{2T}} = K_T \quad 6)$$

lo que permite reescribir (5) de la manera siguiente:

$$V_T = k_{2T} (K_T \phi_F - \psi_F) \quad 7)$$

Substrato:

Siguiendo el mismo procedimiento se establece que la velocidad neta en la reacción de la superficie del substrato se puede escribir como:

$$V_\theta = k_{2\theta} (\psi_s - K_\theta \phi_s) \quad 8)$$

donde ϕ_s es una función de la presión parcial del gas transportador en la superficie del substrato y ψ_s otra función de la presión parcial de g en esta superficie, $k_{2\theta}$ es la misma constante de equilibrio de la reacción pero ahora con su valor correspondiente a la temperatura del substrato.

Difusión:

El transporte de los productos de las reacciones antes descritas desde la fuente hacia el substrato, se lleva a cabo por difusión gaseosa, la cual obedece a las leyes de Fick y esta difusión ocurre con una razón neta; V_D [mol/cm²-seg] - misma que se puede aproximar por:

$$V_D = D P^{-1} \frac{\partial(\phi\psi)}{\partial Y} \quad 9)$$

donde D es el coeficiente de difusión de la especie que se difunde y P es la presión total.

Si se considera que el volumen determinado por las superficies de los materiales fuente y sustrato que están frente a frente y el espacio entre ellos está cerrado, es decir, que no hay entrada ni salida de los gases inicialmente contenidos en él ni de los productos de las reacciones cuando éstas ocurren, entonces necesariamente las razones con las que ocurren los tres procesos anteriores serán iguales entre sí e iguales a la razón de crecimiento buscada:

$$V_T = V_\theta = V_D = r_C \quad (10)$$

Sustituyendo las ecuaciones 7, 8 y 9 en la 10 y después de un poco de álgebra se llega a la siguiente expresión:

$$r_C = v_0 (1 - dF) \quad (11)$$

donde:

$$v_0 = \phi_F k_{2T} \frac{K_T - K_\theta}{\left(1 + \frac{k_{2T}}{k_{2\theta}}\right)} \quad (12)$$

y F es un término impuesto por los procesos de difusión, que en general es pequeño, d es la separación entre las superficies de fuente y sustrato. Entonces considerando despreciables los efectos difusivos, se tiene para la ley que gobierna la razón de crecimiento en esta técnica la siguiente expresión:

$$r_C = \phi_F k_{2T} \frac{K_T - K_\theta}{\left(1 + \frac{k_{2T}}{k_{2\theta}}\right)} \quad (13)$$

Dado que los coeficientes cinéticos de las reacciones químicas están gobernados por una ley que hace intervenir la energía de activación de la reacción así como la temperatura a la cual ocurre ésta, se tiene que se pueden escribir como [3]:

$$k_{1T} = \eta e^{-\frac{Q_1}{kT}} \quad (14)$$

$$k_{2T} = \eta e^{-\frac{Q}{kT}} \quad (15)$$

$$K = \xi e^{-\frac{Q - Q_1}{kT}} = \xi e^{-\frac{\Delta H}{kT}}$$

donde Q_1 es la energía de activación de la reacción representada por la ecuación (1) y Q la correspondiente a la ecuación (2) y ΔH es la variación de entalpia del sistema cuando ocurre la reacción, η , γ y ξ son constantes que no dependen de la temperatura. Lo que permite obtener para la razón de crecimiento la siguiente expresión final:

a $T = 700, 750$ y 850°C en función de θ sólo sustituyendo el valor correspondiente de T en la ecuación [20], como se puede observar en esa figura la concordancia con los resultados experimentales es satisfactoria.

Esos mismos resultados muestran que en estas condiciones, la razón de crecimiento es perfectamente controlable en el rango de $0.01 \leq V_0 \leq 1.0$ $\mu\text{m}/\text{min}$.

El efecto activo del vapor de agua se ha demostrado de varias maneras, una más fue estableciendo la dependencia de la razón de crecimiento en función de la presión parcial de éste, la figura 6 muestra esta dependencia, de ella se obtiene que

$$V_0 \propto P_{\text{H}_2\text{O}}^{1/2} \quad (21)$$

De esta dependencia se pueden establecer las condiciones de crecimiento para que utilizando una muy baja concentración de H_2O en la atmósfera de crecimiento, comparable a la que tienen otras técnicas como concentración residual para este gas, se tengan razones de crecimiento interesantes para ciertas aplicaciones.

PROPIEDADES DEL GaAs-CSVT

Las principales propiedades que se han estudiado a estas películas son las de fotoluminiscencia a baja temperatura, las de transporte eléctrico y las de concentración y tipo de defectos puntuales, todas ellas en función de las condiciones de crecimiento, es decir, T , θ y $P_{\text{H}_2\text{O}}$.

Fotoluminiscencia:

El efecto del vapor de agua sobre las propiedades de fotoluminiscencia del GaAs-CSVT ha sido estudiado con cierto detalle, en un rango de presión parcial que varió sobre 2 órdenes de magnitud; $0.05 - 5.0$ mm Hg. Las temperaturas de fuente y sustrato fueron respectivamente 800 y 700°C . Se utilizaron cuatro familias de muestras según la tabla siguiente:

MUESTRA	$P_{\text{H}_2\text{O}}$ (mm Hg)	CURVA FIG. 8
A	0.05	4
B	0.29	3
C	1.24	2
D	4.9	1

Los resultados se muestran en la Fig. 7, donde se observa una clara evolución de los espectros en función de $P_{\text{H}_2\text{O}}$. Conforme $P_{\text{H}_2\text{O}}$ disminuye el espectro de luminiscencia pasa prácticamente inexistente, curva 1, a una estructura de picos bien definida, curva 4, el principal de estos picos tiene una intensidad mayor en más de 100 veces al de la curva 1 y al pico inme-

diato siguiente en intensidad, de la misma familia de muestras. Este pico se localiza a 1.514 eV energía que corresponde a la banda excitónica característica de buenos materiales. Estos resultados confirman, como era de esperarse, la necesidad de crecer a bajas concentraciones de H_2O .

La exploración del efecto de los parámetros experimentales restantes se ha efectuado en los siguientes rangos de T y θ , $750 \leq T \leq 850^\circ C$ y $600 \leq \theta \leq 830^\circ C$ manteniendo $P_{H_2O} \approx 0.05$ mm Hg [6]. De lo reportado en esta referencia se concluye que las propiedades de luminiscencia, no son muy sensibles ni a T ni a θ , obteniéndose en general material de buena calidad, donde la transición dominante es la de borde de banda y algunas transiciones menores a través de defectos extrínsecos que son básicamente debidos a C y Ge seguramente transportados desde la fuente. Un espectro de luminiscencia tal como se presenta en las películas que se han obtenido últimamente se muestra en la Fig. 8.

Propiedades de transporte eléctrico:

En películas crecidas conforme a la descripción dada en la sección anterior pero manteniendo $P_{H_2O} \approx 0.05$ mm Hg, se estudiaron las propiedades de transporte eléctrico mediante mediciones de resistividad y efecto Hall utilizando la técnica de Van der Paw. Todas las películas presentan conductividad tipo N, la Fig. 9 muestra la dependencia de la concentración de electrones n , y su movilidad μ_n a temperatura ambiente en función de las condiciones de crecimiento, de ella se tiene que la concentración de electrones y su movilidad es claramente dependiente de las condiciones de crecimiento y n , superior a las concentraciones iniciales del mismo portador en el material fuente.

En crecimientos recientes utilizando una fuente más pura (comercial) y tomando mayores precauciones de limpieza, se han crecido películas con $n \approx 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y un μ_n (300 K) de $5200 \text{ cm}^2 \text{ v}^{-1} \text{ s}^{-1}$, estos valores son propios a un buen material no muy compensado. Por otro lado se ha encontrado que la movilidad es muy sensible al procedimiento seguido para crecer la película.

