

Determinación de las propiedades ópticas del Si mediante un medidor-psi de barrido

V.G. Vázquez, C. Martínez M.* y J.L. Martínez

Departamento de Física, Instituto de Ciencias, Universidad Autónoma de Puebla,
Apartado Postal J-48, Puebla, Pue., México

(recibido el 19 abril de 1988; aceptado el 4 de octubre de 1988)

Resumen. En este artículo se presentan los resultados de la determinación de las constantes ópticas de Si mediante un *medidor-psi* de barrido. Nuestro *medidor-psi* mide el módulo de la función elipsométrica $\rho = \tan \psi e^{i\Delta}$, a través de la reflectividad total oblicua $R(t)$ de un haz incidente polarizado linealmente, tomando la razón de $R(t)$ a dos estados distintos de polarización lineal dependientes del tiempo R_p y R_s . Por medio de una transformación Wiener-Lee de la función elipsométrica ρ del primer cuadrante del plano complejo de frecuencia $i\omega$ a un círculo unitario del plano complejo ω , es posible recuperar la función dieléctrica $\epsilon(\omega)$ del Si en el mismo intervalo óptico de la medición espectral de $|\rho|^2$.

PACS: 07.60.Dq; 07.60.Fs; 07.60.Hv

1. Introducción

Para determinar las constantes ópticas de materiales absorbentes por reflectancia, se necesitan al menos dos mediciones independientes de algunos parámetros de reflectancia. La literatura de tales mediciones incluyen, por ejemplo: determinación de la reflectividad a dos ángulos de incidencia diferentes [1], dos estados diferentes de polarización y ángulo de incidencia fijo [2], dos estados diferentes de polarización y dos ángulos de incidencia diferentes [3], dos estados diferentes de polarización alrededor del pseudo-ángulo de Brewster [4], etc. En estos métodos se tiene que confiar en cálculos numéricos para invertir la ecuación de reflectancia en términos de las constantes ópticas del material bajo estudio, además de modificar la geometría del arreglo experimental. Si se está interesado en dejar fijo el arreglo experimental, debe restituir la información completa de las constantes ópticas por medio de un cálculo de Kramers-Krönig [5]. En las mediciones de la función dieléctrica del Si, se decidió usar el arreglo llamado elipsómetro unielemento de polarizador rotante (*medidor-psi*) y llevar a cabo una medición espectroscópica de la razón $\tan^2 \psi = \frac{R_p}{R_s}$ en el intervalo óptico de 1.5 a 6.0 eV. Con el uso posterior del método de Fourier sugerido en la Ref. [6], se recuperó la fase de la función elipsométrica ρ .

*Escuela Preparatoria Nocturna "Lic. Benito Juárez", Universidad Autónoma de Puebla, 14 Sur y Av. San Baltazar, 72500 Puebla, Pue., México.

2. Experimento

Un diagrama esquemático del arreglo experimental se muestra en la Fig. 1. La medición de $\tan^2 \psi$ a cada longitud de onda fija fue realizada por correlación temporal de la reflectividad dependiente del tiempo

$$R(t) = \frac{(R_p + R_s) + (R_s - R_p) \cos 2\omega t}{2}, \quad (1)$$

a dos estados de polarización dependientes del tiempo $R(t_1) = R_p$ y $R(t_2) = R_s$, por medio de un promediador de señal box-car PARC modelo 162. La razón entre los dos estados de polarización a la salida del box-car, da directamente la representación espectral de $R(t_1)/R(t_2) = \tan^2 \psi = |\rho|^2$. Para calibrar la superficie de la muestra con el plano de incidencia del polarizador rotante, se usó una señal eléctrica de referencia proveniente de nuestro elemento rotante para tomar $R(t_1)$ en el mínimo y $R(t_2)$ en el máximo de la Ec. (1). Este método permite calibrar electrónicamente el plano de incidencia y evitar algunos errores sistemáticos encontrados cuando se usan voltímetros simples *ac/dc* [7], además de tener la flexibilidad de promediar el ruido mediante el incremento de la razón de muestreo en la medición. Se usó un ángulo de incidencia de 70° , para el cual la mayoría de los semiconductores, la razón R_p/R_s obtiene su máxima sensibilidad [8].

Se recuperó la fase de la función espectral ρ calculando los coeficientes de Fourier del coseno de la representación espectral compleja de la función

$$\ln \rho(\omega) = \frac{1}{2} \ln(\tan \psi) + i\Delta(\omega),$$

como

$$\ln \rho(\delta) = \sum_n (A_n \cos n\delta + iB_n \sen n\delta), \quad (2)$$

y calculando los coeficientes del coseno a través de la relación $A_n = -B_n$, donde δ está definida a través de la transformación a un círculo unitario:

$$W = \frac{1 + \omega}{1 - \omega} = e^{i\delta}. \quad (3)$$

Debido al intervalo óptico limitado de nuestras mediciones para $\tan^2 \psi$, se usó la periodicidad de 2π y la propiedad de paridad de $\ln[\tan \omega(\delta)]$ para interpolar, en el espacio δ , un polinomio de tercer orden en el intervalo óptico inaccesible. Una ilustración del método usado se muestra en la Fig. 2.

Para garantizar la precisión en el cálculo de $\epsilon(\omega)$ respecto de alteraciones superficiales tales como contaminantes, rugosidad u óxidos nativos, se prepararon muestras

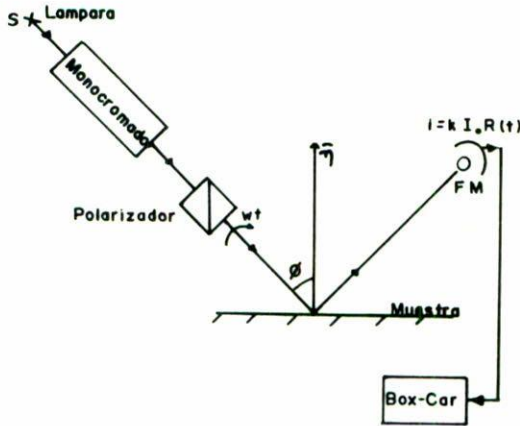


FIGURA 1. Arreglo experimental para la medición del módulo de la función elipsométrica ρ .

