

POTENCIA MÁXIMA DE UN HAZ LÁSER PULSANTE PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL ARSENIURO DE GALIO

**B. GONZÁLEZ, A. HERNÁNDEZ,
J. GARCÍA, F.J. DEL PINO Y J.R. SENDRA**

INTRODUCCIÓN

El Arseniuro de Galio (GaAs) es un material semiconductor que, entre otras, tiene numerosas aplicaciones en optoelectrónica. Sus propiedades electroópticas pueden caracterizarse mediante una técnica basada en la iluminación con un haz láser pulsante de un dispositivo o de un "chip" de GaAs, que se desplaza a lo largo de la superficie del material. Esta técnica se emplea por ejemplo en medidas de emisión térmica [1], en la evaluación de imperfecciones en semiconductores [2], en el estudio de nuevos mecanismos de fotogeneración [3], o como control óptico en circuitos integrados de microondas de GaAs [4].

Para poder aplicar esta técnica es necesario conocer si debido al calentamiento producido por el láser se produce un aumento signifi-

RESUMEN

Algunas propiedades físicas de los materiales semiconductores pueden medirse mediante iluminación con radiación láser y el posterior tratamiento de los fenómenos de conducción producidos. Sin embargo, la radiación incidente puede incrementar la temperatura de la muestra hasta llegar a desvirtuar los valores de los parámetros objeto de análisis.

En este artículo se estudia el impacto de la técnica indicada en la caracterización del Arseniuro de Galio. La metodología de análisis consiste en la simulación numérica, basada en resultados experimentales, de la situación real. Los resultados delimitan la potencia máxima de la radiación manteniendo la temperatura de la muestra en valores aceptables.

ABSTRACT

Some physical properties of semiconductor materials can be measured by applying a laser beam on and analyzing the resulting conduction phenomena. However, incident radiation may increase the material temperature to the point of turning out erroneous measured values.

This work deals with the study of this technique when applied to the characterization of GaAs material. The analysis method is based on numerical simulation, under experimental constraints, of the actual situation. The results limit the maximum applied laser beam power, maintaining the material temperature into acceptable values.

Las actividades relacionadas con la recepción, transmisión e intercambio de información, junto con la resolución de problemas, son las que representan una mayor proporción de la actividad del directivo público

ficativo de la temperatura en el material analizado. Un incremento de sólo unos pocos grados centígrados puede llevar a la introducción de considerables errores en la medida de los valores de parámetros electroópticos de interés.

Siguiendo el razonamiento a la inversa, resulta de gran interés conocer la potencia luminosa máxima del haz que, aplicada a la muestra, asegure la fiabilidad de las medidas obtenidas. La situación correspondiente a un flujo del haz láser constante, llamada situación estacionaria, ha sido ya analizada [5]. Los resultados de dicho análisis son pesimistas respecto a la mencionada potencia máxima pues el aumento de la temperatura del sustrato es superior al experimental ya que en la práctica la iluminación es, usualmente, pulsante [1], [4], y [6] es decir, se ilumina el material durante un intervalo de tiempo de muy corta duración (del orden de nanosegundos), de modo que la potencia del láser podrá ser mayor que la prevista en el caso estacionario sin que se produzca un calentamiento del sustrato tal que falsee las medidas.

Para un estudio más detallado del incremento de la temperatura es necesario considerar la evolución temporal de la fuente de potencia luminosa. Así, en este documento se presentan los resultados obtenidos en el estudio dinámico del calentamiento de un sustrato de GaAs, debido a un haz láser en forma de pulso.

HAZ LÁSER Y SUBSTRATO DE GAAS CONSIDERADOS

El principal objetivo del proyecto es determinar la máxima potencia de un haz láser en forma de pulso, que incide sobre un sustrato de GaAs, sin que se produzca un excesivo aumento de la temperatura. Se asume que el semiconductor es puro y que el sustrato absorbe toda la energía del láser, es decir, no hay reflexión en la superficie de incidencia (caso de calentamiento máximo y, por ende, menos favorable).

