¿Podemos conocer el espesor real de las capas delgadas metálicas?

Oliva, A. I.¹, Lugo-Quintal, J. M.², Riveros, H. G.³

Fecha de recepción: 18 de abril de 2010 – Fecha de aprobación: 17 de junio de 2010

RESUMEN

Usando una fuente de evaporación puntual y un sustrato relativamente grande para evaporar capas metálicas, es difícil conseguir un espesor uniforme sobre toda la superficie evaporada. Depositando térmicamente una capa de aluminio con espesor nominal de 100 nm sobre un sustrato de vidrio, se estima el valor del espesor depositado a través de un mapeo de resistividad eléctrica medido en la superficie por la técnica de cuatro puntas colineales. El espesor asociado a la resistividad eléctrica es comparado con el espesor teórico determinado usando una relación geométrica y con los valores medidos por perfilometría sobre muestras preparadas en condiciones similares. Los resultados arrojan variaciones de espesor de hasta 15% entre el centro de la muestra y el extremo más alejado. Se repitieron estas mediciones transcurridos 10 y 45 días después del depósito y no se observaron cambios importantes en la resistividad eléctrica. Esta alta estabilidad superficial en el tiempo es asociada con la capa nativa de óxido de aluminio formada. El valor del espesor reportado depende de la metodología utilizada para medirlo.

Palabras clave: capas delgadas, espesor, resistividad eléctrica.

Can we know the real thickness of metallic thin films?

ABSTRACT

Using a punctual evaporation source and a relatively large substrate to prepare metallic films by thermal evaporation, results difficult to achieve uniform thickness on thin film surfaces. Aluminum films with 100 nm as nominal thickness deposited on glass substrates, were used to estimate the film thickness by means of a surface mapping of the electrical resistivity measured by the four-probe technique. The thickness associated with the electrical resistivity is compared with a theoretical thickness determined from a geometrical relation and with the real values measured by profilemetry on samples prepared under similar conditions. From results, variations of about 15 % on thickness were obtained from the center of sample to the farthest side. This measurement process was repeated 10 and 45 days after films deposition and not important changes of resistivity was observed. High stability of aluminum films is associated with the native aluminum oxide layer. The value of the reported thickness depends on the methodology used to measure it.

Keywords: electrical resistivity, thickness, thin films.

¹ Investigador Titular del Cinvestav IPN Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada, A.P. 73-Cordemex, 97310 Mérida Yucatán. E-mail: oliva@mda.cinvestav.mx.

² Estudiante de Maestría en Fisicoquímica, Cinvestav IPN Unidad Mérida, Departamento de Física Aplicada. E-mail: jquintal@mda.cinvestav.mx.

³ Profesor Investigador en periodo sabático del Instituto de Física-UNAM. E-mail: riveros@fisica.unam.mx

1. INTRODUCCIÓN

El espesor de un material en capa delgada es un parámetro que determina las diferentes Conociendo propiedades del mismo. y controlando su valor durante su preparación, es posible identificar si alguna propiedad es benéfica o no para su desempeño. Este parámetro es más relevante cuando su valor está por debajo de los 100 nm. Así por ejemplo, si el espesor de una capa delgada es incrementado, la resistencia eléctrica y los esfuerzos mecánicos disminuyen, debido al incremento del área transversal.

La resistividad eléctrica es conocida como una propiedad intrínseca de un material que nos da idea de su capacidad de respuesta eléctrica. Sin embargo, para metales con espesores en el rango nanométrico, su valor se incrementa significativamente al disminuir el valor del espesor (Camacho & Oliva 2005), por lo que ya no se considera un parámetro intrínseco, sino dependiente de la dimensión.

La resistividad eléctrica ha sido también utilizada como un método simple e indirecto para determinar in situ el espesor de capas delgadas metálicas (Weller 2001). La tecnología de películas delgadas es, simultáneamente, una de las artes más antiguas y una de las ciencias más (Siewenie & He 2009; Malonie & nuevas Hummel 1997). En la actualidad, las capas delgadas metálicas son utilizadas principalmente como recubrimientos ópticos, estéticos y de protección, así como de interconexión eléctrica en la industria microelectrónica y nanoelectrónica. delgadas de materiales También, capas semiconductores son ampliamente utilizadas como materiales activos para producir celdas solares de alta eficiencia.

