

Obtención de imágenes térmicas y termoelectrónicas mediante Radiometría Fototérmica Infrarroja.

P. J. Mendoza y M. E. Rodríguez

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional
José Siurob 10, Col. Alameda, 76040, Querétaro, Qro.

En este trabajo, se reportan nuevas aplicaciones de Radiometría Fototérmica Infrarroja en el dominio de la frecuencia, para el estudio cuantitativo de propiedades térmicas y electrónicas de materiales semiconductores. Se da un especial énfasis a la obtención de imágenes térmicas y termoelectrónicas para el diagnóstico de dispositivos semiconductores. Hemos estudiado obleas de silicio, así como microcircuitos integrados con el propósito de establecer su uniformidad térmica y electrónica. Finalmente, se analizaron obleas de InSb utilizado como sustratos para el crecimiento por haces moleculares de detectores de infrarrojo de InSb/CdTe. De acuerdo a los resultados obtenidos, la Radiometría Fototérmica Infrarroja posee una alta sensibilidad a la detección de diferente concentración de portadores así como a la estructura cristalina del material en áreas microscópicas.

Keywords:

1. Introducción

En los últimos años, las técnicas fototérmicas han crecido en importancia para la caracterización térmica y electrónica de materiales semiconductores [1,2], metálicos, y orgánicos [3] entre otros. Radiometría Fototérmica Infrarroja (RFI) ha tomado el liderazgo de las técnicas fototérmicas sobre técnicas como fotoacústica, debido esencialmente a su carácter no destructivo, remoto y sin contacto, además de permitir el análisis de muestras en línea. Los parámetros térmicos y eléctricos (termoelectrónicos) que se pueden obtener a través de un espectro radiotérmico son: tiempo de vida de portadores minoritarios (τ), velocidad de recombinación frontal (S_1) y trasera (S_2), coeficiente de difusión de portadores ($D_{n,p}$), así como la difusividad térmica del material (α). El problema de unicidad de la solución en el caso de radiometría fototérmica infrarroja ha sido ya discutido para modelos tanto unidimensional como tridimensional [1,4] y se ha demostrado que cada uno de los parámetros antes mencionados tienen funciones de peso diferentes en el rango de frecuencias de modulación, y que tanto la amplitud de la señal como su fase requieren de funciones de peso específico para cada parámetro de manera independiente. Este problema fue analizado acotando los valores de los parámetros termoelectrónicos teniendo en cuenta un análisis instrumental (calibración del sistema).

Fundamentos físicos de RFI

Cuando a un cuerpo absorbente se le hace incidir una radiación monocromática o policromática modulada, se produce un cambio también modulado de la temperatura de su superficie, como resultado del proceso de absorción de radiación y la conversión no radiativa de energía. Esta energía emitida por el cuerpo, puede ser observada a través de la emisión de radiación de cuerpo negro de la superficie y del bulto (radiación de Planck). Midiendo las variaciones de emisión de cuerpo negro es posible obtener información

sobre el espectro de absorción, propiedades físicas (térmicas y electrónicas) entre otras. Las bases físicas de la detección mediante esta técnica es la ley de radiación de cuerpo negro, la cual describe la emisión radiada total, W , sobre un infinito ancho de banda, de un cuerpo en equilibrio térmico a una temperatura T ,

$$W = \epsilon \sigma T^4 \quad [\text{W/cm}^2] \quad (1)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann y ϵ es la emisividad del cuerpo. Si el proceso fototérmico induce cambios de temperatura en la superficie del material, $\Delta T(w)$ y este cambio es muy pequeño comparado con la temperatura de equilibrio, el cambio en la emitancia, puede ser escrito como:

$$\Delta W = 4 \epsilon \sigma T^3 \Delta T(w) \quad (2)$$

En recientes años, el extensivo desarrollo tanto en la teoría como en la metodología de las técnicas radiométricas ha permitido de manera no destructiva la evolución de técnicas y métodos para la investigación de materiales sólidos [5] y biológicos [6,7]. Las primeras aplicaciones en materiales electrónicos fueron reportadas por Nakamura et.al. [8], donde se detectaron micro fracturas en GaAs con la utilización de un microscopio radiométrico. Nakamura y su grupo, midieron la señal como una función de la energía de excitación a bajas frecuencias de modulación (330 Hz), con lo que obtuvieron el primer espectro radiométrico. El mismo grupo también construyó la primera imagen mediante una distribución espacial de señal a temperatura ambiente y con una longitud de onda de 895 nm [9] pero en dicha imagen no se definió cual de las componentes estaba gobernando la señal, debido a la inexistencia de una teoría que condujese a la determinación de funciones de peso. Posteriormente a la comparación de sus imágenes con el perfil de densidad de dislocaciones, concluyeron que la señal radiométrica estaba generada por recombinaciones no radiativas y que

era sensible incluso a densidades bajas de dislocaciones. Los barridos en frecuencias, fueron subsecuentemente utilizados para el análisis electrónico de materiales, como una alternativa a las técnicas puramente térmicas que habían sido usadas por algún tiempo para el análisis de homogeneidad de portadores [10] y parámetros termoelectrónicos en substratos implantados, incluyendo daño de la superficie [11]. Hasta este momento, la emisión de cuerpo negro estaba asociada básicamente a los estados desexcitados fonónicos, es decir, solo a la contribución térmica de la red. Una de las contribuciones más importantes al entendimiento de los fenómenos fototérmicos fue la aportada por Ulmer y Frank [12], los cuales demostraron que los portadores ópticamente generados incrementan la emisión de infrarrojo (cuerpo negro) de la superficie de un cuerpo y queda establecido que la señal radiotérmica está formada por dos contribuciones: térmica, debido a las desexcitaciones de la red y la componente de plasma debida a las contribuciones de las desexcitaciones no radiativas de los portadores fotogenerados. De esta manera, podemos escribir la señal radiométrica total como [1,13]:

$$S_{RFI} = Cte.1 * \text{Térmica} + Cte.2 * \text{Plasma} \quad (3)$$

La principal ventaja de Radiometría Fototérmica Infrarroja, sobre otras técnicas convencionales para la determinación de parámetros térmicos y electrónicos, es que RFI no está limitada por la opacidad de la muestra, sobre técnicas ópticas moduladas radica en la habilidad de medir parámetros de transporte directamente relacionados con la calidad electrónica de la muestra, tales como tiempo de vida, coeficiente de difusión de portadores y el estado de las superficies ya sea frontal o trasera.

Montaje experimental y metodología

El arreglo experimental del instrumento utilizado para el diagnóstico de obleas de silicio, así como de imágenes térmicas y termoelectrónicas se muestra en la figura 1 y ha sido reportado anteriormente [1,2]. Un láser de argón sintonizado en

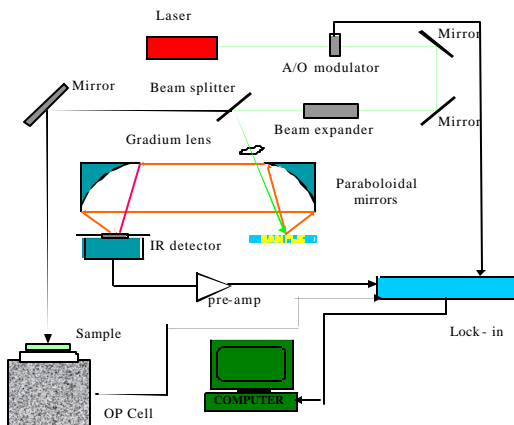


Figura 1. Montaje experimental utilizado para radiometría fototérmica infrarroja en el arreglo tridimensional.

la línea 514 nm se pasa a través de un modulador acusto-óptico (MAO) y subsecuentemente por un expansor de haz produciendo un haz de 1 cm de diámetro. Este haz se enfoca en la superficie de la muestra usando una lente gradium de 12.4 cm. de distancia focal. El tamaño de haz Gaussiano enfocado en la muestra es de solo 40 micras de diámetro.

