

# EVALUACIÓN TÉRMICA DE ESTRUCTURAS DE POLISILICIO PARA SENSORES ANEMOMÉTRICOS CONSTRUIDAS CON TECNOLOGÍA MUMPS

*I. León<sup>+</sup>, R. Amador<sup>+</sup>, K. Kohlhof\**

<sup>+</sup>Microelectronics Research Center, Havana. <sup>\*</sup>University of Applied Sciences Cologne, Germany  
CIME. P.O.Box 8016, Havana 10800, Cuba  
Email: iosvany.leon@cime.ispjae.edu.cu

## ABSTRACT

The air flow measurement has been studied for its application in many fields. Among flow sensors, those operated under a thermal principle have occupied an important position. The application of MEMS technologies for designing such devices will allow reducing its size, response time and to increase the sensitivity.

In the community of MEMS designers it is well established a multi user service for prototyping named MUMPs. It is a surface micromachining process which employs polysilicon as structural material and silicon oxide as sacrificial layer. There are no reported flow sensors developed using this technology.

This paper evaluates the TCR of micro structures fabricated with this process using the Poly2 layer. Anchored structures to the substrate are compared to floating membranes to study its suitability for flow sensors.

## RESUMEN

La medición de velocidad del aire ha sido ampliamente estudiada por su aplicación en diferentes campos. Dentro del grupo de sensores para la medición de dicha variable se destacan los sensores de flujo de principio térmico. La aplicación de tecnologías MEMS para la construcción de dichos sensores brinda ventajas para su miniaturización, disminución del tiempo de respuesta y aumento de la sensibilidad.

Dentro de la comunidad de diseñadores de MEMS es conocido un servicio multiusuario para la producción de prototipos denominado MUMPs. Este brinda un proceso de micromaquinado superficial empleando polisilicio como material estructural y óxido de silicio como material de sacrificio. No se reportan hasta la actualidad sensores de flujo desarrollados con esta tecnología.

En este trabajo se evalúa el TCR de microestructuras construidas con esta tecnología, en particular empleando la capa Poly2. Se comparan también estructuras flotantes y ancladas al substrato para evaluar su aplicabilidad en sensores anemométricos.

# EVALUACIÓN TÉRMICA DE ESTRUCTURAS DE POLISILICIO PARA SENSORES ANEMOMÉTRICOS CONSTRUIDAS CON TECNOLOGÍA MUMPS

I. León<sup>+</sup>, R. Amador<sup>+</sup>, K. Kohlhof\*

<sup>+</sup>Microelectronics Research Center, Havana. \*University of Applied Sciences Cologne, Germany

## RESUMEN

La medición de velocidad del aire ha sido ampliamente estudiada por su aplicación en diferentes campos. Dentro del grupo de sensores para la medición de dicha variable se destacan los sensores de flujo de principio térmico. La aplicación de tecnologías MEMS para la construcción de dichos sensores brinda ventajas para su miniaturización, disminución del tiempo de respuesta y aumento de la sensibilidad.

Dentro de la comunidad de diseñadores de MEMS es conocido un servicio multiusuario para la producción de prototipos denominado MUMPs. Este brinda un proceso de micromaquinado superficial empleando polisilicio como material estructural y óxido de silicio como material de sacrificio. No se reportan hasta la actualidad sensores de flujo desarrollados con esta tecnología.

En este trabajo se evalúa el TCR de microestructuras construidas con esta tecnología, en particular empleando la capa Poly2. Se comparan también estructuras flotantes y ancladas al sustrato para evaluar su aplicabilidad en sensores anemométricos.

## 1. INTRODUCCION

El micromaquinado superficial ha sido ampliamente empleado para la producción de microsensores térmicos. La aplicación de tecnologías MEMS para la construcción de dichos sensores brinda ventajas para su miniaturización, disminución de tiempo de respuesta y aumento de la sensibilidad.

