

**PARTICIPACIÓN DEL FONÓN LO EN LA RELAJACIÓN TÉRMICA
DE PORTADORES CALIENTES DE CAPAS EPITAXIALES DE GAAS TIPO P Y N
A BAJAS TEMPERATURAS**

J. Quintero¹, G. Fonthal^{1,2}, M. De los Ríos¹, N. Piraquive¹, H. Ariza-Calderón¹ y
J. G. Mendoza-Alvarez³

¹Laboratorio de Optoelectrónica, Universidad del Quindío, Armenia Colombia

²Dpto. de Física, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela

³Dpto. de Física, CINVESTAV - IPN, México D. F.

Email: labopt@cocora.uniquindio.edu.co

RESUMEN

Portadores calientes fueron generados por bombeo óptico en películas de GaAs:Ge y GaAs:Sn crecidas por epitaxia en fase líquida y con distintas concentraciones de impurezas. Estos portadores alcanzan entre ellos un causi-equilibrio a través de distintos procesos de relajación, con lo cual se puede definir una temperatura del portador caliente (T_p). La relajación con fonones LO ha sido considerado el más importante de estos procesos. Se midió T_p con la cola de alta energía del espectro de fotoluminiscencia (FL) en distintas temperaturas y potencias de la fuente excitatriz. Binet *et al* [Phys. Rev. B **60**, 4715 (1999)] propusieron un modelo para la participación del fonón LO que relaciona la potencia excitatriz, la temperatura de la red y T_p . Este modelo se simuló para el GaAs en las distintas concentraciones de impurezas y en las distintas temperaturas de la red y los resultados se compararon con los datos experimentales. De las diferencias obtenidas se obtuvo la información sobre la participación del fonón LO en el proceso de relajación de los portadores calientes. Se encontró que en concentraciones intermedias el fonón LO es el más importante en ambos tipos de muestras, pero otros procesos tornan a ser relevantes en otras concentraciones.

INTRODUCCIÓN

Generalmente en la fotoluminiscencia la energía del láser es siempre mayor que la brecha de energía del material en estudio, por consiguiente los electrones (huecos) terminan con una energía cinética en la banda de conducción (valencia) bien encima de la energía térmica media de la red. Los portadores fotoexcitados tienden a alcanzar el equilibrio térmico con la red (termalización) y, consecuentemente, ellos se relajan al borde de la banda perdiendo el exceso de energía cinética. Según Pavesi L. and Guzzi M.¹⁾ la relajación ocurre a través de tres etapas temporales: a) La primera etapa ($\tau \sim 10$ fs)²⁾ es aquella donde los portadores parcialmente pierden su exceso de energía inicial y termalizan entre ellos mismos alcanzando una distribución térmica caliente caracterizada por una temperatura diferente de aquella de la red. Por esta razón estos pares electrón-hueco (e-h) son llamadas portadores calientes y la temperatura característica se le llama temperatura del portador caliente (T_p). b) En la segunda etapa ($\tau \sim 200$ fs)²⁾ la distribución caliente se enfría hacia la temperatura de la red (T) a través de fonones ópticos, plasmones o dispersión intervalles (intervalley scattering). c) La tercera etapa ($\tau \sim 1$ ns)²⁾ concierne al enfriamiento final de la distribución de portadores en la temperatura de la red a través de la emisión de fonones acústicos. Esta última etapa se realiza en los mismos tiempos en que ocurre la recombinación e-h.

Para el GaAs, se ha encontrado que es más frecuente que la segunda etapa se realice a través de fonones ópticos, pero se ha encontrado experimentalmente que la rata de pérdida de

energía medida en estos materiales es mucho menor que la esperada.³⁾ Binet *et al*⁴⁾ propusieron un modelo que relaciona la temperatura del portador caliente con la potencia de la fuente excitatriz siempre y cuando el proceso de termalización de los portadores sea a través de fonones ópticos. En este trabajo se presentan los resultados de utilizar el modelo de Binet con el objeto de determinar la participación de fonones LO en el proceso de termalización de los portadores calientes cuando son excitados a través de un láser en muestras epitaxiales de GaAs.

