

# **Metrología óptica dimensional submicrométrica para determinación de espesores en sub-micro estructuras.**

R.Casquel, M. Holgado, C. Molpeceres, M. Morales, A.M. Sánchez-Pérez, J.L. Ocaña.

*Centro láser UPM. Edificio tecnológico "Arboleda". Campus sur Universidad Politécnica de Madrid. Carretera de Valencia km. 7.300 CP 28031 Madrid.  
Tfno: 91 332 42 80. e- mail: rafael.casquel@upm.es*

## **Resumen**

En este trabajo se presenta el análisis de una técnica de metrología óptica utilizada para el control de procesos en línea en la fabricación de microchips. Se obtienen los perfiles de reflectividad en función del ángulo de incidencia para una longitud de onda de 675 nm, para los estados de polarización s y p. Se obtiene un modelo teórico para una estructura multicapa, con la que se pueden calcular de forma sencilla las propiedades ópticas y dimensiones de las capas. Se obtiene la incertidumbre de la técnica de medida.

**Palabras Clave:** Metrología óptica dimensional, Microfabricación, Reflectometría.

## **Abstract (TNR 10 ptos, negrita, acortando márgenes 10 mm a izqda. y dcha.)**

In this work is presented the analysis of a technique of optical metrology widely used in controlling on-line process in fabrication of microchips. Reflectivity profiles as a function of angle of incidence are obtained for a wavelength of 675 nm. A theoretical model for a Si/SiO<sub>2</sub> multilayer stack is also obtained, which can be used to calculate both the thickness and the optical properties of the layers. A calculation of the uncertainty for the measurement technique is also performed.

**Keywords:** Dimensional Optical Metrology, Microfabrication, Reflectometry.

## **1. Introducción**

La utilización de técnicas de metrología óptica para el control de espesor en procesos en línea de capas delgadas de dieléctricos está muy extendida en el campo de la microfabricación de circuitos integrados, alcanzándose una resolución de hasta 0,1 nm con técnicas basadas principalmente en el estudio de la reflectividad de la luz sobre la estructura de multicapas a estudiar, en función tanto de la longitud de onda como del ángulo de incidencia, así como en el estudio del cambio del estado de polarización de la luz reflejada respecto a la incidente, técnica conocida como elipsometría.

En estos equipos no sólo es importante alcanzar una buena resolución, sino también poder realizar muchas medidas de forma automatizada, garantizando un control de espesores en línea dentro del límite de tolerancias en el proceso de microfabricación de chips. Los materiales comunes a controlar son dieléctricos, como Óxido de silicio y

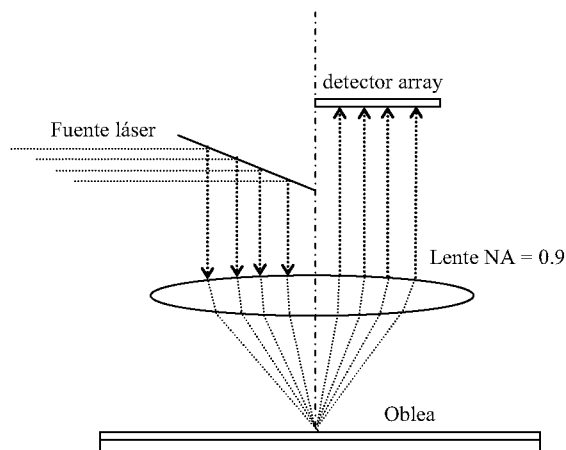
Nitruro de silicio, entre otros, depositados mediante técnicas como PECVD, LPCVD o crecidos térmicamente, que requieren un control continuo para garantizar la calidad exigible dentro del proceso de fabricación; es importante garantizar la uniformidad de las capas depositadas en obleas de hasta 300 mm de diámetro de uso convencional en el sector de la microelectrónica. En la actualidad se encuentran diversos fabricantes con tradición en este sector, como Therna-Wave Inc.-KLA-Tencor, cuya serie de equipos Opti-Probe permite realizar medidas sobre obleas utilizando una combinación de diferentes tecnologías ópticas, concretamente Beam Profile Reflectometry (BPR), Beam Profile Ellipsometry (BPE), Visible Spectrometry (VIS) [5] y Absolute Ellipsometry. Utilizando tres fuentes diferentes de luz (Luz blanca, láser de diodo a 675 nm y láser de He-Ne a 638 nm) se obtiene una gran cantidad de información de la estructura a medir: dos perfiles de reflectividad en función del ángulo de incidencia, reflectividad en función de la longitud de onda (Espectrometría) y parámetros de elipsometría:  $\tan \psi$  y  $\Delta$ . El sistema permite medir de forma simultánea con las diferentes técnicas, lo que aumenta la robustez y fiabilidad de los resultados. A su vez cuenta con un sistema robotizado que permite la carga automática de obleas, así como un sistema óptico de reconocimiento de imágenes para localizar puntos de medida en la oblea, lo que lo hace idóneo para su uso en control en línea. Otra de las particularidades del equipo consiste en que la configuración del sistema óptico permite conseguir un tamaño de haz en el orden de la micra o inferior (0.9  $\mu\text{m}$  para 675 nm), lo que abre la puerta a la medida de espesores en submicrodominios planares. Recientemente se ha demostrado una aplicación de esta combinación de técnicas en caracterización de volúmenes de líquidos del orden de femtolitros dentro de estructuras submicrométricas, que puede tener aplicación en otros campos, como el de biosensores.

