

Capítulo 5:

Caracterización mecánica y eléctrica de las estructuras resonantes

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización de las estructuras resonantes fabricadas. En una primera fase, se presentan las medidas estáticas que consisten en la caracterización de las resistencias actuadoras y detectoras así como el "offset" del puente de Wheatstone, los resultados que se presentan han sido elaborados sobre oblea. A continuación y dentro de las caracterizaciones independientes con el tiempo, se realizan las medidas en temperatura y de desplazamiento y se comparan los resultados experimentales con los obtenidos por simulación. Para la caracterización dinámica, se realiza una verificación por interferometría de forma preliminar de las estructuras en resonancia para terminar con la medida eléctrica de la frecuencia de resonancia y del factor

de calidad de las estructuras encapsuladas tanto en las bases metálicas como en las placas de circuito impreso. Se concluye el capítulo con la medida eléctrica de la respuesta en frecuencia del sensor.

5.1. – Caracterización estática

A continuación se va a realizar la caracterización de las estructuras independientemente del tiempo. Tres son las medidas que se realizan. Se mide de forma estadística las resistencias y offsets y se analizan los resultados estadísticos según el tipo de estructura y de oblea. Seguidamente, se mide de forma experimental la temperatura máxima alcanzada en las estructuras tipo voladizo de 1000 μm y de 300 μm de longitud de masa. Finalmente, se miden los desplazamientos consecuencia de la potencia aplicada en estructuras tipo voladizo y tipo puente.

5.1.1. – Caracterización de resistencias y offset

Para el caso de los resonadores fabricados que se han descrito en el capítulo 3, se trata de estructuras piezoresistivas cuyo elemento sensor es un puente de Wheatstone. De modo que, la caracterización estática es sencilla y mide cuál es la salida en milivoltios del puente de Wheatstone cuando éste se ha desequilibrado debido a un cambio de estrés.

Mediante la caracterización estática se pueden obtener los valores de resistencias, actuadoras (h_1 y h_2) y detectoras (PW_{13} y PW_{24}), fabricadas. En la figura 5.1 se muestra un esquema del sistema completo de actuación y detección (diseñado en forma de puente de Wheatstone). También se puede obtener la medida del "offset". Es de esperar que el offset sea distinto en función del tipo de estructura y del tipo de oblea ya que la configuración del puente de Wheatstone es diferente y por tanto también es distinta la contribución de las pistas de aluminio que pasan por el puente. De forma que, a partir de los resultados que se obtienen, si el puente de Wheatstone

está desequilibrado se puede llegar a saber si el motivo del desequilibrio del puente o elemento sensor se debe al propio diseño (cómo están distribuidas las resistencias del puente de Wheatstone en la estructura) o el desequilibrio es consecuencia del propio proceso de fabricación.

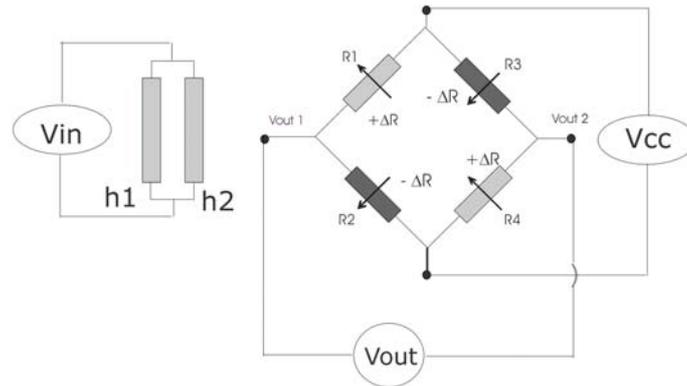


Figura 5.1: Configuración del sistema completo de actuación y detección en los resonadores piezoresistivos fabricados

Las resistencias diseñadas tanto actuadoras como sensoras, en el caso de estructuras pequeñas, es decir, voladizos de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa, se distinguen tres tipos a, b o c según la disposición y valores de las resistencias que componen el puente de Wheatstone (ver capítulo 3, tabla 3.3). De este modo, para el caso de la estructura tipo Aa, las resistencias actuadoras tienen unos valores nominales de $4 \text{ K}\Omega$, mientras que los valores de las resistencias sensoras son de 400Ω . Las estructuras tipo Ab y Ac tienen sin embargo una disposición de las resistencias sensoras diferente de la estructura Aa y diferentes entre sí. Los valores de las resistencias para ambos casos, son de $4 \text{ K}\Omega$ para las resistencias actuadoras y $1,25 \text{ K}\Omega$ para las sensoras. Las resistencias se diseñan de diferentes valores debido a la problemática existente en la reducción de dimensiones que presentan las estructuras pequeñas con respecto a las estructuras grandes de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa. En la figura 5.2 a, b y c se muestra una fotografía de las estructuras pequeñas una vez fabricadas.

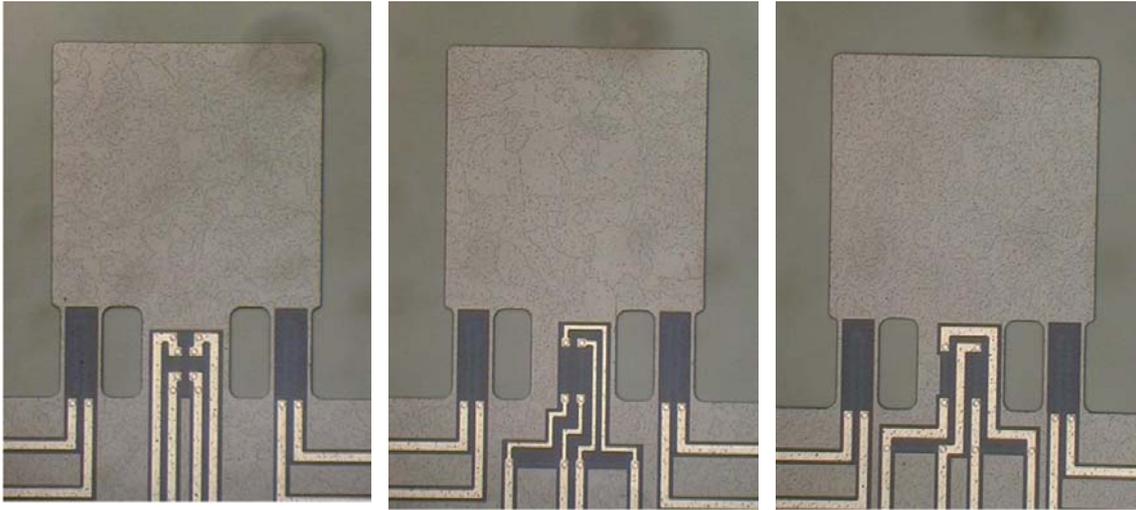


figura 5.2 a

figura 5.2 b

figura 5.2 c

Figura 5.2: (a) Fotografía de una estructura voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa tipo A (b) Fotografía de una estructura voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa tipo B (c) Fotografía de una estructura voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa tipo C

Para el caso de las estructuras tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ y puente de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ y $1000 \times 500 \mu\text{m}^2$ de masa, tienen unos valores teóricos de $1,25 \text{ K}\Omega$ (ver capítulo 3, tabla 3.3). En la figura 5.3 se muestra una fotografía de la zona de actuación y de detección de las estructuras fabricadas con estas dimensiones.

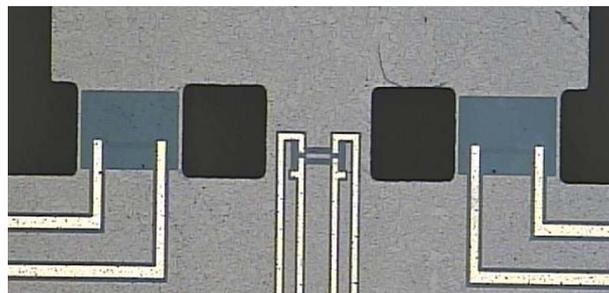


figura 5.3 a

Figura 5.3: Configuración estándar del puente de Wheatstone y de las resistencias actuadoras en estructuras tipo B, C, D, E y F.