Perfiles de impurezas residuales efectuados mediante la técnica de SIMS (Secondary Ion Mass Spectroscopy) han mostrado que las impurezas residuales son el Si y S, el primero originado con toda probabilidad en la fuente y el segundo seguramente que se debe a una incorporación a partir de H_2S que se introduce en la cámara durante el cargado de las muestras y no se extrae debido a un insuficiente enjuague con H_2 puro.

Otras impurezas como el Fe, Mg, Cr, Mn se encontraron sistemáticamente en concentraciones alrededor de 10^{14} cm^{-3} [7].

La Fig. 10 muestra un perfil típico. Por otro lado utilizando fuentes impurificadas, según primeros resultados obtenidos, es posible recuperar esa impurificación en la película epitaxial lo que abre la posibilidad para tener películas de ambos tipos de conductividad en un amplio rango de valores.

Defectos Profundos:

Mediante la técnica de DLTS se han estudiado los defectos profundos que hay en este material [8]. La Fig. 11 muestra una gráfica de $T^2/e - 1/T$; e es la razón de emisión de los electrones y T es la temperatura absoluta, para todas las películas estudiadas independientemente de las condiciones de crecimiento. En esta figura están los tres únicos defectos encontrados; D1, D2 y D3, sus parámetros característicos se resumen en la tabla II.

TABLA II

	E eV	σ cm ²
D1	1.1	1.33×10^{-10}
D2 (EL2)	.82	1.33×10^{-13}
D3 (EL0)	.81	4.8×10^{-13}

Comparando con los resultados descritos en la literatura [9] se tiene que D2 corresponde al defecto EL2; que es un defecto de antiestructura complejo constituido por un As en sitio Ga más un As intersticial. Este defecto está presente en todos los materiales crecidos por epitaxia en fase vapor incluida la de haces moleculares, así como en material masivo, con una concentración que depende de las condiciones de crecimiento. Es mediante este defecto que se consigue crecer material masivo semi-aislante sin agregar impurezas extrínsecas. D3 corresponde a EL0 un defecto generalmente asociado a la presencia de oxígeno y D1 no se encuentra en la literatura.

La concentración de estos defectos es fuertemente sensible a las condiciones de crecimiento. Resultados preliminares mostrados en las figuras 12 y 13 muestran la dependencia de D1 y D2 en función de T y θ , de esas figuras se ve que la concentración de estos se puede ajustar experimentalmente en un amplio rango, típicamente entre 10^{14} y 10^{16} cm⁻³. En la Fig. 14 el defecto D3, su concentración parece no depender de T ni de θ pero sí fuertemente de P_{H_2O} . Estos resultados plantean claramente la posibilidad de crecer películas cuya concentración de defectos puntuales se puede modular a través de las condiciones de crecimiento, y de esta manera adaptarlas mejor a los requerimientos de cualquier dispositivo. Por ejemplo, material semi-aislante como el que se utiliza en películas colchón para realizar transistores de efecto de campo, ha sido crecido sin agregar impurezas extrínsecas.

DISPOSITIVOS BASADOS EN GaAs-CSVT

Con películas crecidas por ésta técnica se han realizado transistores MES-FET* y uniones P-N las cuales siguen razonablemente bien el modelo de transporte de carga eléctrica por difusión de Shockley, estos resultados son muy recientes y se publicarán pronto.

CONCLUSIONES

De la revisión de resultados concernientes a la epitaxia de materiales semiconductores mediante la técnica de transporte en fase vapor a corta distancia, se puede considerar que, a pesar de su simplicidad y economía permite crecer los semiconductores más comúnmente estudiados y utilizados en la realización de dispositivos, pero que en general está muy poco explotada. En el caso particular, cuando se utiliza esta técnica para crecer arseniuro de galio utilizando vapor de agua como gas transportador, se encuentra que la razón de crecimiento se puede controlar en un amplio rango de velocidades 0.5 - 120.0 $\mu\text{m/h}$. Observando que el hecho de utilizar vapor de agua como gas transportador no necesariamente degrada las propiedades del material, sin embargo nada impide usar otro gas para llevar a cabo el transporte de masa, Cloro o Iodo por ejemplo. Las propiedades de fotoluminiscencia mostrada por este material reflejan la buena calidad del mismo, pues en ellas la transición dominante es la de borde de bandas. De las propiedades de transporte eléctrico se tiene que actualmente el material es siempre tipo N, con una concentración de electrones que depende de las condiciones de crecimiento, que se encuentra en el rango de $10^{16} \leq n_0 \leq 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Existiendo la posibilidad de poder impurificar en forma controlada a través de fuentes impurificadas pudiendo obtener ambos tipos de conductividad, actualmente películas con $n_0 = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ y $\mu_n (300 \text{ K}) = 5200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ se obtienen sin ninguna dificultad. El GaAs crecido con esta técnica, presenta tres niveles profundos cuya concentración es fuertemente dependiente de las condiciones de crecimiento. Estos defectos pueden utilizarse para modelar ciertas propiedades del material, por ejemplo incrementando su concentración de uno de ellos (EL2) se ha logrado tener material semi-aislante sin agregar impurezas extrínsecas. Finalmente con esta técnica se han hecho dispositivos electrónicos como transistores MES-FET y uniones P-N de excelente calidad. Sin embargo, es claro que la técnica está empezando y tiene mucho que progresar, por ejemplo es necesario explorar otros gases transportadores, así como la realización de estructuras más complejas del tipo multicapa. Así como comprobar su aplicación en otros materiales como InP y GaP.

* que son el objeto de otra comunicación en este simposio.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su más grande reconocimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México y a la Organización de los Estados Americanos quienes apoyaron económicamente desde su inicio hasta hoy este trabajo, así como a la UNESCO (por su apoyo al inicio del mismo) y a otras Instituciones como el CNRS de Francia, en particular el laboratorio de Sólidos Meudon-Bellevue y del Grupo de Física de sólidos de ENS por su decidida cooperación y ayuda en muchos aspectos. Finalmente a los colegas de México y de otros países que de una manera u otra participaron en él, muchas gracias a todos.

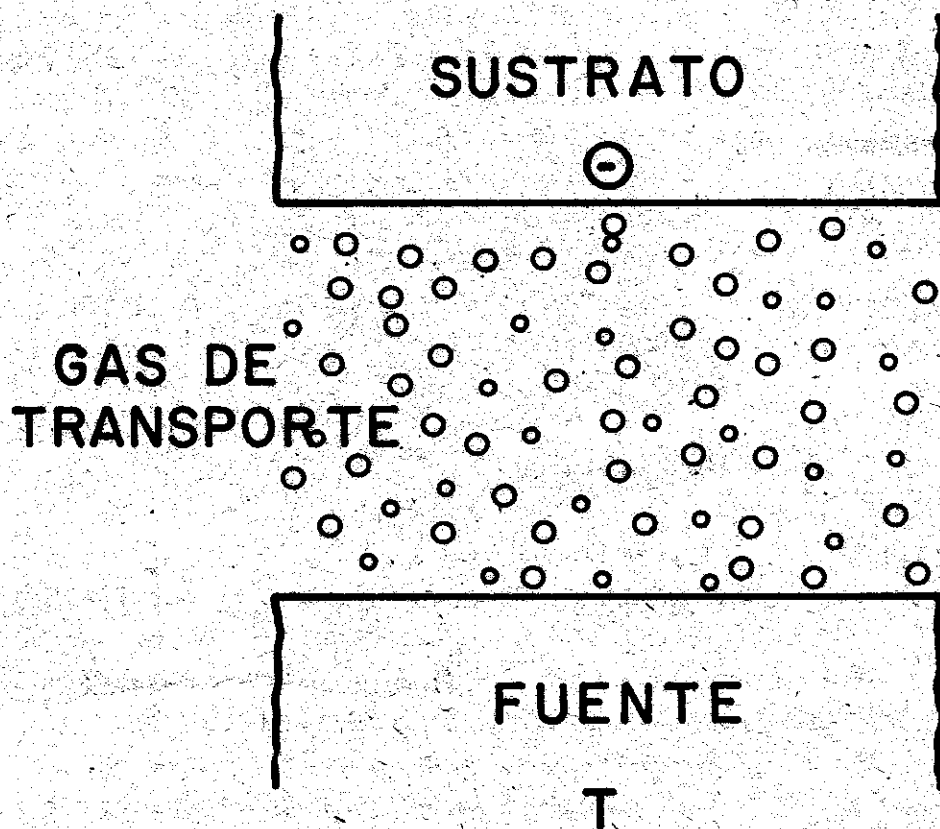


Fig. 1. Esquema de la disposición de materiales para epitaxia por CSVT.