EXPERIMENTO

Muestras de GaAs:Ge tipo p y GaAs:Sn tipo n fueron crecidas por epitaxia en fase líquida sobre substratos de GaAs con orientación (100) y en concentraciones de impurezas desde 1×10^{16} hasta $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$. Los espectros de FL se tomaron con el siguiente arreglo: la línea 488 nm de un láser de Ar LEXEL 95 fue usada como fuente de excitación y la luz incidente fue enfocada sobre la superficie de la muestra con una lente cilíndrica. La luz emitida fue recogida por un espectrómetro SPEX 500M, y esta luminiscencia se midió con un fotomultiplicador HAMAMATSU R2658 acoplado a un amplificador "lock-in" ajustado a 83 Hz. La muestra fue enfriada mediante un sistema cerrado de He líquido. Se tomaron espectros con distintas potencias del láser desde 0.067 a 133.3 W/cm^2 .

ANÁLISIS Y RESULTADOS

La línea del láser utilizada lleva los portadores muy arriba del fondo de las bandas en el GaAs. Hay por lo tanto dos trayectorias principales para la relajación de los electrones muy energéticos: o una interacción con la red a través de emisión de fonones o una colisión directa con el gas de electrones.⁵⁾ La interacción con la red se hace fundamentalmente a través de fonones ópticos de energía E_{LO} porque el exceso de energía a ser relajado es muy grande.⁶⁾ En la referencia 4 se hace la deducción de la potencia $P(T_p)$ disipada por el gas de portadores por portador fotoexcitado, la cual se expresa como:

$$P(T_e) = \frac{2E_{LO}}{m_p} (eE_0) \left(\frac{e^{x_0 - x_p} - 1}{e^{x_0} - 1} \right) \left[\frac{(x_p/2)^{1/2} e^{x_p/2} K_0(x_p/2)}{\sqrt{\pi/2}} \right] \quad (1),$$

donde $x_0 = E_{LO}/T$, $x_p = E_{LO}/T_p$, K_0 es la función modificada de Bessel de orden cero y E_0 es un campo efectivo dado por:

$$eE_0 = \frac{m_p e^2 E_{LO}}{4\pi \hbar^2 \epsilon_0} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) \quad (2),$$

con ϵ_0 la permitividad del espacio libre, ϵ_∞ y ϵ_0 las constantes dieléctricas óptica y estática respectivamente.

Por otro lado, la potencia P_{lum} entregada al gas de portadores por los fotoportadores excitados es⁴⁾:

$$P_{lum} = (I / d)(W / E)(1 / n) \quad (3),$$

donde I es la densidad de potencia incidente, d es la longitud de penetración efectiva del láser, E es la energía del fotón, W es la energía en exceso suministrada a los portadores y n la densidad de portadores. Esta densidad se calculó con la conocida ecuación⁷⁾:

$$n = \frac{2N_I}{1 + \sqrt{1 + (4N_I / \beta N_{C,V}) \exp(E_i / kT)}} \quad (4)$$

E_i es la energía de ionización de la impureza, β la degeneración, N_I y $N_{C,V}$ son las concentraciones de la impureza y la densidad efectiva de estados en la respectiva banda. β fue tomada como 2^7 , $E_{Ge} = 40$ meV y $E_{Sn} = 6$ meV.

En estado estacionario P_{lum} es igual a $P(T_p)$, por lo tanto:

$$(I/d)(W/E)(1/n) = \frac{2E_{LO}}{m_p} (eE_0) \left(\frac{e^{x_0 - x_p} - 1}{e^{x_0} - 1} \right) \left[\frac{(x_p/2)^{1/2} e^{x_p/2} K_0(x_p/2)}{\sqrt{\pi/2}} \right] \quad (5)$$