Con la caracterización estática se obtienen los valores de resistencias y offset. Estas medidas se realizan de forma automática sobre oblea en mesa de puntas. Se miden los valores de las resistencias actuadoras, las resistencias en diagonal del puente de Wheatstone (PW_{13} y PW_{24}) y los offsets cuando se aplica $V_{in} = +0V$ (offset,1) y $V_{in} = +8V$ (offset,2) a las resistencias actuadoras y se polariza el puente de Wheatstone con $V_{cc} = +5V$ (ver figura 5.1). La polarización elegida de $+8V$ a las resistencias calefactoras corresponde a una potencia aplicada de 50 mW en el caso de las estructuras de $1000 \times 1000 \mu m^2$ y de 16 mW en el caso de las estructuras de $300 \times 300 \mu m^2$. Las tablas 5.1A y B muestran los valores experimentales según el tipo de oblea y el tipo de disposición de las resistencias según las dimensiones de las estructuras.

	estructura (wmaxlma) (μm^2)	R (H₁) (KΩ)	R (H₂) (KΩ)	PW₁₃ (KΩ)	PW₂₄ (KΩ)	OFFSET,1 (VIN=0V) (mV)	OFFSET,2 (VIN=+8V) (mV)
Aa	voladizo	4,483 \pm	4,452 \pm	0,494 \pm	0,494 \pm	- 39,7 \pm	- 40,3 \pm
	(300x300)	0,052	0,090	0,004	0,004	16,1	13,0
Ab	voladizo	4,54 \pm	4,55 \pm	1,336 \pm	1,341 \pm	63,7 \pm	- 74,8 \pm
	(300x300)	0,047	0,041	0,019	0,014	14,7	16,1
Ac	voladizo	4,52 \pm	4,52 \pm	1,33 \pm	1,33 \pm	108,6 \pm	- 122,9 \pm
	(300x300)	0,043	0,059	0,013	0,013	9,6	10,3
C	voladizo	1,255 \pm	1,280 \pm	1,341 \pm	1,341 \pm	47,2 \pm	34,1 \pm 18,0
	(1000x1000)	0,051	0,030	0,011	0,011	19,9	
D	doble	1,278 \pm	1,293 \pm	1,366 \pm	1,367 \pm	41,4 \pm	32,4 \pm
	voladizo (1000x1000)	0,016	0,024	0,021	0,021	17,1	16,3
E	puente	1,281 \pm	1,269 \pm	1,353 \pm	1,354 \pm	- 33,3 \pm	-52,1 \pm
	(1000x1000)	0,123	0,033	0,013	0,013	14,2	14,0
F	puente	1,255 \pm	1,256 \pm	1,341 \pm	1,341 \pm	- 30,5 \pm	-53,5 \pm
	(1000x500)	0,007	0,005	0,008	0,008	15,7	12,5

Tabla 5.1A: Resultados estadísticos experimentales de las resistencias y offset de las distintas estructuras para oblea tipo A de 5 μm de grosor de silicio

En la tabla 5.1A se muestran los datos estadísticos de la medida de las resistencias, actuadoras y sensoras, y offset de las estructuras que se han fabricado. Los valores están tratados de forma estadística y muestran las desviaciones para cada uno de los valores. Se han podido medir el 60 %, 83% y 63% de los dispositivos fabricados en el caso de oblea tipo A de 5 μm , oblea tipo B de 5 μm y oblea tipo B de 15 μm , respectivamente.

Los valores experimentales de las resistencias coinciden con los datos iniciales teóricos (ver capítulo 3, tabla 3.3), obteniendo una desviación de los valores experimentales con respecto a los valores diseñados inferior al 15%. A continuación, se analiza con detalle los valores de offset que se obtienen para las distintas geometrías comparando los valores de la columna que corresponde con la medida del offset a $V_{in} = 0V$ con los valores del offset a $V_{in} = +8V$, para cada tipo de geometría. Por ejemplo, para el caso de las estructuras tipo C y D, se corresponden con estructuras tipo voladizo de 1000 μm de longitud de masa y los offsets a $V_{in} = 0V$ que se obtienen son semejantes y con valores de 47,2 mV y 41,4 mV, respectivamente. Estos offsets en teoría deberían ser iguales dado que las estructuras son iguales y tienen la misma distribución de las resistencias sensoras dentro del puente de Wheatstone. Cuando se aplica $V_{in} = +8V$ a las resistencias actuadoras se produce un desplazamiento o deflexión de la estructura. Debido al efecto bimetálico Si - SiO₂, la estructura se desplaza en sentido positivo hacia arriba y produce un cambio en el valor del offset de las estructuras obteniéndose 34,1 mV y 32,4 mV respectivamente. Este offset disminuye y sin embargo debería aumentar, ya que al doblarse las estructuras por efecto bimetálico produciría un cambio a la salida del puente de Wheatstone por efecto del estrés. Este hecho se debe a que las estructuras están inicialmente estresadas (dobladas hacia abajo) tras el proceso de fabricación. Al calentar, las estructuras se recuperan desplazándose en sentido positivo por efecto del óxido, se doblan menos, se estresan menos y por tanto, tienen un offset menor que cuando no se aplica tensión sobre las resistencias calefactoras.

Para el caso de las estructuras pequeñas, voladizos de 300 μm de longitud de masa, se fabrican tres tipos en función de la disposición de las resistencias sensoras del puente de Wheatstone (ver figuras 5.2 a, b y c). En el caso de la estructura tipo Aa, la disposición de las resistencias sensoras es simétrica y los resultados que se obtienen para los offsets a $V_{in} = 0\text{V}$ y $V_{in} = +8\text{V}$ dan unos valores semejantes de $-39,7\text{ mV}$ y $-40,3\text{ mV}$. La simetría de la distribución del puente de Wheatstone implica que las pistas de aluminio que atraviesan el puente central de la estructura es la misma y por tanto, los resultados de offset esperados tienen que ser semejantes. En el caso de las estructuras tipo Ab y Ac tienen una distribución asimétrica de las resistencias sensoras sobre el puente central y además la anchura de las pistas de aluminio es diferente siendo en la estructura tipo Ab la mitad que en el caso de la estructura tipo Ac. Esta situación claramente se pone de manifiesto si se comparan los valores de los offsets cuando $V_{in} = +8\text{V}$ ambas estructuras (tipo Ab y Ac). En la estructura tipo Ac, donde es manifiesto que hay una mayor cantidad de aluminio sobre el puente central de la estructura, hace que el offset cambie de signo debido a que el efecto de las pistas de aluminio gana sobre el efecto del óxido de silicio, en consecuencia la estructura se dobla en sentido hacia abajo (negativo), igual que en el caso tipo Ab. Finalmente, para el caso de las estructuras tipo puente los offsets demuestran que es el óxido con el silicio el que prevalece como efecto bimetálico.

Los resultados que se presentan en la tabla 5.1B muestran los resultados del comportamiento del offset de una oblea tipo B de 5 μm de grosor de silicio, en función del tipo de estructura. Debido al cambio de los valores de los grosores de capa de óxido y aluminio depositados el valor de offset esperado se modifica si lo comparamos con los valores obtenidos en el caso de la tabla 5.1 A.

Las explicaciones de los resultados que se obtienen para los offsets de las distintas estructuras son los mismos para la tabla 5.1A que para la tabla

5.1B puesto que aunque los valores son diferentes, los resultados en función de la aplicación de $V_{in} = 0V$ a $V_{in} = +8V$ a las resistencias calefactoras, van en el mismo sentido, salvo en el caso de las estructuras puente o tipo E y F. Si recordamos los resultados de la tabla 5.1B se corresponden con la caracterización de una oblea tipo B, es decir, una oblea de 5 μm de grosor de silicio, 500 Å de óxido de silicio y 1,5 μm de grosor de aluminio. Los resultados de los offsets de las estructuras E y F, demuestran que dado que el grosor del aluminio es 3 veces mayor que el grosor en el caso de las estructuras caracterizadas en la tabla 5.1 A, son las pistas de aluminio las que tiran de las estructuras doblándolas o estresándolas en sentido positivo.