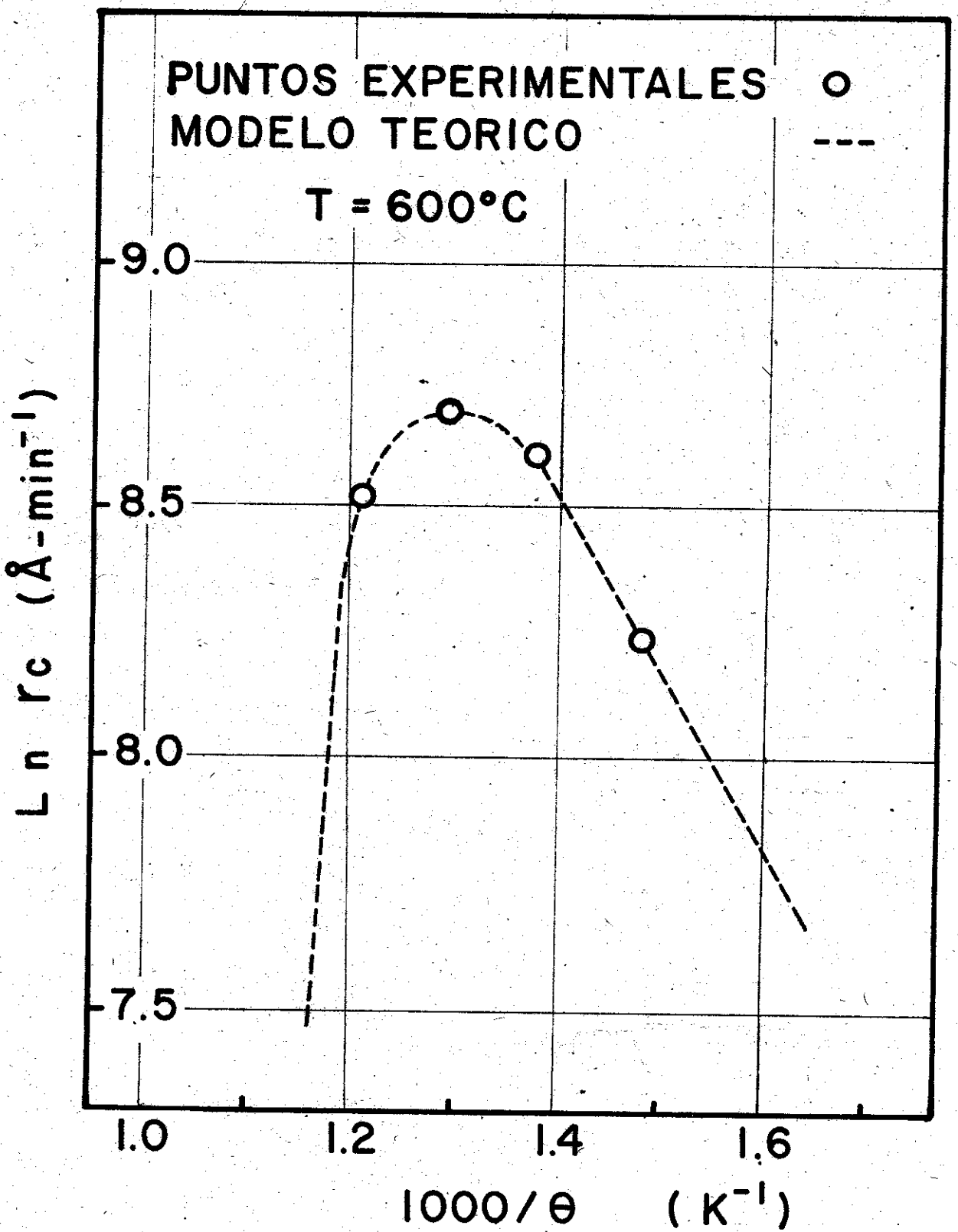


Fig. 2. Curvas teóricas de razón de crecimiento en función de T y θ

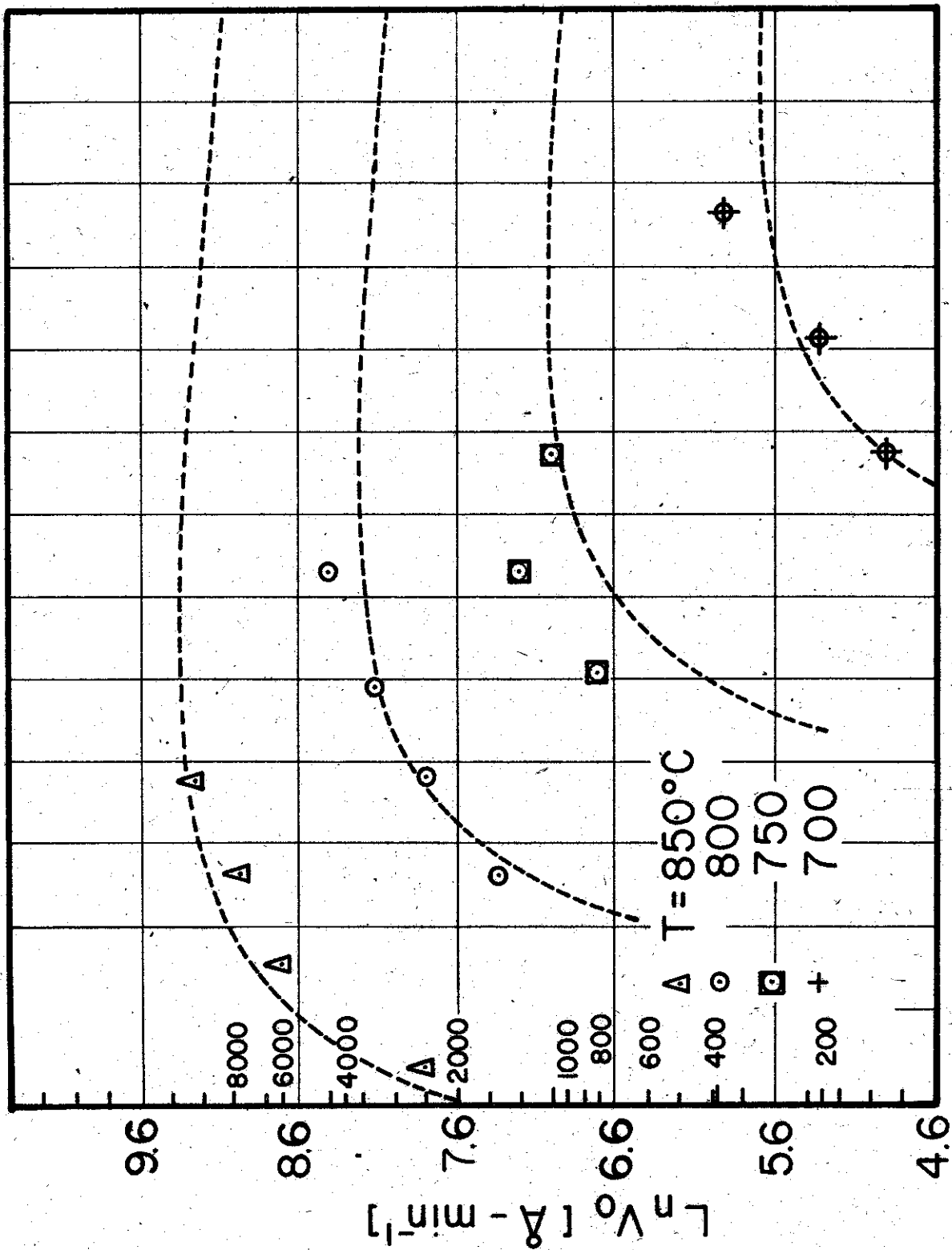


Fig. 3.
 Resultados
 experimen-
 tales y
 ajuste teó.
 rico de la
 r_c en Cdre.

