

Una técnica fotoluminiscente para la medición de coeficientes de absorción óptica de semiconductores

A. Lastras-Martínez, G. Ramírez-Flores
y J.M. Montejano-Carrizales

*Instituto de Física,
Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Alvaro Obregón 64, San Luis Potosí, S.L.P., México.*

(Recibido el 10 de enero de 1989; aceptado el 23 de marzo de 1990)

Resumen. Se describe una técnica fotoluminiscente para la medición de coeficientes de absorción óptica de semiconductores luminiscentes. La técnica requiere de la preparación de una muestra en forma de barrera Schottky, capaz de soportar unos cuantos voltios de polarización inversa. No se impone ningún otro requisito sobre la preparación de la muestra. En particular, la calidad óptica de la superficie de ésta no es un factor crítico para la técnica que aquí se describe. Ilustramos dicha técnica reportando mediciones de coeficientes de absorción óptica de monocristales de GaAs en el rango de energías 1.96-2.60 eV.

PACS: 78.20.Dj; 78.55.Ds

1. Introducción

El coeficiente de absorción óptica es un parámetro de importancia fundamental para una gran variedad de dispositivos de estado sólido. Existe un gran número de técnicas para medir coeficientes de absorción óptica. Estas van desde la simple transmisión óptica [1] hasta la sofisticada elipsometría espectroscópica [2]. Las mediciones de transmisión óptica son útiles para la determinación de coeficientes de absorción menores que 10^4 cm^{-1} . Para valores mayores que éste, a menos que estemos considerando películas delgadas, la preparación de las muestras resulta muy problemática. La elipsometría, por otra parte, es una técnica más general, la cual, sin embargo, necesita de una preparación cuidadosa de la superficie de la muestra que se va a medir. Esto, por otro lado, es cierto, para todas las técnicas basadas en el análisis de luz reflejada.

El propósito de este trabajo es el de reportar una técnica fotoluminiscente simple, para medir coeficientes de absorción óptica en materiales luminiscentes. La técnica requiere de preparar la muestra en forma de una barrera Schottky y, mientras la barrera sea lo suficientemente buena para soportar algunos pocos voltios de polarización inversa, la calidad óptica de la superficie de la muestra no resulta ser un factor crítico. Ilustramos el método reportando coeficientes de absorción en el rango de energía 1.96 a 2.6 eV.

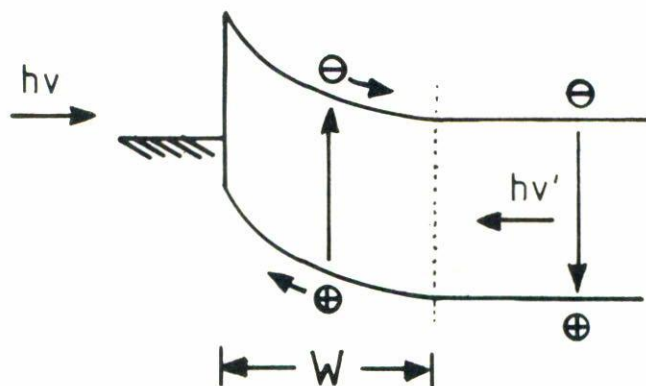


FIGURA 1. Ilustración de la generación de pares electrón-hueco en una Barrera Schottky. La fotoluminiscencia se debe solamente a la recombinación de los pares generados en la región neutra.

2. Descripción de la técnica

El principio de la técnica que estamos reportando en este trabajo es como sigue. Consideremos una barrera Schottky con un haz de luz monocromática incidiendo sobre ella (Fig. 1). Si la barrera tiene un contacto Schottky semitransparente, la luz incidente creará pares electrón-hueco en el semiconductor, los cuales, al recombinarse, podrían a su vez generar radiación fotoluminiscente. La intensidad I de la luz incidente, después de cruzar la interfaz metal-semiconductor, puede ser descrita por

$$I = I_0 T \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

donde I_0 es la intensidad total de la radiación monocromática incidiendo sobre la muestra, I es la intensidad de la radiación dentro del semiconductor a una distancia x de la interfaz metal-semiconductor, T es el coeficiente de transmisión óptica del sistema aire-metal-semiconductor a la energía de la radiación incidente [3], α es el coeficiente de absorción óptica del semiconductor, también a la energía de la radiación incidente. Aunque la ecuación (1) es estrictamente válida solamente para luz incidiendo normalmente sobre la muestra, ésta sigue siendo aproximadamente válida para ángulos de incidencia moderados en virtud de que el índice de refracción del semiconductor a la energía de interés es de aproximadamente 3.5.