	estructura (wmaxlma) (μm^2)	R (H₁) (KΩ)	R (H₂) (KΩ)	PW₁₃ (KΩ)	PW₂₄ (KΩ)	OFFSET,1 (0V) (mV)	OFFSET,2 (+8V) (mV)
Aa	voladizo	4,536 \pm	4,489 \pm	0,518 \pm	0,518 \pm	- 17,6 \pm	- 24,33 \pm
	(300x300)	0,173	0,142	0,019	0,019	16,3	16,4
Ab	voladizo	4,436 \pm	4,437 \pm	1,344 \pm	1,344 \pm	64,27 \pm	- 83,40 \pm
	(300x300)	0,084	0,060	0,038	0,038	32,93	31,15
Ac	voladizo	4,384 \pm	4,384 \pm	1,319 \pm	1,319 \pm	60,93 \pm	- 76,04 \pm
	(300x300)	0,075	0,045	0,013	0,013	26,0	25,90
C	voladizo	1,287 \pm	1,280 \pm	1,382 \pm	1,382 \pm	146,22 \pm	129,41 \pm
	(1000x1000)	0,025	0,025	0,040	0,040	63,53	63,00
D	doble	1,266 \pm	1,272 \pm	1,368 \pm	1,368 \pm	120,32 \pm	103,77 \pm
	voladizo (1000x1000)	0,021	0,028	0,033	0,033	58,37	58,28
E	puente	1,276 \pm	1,277 \pm	1,353 \pm	1,353 \pm	211,33 \pm	209,91 \pm
	(1000x1000)	0,007	0,009	0,045	0,044	59,25	58,31
F	puente	1,291 \pm	1,292 \pm	1,358 \pm	1,359 \pm	246,90 \pm	255,24 \pm
	(1000x500)	0,012	0,015	0,028	0,028	46,77	44,90

Tabla 5.1B: Valores experimentales de las resistencias y offset de las distintas estructuras para oblea tipo B de 5 μm de grosor de silicio

Como ya se ha explicado en el capítulo de fabricación sólo es posible obtener resultados experimentales de una de las obleas de 15 μm procesadas y que se corresponde con una oblea tipo B, cuyos resultados de resistencia y offsets se muestran en la siguiente tabla 5.1.C.

Los resultados que se obtienen en la tabla 5.1C son comparables a los que se obtienen en la tabla 5.1A. La única diferencia que existe entre unas estructuras y otras es el grosor de estructura de silicio. Los valores de offset son mucho menores en el caso de los resultados que se obtienen en la tabla 5.1C de los que se obtienen en la tabla 5.1A. Estos valores son indicativos de la sensibilidad de las estructuras poniéndose de manifiesto como, a priori, a mayor grosor de silicio las estructuras son menos sensibles. Por este motivo, se caracterizarán más estructuras de 5 μm que de 15 μm .

	estructura (wmaxlma) (μm^2)	R (H ₁) (K Ω)	R (H ₂) (K Ω)	PW ₁₃ (K Ω)	PW ₂₄ (K Ω)	OFFSET,1 (0V) (mV)	OFFSET,2 (+8V) (mV)
Aa	voladizo	3,416 \pm	3,431 \pm	0,483 \pm	0,482 \pm	- 0,19 \pm	- 0,09 \pm
	(300x300)	0,348	0,341	0,028	0,029	0,19	0,08
Ab	voladizo	3,461 \pm	3,311 \pm	1,274 \pm	1,269 \pm	0,33 \pm	- 0,17 \pm
	(300x300)	0,317	0,385	0,255	0,225	0,11	0,11
Ac	voladizo	3,442 \pm	3,529 \pm	1,217 \pm	1,227 \pm	0,06 \pm	- 0,21 \pm
	(300x300)	0,352	0,418	0,036	0,037	0,04	0,10
C	voladizo	1,224 \pm	1,097 \pm	1,215 \pm	1,214 \pm	0,34 \pm	0,21 \pm
	(1000x1000)	0,694	0,042	0,029	0,032	0,11	0,12
D	doble	1,157 \pm	1,150 \pm	1,253 \pm	1,262 \pm	0,33 \pm	0,17 \pm
	voladizo (1000x1000)	0,037	0,051	0,026	0,026	0,08	0,08
E	punte	1,142 \pm	1,143 \pm	1,226 \pm	1,220 \pm	0,41 \pm	0,25 \pm
	(1000x1000)	0,034	0,042	0,030	0,031	0,06	0,09
F	punte	1,150 \pm	1,146 \pm	1,230 \pm	1,224 \pm	0,41 \pm	0,26 \pm
	(1000x500)	0,024	0,036	0,03	0,028	0,08	0,10

Tabla 5.1C: Resultados estadísticos experimentales de las resistencias y offset de las distintas estructuras para oblea tipo B de 15 μm de grosor de silicio

5.1.2. – Medida experimental de la temperatura mediante cámara termográfica

Las estructuras que se han fabricado tienen un principio de actuación electrotérmico y por tanto, estudiar la máxima temperatura y la homogeneidad de la temperatura que alcanzan las estructuras cuando son polarizadas, resulta de interés. En este trabajo, dado que la medida de la temperatura no se considera relevante para el funcionamiento de los dispositivos, se utiliza una técnica de medida indirecta de la temperatura como lo es la termografía.

La medida práctica de la temperatura sin realizar contacto con la muestra entraña una serie de dificultades, ya que la medida se realiza a través de otra variable relacionada con ella. La termografía nos permite realizar la medida de la temperatura en las estructuras fabricadas sin tener contacto físico y aunque es una técnica que no es la adecuada para la caracterización de MEMS, puesto que la cámara de infrarrojos que se dispone en el CNM no incluye la óptica adecuada, es una técnica que sirve para corroborar las simulaciones que se han realizado en ANSYS con los valores experimentales y permite estudiar la homogeneidad de la temperatura en las estructuras.

La termografía infrarroja utiliza la transmisión de calor por radiación como variable relacionada con la temperatura, por lo que no es necesario ni el contacto físico con el elemento a medir ni un tiempo de estabilización de temperaturas, permitiendo la realización de medidas en situaciones donde no sería posible el uso de termómetros convencionales, contando además con la ventaja añadida de una mayor rapidez. La termografía infrarroja aprovecha la radiación emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura superior al cero absoluto (-273°C) como variable termométrica. Esta radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura superficial del objeto (ley de Stefan – Boltzman).

Se ha realizado la lectura de la medida de la temperatura máxima alcanzada por las estructuras fabricadas, cuando se ha aplicado una señal en continua de 10 V (80 mW para el caso de los dispositivos grandes o 25 mW para el caso de las estructuras pequeñas) a las resistencias actuadoras. Se utilizan 10 V que es la máxima señal que se puede aplicar mediante el generador de funciones que se utilizará en la caracterización dinámica.

Los resultados experimentales de la temperatura en estático alcanzada, que se muestra en la figura 5.4, quedan cotejados con la temperatura máxima esperada a través de la simulación en ANSYS.

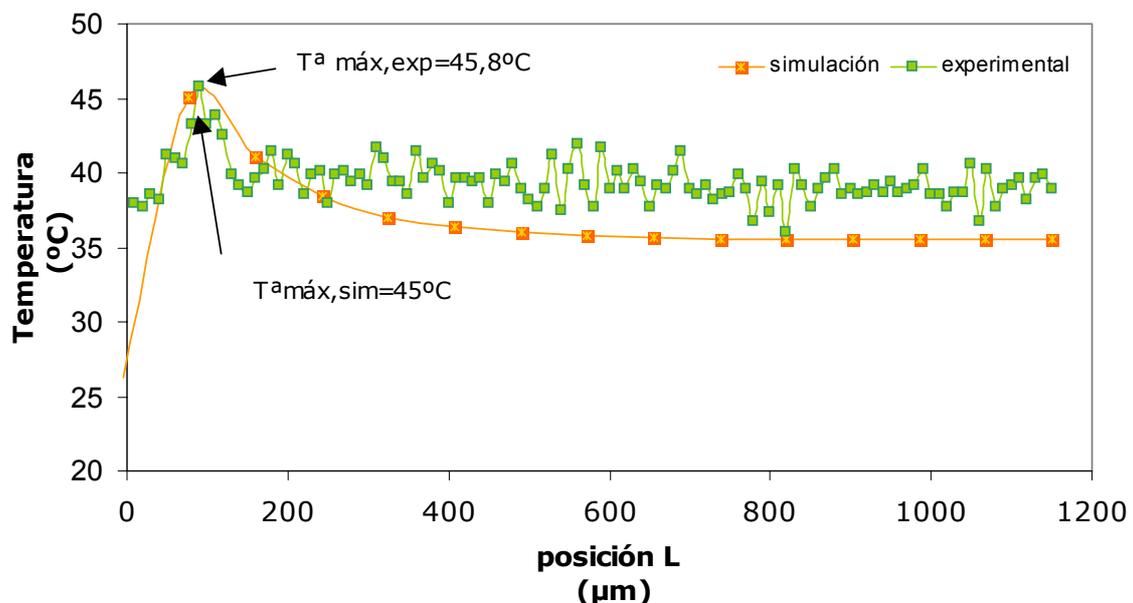


Figura 5.4: Medida experimental y por simulación de la temperatura máxima alcanzada por la estructura de 1000 μm de longitud de masa cuando se ha aplicado una potencia de 80 mW a las resistencias actuadoras