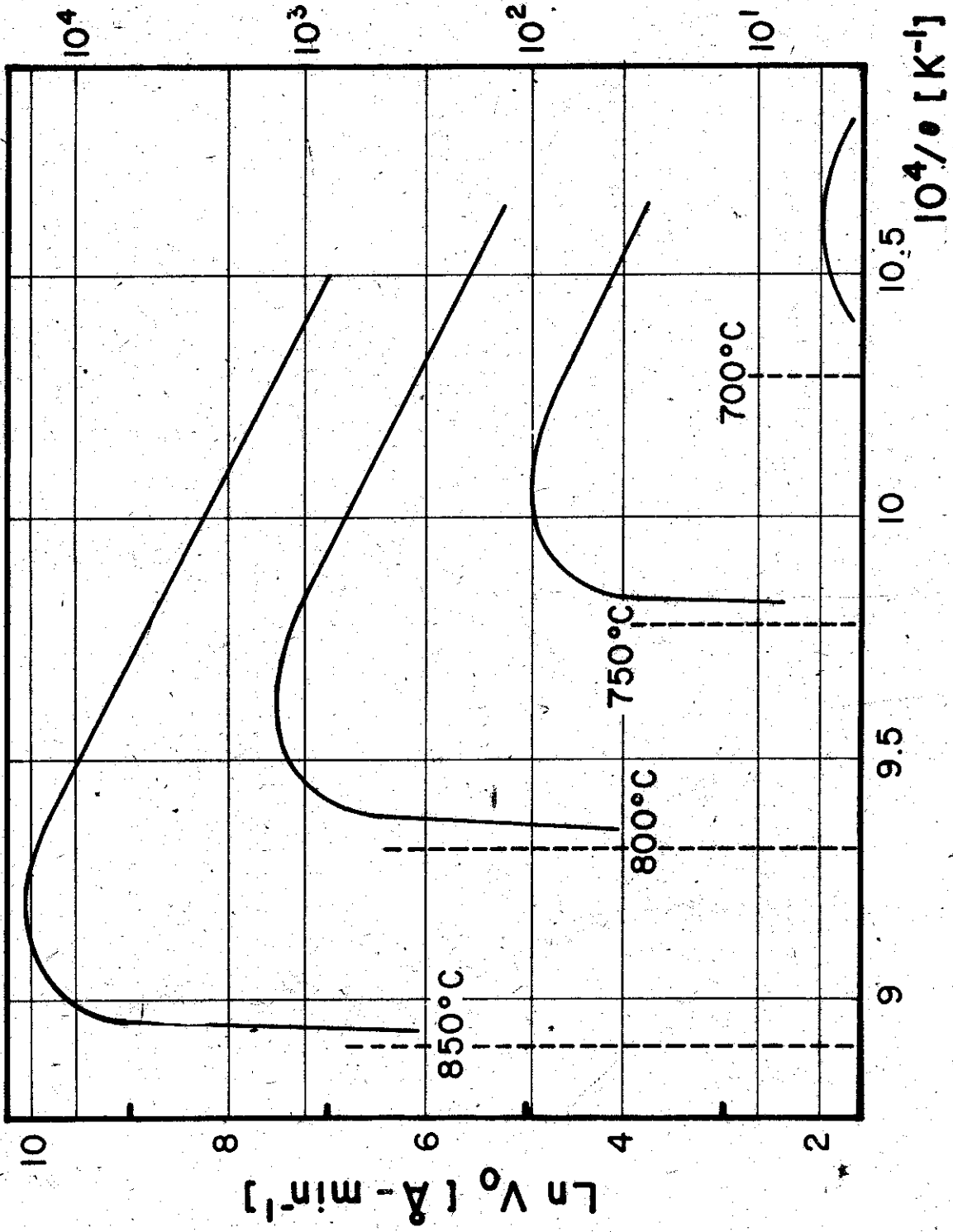


Fig. 4.
 r_c en función
 de T CdTe.