Por otro lado, la técnica de cuatro puntas colineales es una herramienta ampliamente utilizada para medir la resistividad eléctrica en materiales de capa delgada por contacto directo

$$P_o = \frac{E}{4\pi h^2}$$

(1)

Donde h es la distancia vertical entre la fuente y el sustrato. Si la superficie del sustrato está además alejada del punto vertical una distancia x, entonces

con su superficie. Esta técnica se utiliza en la industria de semiconductores y una de las diversas aplicaciones cae en el ramo de la fabricación e investigación de los mismos (ASTM 1999). En este trabajo, se pretende discutir el concepto del espesor y su importancia para sus aplicaciones en el campo de la nanotecnología. Para ello, se depositaron térmicamente capas de Al con espesor nominal de 100 nm, sobre sustratos de vidrio medido con un sensor de cristal de cuarzo. Este valor es también estimado a través de mediciones de la resistividad eléctrica en su superficie y comparado tanto con el valor reportado de un modelo obtenido a partir de una geometría de fuente puntual, como con los valores medidos usando un perfilómetro. Los resultados muestran los diferentes conceptos que pueden ser útiles para conocer el espesor y la dificultad para saber su valor real.

2. TEORÍA

Aunque es altamente deseable tener uniformidad en el espesor de las capas depositadas sobre un sustrato plano, se sabe que no resulta trivial debido al ángulo sólido que forma el vapor del material a ser depositado y a la geometría plana del sustrato colocado en la parte superior (Figura 1). Por ello, podemos calcular el valor teórico del espesor de una capa depositada usando un modelo que involucre los parámetros geométricos (Echertová 1986), como función de la posición. Asumiendo que durante el depósito, el vapor del material evaporado viaja en dirección radial y esférica hasta llegar al sustrato, el espesor d_o depositado en el centro y perpendicular al sustrato, difiere del espesor d_x correspondiente a un punto fuera del centro del sustrato, como se muestra en la Figura 1. La relación entre estos espesores puede estimarse si se determina la cantidad de material P_{a} por unidad de tiempo t y por unidad de área A que llega verticalmente a la superficie del sustrato, el cual es emitida por una fuente puntual isotrópica con una razón E (g/s), tal que:

la cantidad de material por unidad de tiempo y por unidad de área P_x que llega al sustrato estará dada por la componente de E:

$$P_x = \frac{E\cos\theta}{4\pi(x^2 + h^2)} \tag{2}$$



Figura 1. Parámetros geométricos correspondientes a la fuente de evaporación y a la posición del sustrato en el proceso de evaporación.

Donde, de acuerdo a la Figura 1,

$$\cos\theta = \frac{h}{\sqrt{(x^2 + h^2)}} \tag{3}$$

Sustituyendo la relación (3) en la ecuación (2) y obteniendo el cociente P_x/P_o de las relaciones (1) y (2), llegamos a la relación geométrica entre el

$$\frac{P_x}{P_o} = \frac{d_x}{d_o} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{x}{h}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}$$
(4)

Para obtener esta relación se ha tomado en cuenta el volumen V=Ad depositado, la densidad ρ del material y el tiempo t de depósito. La cantidad de material depositado puede conocerse a partir de estos parámetros, donde:

- d_x , es el espesor del material depositado a una distancia *x* del centro del sustrato.
- *x*, es la distancia horizontal medida respecto del centro del sustrato (x_{max} = ±37.5 mm, en nuestro caso).
- *h*, es la distancia vertical medida desde la fuente de evaporación hasta centro del sustrato $(14.00 \pm 0.05 \text{ cm}, \text{ en nuestro sistema}$ experimental).
- d_o , es el espesor de la capa depositada y medida desde el punto más cercano (centro del sustrato) a la fuente puntual (d_o =100 nm, en nuestro caso).

La distancia x se determina sobre un plano perpendicular a la vertical de la fuente, correspondiente a la superficie donde se deposita el material evaporado.

Por otro lado, con la técnica de cuatro puntas colineales es posible medir el valor de la resistividad local si aplicamos una corriente I y medimos un voltaje V sobre una capa delgada de espesor *d*. Para ello, es requisito conocer de antemano el espesor en cada punto analizado para poder determinar el valor de la resistividad. Este requisito no es sencillo de cumplir para el caso de una capa delgada con área relativamente grande.