En la figura 5.4 se obtiene el valor de la temperatura máxima alcanzada para un dispositivo tipo voladizo de 1000 μm de longitud de masa cuando se han aplicada 10V (80 mW) a las resistencias actuadoras. Se puede observar en la figura como se ha realizado una medida a través de un

camino elegido para obtener la máxima temperatura alcanzada en las resistencias actuadoras tanto experimentalmente como a través de la simulación en ANSYS. Los datos experimentales reflejan como la temperatura máxima alcanzada por la estructura es de 45,8°C. La temperatura que se había estimado por simulación es de 45°C. Se demuestra como la simulación y experiencia coinciden.

De forma análoga, se ha medido experimentalmente la temperatura máxima alcanzada por la estructura tipo voladizo de 300 μm de longitud de masa cuando se han aplicado a las resistencias actuadoras una tensión de 10V (25 mW). El valor experimental de la medida de la temperatura comparado con el valor simulado para este tipo de estructura. Se observa como el valor experimental de la medida de la temperatura resulta mucho más intuitivo para este caso que para el caso de la estructura anterior. Esto significa que si la temperatura máxima que alcanza la estructura tipo voladizo de 300 μm de longitud de masa es de 56,1°C, frente a los 38,5°C estimados por simulación. El error de la medida es mayor para este caso, la desviación en la medida en el caso de la estructura de la figura 5.4 es del 1,7% frente al 45,7% en el caso de la estructura de 300 μm . Para obtener una medida experimental de mayor exactitud se tendría que proceder utilizando los parámetros de emisividad y transmisión de los diferentes materiales que definen la estructura y se utilizan en la fabricación. Pero para el primer caso, la desviación de la medida se encuentra por debajo del 10%, la aproximación se considera apropiada para la medida de la temperatura máxima alcanzada para ese tipo de estructura.

5.1.3. – Medida experimental de los desplazamientos con el microscopio confocal

Mediante la medida de los desplazamientos estáticos se puede comprobar, de forma experimental, varios efectos. Por un lado, se puede corroborar el efecto del voltaje aplicado, es decir, se puede confrontar como a mayor

voltaje aplicado mayor es el desplazamiento que sufre la estructura. Por otro lado, se puede verificar el efecto bimetal, es decir, se puede comprobar como las estructuras inicialmente y tras su encapsulado tienen una posición inicial y en función de si en las estructuras gana el efecto bimetal Si - SiO₂ o el efecto bimetal Si - Al, las estructuras suben o bajan respectivamente debido a los valores de los distintos coeficientes de dilatación de la bicapa, una vez que han sido polarizadas.

De este modo, se han medido los desplazamientos estáticos para dos tipos de estructuras, la estructura tipo voladizo y tipo puente de 1000 μm de longitud de masa. En la figura 5.5 a y b se muestran las imágenes topográficas que se han obtenido para una estructura tridimensional mediante barrido óptico con el microscopio confocal para cada una de las estructuras propuestas.

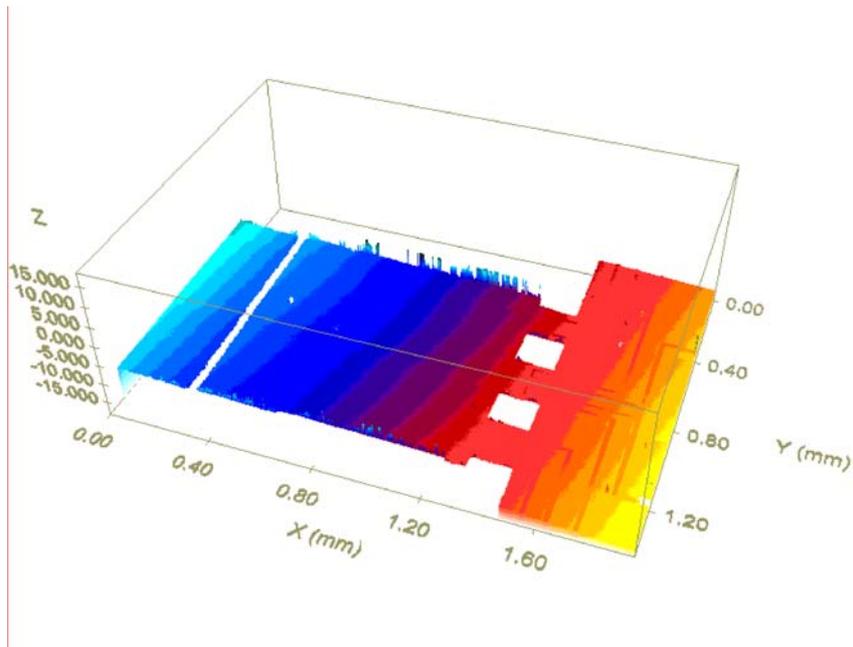


figura 5.5.a

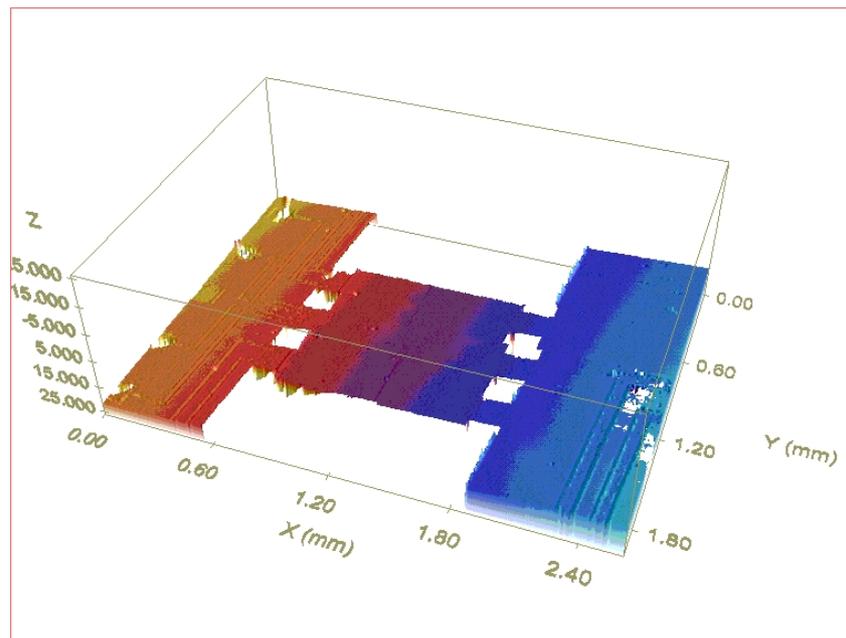


figura 5.5.b

Figura 5.5: (a) Imágenes topográficas obtenidas con el microscopio confocal para las estructuras tipo voladizo cuando se han aplicado 3mW a las resistencias actuadoras (b) Imágenes superficiales obtenidas con el microscopio confocal para las estructuras tipo puente cuando se han aplicado 28 mW a las resistencias actuadoras

En las figuras 5.5 a y b se muestra como las estructuras al aplicar una tensión se doblan.