MUMPs es un servicio multiusuario para la producción de dispositivos MEMS. Este brinda un proceso de micromaquinado superficial empleando polisilicio como material estructural y óxido de silicio como material de sacrificio. Múltiples aplicaciones se reportan con esta tecnología pero no se reportan hasta la actualidad sensores de flujo desarrollados con esta tecnología [1].

En este trabajo se evalúa el TCR de microestructuras, construidas con la capa Poly2, flotantes y ancladas al sustrato para evaluar su aplicabilidad en sensores anemométricos.

El emplear polisilicio directamente como elemento calefactor y sensor simultáneamente brindaría la

posibilidad de lograr dispositivos de bajo costo y mayor simplicidad estructural.

## 2. MUMPS

MUMPs es un servicio brindado por MCNC (MEMS Technology Application Center) [2]. Está concebido para micromaquinado superficial de propósito general y soporta la inclusión de diferentes diseños sobre una misma oblea. Es un proceso de 8 máscaras y 7 niveles, uno de nitruro de silicio, 3 de polisilicio, 2 de óxido y otro de metal. Tres capas de polisilicio constituyen el material estructural. Óxido fósfo-silicatado (PSG) es empleado como capas de sacrificio y nitruro de silicio constituye la capa aislante sobre el sustrato [3].

La gran mayoría de aplicaciones desarrolladas con esta tecnología corresponde a dispositivos electromecánicos y optoelectrónicos por lo que la información relativa a sus propiedades térmicas es escasa y dispersa.

## 3. POLISILICIO

El polisilicio ha sido reportado como un material atractivo para sensores térmicos por su sensibilidad térmica, alta estabilidad y compatibilidad con procesos estándar para la producción de circuitos integrados. Su resistividad es función del tamaño de los granos del cristal, la concentración de impurezas y la temperatura. El empleo de polisilicio ligeramente dopado como sensor térmico es conocido y muestra una resistividad con dependencia exponencial negativa con la temperatura [4].

Sin embargo, el polisilicio de la tecnología MUMPs es altamente dopado con fósforo. Estas capas son dopadas a continuación de su deposición mediante tratamiento térmico, difundiendo fósforo desde las capas de óxido fosfo-silicatado que las rodean.

## 4. DISEÑO DE LAS ESTRUCTURAS DE PRUEBA

Los sensores anemométricos térmicos funcionan de forma general sobrecalentando un elemento sensor que es enfriado forzosamente por el flujo al que es expuesto. En particular en los anemómetros CTA, midiendo la potencia que se necesita para mantener dicho elemento sobrecalentado a temperatura constante, se obtiene una variable proporcional a la velocidad del fluido [5]. Al

influir la temperatura del medio en la transferencia térmica que ocurre, se hace necesaria una referencia de la temperatura del medio.

La aplicación final para la que han sido concebidas las estructuras anemométricas, no requiere la determinación de la dirección ni sentido del flujo. Pero es importante que estas sean igualmente sensibles para todas las direcciones en un plano. Por esta razón se diseñaron resistores de polisilicio con geometría cuadrada. La disminución de la masa térmica de los mismos determina un menor tiempo de respuesta y una mayor sensibilidad al movimiento del aire. Para disminuir la potencia necesaria para calentar el elemento sensor, se deben minimizar las pérdidas por conducción de calor hacia el sustrato [6,7]. Construyendo membranas flotantes sobre el sustrato se logra lo antes mencionado.

Los prototipos fueron fabricados en la corrida # 46 de MUMPs. Todas han sido construidas utilizando el nivel Poly2 aunque empleando el nivel Poly0 y Poly1 indistintamente como elementos estructurales para lograr estructuras flotantes a diferentes distancias del sustrato. Las capas de Poly2 tienen un espesor de  $1,5 \mu\text{m}$  y están suspendidas en diferentes muestras a distancias de  $5,25$  y  $3,2 \mu\text{m}$  sobre el sustrato. La capa Poly2 fue escogida porque permite obtener membranas flotantes a mayor distancia del sustrato.

También se evalúan estructuras de Poly2 ancladas directamente sobre la capa de nitruro de silicio. Estas estructuras ancladas, también cuadradas, poseen una mayor masa térmica y por tanto promedian las variaciones de la temperatura ambiente. De esta forma brindan una medición más exacta de la temperatura del fluido.