En un material con espesor de capa delgada, la resistividad eléctrica puntual se puede determinar a través de la relación (Keithley 1998):

79

espesor en cualquier sitio y el espesor en la vertical al sustrato, esto es:

$$\rho = 4.532 \left(\frac{V}{I}\right) d \tag{(4)}$$

Así, podemos construir un mapa de resistividad eléctrica si medimos esta variable en diferentes puntos sobre la superficie de una capa metálica depositada, y después asociarle un mapa de espesores. Es preciso aclarar que para utilizar la relación (5), es indispensable conocer en cada punto de la superficie el espesor correspondiente, a través del cual se determina su correspondiente resistividad eléctrica. En la práctica esta situación, como ya hemos dicho, resulta difícil de conseguir y se supone que el valor nominal es constante.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Sobre un sustrato de vidrio (portaobjetos) de 25 mm de ancho, 75 mm de largo y 0.9 mm de espesor, se depositó una capa de aluminio de 100 nm de espesor con una razón promedio de depósito de 2.8 nm/s. El aluminio con 99.999 % de pureza es evaporado térmicamente en una cámara de vacío con una presión base de 6.5×10^{-5} Torr. El espesor es controlado usando un sensor de cristal de cuarzo y un controlador Maxtek TM-400. A este espesor medido durante el depósito le llamaremos en adelante como espesor nominal.

Para conseguir una buena adherencia y alta calidad óptica de la capa depositada, se realiza previamente una limpieza de los sustratos, por etapas, con el siguiente procedimiento: lavado con agua y jabón, tricloroetileno, acetona y alcohol isopropílico; enjuagando con agua destilada en un baño ultrasónico entre cada etapa. Finalmente, se secan con aire a presión.

Para llevar a cabo las mediciones de resistividad eléctrica sobre la capa de aluminio depositada, nos apoyamos en una cuadrícula de 5 mm x 5 mm dibujada en papel. La cuadrícula es montada sobre la base del sistema de medición de cuatro puntas colineales. Sobre ella se desplaza la capa de aluminio depositada para la medición de los diferentes puntos, generando un sistema x-y. La cuadrícula es usada como referencia para ubicar los diferentes puntos de cruce y realizar las mediciones de resistividad con mayor precisión. El sistema de medición de resistividad eléctrica consta de una cabeza comercial Jandel que tiene cuatro electrodos separados 1 mm entre sí. Se realizan mediciones cada 5 mm de la muestra con respecto a lo largo y a lo ancho de la capa depositada, además del centro de la misma. En

(5)

los bordes límites de la capa metálica se descartan dichas mediciones. Todas las mediciones de resistividad eléctrica fueron realizadas a temperatura ambiente y presión atmosférica.

El sistema de medición de la resistividad eléctrica se apoya con un programa desarrollado en LabView 7.0 que controla un multímetro digital HP-3458A con 8 dígitos de resolución y una fuente de corriente HP-6643A, ambos programables, los cuales están conectados a las terminales de la cabeza Jandel. La zona de medición puntual es de 3x3 mm², equivalente a una separación de 1 mm entre cada electrodo.

Las mediciones de resistividad se realizaron haciendo pasar corrientes de 20 ± 2 mA y 40 ± 2 mA para fines de comparación, aunque dado que el aluminio es un metal que posee un comportamiento óhmico, el valor de la resistividad permanece prácticamente invariable bajo diferentes corrientes de medida. Con estos valores de corriente aplicada, el incremento de temperatura en la película es local y despreciable con respecto a la temperatura ambiente.

4. RESULTADOS

Para obtener el mapa de la resistividad eléctrica, se usó como referencia (x=0, y=0) el centro de la capa de aluminio depositada. Basado en la cuadrícula de referencia, se realizaron 57 mediciones (separadas entre sí, 5.0 ± 0.5 mm) sobre el área de la capa de aluminio, incluyendo el centro del sustrato. Los puntos, o zonas de medida, son los puntos donde se interceptan las líneas del cuadriculado y es donde se posicionan las cuatro puntas del medidor para realizar las medidas de la resistividad, de forma que sea posible obtener un mapa superficial de la misma.