Se han medido experimentalmente los desplazamientos de las estructuras en función de la tensión que se aplica a las resistencias actuadoras para 2V (3 mW), 6V (28 mW) y 10V (80 mW), contrastando los resultados experimentales con los estimados por simulación. Los valores de potenciales elegidos quedan justificados teniendo en cuenta que, para el límite superior, el generador de funciones no puede aplicar una señal de más de 10 V de amplitud, mientras que, para el límite inferior de voltaje aplicado, no se observa ningún desplazamiento experimental por debajo de 2 V y la medida de los 6V aplicados se corresponde con el valor medio de los límites inferior y superior establecidos. En la tabla 5.2 se muestra los valores experimentales y valores simulados del desplazamiento.

potencia (mW)	estructura voladizo		estructura puente	
	$u_{z,máx}^{simulación}$ (μm)	$u_{z,máx}^{exp}$ (μm)	$u_{z,máx}^{simulación}$ (μm)	$u_{z,máx}^{exp}$ (μm)
3	0,03	$0,15 \pm 0,07$	0	0
28	0,25	$0,30 \pm 0,09$	0,12	$0,13 \pm 0,09$
80	0,71	$0,73 \pm 0,16$	0,71	$0,72 \pm 0,10$

Tabla 5.2: Resultados experimentales y simulados de los desplazamientos estáticos en función de la potencia aplicada para estructuras tipo voladizo y tipo puente de 1000 μm de longitud de masa

En la tabla 5.2 se puede observar que, tanto para el caso de las estructuras tipo voladizo como tipo puente, la simulación realizada con la definición de la geometría y propiedades térmicas y mecánicas de los materiales se obtienen unos resultados simulados que coinciden con los resultados experimentales con un margen de error inferior al 20%. En concreto, para el caso de la estructura tipo voladizo para su caracterización se realizó una primera inspección de la estructura sin aplicar tensión a las resistencias

Si – SiO₂ al aplicar tensión, dado el principio de actuación de las estructuras diseñadas, aumenta localmente la temperatura de la estructura produciendo un gradiente de temperatura producido por la disipación del calor de las resistencias y debido a los diferentes coeficientes de dilatación de los materiales silicio y óxido de silicio se produce el desplazamiento de la estructura en sentido positivo por efecto del óxido. Esta situación se corrobora con la medida de los offsets (ver tabla 5.1A).

De forma análoga, se procede con la estructura tipo puente. Inicialmente se inspecciona el estado inicial del dispositivo cuando no se aplica tensión a las resistencias actuadoras y se observa como está plana comparado con la zona plana que se corresponde con el marco de silicio, ver figura 5.7.

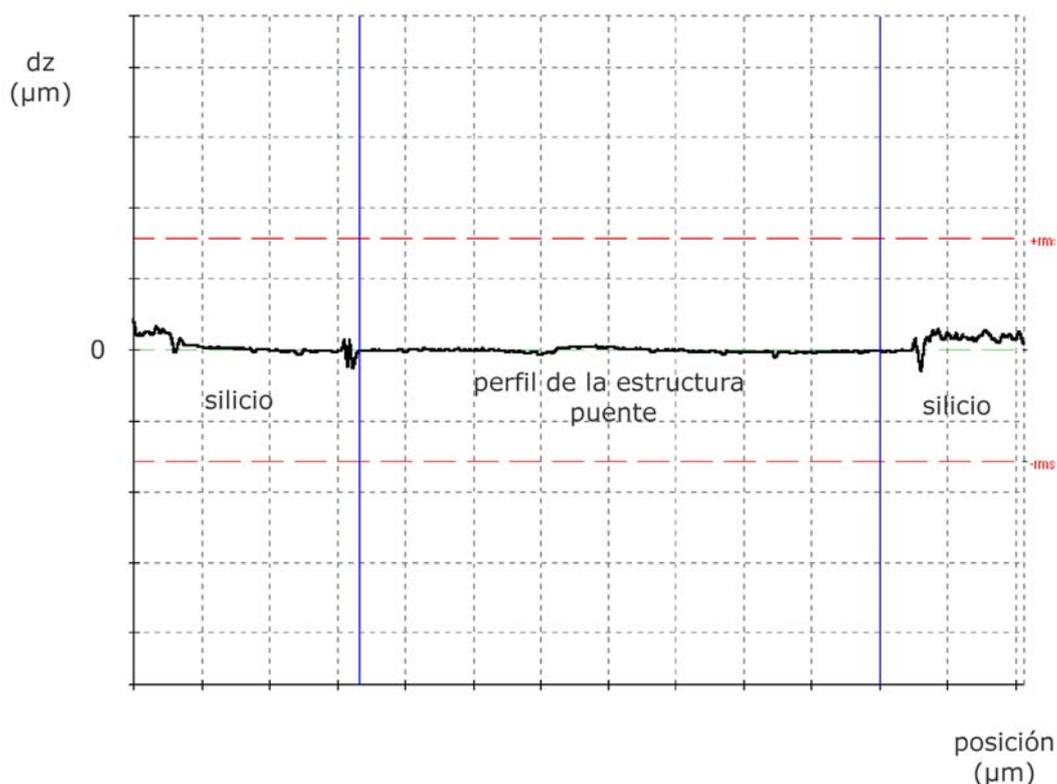


Figura 5.7: Comprobación del estado de la posición inicial de la estructura tipo puente sin aplicar voltaje a las resistencias actuadoras

Al tratarse de una estructura tipo puente tiene ambos extremos fijos, no aparece efecto del gradiente de estrés y, en consecuencia, está plana. Para este tipo de estructuras, únicamente podría aparecer estrés tipo axial cuyo efecto hace que la estructura se deforme en forma de cúpula cóncava o convexa (en función del signo positivo o negativo de estrés) o bien que quede tensionada (estrés tensil). Por el hecho de ser un tipo de dispositivo con ambos extremos fijos, implica que se trata de un diseño mucho más rígido que la estructura tipo voladizo y por este motivo, los desplazamientos que se obtienen en función del voltaje aplicado son menores en los puentes que en los voladizos, tal y como se muestra en los datos de la tabla 5.2. Si comparamos los desplazamientos estáticos para una tensión continua de 6V aplicada a las resistencias actuadoras, se obtiene que en el caso del voladizo la estructura se desplaza 2,3 veces más que en el caso de la estructura tipo puente. Es decir, que para obtener un mismo desplazamiento en un voladizo que en una estructura tipo puente será necesario aplicar una mayor potencia.

En los resultados de la tabla 5.2, se destaca el hecho de que los desplazamientos estáticos que se han obtenido para el caso de las estructuras voladizo y puente cuando se aplican 10 V a las resistencias actuadoras coinciden. Estos resultados se justifican por el hecho de que en el caso de la estructura tipo puente al tener ambos extremos fijos los desplazamientos que se obtienen no sólo son consecuencia directa del efecto bimetal sino que hay que añadir el efecto asociado de que no es posible la total dilatación de los materiales en dirección longitudinal y, por tanto, la estructura se deforma.

En conclusión, queda verificado los desplazamientos estáticos en las estructuras por la aplicación de distintos voltajes a las resistencias actuadoras.

5.2. – Caracterización dinámica

Dentro de las caracterizaciones dinámicas se diferencian las obtenidas de forma preliminar por interferometría de las que han sido obtenidas de forma eléctrica.

Para la caracterización por interferometría se hace uso de un nuevo substrato piezoeléctrico que excita las estructuras de forma mecánica. El encapsulado en base metálica demuestra que también es lo suficientemente plano como para poder realizar una caracterización, a modo preliminar de forma óptica, que determinará las frecuencias de resonancia de las estructuras. Se van a caracterizar las estructuras encapsuladas de forma eléctrica, obteniendo para alguna de ellas, las curvas de resonancia. También se comprobará el uso de un circuito amplificador que mejora la señal de salida y finalmente, se caracterizarán las estructuras una vez que la capa sensible ha sido depositada. Se comprobará como se modifica tanto la frecuencia, como la amplitud como el factor de calidad.

5.2.1. – Caracterización óptica de los resonadores por interferometría

El método de interferometría es utilizado para inspección de las muestras en situaciones estáticas y para caracterización en aplicaciones dinámicas.