De acuerdo con la Ec. (1), el cambio en la intensidad de la radiación incidente al cruzar la región de la barrera de Schottky de ancho W , está dada por

$$\Delta I = I_0 T [1 - \exp(-\alpha W)]. \quad (2)$$

Haremos la suposición razonable de que los pares electrón-hueco creados en la región de barrera, cuyo número es proporcional a ΔI , son: o bien separados por el intenso campo eléctrico ahí existente, o bien, se recombinan sin emitir radiación a través de niveles profundos. De esta manera, la fotoluminiscencia de la muestra provendrá enteramente de la recombinación de los pares electrón-hueco generados en la zona neutra del semiconductor, más allá de la región de campo eléctrico. De acuerdo con esto, la intensidad L de la radiación fotoluminiscente emergiendo de la muestra estará dada por

$$L = CI_0TT' \exp(-\alpha W), \quad (3)$$

en donde T' es el coeficiente de transmisión óptica del sistema semiconductor-metal-aire a la energía de la radiación fotoluminiscente y C es la probabilidad de que, una vez generado un par electrón-hueco en la zona neutra del semiconductor, se recombine generando un fotón. Dicha probabilidad puede escribirse como $C = \eta(1 - p)$, donde η es la eficiencia cuántica del semiconductor para la generación de fotones y p es la eficiencia de colección, por la barrera de Schottky, de los portadores minoritarios generados en la zona neutra del semiconductor. Al escribir la Ec. (3) se supuso que los fotones luminiscentes generados no son absorbidos en su camino hacia el exterior de la muestra mientras cruzan la zona de la barrera Schottky. En caso contrario, sería necesario introducir en la Ec. (3) un factor de atenuación, el cual dependería de W .

Se tiene entonces que, tomando logaritmos a ambos lados de la Ec. (3), se puede escribir:

$$\ln(L) = K - \alpha W, \quad (4)$$

donde K es una constante independiente de W .

De la Ec. (4), podemos ver que α puede obtenerse de la pendiente de la gráfica $\ln(L) - W$. W puede variarse aplicando un voltaje inverso a la barrera. La medición tendrá una precisión mayor cuando $W \approx \alpha^{-1}$. Se hace notar que la técnica descrita es independiente del espesor de la película metálica de la barrera de Schottky. Por supuesto, esta tendrá que ser lo suficientemente delgada para permitir la excitación y detección de la fotoluminiscencia. Por otro lado, a fin de asegurar que los fotones luminiscentes no son absorbidos en la región de la barrera de Schottky, al realizar la medición se deben considerar solamente aquellos con energías lo suficientemente pequeñas para que el correspondiente coeficiente de absorción cumpla la condición $W \ll \alpha^{-1}$. Esto normalmente implica detectar luminiscencia a energías ligeramente por abajo de la brecha prohibida del semiconductor. Siempre y cuando exista una cantidad detectable de radiación fotoluminiscente para la cual se cumpla la condición $W \ll \alpha^{-1}$, la distribución espectral de la fotoluminiscencia es intrascendente para la técnica descrita en este trabajo.

Se debe notar que una dependencia lineal de $\ln(L)$ en W implica que α es una constante independiente del campo eléctrico presente en la región de la barrera Schottky. En nuestro caso, esto es usualmente una buena aproximación si la energía

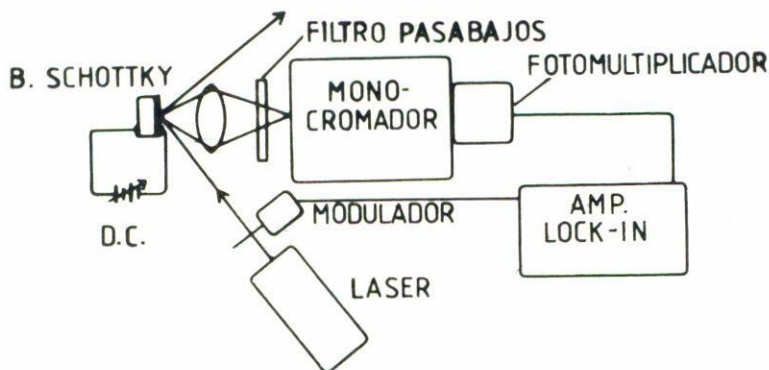


FIGURA 2. Diagrama esquemático del arreglo empleado para medir la fotoluminiscencia.

de los fotones incidentes no es muy cercana a la de uno de los puntos críticos de la estructura de bandas del semiconductor. Para energías de fotones en la vecindad de uno de estos puntos, el fenómeno de electroabsorción [4,5], podría ser importante.