La figura 2 muestra un mapa de la variación del espesor obtenido de acuerdo a la ecuación (4). Para ello, se utilizó como referencia el espesor depositado de 100 nm, considerando que éste se consigue en el centro de la capa depositada (x=0, y=0). Se observa que las variaciones del espesor presentan simetría en ambas direcciones (largo y ancho) y éstas disminuyen en los puntos alejados del centro de la capa depositada. Esta disminución es mayor en los puntos más alejados del centro de la capa de aluminio, alcanzando en este caso una variación máxima de alrededor de 8 nm, equivalente al 8 % del espesor de referencia.



Figura 2. Mapa del espesor teórico del aluminio evaporado sobre un sustrato de vidrio de 25x75 mm².

La Figura 3 muestra el mapa de resistividad eléctrica medida por la técnica de cuatro puntas para la capa de aluminio/vidrio. Para obtener dicho mapa se hizo uso de la ecuación (5), donde se ha considerado que el

espesor nominal $d_o = 100$ nm del aluminio depositado es constante para todos los puntos de la película. De antemano sabemos que esto no es cierto y su efecto será discutido más adelante.



Figura 3. Mapa de la resistividad eléctrica medida en la capa de aluminio/vidrio. Los valores se obtuvieron aplicando una corriente de 20 ± 2 mA. Todas las mediciones fueron realizadas a temperatura ambiente y a presión atmosférica.

De la Figura 3 se observa un incremento de la resistividad eléctrica al alejarse del centro de la capa depositada (i.e. nuestro punto de referencia). Por ello, en los extremos de la capa depositada se encuentran los valores más altos de la resistividad. Esto es justificado por dos razones: i) el espesor del aluminio depositado es realmente menor en esos puntos, y ii) se ha supuesto que el espesor de la capa es uniforme.

El valor mínimo de la resistividad eléctrica medida en el centro de la placa es de $(1.22\pm0.10) \times 10^{-7} \Omega$ -m y se incrementa hasta un valor máximo de $1.62 \times 10^{-7} \Omega$ -m en los extremos de la placa. Estos valores absolutos de resistividad obtenidos son similares a los valores reportados en trabajos recientes para capas delgadas de aluminio (Camacho & Oliva 2006).

Una comparación cualitativa entre las Figuras 2 y 3,

muestra la concordancia de que a menor espesor, se obtiene un mayor valor en la resistividad eléctrica.

Para estimar, a partir de la Figura 3, el espesor correspondiente en cada punto de la capa de Al, usamos el valor de la resistividad eléctrica medida en el centro de la placa como referencia y cada valor medido de la resistividad (suponiendo espesor constante). Partiendo de la relación de la resistividad eléctrica para una película delgada (Ec. 5), podemos obtener un mapa del espesor del aluminio depositado con respecto a las dimensiones de la placa. La Figura 4 muestra los resultados, en la cual se observa la disminución del espesor del aluminio depositado al alejarnos del centro de la placa. En el centro de la placa el espesor de referencia corresponde al valor de 100 nm y en los extremos el espesor obtenido es de 78 nm.



Figura 4. Mapa del espesor del aluminio depositado sobre un sustrato de vidrio de $25x75 \text{ mm}^2$ obtenido de la relación de la resistividad eléctrica (Ec. 4), aplicando una corriente de $20 \pm 2 \text{ mA}$.

Comparando las Figuras 2 y 4, correspondientes al espesor teórico y al espesor obtenido a partir de la resistividad medida, podemos notar una mayor diferencia en los valores reportados. Así, para la Figura 4, se encuentra una diferencia de 22 nm en el espesor para los puntos más alejados del centro de la capa depositada, en comparación con los 8 nm estimados previamente para el valor teórico. La diferencia neta de 14 nm (22 nm-8 nm) es compatible con valores publicados para el cambio del espesor

(Avilés et al. 2005).