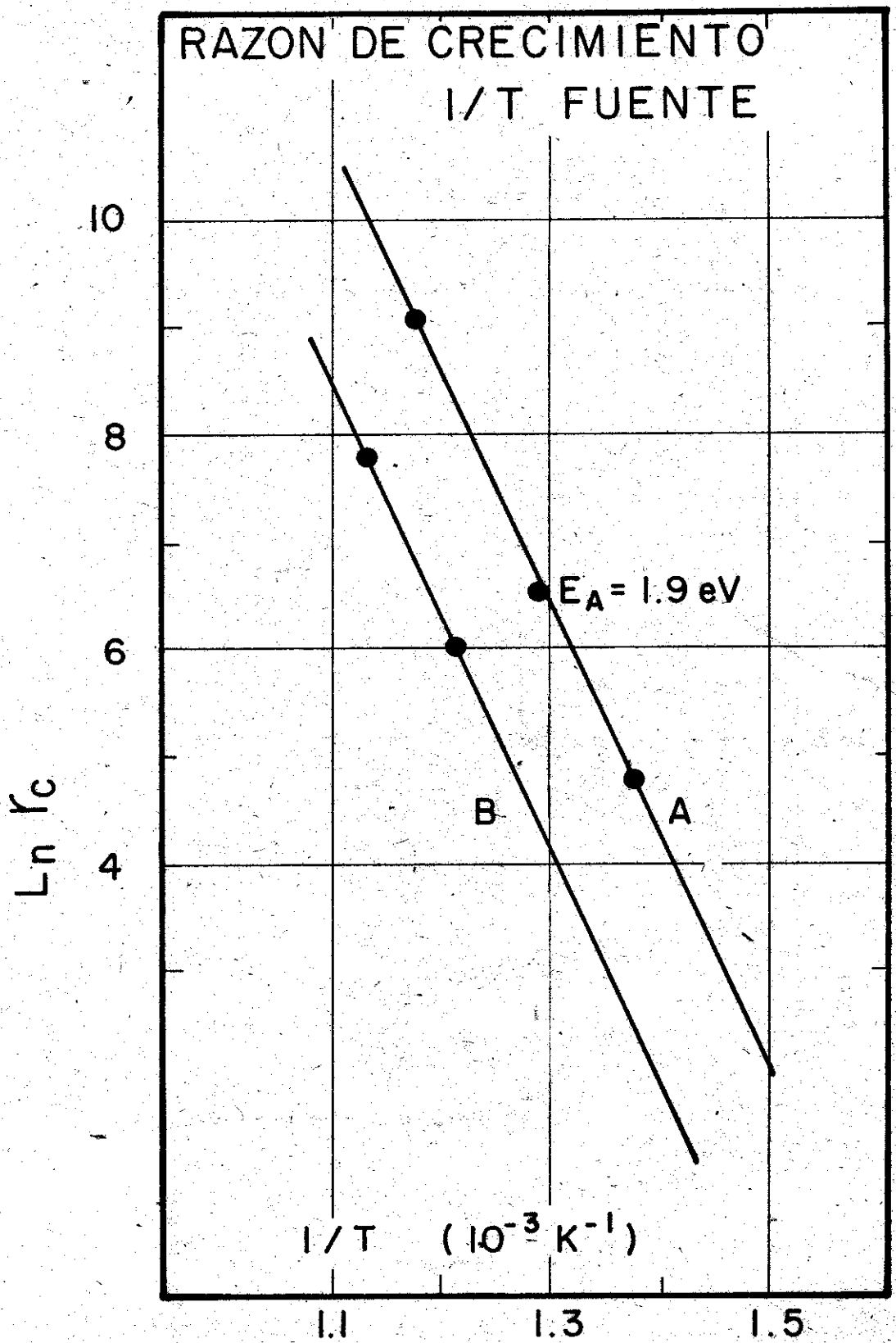


Fig. 5. Razón de crecimiento en GaAs

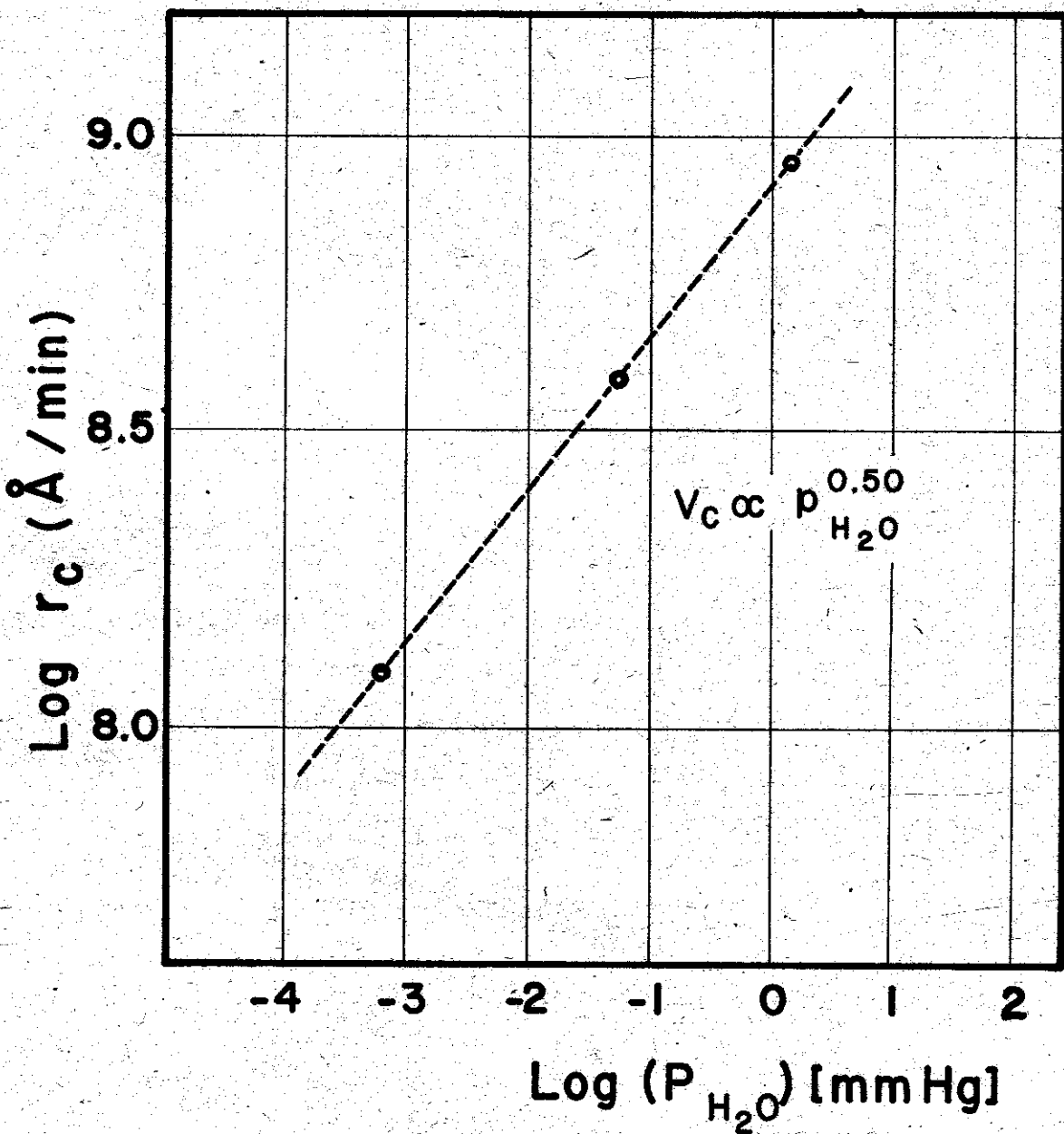


Fig. 6. Dependencia de la razón de crecimiento en función de la presión de H₂O.

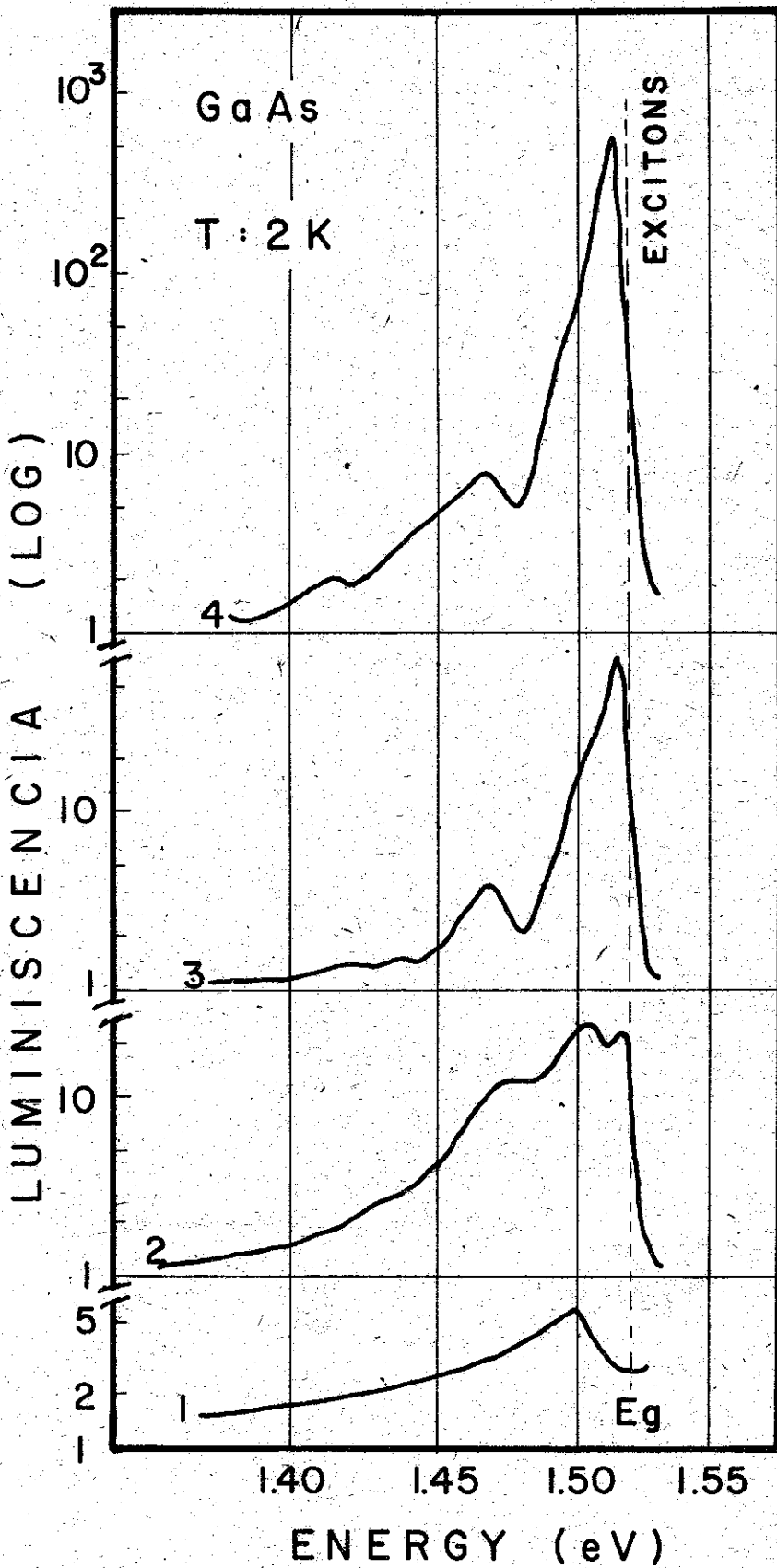


Fig. 7.

Evolución de la
 fotoluminiscencia
 en función de
 P_{H_2O} en GaAs.

LUMINISCENCIA u.a.

