

# VALIDACIÓN DE UN MODELO ELÉCTRICO PARA LA SOLDADURA ANÓDICA MEDIANTE SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

E. GONZÁLEZ <sup>a</sup>, J.A. PLAZA <sup>b</sup>, J. ESTEVE <sup>c</sup>

a CENTRO DE INVESTIGACIONES EN MICROELECTRÓNICA, CIUDAD HABANA 10800, CUBA  
FAX: 53-7-558939, E-MAIL [estrella.gonzalez@cime.ispjae.edu.cu](mailto:estrella.gonzalez@cime.ispjae.edu.cu)

b CENTRO NACIONAL DE MICROELECTRÓNICA, CERDANYOLA, BARCELONA, ESPAÑA, E-MAIL  
[plaza@cnm.es](mailto:plaza@cnm.es)

c CENTRO NACIONAL DE MICROELECTRÓNICA, CERDANYOLA, BARCELONA, ESPAÑA, E-MAIL  
[jaume@cnm.es](mailto:jaume@cnm.es)

## ABSTRACT

In this paper, is presented the validation of an electrical model. It allows to explain electrostatically the process of anodic bonding between silicon and Pyrex # 7740 glass wafers. This model supposes that an MOS equivalent structure capacitance is formed.

Test structures of electrostatic test [1,2] have been used to explain the behavior of interface during the process of anodic bonding. The deformation of these structures is calculated by finite element simulation, with ANSYS V5.1.

The results of simulation are the same as those obtained experimentally by other author [3,4,5,6]. It is confirmed that the model describes the experimental result.

## RESUMEN

Se presenta la validación de un modelo que explica acertadamente desde el punto de vista electrostático lo que sucede durante el proceso de soldadura anódica entre obleas de silicio y obleas de vidrio Pyrex # 7740 o similares. En este modelo se supone que la estructura formada es equivalente al de una capacidad MOS.

Para explicar el comportamiento de la interfase durante la soldadura se parte de las estructuras de prueba del Test Electrostático [1,2] y se calcula la deformación de estas mediante simulación por el método de los elementos finitos, específicamente el programa ANSYS V5.1.

Los resultados de la simulación obtenidos son similares a los obtenidos experimentalmente por otros autores [3,4,5,6], de manera que se confirmó que el modelo describe los resultados experimentales.

# VALIDACIÓN DE UN MODELO ELÉCTRICO PARA LA SOLDADURA ANÓDICA MEDIANTE SIMULACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS.

E. GONZÁLEZ <sup>a</sup>, J.A. PLAZA <sup>b</sup>, J. ESTEVE <sup>c</sup>

<sup>a</sup> CENTRO DE INVESTIGACIONES EN MICROELECTRÓNICA, CIUDAD HABANA 10800, CUBA  
FAX: 53-7-558939, E-MAIL [estrella.gonzalez@cime.ispjae.edu.cu](mailto:estrella.gonzalez@cime.ispjae.edu.cu)

<sup>b</sup> CENTRO NACIONAL DE MICROELECTRÓNICA, CERDANYOLA, BARCELONA, ESPAÑA, E-MAIL  
[plaza@cnm.es](mailto:plaza@cnm.es)

<sup>c</sup> CENTRO NACIONAL DE MICROELECTRÓNICA, CERDANYOLA, BARCELONA, ESPAÑA, E-MAIL  
[jaume@cnm.es](mailto:jaume@cnm.es)

## RESUMEN

Se presenta un modelo electrostático para describir el proceso de soldadura anódica entre obleas de silicio y obleas de vidrio Pyrex # 7740 o similares. En este modelo se supone que la estructura formada es equivalente al de una capacidad MOS.

Para explicar el comportamiento de la interfase durante la soldadura se parte de estructuras de prueba del Test Electrostático [1,2] y se calcula la deformación de éstas mediante simulación por el método de los elementos finitos, específicamente el programa ANSYS V5.1.

Los resultados de la simulación obtenidos se ajustan a los obtenidos experimentalmente por otros autores [3,4,5,6], de manera que se confirmó que el modelo describe los resultados experimentales.

## 1. INTRODUCCIÓN

La técnica de soldadura anódica es utilizada comúnmente en microelectrónica para unir obleas de vidrio y silicio. La ventaja de este proceso de soldadura en el encapsulado y fabricación de Sistemas Micro Electro Mecánicos (MEMS) en especial en el caso de microsensores es que reduce considerablemente los esfuerzos mecánicos que pueden inducirse durante la unión de las obleas, evitando así en los dispositivos la aparición de corrimientos iniciales (offsets), pérdidas de sensibilidad, histéresis, derivas térmicas, etc, [7,8]. Por otro lado el vidrio puede formar parte del dispositivo, como por ejemplo en sensores de presión o acelerómetros, definiendo electrodos para capacidades, canales y cavidades.