La figura 1 muestra una foto por microscopía electrónica de una esquina de una membrana flotante. En esta se aprecia uno de los cuatro puntos de apoyo que posee y que aumentan su estabilidad y disminuyen las posibilidades de daño mecánico por flexión. Las líneas de conducción llegan a las membranas a través de puentes flotantes construidos con la misma capa Poly2 y con metalizado sobre ellos. De esta forma las membranas quedan conectadas térmicamente al sustrato solamente a través de los pequeños puntos de apoyo y dos estrechos puentes. La figura 2 muestra uno de los puentes de conexión de una membrana flotante. Las dimensiones están entre  $100$  y  $400 \mu\text{m}$ . Las estructuras ancladas son de  $100 \times 100 \mu\text{m}$ . En la figura 3 se observa una vista superior de una membrana flotante.

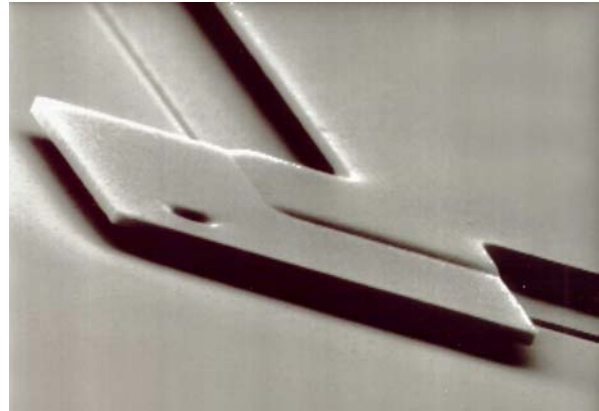


Figura 1. Detalle de punto de apoyo de membrana flotante de Poly2.

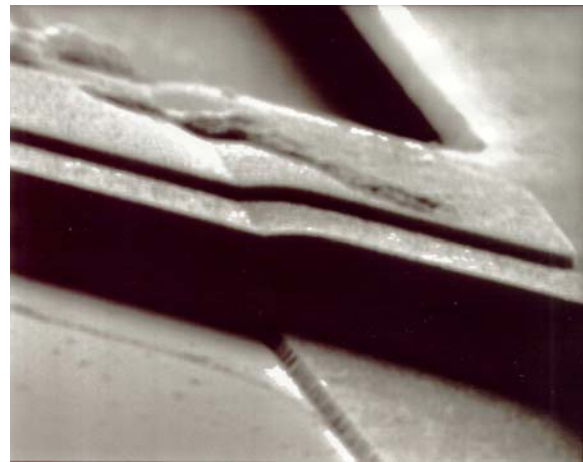


Figura 2. Detalle de puente de conexión de membrana flotante.

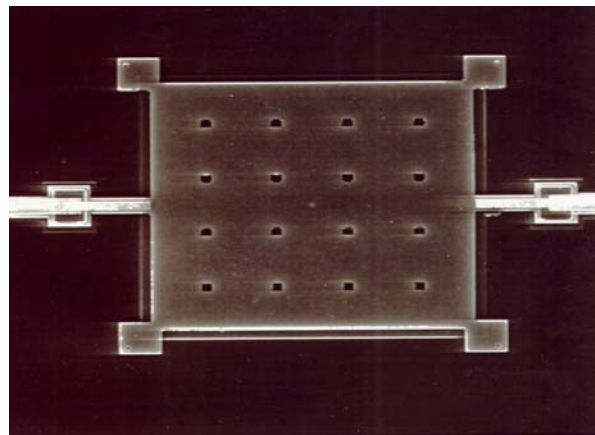


Figura 3. Vista superior de una estructura flotante.

## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las estructuras resistivas fueron evaluadas a diferentes temperaturas en un rango entre  $5$  y  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ . Para esto los dados fueron encapsulados en envases cerámicos DIL. Se sometieron a rampas de voltaje limitadas hasta un valor de  $50$  ó  $100 \text{ mV}$  limitando la corriente que circula a través de

los dispositivos evitando autocalentamiento. El sistema de medición se operaba excitando con señales no continuas lo que contribuía también a disminuir el posible autocalentamiento. Los límites para la potencia promedio máxima a disipar en las estructuras fueron estimados a través de un modelo matemático implementado en MathCAD que simulaba una membrana sobrecalentada sobre la que se hacía pasar una corriente de aire.

El análisis térmico de las muestras se efectuó en una cámara climática con una estabilidad de  $\pm 1^\circ\text{C}$  y empleando un monitor modular DC HP 4142B con ICCAP como interfaz de software con el mismo.

Las figuras 4 y 5 muestran la variación de la resistencia con la temperatura para una membrana flotante y una estructura anclada respectivamente para la muestra número 6. Estas se ajustan a un polinomio de segundo grado y su dependencia con la temperatura se expresa de la forma [8]:

$$R(T) = R(T_0) \left[ 1 + TC_1(T - T_0) + TC_2(T - T_0)^2 \right]$$

donde:

$T_0$ : Temperatura nominal =  $27^\circ\text{C}$

Los coeficientes térmicos del Poly2 para la ecuación anterior se listan en la Tabla 1 para las muestras 5 y 6 tomadas como ejemplo. Cada muestra corresponde con uno de los  $15\text{ cm}^2$  que se reciben después de una corrida MUMPs.

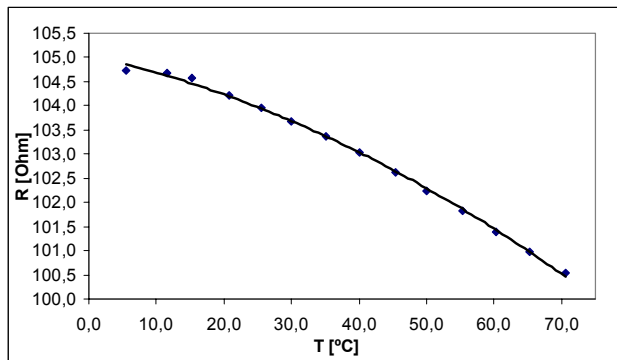


Figura 4. Variación de  $R(T)$  para una membrana flotante de Poly2 (muestra #6).

#	Poly2	$R(T_0)$ [ $\Omega$ ]	$TC_1$ [ $^\circ\text{C}^{-1}$ ]	$TC_2$ [ $^\circ\text{C}^{-2}$ ]
5	flotante	91,11	$-3,53 \times 10^{-4}$	$-3,29 \times 10^{-6}$
	anclado	78,30	$-5,58 \times 10^{-4}$	$-2,52 \times 10^{-6}$
6	flotante	103,85	$-5,59 \times 10^{-4}$	$-4,89 \times 10^{-6}$
	anclado	74,87	$-5,89 \times 10^{-4}$	$-2,67 \times 10^{-6}$

Tabla 1. Coeficientes térmicos experimentales del Poly2 para las muestras 5 y 6.

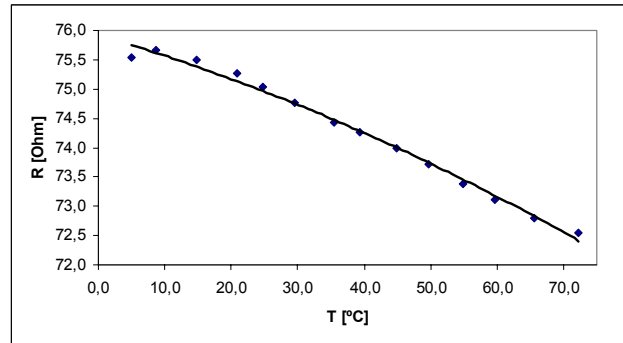


Figura 5. Variación de  $R(T)$  para estructura una anclada de Poly2 (muestra #6).