Para aplicaciones en estático, el método de interferometría es útil para inspeccionar si las estructuras son planas y en caso de que no lo sean, estimar la curvatura o la inclinación teniendo en cuenta que cada franja de interferencia se corresponde con un desplazamiento en dirección "z" de aproximadamente 0,25 μm . Incluso se puede determinar el sentido de la curvatura (cúpula cóncava o convexa) o inclinación (hacia arriba o abajo) teniendo en cuenta el sentido de movimiento de las franjas de interferencia. De modo que, si se sube la muestra y el sentido de las franjas de

interferencia se dirigen hacia la zona del anclaje, significa que la estructura está inclinada hacia abajo o bien tiene forma de cúpula cóncava. Por el contrario, si se sube la muestra y las franjas de interferometría van en sentido saliente, significa que la estructura se encuentra inclinada hacia arriba o bien tiene forma de cúpula convexa. En el caso de que no aparezcan franjas de interferencia, al desplazar la muestra, si las franjas de interferencia aparecen y desaparecen de forma simultánea, es indicativo de que la estructura está plana.

Para aplicaciones en dinámico, la interferometría se utiliza para caracterizar la estructura en resonancia y determinar los valores de los parámetros mecánicos característicos de la resonancia como son principalmente, su frecuencia de resonancia, su amplitud y su factor de calidad. Hay que resaltar que la medida del factor de calidad es muy inexacta por tratarse de una medida óptica. Determinar la variación de la amplitud de resonancia en un 70% de las franjas de interferencia de contraste cero, resulta complicada su afinación y el error que se comete puede llegar a ser elevado. Otra desventaja asociada a este tipo de medida consiste en que se tiene un desconocimiento completo del valor de la energía que se está aplicando para que la estructura entre en resonancia y en consecuencia, los valores de amplitud que se obtienen por los distintos modos de vibración, para una misma estructura, no son comparables (ver la respuesta en frecuencia del substrato piezoeléctrico de 4,1 kHz en la figura B.2 del anexo B). Lo que sí es una ventaja es que se visualiza la resonancia.

De forma preliminar, las estructuras resonantes han sido caracterizadas de forma óptica por interferometría. El método de interferometría consiste en utilizar un microscopio en modo de interferometría con $\lambda = 546 \text{ nm}$. Cada franja de interferencia corresponde a una variación en eje "z" de 2730 \AA . El procedimiento para la medida dinámica en frecuencia consiste en colocar la muestra a medir inclinada sobre la base del microscopio. De este modo, aparecen franjas de interferencia sobre la superficie de la estructura, tal y

como se muestra en la figura 5.8a. Cuando se aplica una señal en voltaje en alterna en la forma $(A \sin \omega t)$, la estructura entra en resonancia. Esta resonancia se puede comprobar visualmente por la aparición de unas franjas que se denominan franjas de contraste cero sobre la superficie de la estructura, tal y como se muestra en la figura 5.8b. De modo que, la frecuencia de resonancia coincide cuando se obtiene la máxima amplitud o mayor número de franjas de contraste cero sobre la superficie de la estructura.

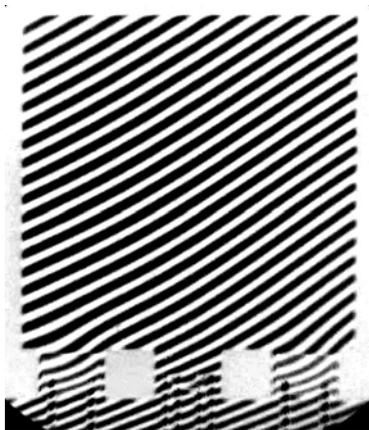


figura 5.8a

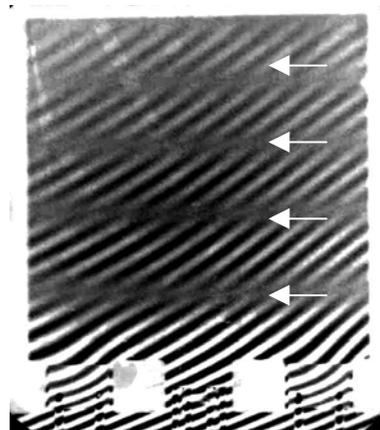


figura 5.8b

Figura 5.8 a: Fotografía, en estático, de la estructura tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de longitud de masa observada por interferometría **(b)** Fotografía, en resonancia, de la estructura tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de longitud de masa observada por interferometría

Cada franja de contraste cero aparece como solución homogénea de la función de Bessel de orden cero, cuya expresión viene dada según la ecuación [5.1]

$$J_0 = \frac{4\pi A}{\lambda}$$

[5.1]

dónde "A" es la amplitud de la resonancia y "λ" la longitud de onda.

En función de la longitud de onda utilizada, los ceros de la función de Bessel o franjas de contraste cero aparecen a 110 nm, 220 nm, 330 nm,... y así sucesivamente. El número de franjas de contraste cero indica el valor de la amplitud de resonancia. En la fotografía de la figura 5.9b, la estructura tipo voladizo ha sido excitada con una señal del tipo $(10 \text{ sen } \omega t)$, y dado que se obtienen 5, 5 franjas de interferencia, se obtiene un valor de amplitud de la resonancia de 495 nm.

La principal ventaja asociada para este tipo de medida es que se puede comprobar de forma visual que las estructuras resuenan, se pueden determinar los valores de los parámetros mecánicos de la resonancia (frecuencia, amplitud y factor de calidad) e incluso la forma de los modos de vibración. Comprobar en qué modo está vibrando la estructura resulta sencillo en función del dibujo que las franjas de contraste cero esbozan sobre la superficie de las estructuras a medir (ver figura 5.10 y 5.11).

5.2.1.1. - Caracterización dinámica de las estructuras pegadas en substrato piezoeléctrico

En este tipo de montaje experimental, las estructuras se excitan mediante la energía que se transmite desde el substrato piezoeléctrico cuando este es excitado eléctricamente. La detección de la resonancia se realiza de forma óptica por interferometría por la aparición y medida de las franjas de contraste cero. Por tanto, con este tipo de medida, se utiliza la propiedad que tienen los substratos cerámicos piezoeléctricos de convertir una señal eléctrica en mecánica. Ésta señal alterna se aplica entre las dos caras del substrato, de modo que, a la máxima amplitud se obtiene la frecuencia de resonancia de la estructura.

El montaje experimental, que se requiere para este tipo de caracterización preliminar se muestra en el anexo B. La figura 5.9 muestra una imagen del

montaje utilizado para la caracterización por interferometría de las estructuras en sustrato piezoeléctrico.

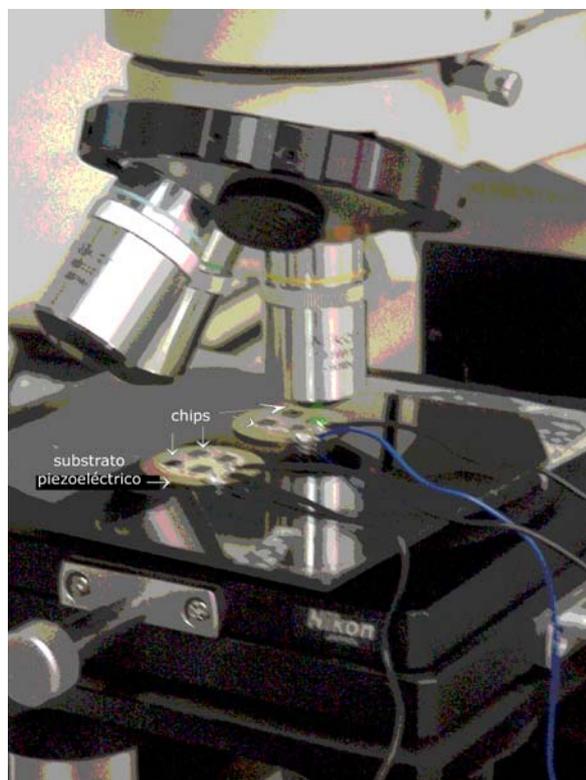


Figura 5.9: Fotografía del montaje de interferometría utilizado para la caracterización de los resonadores en sustrato piezoeléctrico

Se han caracterizado de este modo las distintas estructuras diseñadas y se han obtenido sus frecuencias de resonancia para el primero de los modos de vibración y cuyos valores se esquematizan en la siguiente tabla 5.3.

estructura (wmaxlma)	nomenclatura	b (μm)	L (μm)	fr,teórica (kHz)	fr,exp ^{interf} (kHz)
voladizo (1000x1000)	C	1000	1000	5,4	3,85
voladizo (300x300)	Aa	300	300	44,7	42,44
puente (1000x1000)	E	1000	1000	26,9	24,76
puente (1000x500)	F	1000	500	71,2	53,42