Los perfiles de reflectividad y datos elipsométricos obtenidos por las diferentes técnicas dependen de, por un lado, la estructura de capas a analizar (número de capas), las propiedades ópticas de las mismas (índice de refracción real y complejo,  $n$  y  $k$ ), y el espesor de cada una de ellas. Usando un modelo teórico de multicapas se realiza un ajuste matemático a la curva experimental, obteniendo las incógnitas que se presenten en cada caso. En este trabajo se va a analizar el sistema multicapa más sencillo, consistente en una capa de Óxido de Silicio depositada sobre una oblea de silicio, con

índices de refracción conocidos, siendo el espesor la variable a determinar. Se analizará en detalle una de las técnicas presentadas, BPR.

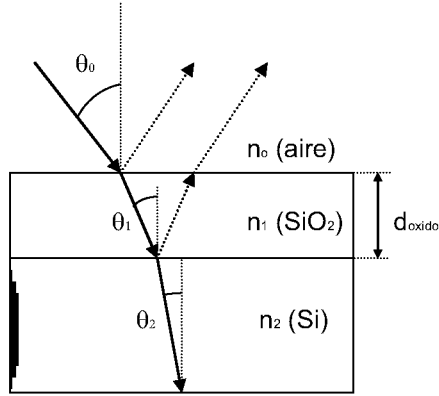
## 2. Resultados y discusión.

De las técnicas mencionadas, BPR analiza la reflectividad de un dispositivo multicapa en función del ángulo de incidencia. Se fija para ello la longitud de onda de la luz incidente, usando para ello un láser de diodo a 675 nm, y se obtienen dos perfiles de reflectividad, uno para cada estado de polarización, s y p. La particularidad más importante de la técnica reside en que el sistema óptico empleado permite la obtención de la reflectividad para un rango de ángulos comprendido entre  $-64^\circ$  y  $64^\circ$  con una sola medida. En la figura 1 se muestra un esquema de la técnica. El haz láser colimado incide en la lente. En función de la distancia al eje, la luz sale de dicha lente incidiendo con un ángulo determinado en la oblea. Posteriormente la luz reflejada vuelve a pasar por la lente y finalmente es recolectada por una matriz de detectores lineales, de forma que cada detector representa un ángulo de incidencia.



**Figura 1.** Vista esquemática de BPR

En la figura 2 se muestra esquemáticamente una oblea de silicio sobre la que se ha depositado una capa de espesor ' $d$ ' de  $\text{SiO}_2$ . Se obtienen dos expresiones para la reflectividad de la luz en función del ángulo de incidencia ( $\theta_0$ , Fig. 1).  $\theta_1$  y  $\theta_2$  se obtienen directamente de la ley de Snell.



**Figura 2.** Modelo de capas SiO<sub>2</sub> / Si estudiado

$$R_s = \frac{r_{0s} + r_{1s} * e^{jk}}{1 + r_{0s} * r_{1s} * e^{jk}} \quad (1)$$

$$R_p = \frac{r_{0p} + r_{1p} * e^{jk}}{1 + r_{0p} * r_{1p} * e^{jk}} \quad (2)$$

donde  $k = \frac{4 * \pi * d_{oxido} * n_1 * \cos \theta_1}{\lambda}$ , y  $r_{0s}$ ,  $r_{1s}$ ,  $r_{0p}$  y  $r_{1p}$  son las ecuaciones de Fresnel para las polarizaciones s y p, respectivamente.

Conocidos los índices de refracción de las capas, que para 675 nm son  $n = 1,458 \pm 0,0001$  (SiO<sub>2</sub>) y  $n = 3,822 \pm 0,0001$  (Si), se obtiene el espesor de la capa usando un modelo matemático de correlación entre el resultado teórico y el experimental.

El cálculo de incertidumbre se ha realizado siguiendo el documento EA4 /02 [10]. En primer lugar se ha realizado una calibración de un patrón, obteniéndose la incertidumbre de calibración. Se trata en este caso de un patrón de SiO<sub>2</sub>/Si de  $7,8 \pm 0,2$  nm. Se han realizado un total de 10 medidas, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 1, junto con la desviación típica calculada.