Un análisis comparativo de los valores de TCR para las estructuras ancladas y flotantes revela valores relativamente similares. Sin embargo la dispersión de este parámetro para las membranas flotantes es mayor que para los elementos anclados. Esto puede obedecer a efectos mecánicos que pueden presentarse en las membranas flotantes debido a stress residual que influye en las propiedades del material. También puede existir “stiction” en las membranas remanente del proceso de ataque isotrópico a pesar de todas las precauciones tomadas para evitarlo. No consideramos que exista deformación por dilatación térmica dada la baja potencia a que han sido evaluadas las membranas.

Es conocido que en grandes capas de polisilicio aparece encorvamiento debido a la no uniformidad en la distribución del stress residual [9,10]. Y en el caso de MUMPs las láminas tienden a encorvarse hacia arriba. Las mediciones experimentales mostraron resultados más consistentes y menos fallas en las membranas de menor tamaño dado que estas poseen una menor relación entre el largo y el espesor de las mismas, lo que reduce el stress residual.

Los valores de TCR obtenidos difieren de valores reportados de forma significativa [11]. Esto puede deberse a que las muestras pertenecen a diferentes corridas de MUMPs.

La diferencia en el valor de TCR que se observa entre estructuras ancladas y flotantes obedece en parte a que en la tecnología utilizada la fuente de dopaje es el óxido PSG que se encuentra en ambas caras del Poly2 depositado, difundiendo impurezas mediante tratamiento térmico. Sin embargo, las estructuras ancladas, durante dicho tratamiento, solo tienen óxido por la parte superior y reciben impurezas por difusión en un solo sentido, lo que las hace menos dopadas. Esta razón hace que el nivel de dopaje de las capas sea dependiente de su posición estructural.

## 6. CONCLUSIONES

Se ha reportado el TCR de estructuras de polisilicio obtenido con tecnología MUMPs. Las posibilidades de su empleo para estructuras anemométricas son válidas a pesar de poseer un TCR relativamente bajo al ser el nivel Poly2 de MUMPs altamente dopado.

Diferencias entre los valores de dicho coeficiente para estructuras flotantes y ancladas sobre el sustrato se reportan con una menor dispersión de este parámetro para las segundas.

Se requiere mayor profundización en las causas de las deformaciones mecánicas que influyen sobre las propiedades del material de las membranas flotantes

## 7. REFERENCIAS

[1] A. Rasmussen, M. E. Zaghoul. "In the flow with MEMS." IEEE Circuits and Devices. The optoelectronics magazine. Vol. 14, No. 4, July 1998.

[2] <http://www.memsrus.com>

[3] D. A. Koester, R. Mahadevan, B. Hardy and K. W. Markus, "MUMPS design handbook.", Ver. 7.0, Cronos Integrated Microsystems, 2001.

[4] L. Ristic, "Sensor Technology and Devices", ISBN 0-89006-532-2, Artech House, Inc., pp. 313, 1994.

[5] B. W. van Oudheusden, "Silicon thermal flow sensors". Sensors and Actuators A, 30, pp 5-26, 1992.

[6] Y. C. Tai, R. S. Muller and R. T. Howe. "Polysilicon bridges for anemometer applications." IEEE, pp. 354-357, 1985.

[7] F. Mailly, A. Giani,, R. Bonnot, P. Temple-Boyer. "Anemometer with hot platinum thin film". Sensors and Actuators A, 3076, pp. 1-7, 2001.

[8] T. Quarles, A.R. Newton, O.O. Pederson, A. Sangiovanni-Vincentelli. SPICE 3 version 3F5 User's Manual. University of California, Berkeley, pp. 14, March 1994.

[9] S. D. Senturia, "Microfabricated Structures for the Measurement of Mechanical Properties and Adhesion of Thin Films," Transducers '87 Rec. of the 4th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 11-16, 1987.

[10] M.T.A. Saif, N.C. MacDonald, "Planarity of Large MEMS," Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 5, no. 2, pp. 9, June 1996.

[11] M. Chiao, L. Lin. "Self-Buckling of Micromachined Beams Under Resistive Heating", Journal of microelectromechanical systems, Vol. 9, No. 1, pp. 146-151, March 2000.