Para obtener una imagen radiotérmica de alta definición, es necesario tener un haz de estas dimensiones, lo que permite usar un modelo radiométrico tridimensional que tiene en cuenta que la región de generación de la señal sea mucho menor que la longitud de difusión de portadores. La medición del diámetro del haz Gaussiano fue determinada mediante un medidor óptico de perfiles de haz (spiricon LBA-100^a V3.03). La potencia del haz incidente utilizada en los experimentos reportados fue de 50 mWatts, lo que satisface las condiciones de baja inyección y nos mantiene en el régimen lineal. Es necesario tener en cuenta la reflectividad de las muestras de silicio en la longitud de onda utilizada que es de alrededor de 0.4 [14]. La radiación infrarroja resultante emitida por la superficie del semiconductor es colectada, colimada y enfocada usando dos espejos parabólicos. La señal se obtiene utilizando un detector de CdTeHg enfriado con nitrógeno líquido con respuesta espectral de 2 a 12 micras. La señal de salida del detector es preamplificada y alimentada a un amplificador Lock-in (Stanford Research System 850) el cual demodula la señal de onda térmica generada. Para obtener los parámetros termoelectrónicos en obleas de silicio el rango típico de frecuencias utilizado es de 10 Hz a 100 KHz. La adquisición de datos y el control de frecuencias se hace mediante una computadora personal. Las imágenes radiométricas fueron generadas usando un sistema computarizado X-Y. La señal obtenida posee dos canales de salida: la amplitud y la fase, lo que permite obtener imágenes térmicas y termoelectrónicas (multicanal).

En reciente publicación [1] se ha demostrado que, a bajas frecuencias, la señal responde esencialmente a la contribución térmica (difusividad térmica, coeficiente de difusión de portadores y velocidad de recombinación trasera), lo que permite la obtención de imágenes térmicas, mientras que a altas frecuencias la señal está principalmente gobernada por la contribución de plasma (tiempo de vida de portadores, velocidad de recombinación frontal). La localización de la región a estudiar, así como la guía del láser se hace utilizando una cámara CCD (ver Fig. 1).

Descripción de las muestras

Las muestras analizadas en este trabajo fueron: una oblea de silicio de 15 cm de radio, térmicamente oxidada (muestra de referencia) tipo p; una oblea de silicio de 12 cm de diámetro ($1000 \text{ \AA} \text{ SiO}_2$) con dispositivos microelectrónicos de la compañía Mitel Semiconductors (Bromont, Québec, Canadá) así como un substrato de InSb

de 5.4 cm de diámetro utilizado para el crecimiento por haces moleculares de detectores de infrarrojo (InSb/CdTe).

2. Resultados

Imágenes Termoelectrónicas

Para la obtención de una imagen térmica o termoelectrónica, es necesario hacer un barrido en frecuencia en diferentes posiciones de la muestra, con el objeto de determinar en que rango de frecuencia se tiene la mayor variación en la señal (sensibilidad). La Fig. 2, muestra la amplitud de la señal radiotérmica, como función de la frecuencia de modulación tomado en una oblea de 15 cm de diámetro para cuatro posiciones en la superficie de la muestra: A(centro), B(2.5 cm) , C(5 cm) y D(7.5 cm) de la posición central (ver figura insertada). Como es evidente de la Fig. 2, a bajas frecuencias ($f < 2$ KHz) se obtienen las mayores variaciones en la señal, mientras que a altas frecuencias la señal fototérmica se mantiene prácticamente constante, reflejando pasivación en la superficie, lo que arroja valores de velocidad de recombinación superficial uniformes y centrados alrededor de 175 cm/seg. Los cambios en la señal fototérmica a bajas frecuencias están gobernados por cambios en el coeficiente de difusión de portadores que de acuerdo a un ajuste multiparamétrico [1] está dado por: 3.1(A), 3.1(B), 4.9(C) y 8.2(D) cm^2/seg . El anterior resultado esta de acuerdo con las predicciones de la teoría, pues el coeficiente de difusión de portadores es un parámetro de bulo. El mismo criterio es usado para la construcción de una imagen termoelectrónica, donde los cambios tanto en amplitud como en fase están dados a altas frecuencias.