**Tabla 1.** Medidas para calibración de patrón.

medida	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	<b>Sc</b>
espesor	7,829	7,821	7,814	7,808	7,835	7,826	7,831	7,832	7,826	7,843	0,0322

Las fuentes de incertidumbre que se han tenido en cuenta se resumen en la ecuación 3 (ley de propagación de varianzas), y han sido, por un lado, la debida al patrón,  $U_p = 0.2$  nm; por otro lado se debe considerar la dispersión de las medidas, con el término  $S_c^2/n_c$ ; y finalmente la influencia de variación del índice de refracción tanto de la sílice como del silicio, así como el efecto de la variación de la longitud de onda del láser. Otras magnitudes de influencia, como la variación de temperatura, la apreciación de escala y la humedad relativa se han despreciado al no ser fuentes de incertidumbre significativas.

$$U_{dc}(n, \lambda, R_s) = \sqrt{U_p^2 + \frac{S_c^2}{n_c} + U_n^2 + U_\lambda^2} \quad (3)$$

Con los datos de la tabla 1,  $S_c^2/n_c = 1,03 \times 10^{-4}$ . Por su parte,  $U_n$  se calcula como la suma cuadrática de la influencia de las variaciones de los dos índices:

$$U_n = \sqrt{U_{nSi}^2 + U_{nSiO_2}^2} = \sqrt{\frac{\partial d}{\partial n_{Si}} * u_{nSi} + \frac{\partial d}{\partial n_{SiO_2}} * u_{nSiO_2}} \quad (4)$$

Con los datos sobre incertidumbre conocidos, y dado que no existe una ecuación analítica implícita, se ha obtenido por métodos numéricos el valor de las derivadas parciales,  $U_n = 0,1$  nm. Por último:

$$U_\lambda = \frac{\partial d}{\partial n_\lambda} * u_\lambda \quad (5)$$

Para una fuente láser con  $\lambda = (675,0 \pm 0,1)$  nm  $U_\lambda = 0,1$  nm. Con todos estos datos  $U_{dc} = 0,30017$  nm.

Una vez obtenida la incertidumbre de la calibración se puede obtener la incertidumbre de la medida. Dicha incertidumbre dependerá del número de medidas realizadas y de su dispersión (su desviación típica calculada); introduciendo el término  $S_{medida}/n_{medida}$  en la ecuación 6:

$$U_{dmedida}(n, \lambda, R_s) = \sqrt{U_p^2 + \frac{S_c^2}{n_c} + \frac{S_{medida}^2}{n_{medida}} + U_n^2 + U_\lambda^2} \quad (6)$$

No obstante, en los procesos de control de espesores es crítico realizar las comprobaciones de la forma más rápida posible. De este modo se utiliza solamente una medición, con lo que  $n_{medida} = 1$ . En este se puede aproximar  $S_{medida} = S_{calibración}$ . De esta forma  $U_{medida} = 0,30199$  nm.

### 3. Conclusiones

Se ha presentado una técnica de control de medida de espesor de láminas delgadas de dieléctricos útil para determinar espesores en rangos nanométricos. Se ha descrito la técnica y se ha calculado la incertidumbre de medida. La posibilidad de combinación con las demás técnicas proporcionadas por el equipo (elipsometría, espectrometría) garantiza la robustez de las medidas. Esta técnica de medida es ampliamente utilizada en el campo de la fabricación de circuitos integrados debido, entre otros factores, a la alta cadencia de la medida, que permite obtener un resultado en menos de 10 segundos, siendo la relación precisión / coste de medida muy ventajosa.

### 4. Referencias

Pierson, H.O. Handbook of Chemical Vapor Deposition - Principles, Technology and Applications (2nd Edition). William Andrew Publishing/Noyes (1999).

*<http://www.thermawave.com>*

A. Rosencwaig et al. "Beam profile reflectometry: A new technique for dielectric film measurements" Appl. Phys. Lett., **60** (1992), 1301-1303.

J. T. Fanton et al. "Multiparameter measurements of thin films using beam-profile reflectometry" J. Appl. Phys. **73** (1993).

J.M. Leng et al. "Characterization of titanium nitride TiN films on various substrates using spectrophotometry, beam profile reflectometry, beam profile ellipsometry and spectroscopic beam profile ellipsometry" Thin Solid Films **313-314** (1998) p. 308-313.

H. G. Tompkins and E. A. Irene. Handbook of Ellipsometry (William Andrew Inc., 2005).

M. Holgado et al. "Optical characterization of extremely small volumes of liquid in sub-micro-holes by simultaneous reflectivity, ellipsometry and spectrometry". Optics Express **15** (2007) p. 13118-13329.

8. E. Hecht and A. Zajac. Optics, Addison-Westley Publishing Company (1974).

9. M. J. Weber. Handbook of optical materials (C.R.C. Press L.L.C., 2003).

10. "EA-4/02 expression of the uncertainty of measurement in calibration".

*<http://www.european-accreditation.org>*

### 5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente con el programa de becas FPU de la Universidad Politécnica de Madrid.