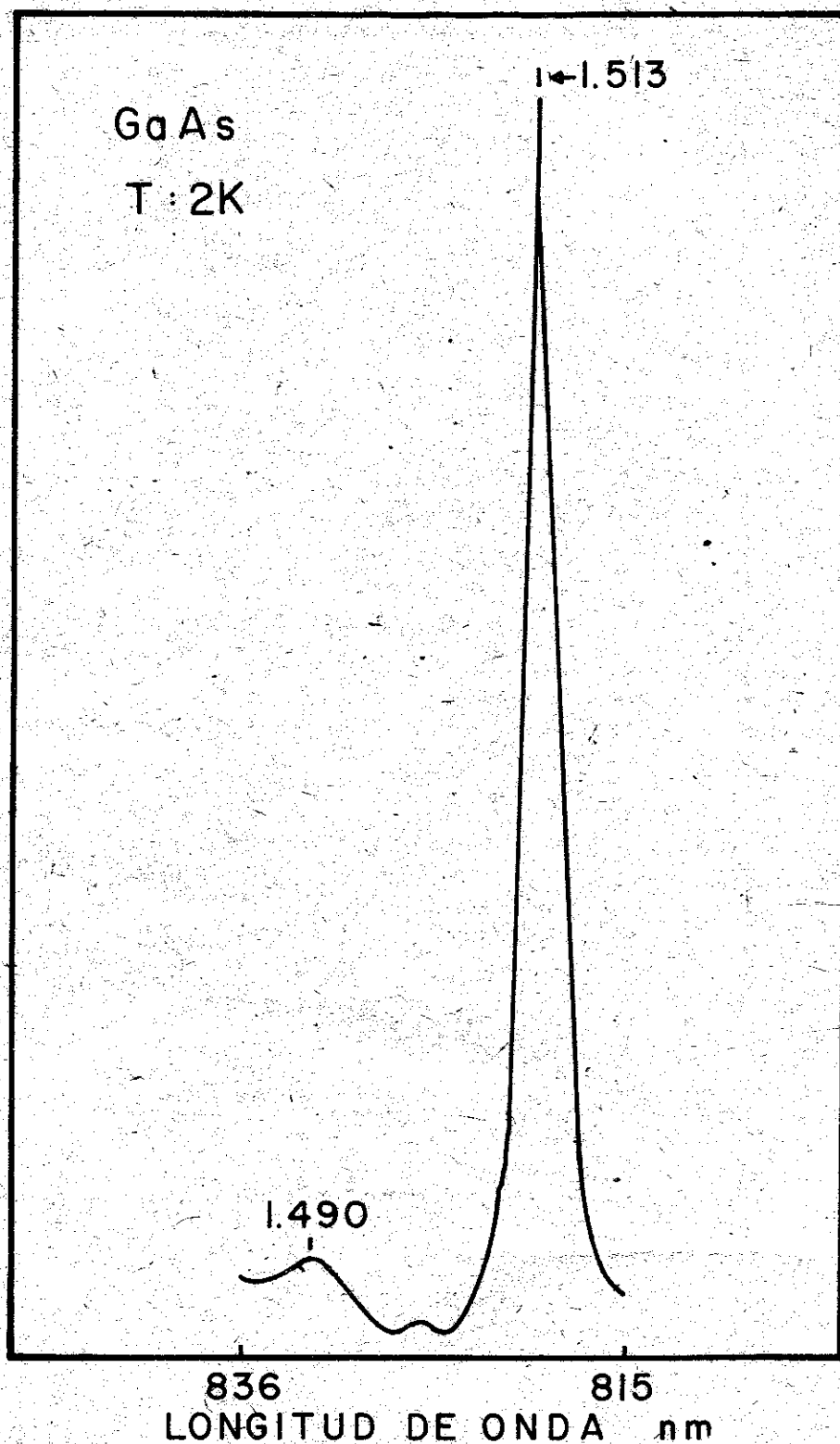


Fig. 8. Espectro de luminiscencia obtenido comúnmente en GaAs-CSVT.

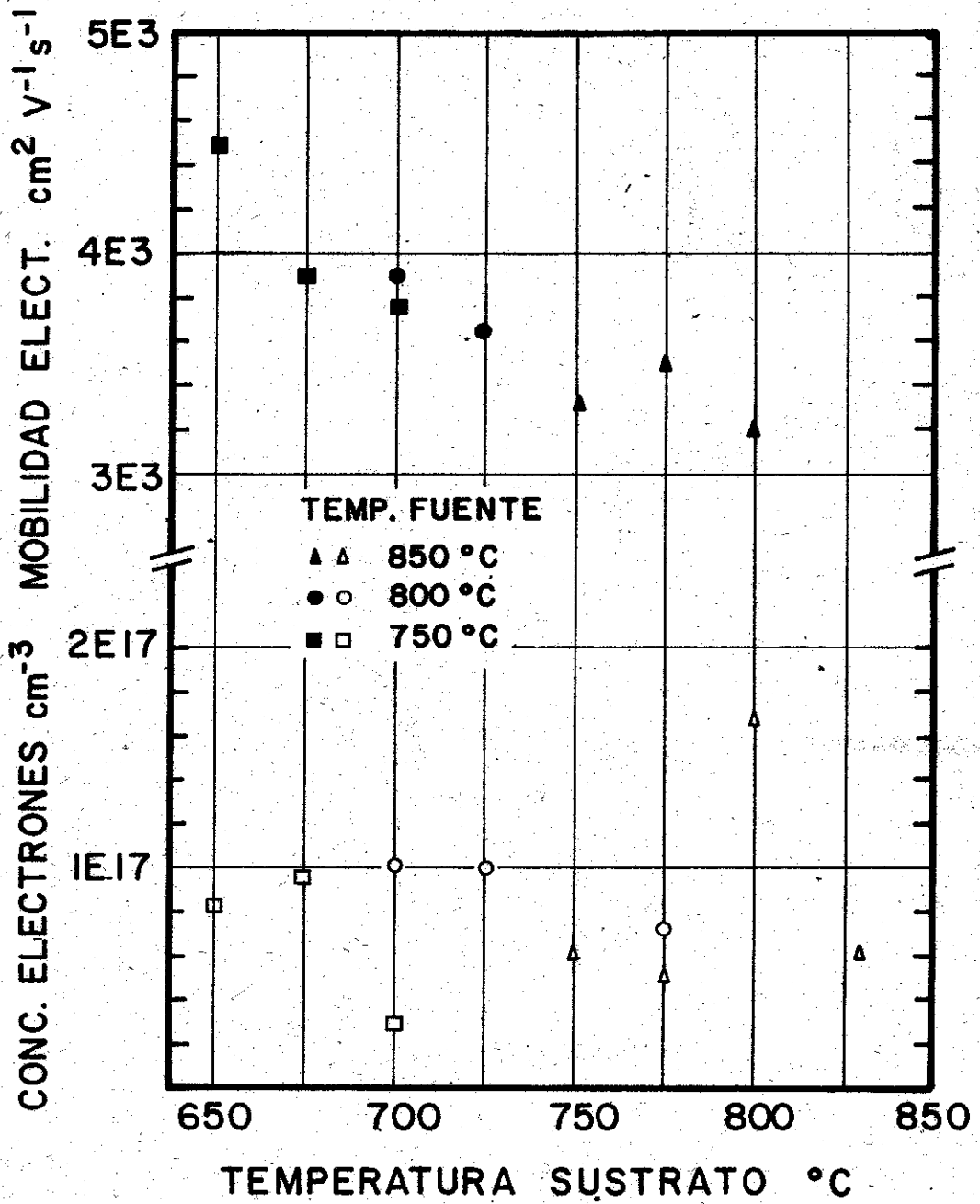


Fig. 9. Concentración y movilidad de electrones en función de T y θ .