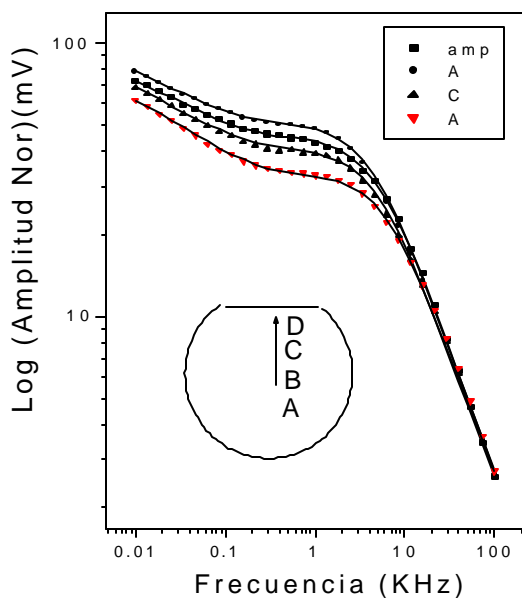


Figura 2. Amplitud de la señal RFI para cuatro diferentes locaciones en la superficie de la muestra.

A continuación se presentan algunas aplicaciones de imágenes radiotérmicas para el análisis de dispositivos semiconductores enfocadas en la obtención de imágenes radiométricas termoelectrónicas.

Inspección de Microcircuitos integrados

Existen cuatro operaciones básicas en el proceso de fabricación de un microcircuito integrado o un dispositivo semiconductor [14, 15], como son:

- a) el proceso de colocación de películas delgadas que pueden ser aislantes, semiconductoras o conductoras.
- b) el proceso de grabado en el cual mediante una serie de pasos se tiene como resultado la remoción parcial o total de parte del sustrato o de las películas delgadas ya depositadas. Este proceso es también conocido como fotoenmascarado, fotolitografía o microfotolitografía. Es en este proceso donde se crean las diferentes partes que constituyen un circuito integrado. Esta operación es la responsable de las dimensiones críticas de los microcircuitos integrados en la actualidad. Errores en este proceso pueden causar cambios en el funcionamiento electrónico del dispositivo y del circuito.
- c) el proceso de dopaje y
- d) el proceso de tratamiento térmico.

Estos procesos pueden ser realizados con la utilización de diferentes tipos de materiales, crecidos o depositados mediante una gran variedad de técnicas.

Una región cercana a la parte central de una oblea de 12 cm. de diámetro (ver figura 3) fue analizada para obtener imágenes termoelectrónicas. La Fig. 4 muestra una imagen radiométrica tridimensional tomada sobre una área de $300 \mu\text{m} \times 340 \mu\text{m}$. Esta región fue escogida para obtener una imagen radiotérmica (termoelectrónica), porque está compuesta de una región de silicio policristalino (cuadrado) que a su vez está rodeada por SiO_2 . La señal radiométrica en amplitud y en fase fue tomada a una frecuencia de 4 KHz.

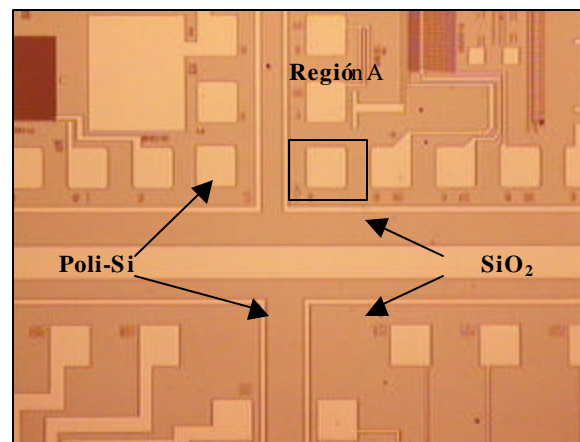


Figura 3. Microfotografía de un microcircuito integrado mostrando regiones de SiO_2 y silicio policristalino

Los valores bajos de amplitud y fase, corresponden a silicio policristalino; como era de esperarse, la eficiencia de conversión no radiativa está afectada por la baja densidad de portadores foto excitados presentes en el silicio policristalino, lo que refleja que la señal está básicamente gobernada por la componente térmica.