La unión del vidrio y del silicio se realiza uniendo las obleas por una de sus caras, calentando este conjunto a una temperatura determinada (400°C) y aplicándole una diferencia de potencial (1000V) durante algunos minutos [8,9]. Estas condiciones producen un movimiento de iones de sodio en el vidrio que crea una capa de empobrecimiento en la interfase de soldadura, lo que genera una **fuerza electrostática** que hace que las superficies que se van a soldar se pongan en contacto íntimo y se produzca la soldadura.

La técnica para realizar la soldadura anódica es sencilla, a pesar de que el proceso es complejo. Aunque esta técnica fue descubierta hace más de 30 años [7], los mecanismos físico-químicos presentes en ella no están totalmente claros y por ello se continúa dedicando un

gran esfuerzo a su estudio reportado en la literatura internacional [10,11,12,13,14,15].

Para la evaluación de todas las soldaduras realizadas en este trabajo se utilizó el método de evaluación de la soldadura denominado **test electrostático** [1,2].

Este test consiste de una máscara de prueba para definir cavidades en el silicio. Estructuras de prueba en forma de cavidades circulares y rectangulares de diferentes diámetros y anchos y por tanto diferentes rigideces para que sus superficies entren en contacto. De manera que para determinadas condiciones de soldadura habrá estructuras que suelden y otras más pequeñas que no suelden. En la Fig.2 se muestra dicha máscara de prueba.

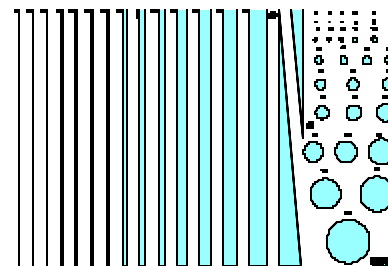


Fig.2. Máscara de prueba

Una dimensión importante que determina la rigidez de la estructura de prueba para una determinada profundidad H de las cavidades es el diámetro L de los círculos y el ancho L de los rectángulos, siendo L<sub>test</sub> el diámetro o el ancho de la estructura mínima soldada. Un corte transversal de los círculos y los rectángulos presenta la misma sección transversal, como se muestra en la Fig.3.

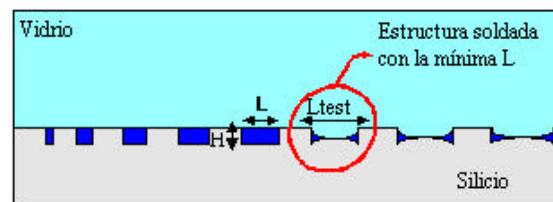


Fig.3. Sección transversal de las cavidades de las estructuras de prueba.

## 2. MODELOS ANTERIORES.

A pesar de que se han publicado muchos trabajos que establecen diferentes modelos para describir el proceso de soldadura anódica [9,16,17,18], estos no explican completamente los resultados experimentales.

El modelo de voltaje constante [9] establece la existencia de un voltaje de colapso que debe ser muy parecido para las estructuras mínimas soldadas en obleas con diferentes profundidades de las cavidades H. Experimentalmente [19], pudo comprobarse que realmente no existe un voltaje de colapso pues en ocasiones las estructuras de test solamente sueldan parcialmente. Las simulaciones realizadas muestran que el voltaje de colapso ( $V_{colap}$ ) calculado por simulación por el método de los elementos finitos no es igual para las estructuras mínimas soldadas en obleas con diferentes profundidad de las cavidades H [19], Tabla1. Dado que una vez soldadas las estructuras el corte de todas ellas es el mismo, este voltaje debería de ser el mismo para las diferentes profundidades, H. Por lo tanto el modelo no describe bien el proceso.

H[Å]	Circular		Rectangular	
	$L_{test}$ [µm]	$V_{colap}$ [V]	$L_{test}$ [µm]	$V_{colap}$ [V]
805	60	179	40	168
1792	160	373	100	362
2759	360	469	200	482
3728	520	609	300	617

**Tabla 1.**  $L_{test}$  experimental y voltajes de colapso simulados para las mínimas estructuras circulares y rectangulares soldadas con diferentes profundidades H.