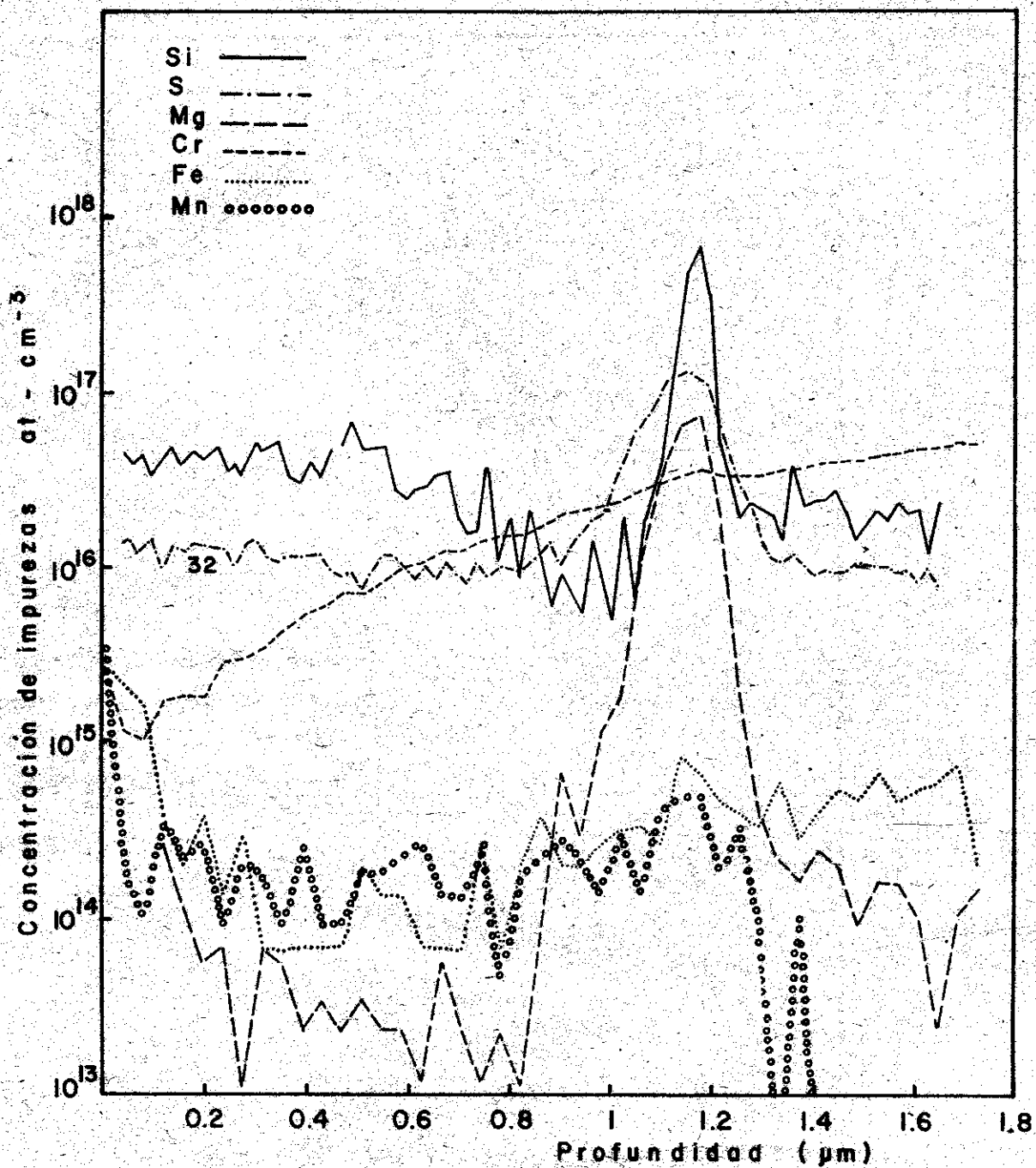


Fig. 10. Perfil de impurezas residuales obtenido por SIMS.

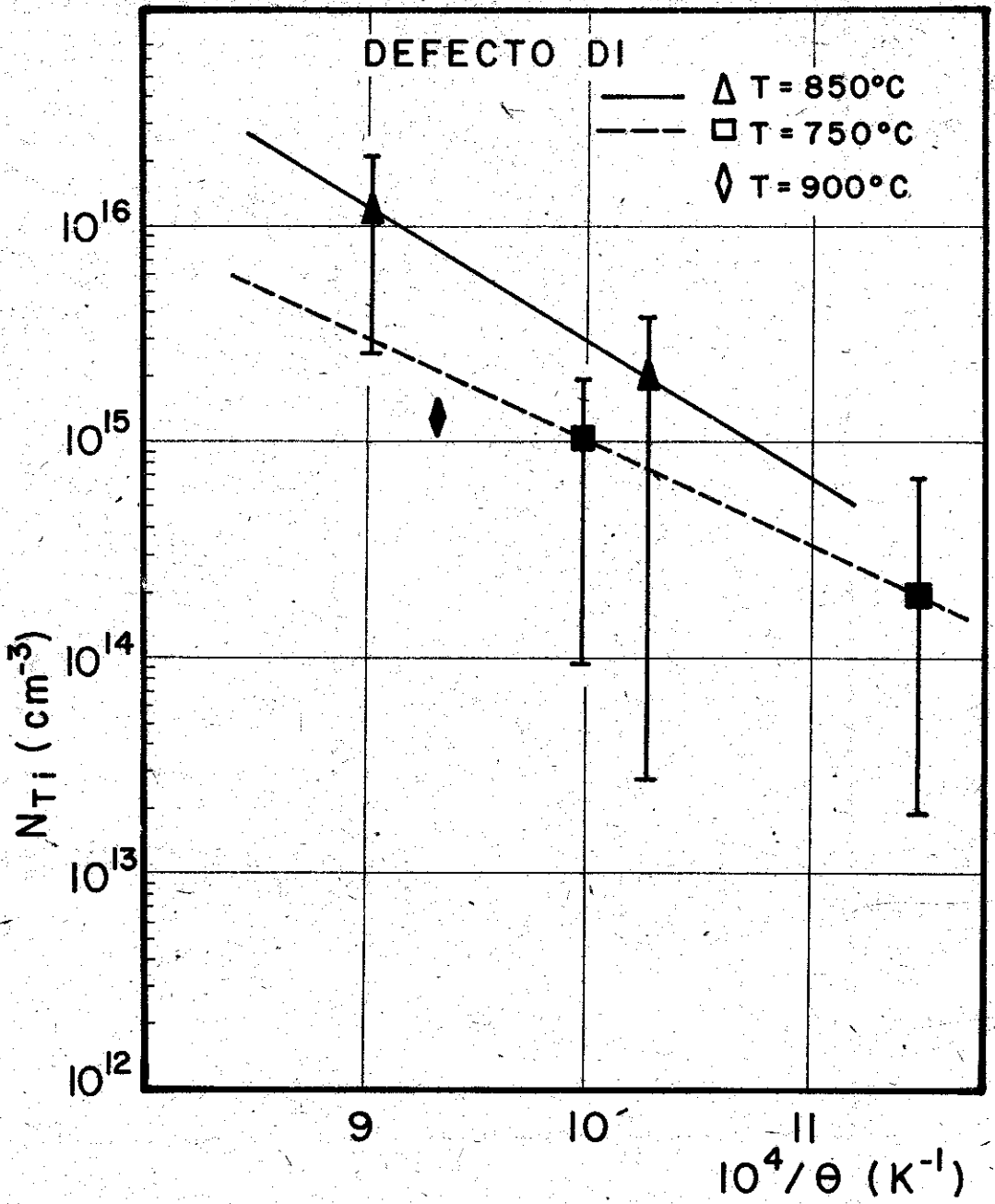


Fig. 12. Dependencia de D1 en función de T y θ .