3. Arreglo experimental

Las muestras utilizadas en este trabajo fueron barreras de Schottky metal-semiconductor fabricadas evaporando una capa semitransparente de Au sobre una oblea de GaAs tipo *n*, contaminada con átomos de Te a un nivel de $2.7 \times 10^{17}/\text{cm}^3$. Previamente a la deposición de la película de Au, se formó un contacto óhmico aleado en la superficie posterior de la oblea. Se tuvo cuidado en decapar químicamente la superficie antes de depositar la película semitransparente de Au, con el fin de remover el daño térmico producido durante el proceso de aleación del contacto óhmico. Finalmente, la oblea se cortó en diodos con un área de 1 mm^2 y se montaron éstos en bases de transistor TO-18. El ancho de las barreras Schottky se obtuvo a partir de mediciones $C-V$. Se obtuvieron líneas rectas casi perfectas para las gráficas $C^{-2}-V$, de las cuales se dedujo un voltaje de difusión para la barrera de Schottky de 1.0 V.

El arreglo experimental empleado para las mediciones de luminiscencia se muestra esquemáticamente en la Fig. 2. La muestra fue excitada por un láser de He-Ne ($h\nu = 1.96 \text{ eV}$) o por un láser de Argón (líneas 2.41 eV y 2.60 eV). La radiación de fotoluminiscencia emitida por la muestra se enfocó en la rendija de entrada de un monocromador de 0.25 m de distancia focal, sintonizando a una energía de fotón ligeramente menor que la de la brecha prohibida del GaAs. La luz que emerge de la rendija de salida del monocromador se hizo incidir sobre la superficie fotosensible de un fotomultiplicador RCA-C31034. Se debe usar baja potencia en el haz del láser que incide sobre la muestra. De otra manera, debido a pérdidas resistivas en

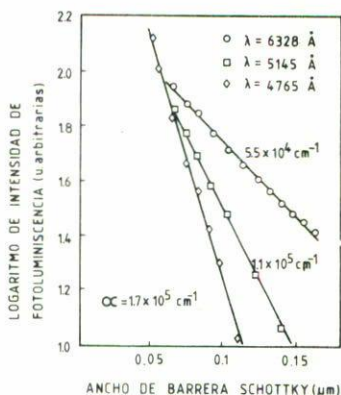


FIGURA 3. Gráfica del logaritmo de la intensidad de fotoluminiscencia versus ancho de barrera Schottky para tres energías de fotones incidentes. Los coeficientes de absorción mostrados en cada energía se determinaron de las pendientes de las líneas correspondientes.

la película de Au, la barrera de Schottky puede no ser uniformemente polarizada y resultar alinealidades en las gráficas $\ln(L)-W$. En nuestras mediciones se usaron potencias de $\approx 1 \text{ mW}$.

4. Resultados y discusión

En la Fig. 3 se resumen los resultados de nuestro trabajo. En esta figura se muestran tres curvas $\ln(L)-W$ para tres diferentes energías fotónicas. Estas corresponden a las líneas de emisión de los láseres de He-Ne ($h\nu = 1.96 \text{ eV}$) y Ar ($h\nu = 2.41$ y 2.60 eV); es decir, a $\lambda = 6328 \text{ \AA}$, 5145 \AA y 4765 \AA respectivamente. Como puede verse de la Fig. 2, los puntos experimentales pueden ajustarse razonablemente bien por líneas rectas. En dicha figura se muestran también los coeficientes de absorción óptica obtenidos de las pendientes de las rectas ajustadas.

Se hace notar que los valores obtenidos para α son aproximadamente 20% más altos que los reportados en las Refs. [6-8], los cuales fueron determinados por mediciones elipsométricas y de transmisión óptica, respectivamente. Esta discrepancia podría deberse a que nuestras muestras tienen grados de impurificación más altos que los correspondientes a las muestras de las Refs. [6-8]. Como se señaló líneas arriba, para energías de fotones cercanas a las de los puntos críticos del GaAs, el fenómeno de electroabsorción podría ser importante, dando lugar a una dependencia no lineal para la relación $\ln(L)-W$. De esta manera, la ligera forma de S de la curva experimental de la Fig. 3, correspondiente a la energía 1.96 eV ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$), puede

explicarse por el hecho de que la transición óptica del punto crítico $E_0 + \Delta_0$ del GaAs ocurre aproximadamente a esta energía. El punto crítico $E_0 + \Delta_0$ es debido al desdoblamiento espín-órbita del gap fundamental del GaAs.