Por otro lado, valores altos de amplitud y pequeños valores de desfase están asociados directamente con las regiones de SiO₂ debido al dominio de la señal por la componente de plasma. Estos resultados demuestran que las imágenes pueden ser usadas para identificar áreas de alta y baja actividad electrónica a través de regiones particulares en la muestra inmediatamente después del proceso de fotolito grabado. Es muy interesante notar que en las regiones donde existe SiO₂ de acuerdo a la imagen termoelectrónica no hay una buena uniformidad electrónica. Esto puede ser debido a contaminación durante los procesos anteriores al grabado, como son el pulido mecánico y/o químico. Es interesante notar, que la sensibilidad de la técnica es diferente para la señal de amplitud y la de fase, y que en el caso de la figura 4 la fase presenta un grado mayor de sensibilidad; el anterior resultado ha sido ya reportado [1] y muestra que en los ajustes multiparamétricos es necesaria la obtención de parámetros de peso por canal de información.

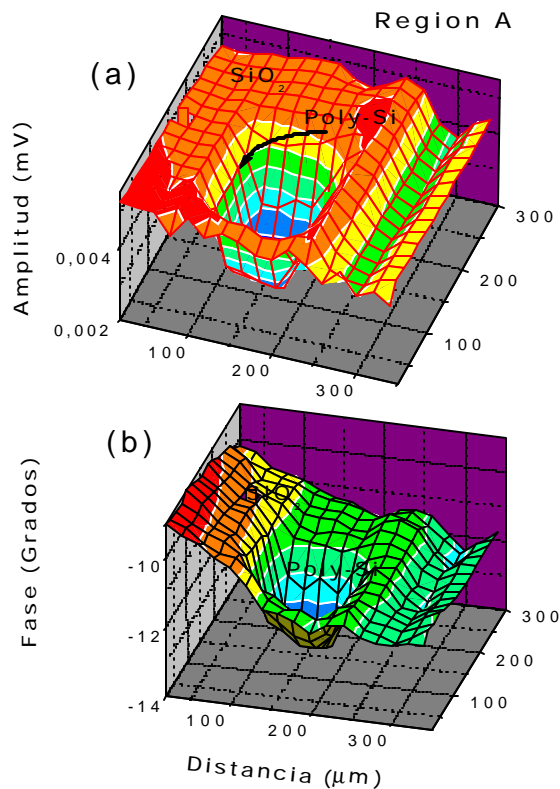


Figura 4. Amplitud y fase de la señal radiotérmica de la región A mostrada en la figura 2.

Inspección de obleas para crecimientos epitaxiales

La figura 5 muestra la amplitud (a) y la fase (b) de una imagen radiométrica termoelectrónica tomada en una área de 2 mm x 2mm localizada en la parte central de una oblea de InSb utilizada como sustrato para el crecimiento epitaxial de CdTe. Como es bien sabido, el éxito de un crecimiento epitaxial depende fuertemente del estado (electrónico y estructural) del sustrato. Esta imagen se obtuvo a una frecuencia de 5 KHz., donde podemos encontrar regiones dentro de esta oblea con diferencias de señal de aproximadamente el 300 %. Esta diferencia de señal se atribuye esencialmente a la existencia de diferentes densidades electrónicas de portadores. La oblea utilizada, de acuerdo al análisis radiométrico no presenta una uniformidad electrónica.

La utilización de RFI puede dar una excelente información tanto in-situ como ex-situ del estado del sustrato, su aplicación puede contribuir al mejoramiento de crecimientos, al poder cuantificar el estado electrónico en el caso de obtención de imágenes a altas frecuencias o el estado de la red al ser tomada la imagen a bajas frecuencias.

3. Conclusiones

Mediante este trabajo pudimos establecer, que la radiometría fototérmica infrarroja en el dominio de la frecuencia es una técnica que permite determinar de una manera visual los parámetros termoelectrónicos, así como establecer una metrología para la obtención a temperatura ambiente de imágenes térmicas y termoelectrónicas para la inspección de una manera remota, no destructiva y sin contactos de dispositivos semiconductores.