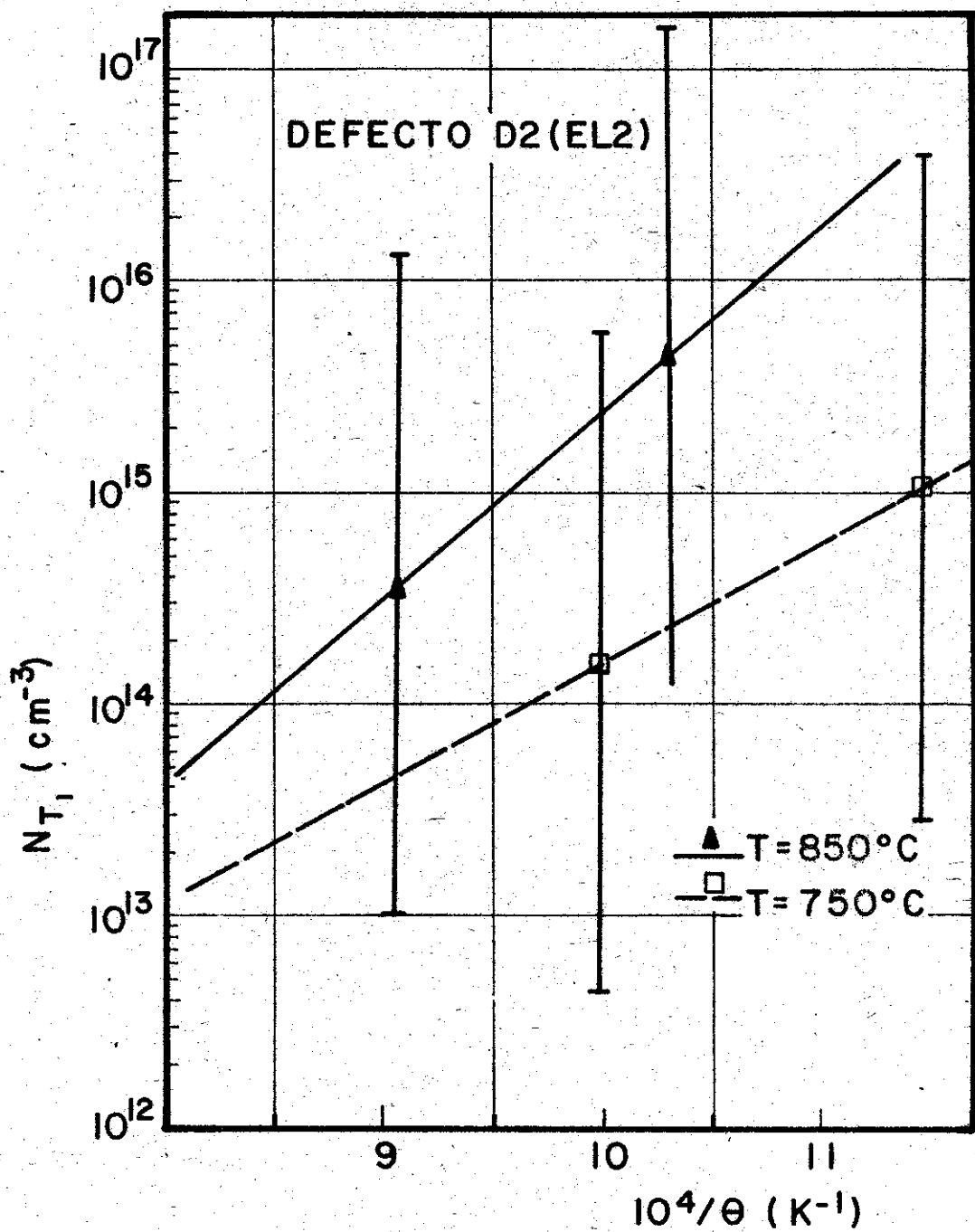


Fig. 13. Dependencia de D2 en función de T y θ .

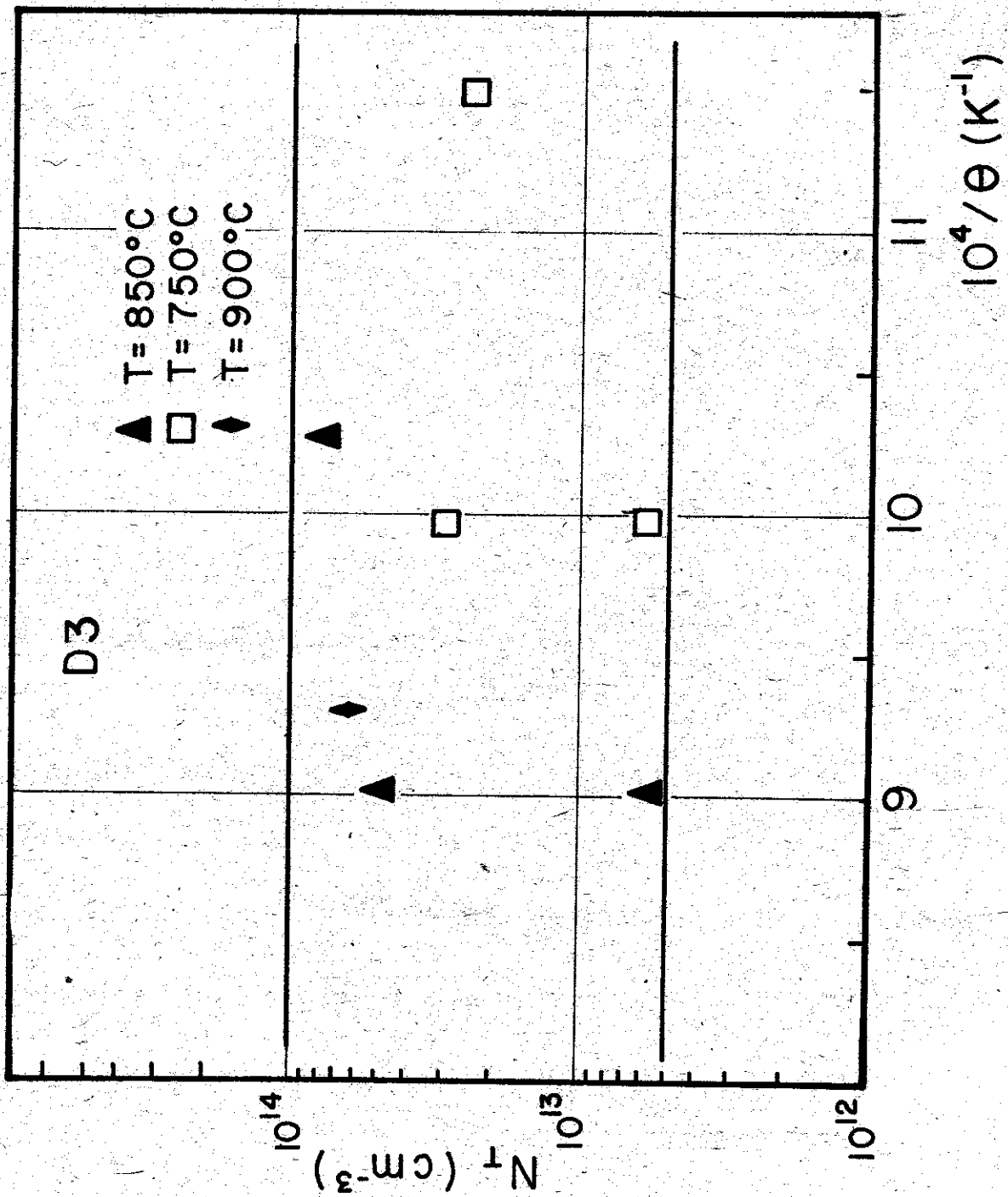


Fig. 14.

Dependencia de D3
en función de θ .

BIBLIOGRAFÍA

1. Bailly, F. et al.
J. Electrochem. Soc. 126, 1604 (1979).
2. Chaves, F. et al.
J. Appl. Phys. 54 (11), 6646 (1983).
3. Denbigh, K.
The principles of chemical Equilibrium. (Cambridge University, Cambridge, London, (1971) p. 160.
4. Mimila, J. et al.
J. Appl. Phys. 58 (9), 3652 (1985).
5. _____
Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 58 p. 55 (1986).
6. Mimila, J. y R. Castanedo
Niveles profundos en películas epitaxiales de GaAs obtenidas por CSVT. Reporte Interno, CIEA-IPN México, D. F., México.
7. Lagowski, J. et al.
Appl. Phys. Lett. 44 (3) p. 336 (1984).