El modelo de carga constante [16] considera que la carga que hay en la capa de empobrecimiento se mantiene constante durante el proceso de soldadura y esta carga debería ser muy parecida para las estructuras mínimas soldadas en obleas con diferentes profundidades de la cavidad H, como en el caso del modelo de voltaje constante.

De la Tabla 2 puede observarse que es necesario aumentar la densidad de carga ( $Q/A$ ) para soldar estructuras con profundidades H menores, por lo que este modelo tampoco se adapta a los resultados experimentales.

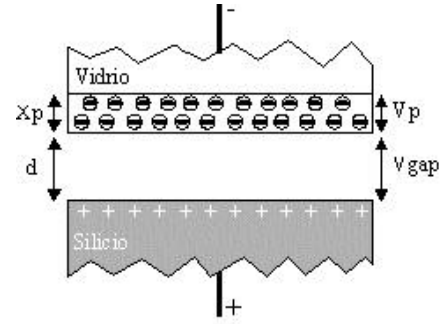
H[Å]	Circular		Rectangular	
	$L_{test}$ [µm]	$Q/A$ [C/m <sup>2</sup> ]	$L_{test}$ [µm]	$Q/A$ [C/m <sup>2</sup> ]
805	60	0.047	40	0.046
1792	160	0.043	100	0.043
2759	360	0.035	200	0.037
3728	520	0.034	300	0.035

**Tabla 2.**  $L_{test}$  experimental y densidad de carga mínima para las estructuras rectangulares y circulares soldadas con diferentes profundidades H.

### 3. MODELO EQUIVALENTE AL DE UNA CAPACIDAD MOS.

En este trabajo se presenta la validación de un modelo que supone que la estructura que se forma es equivalente al de

una capacidad MOS, donde parte de potencial aplicado cae en la capa de empobrecimiento del vidrio  $V_p$  y parte entre las superficies que se van a soldar  $V_{gap}$ , no considerando caída de potencial en el vidrio. Fig.4.



**Fig.4.** Distribución de la caída de potencial en la interfase de las estructuras de prueba en el modelo equivalente al de una capacidad MOS.

La presión electrostática entre las superficies que se van a soldar  $P_{gap}$  está determinada por:

$$P_{gap} = \epsilon_o \frac{V_{gap}^2}{2d^2} = \frac{1}{2} \epsilon_o (2a^2 d^2 + 2aV - 2a\sqrt{a^2 d^4 + 2ad^2 V})$$

Donde  $V = V_p + V_{gap}$ ,  $a = \frac{r\epsilon_G}{\epsilon_o^2}$

$\epsilon_G$  y  $\epsilon_o$  son las permitividades del vidrio y el aire respectivamente y  $\rho$  la densidad volumétrica de carga en la capa empobrecida.

La dificultad principal de este modelo radica en conocer la densidad volumétrica de carga en la capa de empobrecimiento y por ello se simulan las estructuras mínimas soldadas para ajustar estos valores.

Para validar el modelo se determinó inicialmente [19] la densidad volumétrica de carga necesaria para soldar las estructuras mínimas soldadas,  $L_{test}$ , obtenidas experimentalmente para obleas con profundidades de las cavidades H diferentes. Si estos valores son iguales significa que el modelo es correcto.

La densidad volumétrica de carga se determinó por simulación con el programa ANSYS, introduciendo en el programa los datos experimentales de las estructuras mínimas de prueba soldadas  $L_{test}$  de cada oblea, obtenidos con las mismas condiciones de soldadura (voltaje 1000 V y temperatura 400 °C), donde  $X_p$  es el ancho de la capa de empobrecimiento en el vidrio y d la separación entre las superficies, como se observa en la Fig. 4.

Los resultados de la simulación se muestran en la Tabla 3, en las filas en blanco, donde puede observarse que las densidades de carga necesarias para que las estructuras mínimas suelden, son muy parecidas y las diferencias pueden deberse a que en la máscara las variaciones en tamaño de las estructuras son discretas.

Este resultado indica que el modelo describe con bastante exactitud el proceso, ya que independientemente de las dimensiones de las estructuras de prueba, cuando las condiciones de soldadura son idénticas la densidad de carga que se tiene es similar.

Para estudiar la posible caída de potencial en el vidrio se realizaron simulaciones suponiendo caídas en el vidrio

de 300V y 500V (simulaciones para V=700 y V=500V respectivamente, en la Tabla 3).