La cola de alta energía, por encima de la brecha de energía (E_g) del espectro de FL, da una indicación directa de la temperatura del portador caliente tomando la distribución térmica como la de Maxwell-Boltzmann^{1,2}. La figura 1 presenta el ajuste lineal hecho en la cola de alta energía de la transición banda a banda para algunos espectros usando la ecuación 3:

$$I(\hbar\omega) \propto \exp(-(\hbar\omega - E_g) / kT_p) \quad (6)$$

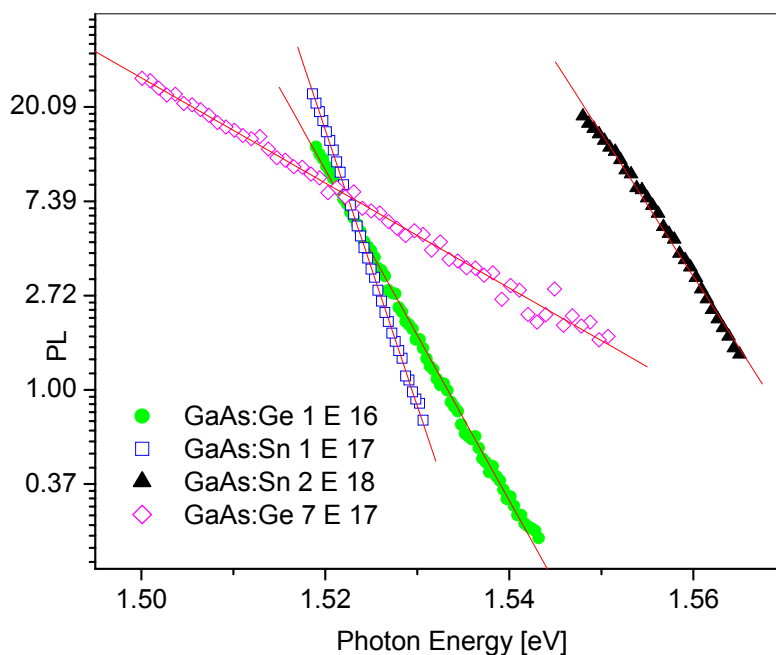


Figura 1.

Por otro lado, la función K_0 es una serie convergente por lo que se tomaron términos (X_i) hasta que se cumpliera la relación $X_j/X_1 < 0.01$. La figura 2 presenta la simulación de la ecuación 1 para distintas temperaturas de la red. Los datos que se tomaron fueron los siguientes: $m_e = 0.067^{(8)}$, $m_p = 0.53^{(8)}$, $E_{LO} = 36$ meV⁽⁸⁾, $E = 2.54$ eV, $d = 88$ nm⁽⁸⁾, $\epsilon_\infty = 10.89^{(8)}$ y

$\epsilon_0=13.18^8$). Los datos experimentales siguen a los teóricos pero la T_p es mayor de la esperada. El proceso de termalización de los portadores calientes a través de sólo fonones LO no es completo. La presencia de defectos aumenta el tiempo de relajación con fonones LO. Esto se puede ver más claro en la figura 3. Las muestras permanecieron almacenadas durante 6 años en oscuridad a la temperatura ambiente, lo que ocasionó su envejecimiento por un proceso de oxidación aumentándose el número de defectos en capas cercanas a la superficie.⁹ Haciendo comido químico con una solución 3:1:1 de $H_2SO_4 : H_2O_2 : H_2O$ a $60^\circ C$ por un minuto se consigue quitar una capa de $0.7 \mu m$. En la figura 3 se dibuja $1/T_e$ antes y después del comido químico. Se puede ver como cuando se quita la capa de óxido y defectos la participación de sólo fonones LO explica la termalización de los portadores calientes. Para las demás muestras la situación fue la misma.

CONCLUSIONES

Se encontró que la presencia de defectos en muestras epitaxiales envejecidas de GaAs:Ge y GaAs:Sn con distintas concentraciones de impurezas aumenta el tiempo de relajación por fonones LO en la termalización de portadores calientes. Haciendo comido químico que elimina tanto las capas de óxido como las superficiales que contienen mayor densidad de defectos, se consigue que el modelo de sólo intervención de fonones LO en la relajación coincida con lo experimental, lo cual demuestra que en muestras semiconductoras envejecidas intervienen otros procesos de relajación térmica distintos a la relajación por fonones LO.