Calor específico	c_p (J Kg ⁻¹ K ⁻¹)	325
Densidad volumétrica	ρ (kg·m ⁻³)	5314.7
Temperatura de fusión	$T_{\text{fusión}}$ (K)	1513
Coefficiente de absorción	α (m ⁻¹)	$31.1 \cdot 10^5$
Conductividad térmica	K_0 (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	57.95

Parámetros físicos del GaAs

TABLA 1

Desde el punto de vista físico, el problema consiste en determinar la distribución de temperaturas en un medio material. Se aborda calculando las soluciones de la ecuación del calor sometida a las condiciones de contorno adecuadas. De los tres mecanismos básicos de propagación del calor (conducción, convección y radiación) el principal, en este caso, es el de conducción en el seno del material semiconductor. El intercambio de calor en la superficie del GaAs debido a la convección es despreciable frente al anterior. Tampoco existen procesos de radiación desde la muestra (ausencia de reflexión). La resolución de la mencionada ecuación se hará numéricamente, y a la temperatura ambiente, $T_0=300$ K.

Los parámetros físicos involucrados son indicados en la tabla 1 [7].

El valor dado para el coeficiente de absorción, α , es el correspondiente a una longitud

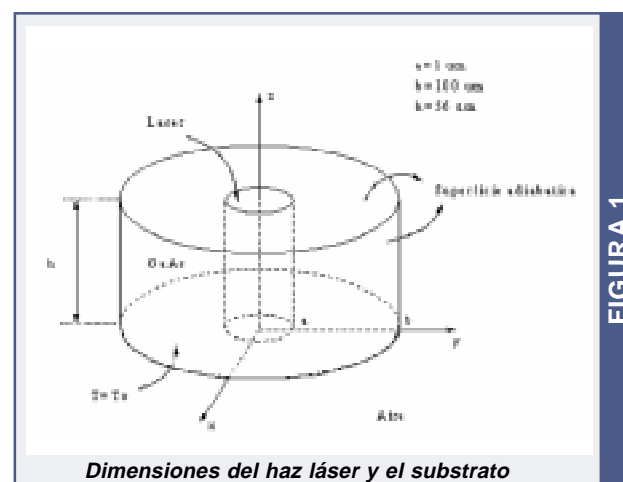
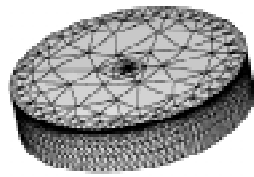


FIGURA 1

FIGURA 2



Mallado del sustrato del GaAs

de onda del haz láser de 670 nm. La figura 1 muestra la estructura geométrica considerada del haz láser y del sustrato. El sustrato de GaAs tiene un radio, b , de $100 \mu\text{m}$ y una profundidad, h , de $56 \mu\text{m}$ (suficientes para la estabilización de la temperatura). El haz láser incide sobre el sustrato en el cilindro dibujado a trazos, y su radio, a , es $1 \mu\text{m}$.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el trabajo indicado para el caso estacionario [5], se demostró que para dimensiones prácticas el único parámetro que puede hacer variar la temperatura significativamente es la potencia del láser. Por ello sólo se ha considerado la variación de la temperatura con la potencia del haz, permaneciendo constantes el resto de los parámetros.

La evolución temporal de la temperatura del sustrato, cuando sobre él incide un pulso de láser, viene determinada por la ecuación dinámica del calor:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = g(z, T) \quad (1)$$

donde T representa la temperatura dada en K; c_p es el calor específico a presión constante, k la conductividad térmica, ρ la densidad volumétrica de masa del GaAs y g es la densidad de potencia entregada por las fuentes de calor (el haz luminoso). Debido a la simetría cilíndrica del problema, esta densidad de potencia, $g(\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$, depende sólo de z .

Como el incremento de la temperatura en el sustrato ha de ser pequeño para que el láser pueda ser utilizado en la medida, consideramos los valores de c_p , ρ y k constantes e iguales a sus valores a temperatura ambiente, T_0 .

Por otro lado, habitualmente se emplean pulsos láser con una duración del orden de nanosegundos [1], [2] y [6]. Por ello se ha fijado una duración típica de 20 ns. La potencia del haz, $P(\text{W})$, es el único parámetro a variar.