H [m]	Ltest [μm]	Voltaje [V]	Densid. Carga [C/m3]	Vgap [V]	Vp [V]	Xp [μm]	P[MPa] (d=0)	P[MPa] (d=H)
8,05E-08	40	1000	17441	342,8	657,2	2,16	122,09	80,24
1,792E-07	100	1000	17075	593,7	406,3	1,72	119,53	48,57
2,759E-07	200	1000	14313	707,8	292,2	1,59	100,19	29,27
3,728E-07	300	1000	15547	808,7	191,3	1,23	108,83	20,82
5,518E-07	600	1000	16016	895,9	104,1	0,90	112,11	11,67
8,05E-08	40	700	25645	317,2	382,8	1,36	125,66	68,71
1,792E-07	100	700	27020	510,3	189,7	0,93	132,40	35,88
2,752E-07	200	700	28458	595,9	104,1	0,67	139,44	20,74
3,728E-07	300	700	72250	671,6	28,4	0,22	354,03	14,36
<b>5.518E-07</b>	<b>600</b>	<b>700</b>	-	<b>500,0</b>		<b>0</b>	-	<b>7,12</b>
8,05E-08	40	500	37344	286,1	213,9	0,84	130,70	55,91
1,792E-07	100	500	55273	433,2	66,8	0,39	193,46	25,86
2,752E-07	200	500	1887695	498,9	1,1	0,01	6606,93	14,54
<b>3.728E-07</b>	<b>300</b>	<b>500</b>	-	<b>500,0</b>		<b>0</b>		<b>7,96</b>
<b>5.518E-07</b>	<b>600</b>	<b>500</b>	-	<b>500,0</b>		<b>0</b>		<b>3,63</b>

**Tabla 3.** Resultados de las simulaciones realizadas: Las filas en blanco corresponden a los resultados que parten de la idea que prácticamente no cae potencial en el vidrio.

Los resultados mostrados en esta Tabla reafirman la validez del modelo.

De las filas en blanco que corresponden a las simulaciones realizadas a partir de datos experimentales ( $L_{test}$ ) y suponiendo que la caída de potencial en el vidrio es pequeña (suposición ampliamente reportada en la literatura) se pueden hacer las siguientes afirmaciones:

1 En obleas con profundidades de las cavidades H diferentes, sometidas a un proceso de soldadura con iguales condiciones (voltaje y temperatura) la densidad de carga necesaria (Densid.Carga) para que las estructuras mínimas suelden son muy parecidas, pues el movimiento de carga sólo depende de las condiciones del proceso.

2 El espesor de la capa de empobrecimiento ( $X_p$ ), es del orden de las micras, igual al valor medido experimentalmente por otros autores [3,20].

3 El valor de la presión electrostática (P, d=0) que se obtiene según el modelo para voltajes de 1000V, es del orden de 100-120 Mpa, valor cercano al valor de la presión de ruptura del vidrio Pyrex # 7740 que es 150 Mpa [4]. Se ha observado experimentalmente que algunas estructuras aparecen rotas.

4 La presión electrostática (P, d=H), cuando las superficies están separadas a una distancia d=H, es diferente para cada oblea, ya que la H es diferente e independiente de si sueldan las estructuras o no.

5 Las simulaciones se ajustan bien a los resultados experimentales aplicando 1000V a las mismas, lo cual implica que no se considera ninguna caída de potencial en el vidrio.

De las filas sombreadas en gris se concluyó lo siguiente.  
1 En las filas correspondientes a 700V y 500V que implican una caída de potencial en el vidrio de 300V y 500V respectivamente, el valor de la densidad de carga obtenidas por simulación de las estructuras mínimas

soldadas en cada caso no son iguales, lo que implica que el potencial que cae en el vidrio es menor de 300V.

2 En estas mismas filas puede observarse que la presión electrostática (P, d=0) para las estructuras mínimas soldadas para diferentes H no son iguales, lo que justifica aun más que las simulaciones considerando mayores caídas de potencial en el vidrio no son correctas.

3 Para valores de H, mayores, los resultados para 700V y 500V no convergen lo cual indica que no hay ninguna densidad de carga posible que satisfaga el modelo y pueda soldar la estructura lo cual también ratifica que considerar mayores caídas de potencial en el vidrio no es correcto.

#### 4. CONCLUSIONES.

Se demostró la validez del modelo equivalente al de una capacidad MOS, pues los resultados de la simulación obtenidos en este trabajo son similares a los obtenidos experimentalmente por otros autores.