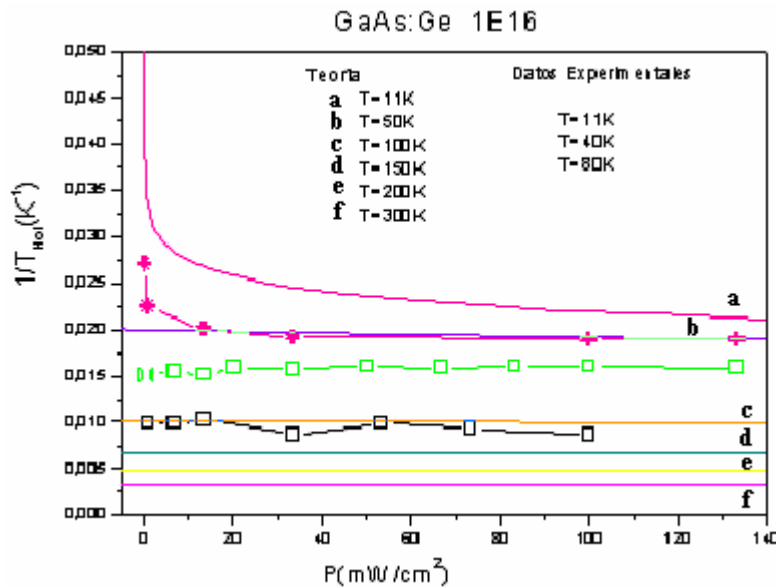


Figura 2

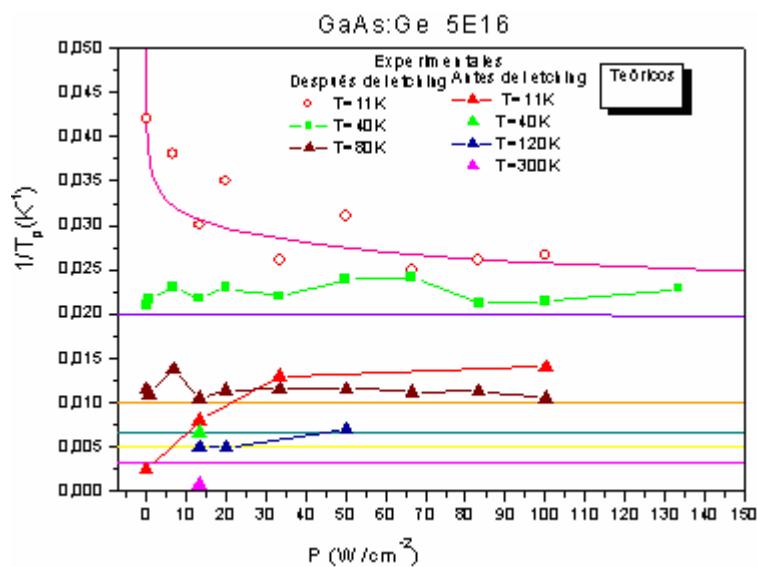


Figura 3

AGRADECIMIENTOS

Trabajo apoyado por Colciencias-BID y la Universidad del Quindío.

REFERENCIAS

- [1]. PAVESI L. and GUZZI M., J. Appl Phys. **75** (10), 4779 (1994)
- [2]. YU P. and CARDONA M., "Fundamentals of Semiconductors" Springer-Verlag Berlin (1996).
- [3]. PRABHU S. S., VENGURLEKAR A. S., ROY S. K. and SHAH J.: Phys. Rev. **51**, 14233 (1995).
- [4]. BINET F., DUBOZ J. Y., OFF J. and SCHOLZ F.: Phys. Rev B, **60**, 4715 (1999).
- [5]. KELLER P., MISHRA U. K. and DENBAARS S.P.: Appl. Phys. Lett. **71**, 2572 (1997).
- [6]. LYON S. A.: J. Lumin. **35**, 121 (1986).
- [7]. BLAKEMORE J. S. "Semiconductor Statistics" Dover, Boston (1986)
- [8]. LANDOLT-BÖRNSTEIN, "Semiconductors, Subvolume a: Intrinsic properties of group IV elements and III-V, II-VI and I-VII compounds" (Edited by O. Madelung, W. Van der Osten and U. Rössler) Neue Serie, subvolume III-22, , Springer-Verlag, Germany (1987).
- [9]. FONTHAL G., DE LOS RIOS M., J. QUINTERO, N. PIRAQUIVE, H. ARIZA-CALDERON y MENDOZA-ALVAREZ J.: Rev. Col. Fis. **32**, 104 (2000).