Tabla 5.3: Cuadro resumen de los valores teóricos y experimentales de las frecuencias de resonancia para primer modo de vibración de las estructuras con geometría, tipo voladizo o tipo puente, diseñadas con distintas dimensiones y excitadas de forma mecánica y caracterizadas ópticamente por interferometría

En la tabla 5.3 se resumen los valores experimentales medidos en estructuras tipo voladizo (C y Aa) y tipo puente (E y F) de 5 μm de grosor de silicio. La frecuencia de resonancia teórica se calcula a partir de la expresión 3.1.vii deducida en el capítulo 3. Los valores teóricos de las frecuencias de resonancia están calculados substituyendo en la expresión [3.1.vii] los valores de los parámetros geométricos diseñados en máscara y los valores de las propiedades de los materiales encontrados en la literatura (ver tabla 3.7). De este modo, se puede observar en la tabla 5.3, como el valor de la frecuencia teórica siempre es mayor que el valor experimental y por tanto, el dato teórico da un error medio de 16,3 % con respecto al dato experimental y que depende de cada diseño. Esta desviación entre el valor teórico y experimental se debe a que, en el desarrollo de la expresión matemática de la frecuencia de resonancia hay factores que no se tienen en cuenta y que son consecuencia directa del proceso de fabricación, como son el desalineamiento y el sobreataque (que modifican la longitud efectiva del resonador), y por tanto, hacen que el valor de frecuencia experimental se modifique frente al valor teórico, dada su directa influencia.

5.2.1.2. - Caracterización de las estructuras encapsuladas en bases metálicas

Los dispositivos excitados usando las propias resistencias calefactoras integradas y encapsulados en bases metálicas o en placas de circuito impreso, también permiten una primera caracterización preliminar de los resonadores por interferometría, ya que el montaje es lo suficientemente plano y estable para la realización de una primera medida inicial. De este modo, se han obtenido las frecuencias de resonancia y factores de calidad de algunas de las estructuras encapsuladas en base metálica, excitando las estructuras mediante la aplicación de una señal alterna tipo sinusoidal en las resistencias actuadoras. La tabla 5.4 muestra los valores que se han obtenido para las distintas estructuras encapsuladas en base metálica.

	estructura (wmaxlma)	frecuencia (kHz)	factor de calidad Q
Aa	voladizo (300x300)	34,19 ± 1,56	230 ± 45,16
Ab	voladizo (300x300)	31,92 ± 3,57	161 ± 8,99
Ac	voladizo (300x300)	34,76 ± 1,46	289 ± 42,85
C	voladizo (1000x1000)	4,01 ± 0,32	76 ± 7,81

Tabla 5.4: Cuadro resumen de las frecuencias y factores de calidad medidos por interferometría en estructuras tipo voladizo de 1000 μm y 300 μm de longitud de masa y 5 μm de grosor, encapsuladas en base metálica

En la tabla 5.4 se dan los valores de frecuencia de resonancia y de factor de calidad medido en aire para los distintos tipos de estructuras que han sido caracterizados cuando se aplica una señal $5(1 + \sin \omega t)$. Las frecuencias de resonancia, para estructuras de 5 μm de grosor de silicio y 1000 μm de longitud de masa oscilan entre 3,69 kHz y 4,33 kHz. Para el caso, de estructuras pequeñas de 300 μm de longitud de masa, las frecuencias varían entre un rango de 28,35 kHz y 36,22 kHz

Como ya se ha explicado, este tipo de medida resulta interesante para obtener, no sólo, los valores de la resonancia sino que además proporciona la posibilidad de determinar en qué modo de vibración está resonando la estructura contrastando el dibujo de las franjas de contraste cero que aparece sobre la estructura con el dibujo de las amplitudes obtenidas por simulación modal, tal y como se muestra en las columnas b y c de las figuras 5.10 y 5.11. En función de cómo es este dibujo, indica si la estructura está vibrando en primero, segundo, tercer o sucesivos modos de resonancia.

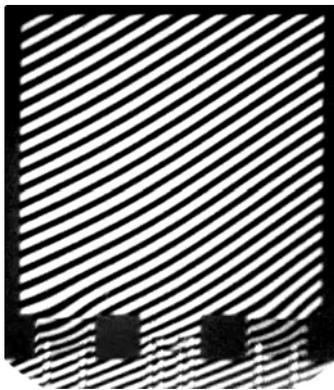


figura 5.10a



figura 5.10b

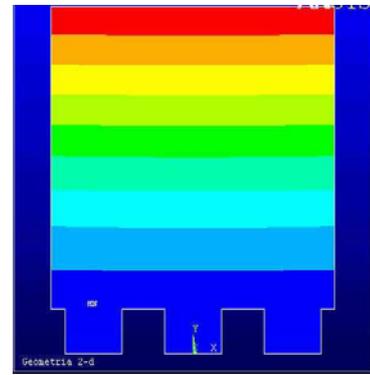


figura 5.10c

Figura 5.10 (a): Fotografía, en estático, de la estructura tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de longitud de masa observada por interferometría **(b)** Fotografía, en resonancia, de la estructura tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ oscilando en primer modo **(c)** Forma modal simulada por ANSYS para primer modo de vibración de una estructura tipo voladizo

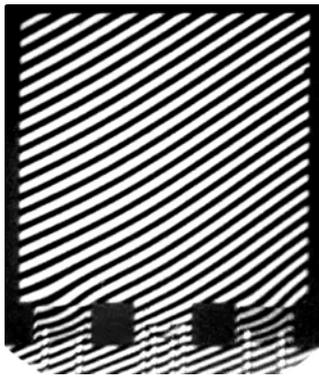


figura 5.11a

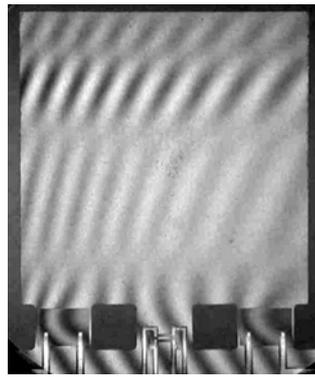


figura 5.11b

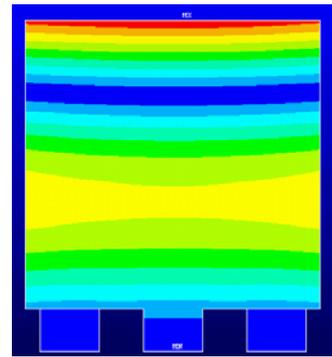


figura 5.11c

Figura 5.11 (a): Fotografía, en estático, de la estructura tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de longitud de masa observada por interferometría **(b)** Fotografía, en resonancia, de la estructura tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ oscilando en tercer modo **(c)** Forma modal simulada por ANSYS para tercer modo de vibración de una estructura tipo voladizo

La figura 5.10a muestra la estructura tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa caracterizada por el método de interferometría y en estático donde se ve claramente como aparecen las franjas de interferometría. En la figura 5.10b y 5.11b se muestra cómo una vez la estructura ha sido excitada aplicando en las resistencias actuadoras una señal del tipo

$V_{ac} = 5 (1 + \text{sen}(wt))$, la estructura entra en resonancia, resonando en su primer modo de vibración con una amplitud de resonancia de 495 nm aproximadamente para el primer modo y de 180 nm para el tercero de los modos. Si se compara la forma de las franjas de contraste cero que se dibujan sobre la superficie de la estructura con la forma de las franjas de desplazamiento encontradas por simulación, se puede comprobar en qué modo de vibración está resonando la estructura (columnas b y c de la figura 5.10).