La validación del modelo se basó en la comprobación de parámetros tales como: espesor de la capa de empobrecimiento, valor de la presión electrostática desarrollada durante el proceso, caída de potencial en el volumen del vidrio.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] J.A. Plaza, J. Esteve y E. Lora-Tamayo, Método no destructivo para la determinación de la calidad de la soldadura anódica y mejora de contactos., Patente n° 9602697, 19 de Diciembre, 1996.
- [2] J.A. Plaza, J. Esteve and E. Lora-Tamayo, Nondestructive anodic Bonding Test, Journal of Electrochemical Society Letters, Vol. 144, No. 5, May, (1997), pp.L108-L110, 1997.

- [3] G.Wallis, Direct-current polarization during field-assisted glass-metal sealing., Journal of the American Ceramic Society, Vol.53, N° 10, pp.563-567, 1970.
- [4] S. Johansson, K. Gustafsson and J. Schweitz, Strength evaluation of field assisted bond seals between silicon and Pyrex Glass, Sensors and Materials 3, pp 143-151, 1988.
- [5] J.A.Plaza and J.Esteve, Effect of the silicon oxide, silicon nitride and polysilicon layers on the electrostatic pressure during the anodic bonding, Proceedings of Eurosensors'97, 21-24 of September, Warsaw. Poland, pp.1267-1270, 1997.
- [6] K.E. Perterson, Silicon as mechanical material, Proceedings of the IEEE, Vol.70, N° 5, pp.420-457, 1982.
- [7] D. I. Pomerantz, , U.S. Patent No. 3 397 278, U.S. Patent No. 2 417 459, 1968.
- [8] G. Tavares, E. González and R. Furlan, Study of Anodic Bonding Between Silicon and Pyrex 7740. XII Congreso da Sociedade Brasileira de Microelectronica, Brasil, 1997.
- [9] G.Wallis and D.I. Pomerantz, Field assisted glass-metal sealing, Journal Applied Physics, Vol. 40, No10, pp. 3946-3949, September, 1969.
- [10] M.L.Dunn, S.J.Cunningham and P.E.W.Labossiere, Initiation Toughness of Silicon / Glass Anodic Bonds, Acta Materialia 48 (2000) pp. 735-744.
- [11] E.T.Enikov, J.G.Boyd, A thermodynamic field theory for anodic bonding of micro electro-mechanical systems (MEMS), Internacional Journal of Engineering Science 38 (2000) pp. 135-158
- [12] J.Sang Go, Y.H.Cho, Experimental evaluation of anodic bonding process based on the taguchi analysis of interfacial fracture toughness, Sensors and Actuators 73 (1999) pp. 52-57.
- [13] J.A.Plaza, E.González, J.Esteve, M.Visser, D.T.Wang, A.Hanneborg, Cathodic Debond of Anodically Bonded Silicon to Glass Wafers, Electrochemical and Solid-State Letters, 3 (8), (2000), pp.392-394.
- [14] J.A.Plaza, E.González, ....., SIMULACIÓN FEM DE  $\mu$ SISTEMAS, IV CONGRESO Métodos Numéricos en Ingeniería, Sevilla, España. 7-10 Junio 1999, Referencia en CD-R ISBN: 84-89925-45-3, Depósito Legal: B-15630-99.
- [15] J.A.Plaza, E.González, J.Esteve, Characterization of Multistack anodic bonds using a non-destructive method", MRS FALL'99, Boston, Massachusetts, USA November 29- December 3, 1999, Comunicación a Congreso. Referenciada en [http:// www.mrs.org](http://www.mrs.org), simposium MM.
- [16] T. R. Anthony, Dielectric insulation of silicon by anodic bonding, J. Appl. Physics, 58(3), 1 August, pp.1240-1247, 1985.
- [17] H. Hebiguchi, S. Shoji and M. Esachi, Room Temperature Anodic Bonding with Low Melting Point Glass film, Tecnical Digest the 9<sup>th</sup> Sensors Symposium, 1990.
- [18] M. Esachi, A. Nakano and H. Hebiguchi, Low Temperature Silicon-to-Silicon Anodic Bonding with Intermediate Low Melting Point Glass, Sensors & Actuators A21-A23, pp. 931-934, 1990.
- [19] J.A. Plaza,  $\mu$  Acelerómetros de Silicio, Memorias para optar por el grado de doctor en Ingeniería Electrónica, Bellaterra, Octubre de 1997.
- [20] M.Despont, H. Gross, F.Arrouy, C. Stelbler, U.Stauffer, Fabrication of a Silicon-Pyrex-Silicon stack by AC anodic bonding., Sensors and Actuators A 55, pp. 219-224, 1996.