Dada la dificultad de conocer punto a punto el espesor real del aluminio, procedimos a preparar una nueva muestra. Para ello, se depositó una capa de aluminio bajo las mismas condiciones de preparación, pero usando máscaras que generen franjas de aluminio a lo largo del sustrato, tal que se formen escalones que nos permitan utilizar la punta sensora de un perfilómetro Dektak 8 de alta resolución. Para ello, se construyó una máscara de una lámina metálica que permita depositar dos franjas de aluminio sobre el sustrato, y así formar escalones alternados de sustrato y material depositado. La Figura 5 muestra tres secciones de dichos perfiles de espesores medidos en una franja de Al depositada con un espesor nominal de 100 nm. Las franjas depositadas son de 5 mm de ancho y muestran los escalones formados en ambos extremos de la franja. Los picos que se observan al inicio y al final de cada perfil, corresponden a un exceso de material producto de la máscara utilizada y no fueron considerados para efectos del espesor. En la figura 5 se señala el espesor promedio estimado para cada sección, cuyas gráficas han sido desplazadas 200 nm para una mejor visualización y comparación. Puede apreciarse que el espesor promedio varía entre 103 y 109 nm, entre el centro y el extremo de la franja y proviene de una zona de contacto de medida de 3x3 mm². Estas variaciones de espesor pueden ser también entendidas si se considera que el sensor de cuarzo utilizado durante el depósito proporciona un promedio másico sin importar la distribución de la misma en la superficie. En el caso del perfilómetro, los valores reportados son locales y se miden con resolución de ángstroms.



Figura 5. Perfiles de altura medidos en una franja de aluminio de 5 mm de ancho. Los escalones iniciales y finales son utilizados para medir el espesor promedio.

Con el fin de obtener un mapa de espesores que las dos limitaciones anteriormente subsane mencionadas, realizamos un cociente entre las Figuras 4 y 2 correspondientes a los mapas de espesores calculado y teórico. La Figura 6 muestra estos resultados. Se observa que el cociente de los espesores entre el centro de la muestra y el extremo más alejado es del 15%, un porcentaje alto si deseamos obtener homogeneidad en el espesor. Hay dos maneras de resolver estas grandes variaciones en el espesor: usando un sustrato esférico o usando un sustrato de menor longitud. En la práctica es más factible la segunda opción. El porcentaje de reducción de espesor obtenido de este modo tiene mayor confiabilidad, dado que considera el efecto del valor del espesor teórico para cada punto, así como de su correspondiente valor de resistividad medida.

mediciones realizadas, se realizaron dos mediciones adicionales de la resistividad eléctrica en la misma muestra de aluminio depositada, después de transcurridos 10 y 45 días de haberse depositado, utilizando diferentes valores de corriente (20 y 40 mA). El mapa de la resistividad resultante en cada caso, fue similar al inicialmente obtenido. Dado que es difícil visualizar la superposición entre estos mapas tridimensionales para observar con claridad las posibles diferencias de tipo experimental, elegimos seleccionar para cada medición un perfil lineal a lo largo de la capa de Al y así poder visualizar mejor la comparación. Los tres perfiles de resistividad se muestran en la Figura 7. Los puntos discretos indican los tres valores medidos y la línea sólida el valor promedio de las tres mediciones. Las mínimas variaciones de la resistividad medida usando

Con el objetivo de conocer la estabilidad de las

Oliva et al. / Ingeniería 14-2 (2010) 77-86

corrientes diferentes para diferentes tiempos, indican un comportamiento invariable de la capa de aluminio con el tiempo transcurrido.



Figura 6. Fracción de reducción entre el espesor calculado usando la resistividad eléctrica y el valor teórico.

De la Figura 7 se obtiene que la variación máxima de la resistividad eléctrica, medida después de transcurridos 45 días está dentro de ± 0.5 %, por lo

que puede considerarse que, durante 45 días, esta propiedad eléctrica permanece prácticamente constante, respecto de la primera medición realizada.



Figura 7. Perfil de resistividad eléctrica tomado sobre una línea a lo largo de la capa de aluminio durante tres periodos diferentes.

La Figura 8 muestra los perfiles de espesor estimados a partir de la resistividad eléctrica obtenida usando dos valores de corriente, así como el espesor promedio para cada punto del perfil a lo largo de la capa de aluminio. Los espesores estimados corresponden a la muestra medida después de 45 días de depositada. Los espesores estimados muestran valores con poca variación en el espesor estimado de la capa de aluminio. Se determinó que el porcentaje de error del espesor de la capa de aluminio, después de haber transcurrido 45 días es del orden de 0.5 %, por lo que asumimos que el espesor permanece constante con el tiempo e invariable con la corriente aplicada en las mediciones.



Figura 8. Perfil de espesores calculados a partir de la resistividad eléctrica a lo largo de la capa de aluminio y su comparación con los espesores medidos por perfilometría.