En [5], se demostró que para una correcta simulación del calentamiento producido por el láser, la densidad de potencia disipada, g , debe decrecer exponencialmente con la profundidad del sustrato. Así se cumple entonces donde $z(\text{mm})$ es la distancia desde el fondo del sustrato (ver figura 1), y $P(\text{W})$ la potencia del pulso. El tiempo, t , se mide en nanosegundos.

$$g(z, t) = \begin{cases} \frac{\alpha P}{2\pi a^2} e^{-\beta z} & \text{si } z \in [0, h] \\ 0 & \text{si } z \in [h, \infty) \end{cases} \quad (2)$$

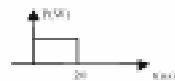
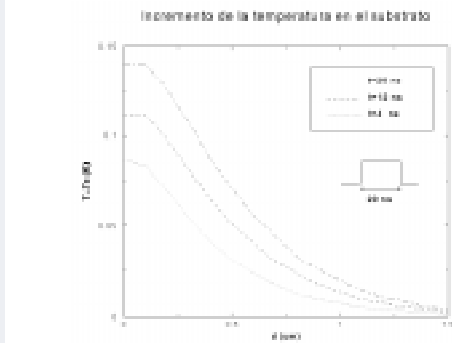


FIGURA 3



Evolución temporal de la temperatura ($P=38.5\text{KW}$)

Para resolver la ecuación del calor (1) han de tenerse en cuenta las condiciones de contorno (ver figura 1). La superficie superior del sustrato se considera adiabática, ya que, como se ha dicho, no existen procesos de convección y a su través prácticamente no hay flujo de calor. La superficie inferior actúa como fuente de calor, por lo que se asume que su temperatura es constante e igual a T_0 . Y la superficie lateral está lo suficientemente alejada del láser para considerarla también adiabática. Por tanto, las condiciones de contorno para (1) son:

donde $r=(x^2+y^2)^{1/2}$ es la distancia al eje del sustrato.

$$\begin{aligned}
 T &= T_c && \text{para } z = 0 \\
 \frac{\partial T}{\partial z} &= 0 && \text{para } z = h \\
 \frac{\partial T}{\partial r} &= 0 && \text{para } r = b
 \end{aligned} \quad (3)$$

CARACTERÍSTICAS DEL SIMULADOR EMPLEADO

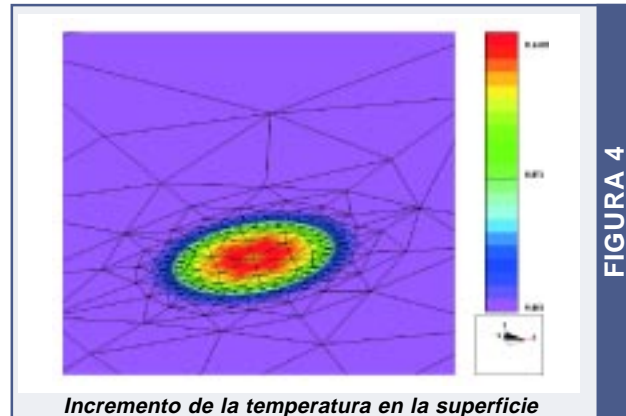
Utilizando métodos numéricos puede obtenerse una aproximación a la solución del problema, $T(x,y,z,t)$, con suficiente precisión para predecir su respuesta.

La herramienta de análisis numérico empleada, denominada SAP (Smart Analysis Programs) [8], simula numéricamente fenómenos eléctricos y térmicos en líneas de interconexión de circuitos integrados. Se basa en dos simuladores de elementos finitos: SCAP (Smart Capacitance Analysis Program) y STAP (Smart Thermal Analysis Program). STAP permite análisis térmico estático y transitorio de interconexiones bajo estrés eléctrico y es el simulador empleado para este estudio.

La generación tridimensional del sustrato se realiza mediante el preprocesador LAYGRID. Un fichero de entrada define la geometría, condiciones de contorno y la densidad de potencia disipada en el sustrato, $g(z,t)$. Con este fichero LAYGRID, mediante una partición del espacio en tetraedros, genera la estructura del sustrato. Esta información queda disponible en otro fichero, donde se incluye las condiciones de contorno y $g(z,t)$, que será utilizado por STAP para la simulación térmica. La figura 2 muestra la partición del sustrato realizada por LAYGRID.