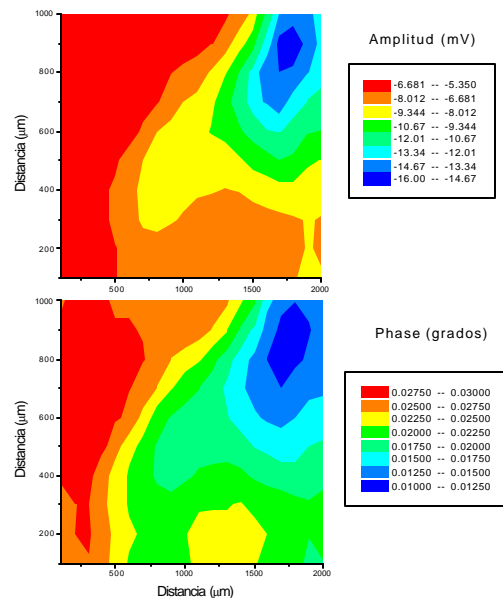


Figura 5. Amplitud (a) y fase (b) de una imagen termoelectrónica tomada a 5 KHz, de un sustrato de InSb.

La sensibilidad de esta técnica permite el análisis de dislocaciones y densidades bajas de defectos en materiales metálicos que pueden tener directa aplicación en el caso de forjas y de identificación de patrones de defectos puntuales, longitudinales entre otros.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por CONACYT México, proyecto 32456-E-2000.

Referencias

- [1] M. E. Rodríguez, A. Mandelis, G. Pan, L. Nicolaides, J. A. García y Y. Riopel, *J. Electrochem. Soc.* **147**, 687 (2000).
- [2] Mandelis, *Solid State Electrom.*, **42**, 1 (1998).
- [3] S. E. Bialkowski, en: *Photothermal spectroscopy methods for chemical analysis*, Vol 13, John Wiley & sons, New York, cap 2 (1996).
- [4] T. Ikari, A. Salnik y A. Mandelis, *J. Appl. Phys.*, **85**, 7392 (1999).
- [5] R. E. Imhof, B. Zhang y D. J. S. Bich, en *non-Destructive evaluation* (Editado por A: Mandelis). *Progress in Photothermal and Photoacoustic Science and Technology*, Vol II. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, Cap. 7 (1994).
- [6] S. Prahl, In *life and Earth Science* (Editado por A. Mandelis y P. Hess) *Progress in Photothermal and Photoacoustic Science, Science and Technology*, Vol III, SPIR Opt. Eng. Press (1984).
- [7] J. Welch y M. J. van Gemert, *Optical and Thermal Response of Laser-Irradiate Tissue*, Plenum, New York (1995).
- [8] H. Nakumara, K. Tsubouchi, N. Mokoshiba y T. Fukuda, *Jpn. J. Appl. Phys.* **24**, L876 (1985).
- [9] H. Nakumara y K. Tsubouchi, en *Photoacoustic and thermal wave phenomena in semiconductors*, Editado por A. Mandelis), North Holland, New York, cap. 3 (1987).
- [10] D. F. Edwards y P. D. Maker, *J. Appl. Phys.*, **33**, 2466 (1962).
- [11] H. Kachare, W. G. Spizer, F. K. Euler y A. Kahan, *J. Appl. Phys.*, **45**, 2938 (1974)
- [12] E. A. Ulmer, and D. R. Franck. *Proc. IX th Int. Conf. Physics, Semiconductors*, Nauka, p 170 (1968).
- [13] S. J. Shear, M. G. Someck, y T. Hiller, *Mat. Sci. Eng. B* **5**, 89 (1990).
- [14] P. Van Zanten: *Microchip Fabrication*, New York, McGraw-Hill, 102 (1997).
- [15] M. E. Rodríguez, A. Mandelis, G. Pan, J. A. García y Y. Riopel, *Sol. Sta. Electr* **44**, 703 (2000).