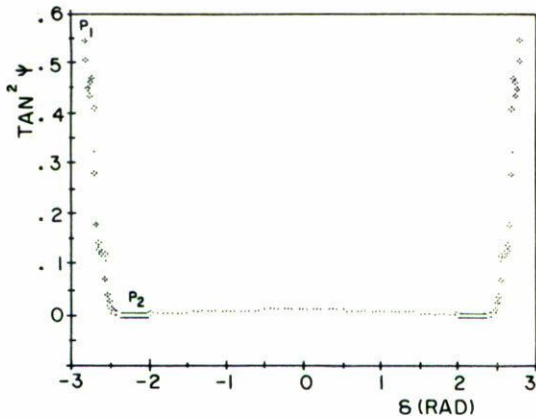


FIGURA 2. Método de interpolación para la función espectral par ρ medida en el espacio δ . Los puntos P_1 y P_2 corresponden al intervalo óptico medido.

como sugiere Aspnes [9], para usar la ecuación de Fresnel de dos fases

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \text{sen}^2 \phi + \text{sen}^2 \phi \tan^2 \phi \left[\frac{1 + \rho}{1 - \rho} \right]^2 \tag{4}$$

Aunque la polarización parcial de la luz emergente del monocromador puede eliminarse insertando un rotador de polarización (rombo de Fresnel), se detectó una

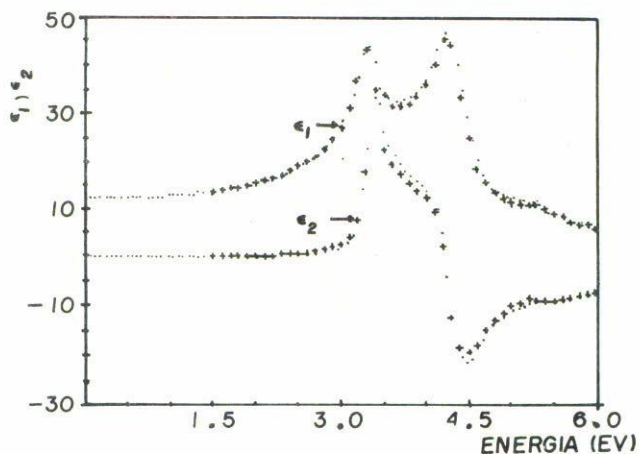


FIGURA 3. Comparación de la función dieléctrica (Si) por el método discutido en el texto y datos obtenidos por espectroscopía elipsométrica (Ref. [9]).

modulación temporal $\leq 1\%$ de la Ec. (1), sin efecto importante en la determinación de $\epsilon(\omega)$ y dentro del error experimental.

3. Resultados

Una comparación de la función dieléctrica del Si calculada en el intervalo 1.5 a 6.0 eV con el método descrito anteriormente y el obtenido por espectroscopía de elipsometría [9], se muestra en la Fig. 3. Las características espectrales de nuestro método se aproximan hasta el 2% en el intervalo completo, indicando con ello lo interesante y la simplicidad del *medidor-psi*. Debe notarse que, aunque usando un *medidor-psi* con un sólo elemento óptico, uno tiene que confiar en un cálculo numérico después del punto final de la medición. También, para determinar las constantes ópticas, no se puede asegurar la calidad óptica de la superficie, sólo después de haber completado el ciclo de la medición, debido a la determinación de únicamente el módulo de la función elipsométrica en esta configuración.

Este trabajo fue apoyado parcialmente a través de CONACYT y SEP.

Referencias

1. R.E. Lindquist and A.W. Ewald, *J. Opt. Soc. Am.*, **53** (1963) 247.
2. W.R. Hunter, *J. Opt. Soc. Am.*, **55** (1965) 1197.
3. D.M. Kolb, *J. Opt. Soc. Am.*, **62** (1972) 599.
4. R.F. Potter, *J. Opt. Soc. Am.* **54** (1964) 904.

5. J. Mathews and R.L. Walker, *Mathematical Methods of Physics*, Benjamin/Cummings Publishing, (1970) p. 129.
6. A. Papoulis, *The Fourier Integral and its Applications*, Mc Graw Hill, (1962).
7. A.R.M. Zaghoul and R.M.A. Azzam, *Surf. Sc.*, **96** (1980) 168.
8. D.E. Aspnes, *Optical Properties of Solids: New Developments*, B.O. Seraphin, ed. North Holland, cap. 15 (1976).
9. D.E. Aspnes and A.A. Studna, *Phys. Rev. B* (1983) 985.

Abstract. In this article we present the results of the determination of the optical constants of Si by means of a scanning psi-meter. Our psi-meter measures the modulus of the ellipsometric function $\rho = \tan \psi e^{i\Delta}$, by measuring the total oblique reflectivity, $R(t)$, of a rotating linearly polarized incident light, and taking the ratio of $R(t)$ at two different time dependent linear polarization states R_p and R_s . By means of a Wiener-Lee transformation of the ellipsometric function ρ , from the right hand side complex frequency $i\omega$ -plane into a unitary circle of the complex ω -plane, we have been able to recover the dielectric function of Si, $\epsilon(\omega)$ in the same optical range from the spectral measurements of $|\rho|^2$.