La técnica descrita en este trabajo podría, en cierto modo, ser considerada como una técnica de transmisión óptica, en la que el espesor de la muestra correspondería al ancho de la barrera de Schottky. De esta manera, se obtendrá una mayor precisión en la determinación del coeficiente de absorción óptica cuando $W \approx \alpha^{-1}$; esto es, coeficientes de absorción mayores que 10^4 cm^{-1} se pueden medir con relativa facilidad.

Por otro lado, se encuentra que la condición óptica de la superficie de la muestra no es un factor crítico en la técnica descrita en este trabajo, siempre y cuando un número suficiente de fotones incidentes penetren más allá de la superficie metálica semitransparente y generen fotones luminiscentes. Así, la luz dispersada en la superficie de la muestra no necesita tomarse en cuenta. Lo mismo se podría decir con respecto a la presencia de sobrecapas superficiales. En contraste, las técnicas basadas en el análisis de luz reflejada, como es el caso de la elipsometría, son fuertemente dependientes de las condiciones ópticas de la superficie de la muestra.

Se concluye que la técnica presentada en este trabajo, es un método apropiado y muy simple para la medición de los coeficientes de absorción óptica de semiconductores luminiscentes, para energías mayores que la brecha prohibida. Debemos, sin embargo, excluir energías muy cercanas a la de los puntos críticos de la estructura de bandas del material estudiado. Finalmente, mencionaremos que, aún cuando en este trabajo se determinó el coeficiente de absorción del GaAs sólo para tres energías fotónicas, correspondientes a algunas de las líneas disponibles de los láseres que se usaron como fuente de excitación, nada nos impide el medir coeficientes de absorción óptica en un rango dado de energías, mediante la utilización de una fuente de luz continua, tal como una lámpara de tungsteno o de gas.

Reconocimientos

Queremos agradecer a la Ing. Q. Ma. del Refugio Martínez-Castillo su valiosa ayuda y al Dr. J. Urias-Hermosillo por sus interesantes sugerencias durante la preparación del manuscrito. Este trabajo fue parcialmente apoyado por CONACYT, PRDCYT-OEA y SEP.

Referencias

1. Véase por ejemplo L.L.Kamerski, *Policrystalline and Amorphous Thin Films and Devices*, Academic Press, Orlando (1980).
2. Véase por ejemplo D.E. Aspnes, "The Accurate Determination of Optical Properties by Ellipsometry", en: *Handbook of Optical Constants of Solids*, editado por E.D. Palik, Academic Press, Orlando (1985).
3. Para una derivación del coeficiente de transmisión óptica de un sistema en tres fases, véase por ejemplo J.A. Stratton, *Electromagnetic Theory*, McGraw Hill, New York (1941) p. 513. En la ecuación (1) no se explicitó la dependencia de T con los

parámetros ópticos del metal y del semiconductor en virtud de que la misma no es relevante para la técnica aquí descrita.

4. Véase por ejemplo D.E. Aspnes, "Modulation Spectroscopy/Electric Field Effects on the Dielectric Function of Semiconductors", en: *Handbook on Semiconductors*, Vol.2, editado por M. Balkanski, North Holland, Amsterdam (1980).
5. J. Dorantes-Dávila, A. Lastras-Martínez and P.M. Raccah, *Appl. Phys. Lett.* **38** (1981) 442.
6. H. Burkhard, H.W. Dinges and E. Kuphal, *J. Appl. Phys.* **53** (1982) 665.
7. M.D. Sturge, *Phys. Rev.* **127** (1962) 768.
8. D.E. Aspnes and A.A. Studna, *Phys. Rev.* **B27** (1983) 985.

Abstract. A simple photoluminescent technique for the measurement of optical absorption coefficients of luminescent semiconductors is described. The technique calls for the preparation of a sample in the form of a Schottky barrier capable of standing a few reverse-bias volts. No further requirements on sample preparation are imposed. In particular, the optical quality of the sample surface is not a critical factor to the technique here described. We illustrate the technique by reporting measurements of optical absorption coefficients of GaAs single-crystals in the 1.96–2.60 eV photon energy range.