Con STAP se analiza la evolución del campo de temperaturas en régimen transitorio, al incidir un pulso láser sobre el sustrato de GaAs, así como la influencia de la potencia del láser en su calentamiento. Estos resultados y las conclusiones se exponen a continuación.

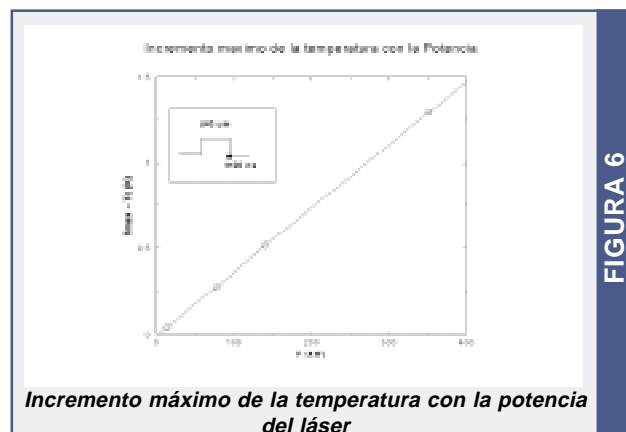
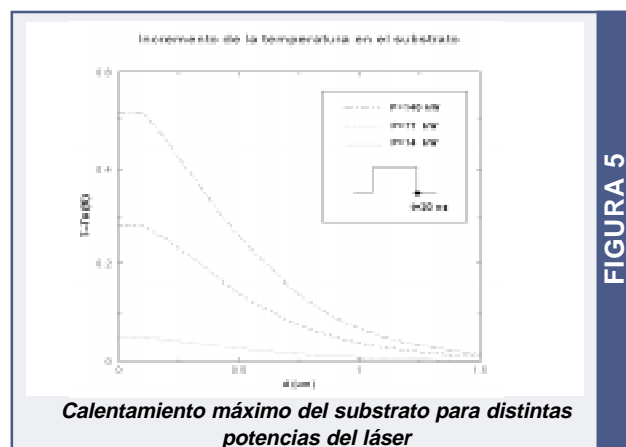
Las actividades relacionadas con la recepción, transmisión e intercambio de información, junto con la resolución de problemas, son las que representan una mayor proporción de la actividad del directivo público



RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis Transitorio

La figura 3 muestra la evolución temporal de la temperatura en el sustrato. La potencia del láser considerada es 38.5 KW, y el resto de los parámetros vienen



dados por los valores indicados anteriormente. Para diferentes instantes, a medida que evoluciona el pulso se representa el incremento de la temperatura en el eje del sustrato; d es profundidad en el sustrato ($d=h-z$).

La forma de las curvas es una gaussiana, cuyo máximo se sitúa, como era de esperar, en la superficie superior del sustrato ($d=0$) y el eje del haz. Es el punto de máximo calentamiento ($T_{\text{máx}}$). Por otro lado, la temperatura decrece rápidamente con la profundidad. A tan sólo $1.5 \mu\text{m}$ el incremento de la temperatura ya es despreciable.

Este rápido descenso también se produce en la superficie del sustrato. En la siguiente figura 4 se muestra el incremento de la temperatura en la superficie superior, donde incide el láser. Esta imagen corresponde al instante final del pulso. Se aprecia como fuera del haz la temperatura tiende rápidamente al valor ambiental, produciéndose esta transición en tan sólo $0.3 \mu\text{m}$.

Por tanto se puede afirmar que el calor prácticamente se acumula en la superficie superior del sustrato donde incide el haz láser. Este resultado también se obtuvo en [5].

Análisis de la Potencia

La figura 5 representa el incremento de la temperatura en el eje del sustrato para diferentes potencias del haz láser incidente, en el instante en que finaliza el pulso. De nuevo

la forma de las curvas es gaussiana. Cabe destacar la elevada potencia que puede tener el láser sin que el sustrato sufra un calentamiento apreciable. Para una potencia tan alta como son 140 kW , el aumento máximo de la temperatura es de tan sólo de 0.5 K . No obstante, este incremento introduciría errores en la medida de los parámetros eléctricos del material.