En la misma Figura 8 y con fines comparativos se incluyen los valores de espesor (y sus respectivas barras de error) de una muestra depositada en forma similar y medidos en diferentes secciones de una franja de Al depositada con un perfilómetro Dektak 8. Se obtiene un valor de espesor mínimo de 85 nm en los extremos de la capa depositada y un valor máximo de 107 nm. En la comparación, se observa una concordancia dentro del 5% entre los espesores estimados usando la resistividad y la medición realizada por perfilometría. Las barras de error graficadas, corresponden al 5% mencionado y puede observarse que los valores reportados usando ambos métodos caen dentro de dichas barras. Esta concordancia da confianza para utilizar la resistividad eléctrica como un parámetro útil para estimar el espesor, cuando éste es difícil de medir en diferentes zonas de la muestra. Sin embargo, el valor real del espesor de la capa depositada, no es claro, ya que depende del método utilizado para medir su valor. En general, el cristal de cuarzo es el sensor más utilizado para reportar los espesores dada su ventaja de poder hacerlo en el momento del depósito, así como de conseguir el control de su velocidad de depósito durante la formación de la capa.

CONCLUSIONES

El espesor de una capa delgada metálica depositada sobre sustratos de área grande usando una fuente de evaporación puntual, disminuye en puntos alejados del centro de evaporación. Usando un mapeo de la resistividad eléctrica en la superficie de una capa de aluminio depositada térmicamente, nos permite obtener un mapa de espesores asociados a cada valor de resistividad medido. Se obtiene una diferencia en los valores de la resistividad eléctrica, teniendo el menor valor en el centro de la capa depositada. Esta diferencia se incrementa, cuanto mayor es el largo del sustrato donde se deposita el material. Del mapa de resistividad eléctrica obtenida en una capa de aluminio de 25x75 mm², se encontraron en los puntos más alejados del centro, diferencias de hasta 15% entre el espesor estimado usando la resistividad y el espesor teóricamente determinado, siendo menor, éste último. Estas discrepancias son corregidas al considerar que la resistividad eléctrica medida en cada punto requiere conocer el valor del espesor correspondiente para hacer una correcta estimación. Mediciones locales del espesor realizadas con un perfilómetro de alta resolución muestran diferencias de hasta 5% entre el espesor estimado por resistividad y el espesor medido. Mediciones realizadas en la capa de aluminio después de transcurridos 10 y 45 días del depósito, muestran que la resistividad eléctrica no presenta cambios importantes (menores del 0.5 %) en ese periodo, por lo que la capa de aluminio depositada (incluyendo su óxido formado) posee alta estabilidad al medio ambiente durante los 45 días transcurridos.

Agradecimientos:

Este trabajo fue elaborado dentro del proyecto CONACYT F1-54173. Los autores agradecen el apoyo técnico de Emilio Corona Hernández y de Oscar Ceh Soberanis.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM Annual Book. West Conshohocken, PA, Vol. 10.05, Standards F43-93, F374-94A, F1529-97, 1999.

Avilés, F.; Ceh, O.; Oliva A. I. (2005). *Physical properties of Au and Al thin films measured by resistive heating*. Surf. Rev. & Lett. 12 101-106.

Camacho, J. M.; Oliva A. I. (2005). Morphology and electrical resistivity of metallic nanostructures. Microelectronics Journal 36 555-558.

Camacho J.M., Oliva A.I. (2006). Surface and grain boundaries in the electrical resistivity of metallic nanofilms. Thin Solid Films 515 1881-1885.

Eckertová, L., Physics of thin films, 1986, Plenum Press. K

Keithley, Low level Measurement. 1998, 5th Edition, pp. 4-21.

Maloni, D.W.; Hummel, R.E. (1997). *Electromigration in integrated circuits*. *Critical Review in Solid State and Materials Sciences*, 22 199-238.

Siewenie, J.E.; He, L. (1999) Characterization of thin metal films processed at different temperatures. J. Vac. Sci. Technol. A 17 1799-1804.

Weller, R. A. (2001) An algorithm for computing linear four-point probe thickness correction factors Rev. Sci. Instrum. 72 3580-3586.

Este documento debe citarse como:

Oliva, A. I., Lugo-Quintal, J. M., Riveros, H. G. (2010). ¿Podemos conocer el espesor real de las capas delgadas metálicas? Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 14-2, pp 77-86, ISSN: 1665-529-X.