Por último, la figura 6 representa el incremento máximo de la temperatura del sustrato (eje del haz, $d=0$) con la potencia del láser, al finalizar el pulso. Al ser pequeño el incremento de la temperatura, éste es proporcional a la potencia del haz. Este resultado es consistente con [5] y [6].

Para considerar válida una medida realizada mediante la técnica del láser, el incremento máximo de la temperatura debe ser menor que 0.1 K [5]. Así pues, con un pulso de 20 ns , la potencia del láser debe ser inferior a 38 kW .

En el caso del Silicio, potencias del orden de 150 kW y pulsos de entre 10 ns y 30 ns , son suficientes para calentar considerablemente el sustrato, llegando en algunos casos a fundirse [1].

Para el arseniuro de galio, potencias más elevadas producen un rápido aumento de la temperatura, ya que la dependencia pasa de ser lineal a parabólica. Este resultado está de acuerdo con [6]. No obstante, a potencias elevadas los resultados aquí presentados no son tan fiables debido a la hipótesis de partida por la que los parámetros físicos se fijan a los valores correspondientes a la temperatura ambiente.

•BIBLIOGRAFÍA

X.Xu, C.P.Griporopolus y R.E.Russo, *Nanosecond-Time-Resolution Thermal Emission Measurement During Pulsed Excimer-Laser Interaction with Materials*. Applied Physics A.VOL. 62. 1996. Págs. 51-59.

S.Sumie, H.Takamatsu, Y.Nishimoto, T.Horiuchi et al., *A New Method of Photothermal Displacement Measurement by Laser Interferometric Probe – Its Mechanism and Applications to Evaluation of Lattice Damage in Semiconductors-*. Jpn. J. Applied Physics. VOL. 31. Pt.1, NO. 11. 1992. Págs. 3575-3583.

D.Abbott y K.Eshraghian, *Current Gain Mechanism in Planar GaAs MESFETs due to New Photovoltaic Self-Biasing Edge-Effect*. Euro GaAs and related III-V Compounds Appl. Symposium. París. 1996. p. 3B3.

S.E.Saddow y C.H.Lee, *Optical Control of Microwave-Integrated Circuits Using High-Speed GaAs and Si Photoconductive Switches*. IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques. VOL. 43, NO. 9. 1995. Págs. 2414-2420.

D.Abbott, B.Davis, B.González, A.Hernández y K.Eshraghian, *Modelling of Low Power CW Laser*

Beam Heating Effects on a GaAs Substrate.
Solid-State Electronics. VOL. 42, NO. 5. 1998.
pp. 809-816.

Engineering. B40. 1996. pp. 89-95.

J.C.Brice, *Properties of Gallium Arsenide.* INSPEC.
2nd Ed. 1990.

R.K.Singh, D.R.Gilbert y J.Viatella, *A Novel Method to Predict Laser-Induced, Non-Linear Thermal Effects in Semiconductors.* Materials Science &

R.Bauer, R.Sabelka y C.Harlander, *SAP User's Manual.* Institute for Microelectronics. TU Vienna. 1999.

•BIOGRAFÍA

Grupo Investigador

El grupo de investigación que ha desarrollado el presente trabajo está adscrito a la División de Tecnología Microelectrónica del IUMA (Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada) de la ULPGC.

Las áreas de interés de la División son, entre otras, la caracterización y modelado de materiales y dispositivos de alta velocidad para aplicaciones analógicas y digitales, el análisis y desarrollo de sistemas de medición electrónica de

parámetros biomédicos y sensores y la estimación de retardos en sistemas digitales de alta velocidad.

Antonio Hernández Ballester
División TME-IUMA
Campus universitario de Tafira, pabellón B
35017- Las Palmas de Gran Canaria
email: toni@cma.ulpgc.es, teléfono: 928451255,
fax: 928451243

Este trabajo ha sido patrocinado por:

UNIÓN ELÉCTRICA DE CANARIAS, S.A.
(UNELCO)