Encontrar los valores exactos de amplitud y factor de calidad de modo óptico, es muy difícil a través de este método a no ser que se disponga de un software específico de captura de imágenes y tratamiento de datos para

esta aplicación. Por este motivo se midieron los resonadores por interferometría y mediante un software de aplicación específica. El software utilizado está basado en el tratamiento de los datos por intensidad de luz estroboscópica. De este modo, se obtiene la caracterización óptica de la estructura tipo voladizo de 1000 μm de longitud de masa (estructuras tipo C y D) y se pueden obtener los valores exactos de amplitud para los tres primeros modos de vibración, y los valores de las frecuencias, tal y como se muestra en la tabla 5.5.

modo de vibración	frecuencia (kHz)	Amplitud (nm)
modo 1	12,508	965,8
modo 2	35,88	141,7
modo 3	85,39	134,0

Tabla 5.5: Medida de los tres primeros modos de resonancia para la estructura tipo voladizo de 1000 μm de masa mediante luz estroboscópica

Dada la disposición de las resistencias actuadoras en la estructura resulta imposible la excitación para la resonancia en modo 2 a no ser que se excite mediante señales desfasadas 180° o se excite en una sola de las resistencias actuadoras. En este caso, el modo 2 ha sido posible excitarlo aplicando señal sólo en una de las resistencias actuadoras. La figura 5.12 muestra el análisis espectral de la estructura tipo C de 15 μm de grosor medida, cuya frecuencia de resonancia experimental para el primer modo de vibración es de 12,508 kHz y un factor de calidad de 300 aproximadamente.

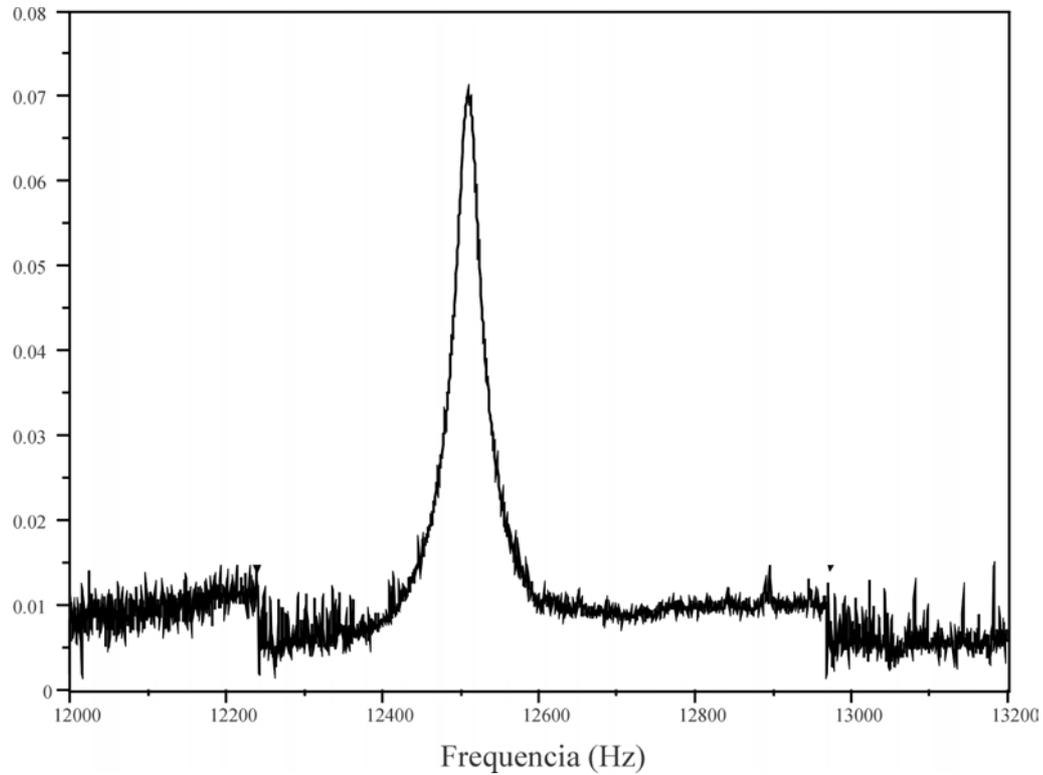


Figura 5.12: Análisis espectral obtenido para la estructura voladizo de 1000 μm de longitud de masa de 15 μm

5.2.1.3. - Medida experimental para el cálculo del módulo de Young equivalente del silicio

En el diseño de las máscaras para la fabricación de estructuras resonantes, con referencia cnm148, se incorporó una estructura de tipo test, cuya descripción se adjunta en el anexo A, para la determinación del módulo de Young equivalente del silicio. Este chip de test está formado por distintos voladizos de distintas dimensiones en longitud y en anchura que permite, utilizando el método de interferometría y dada la relación entre la frecuencia con el módulo de Young, determinar el valor del módulo de elasticidad o módulo de Young equivalente del silicio. La expresión matemática que determina la frecuencia de resonancia para las estructuras

tipo voladizo está deducida en el capítulo 3 y viene dada por la siguiente relación 5.2:

$$fr = 0,162 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{\hat{E}}{\rho}} \quad [5.2]$$

donde " \hat{E} " es el módulo de Young, " L " y " h " es la longitud y grosor de la estructura y " ρ " es la densidad.

Si se supone conocido el valor de grosor de la estructura y se supone que la densidad del silicio es constante, los datos experimentales de la medida de las frecuencias de resonancia, para este chip de test en función del inverso del cuadrado de la longitud (ver figura 5.13), da una respuesta lineal cuya pendiente ($pdte,exp$) está directamente relacionada con el módulo de elasticidad o módulo de Young equivalente del silicio, según la expresión [5.3].

$$E_{equiv} = \left[\frac{(pdte,exp) * \sqrt{\rho}}{0.162 * h} \right]^2 \quad [5.3]$$

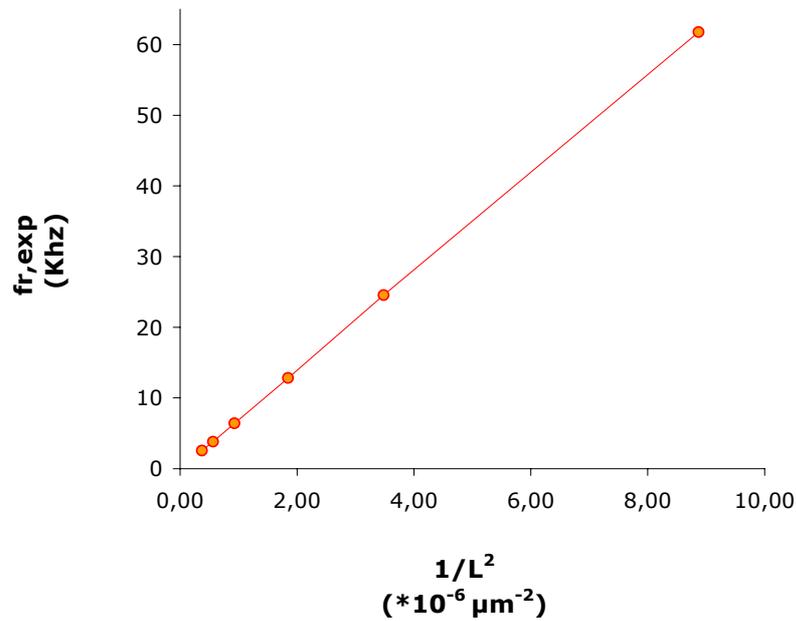


Figura 5.13: Representación gráfica de la relación lineal entre la frecuencia de resonancia experimental (de estructuras tipo voladizo de 100 μm de anchura) con el inverso del cuadrado de la longitud

El valor de pendiente experimental está directamente relacionado con el valor real de la longitud del resonador introduciendo la modificación de dicha longitud en función del sobreaque y desalineamiento entre máscaras tras el proceso de fabricación y que influyen directamente en el valor de la frecuencia de resonancia experimental. de este modo, si se substituyen los valores de pendiente experimental, densidad y grosor de la estructura de silicio, se obtiene que el valor de módulo de elasticidad equivalente del silicio es de $1,52 \text{ e}+11 \pm 0,069 \text{ Pa}$ frente al valor de $1,69 \text{ e}+11 \text{ Pa}$ encontrado en la literatura [200] y utilizado para las primeras simulaciones. Este valor de módulo de Young equivalente del silicio evaluado de forma experimental se ha utilizado para el ajuste de las frecuencias simuladas de resonancia.

5.2.2. – Medida eléctrica preliminar de la frecuencia de resonancia y factor de calidad

Tras la comprobación por interferometría de la resonancia de las estructuras encapsuladas en bases metálicas, se procede a la caracterización eléctrica de los resonadores midiendo la salida en las piezoresistencias del puente de Wheatstone. Para ello, se dispone de una fuente de alimentación, para polarizar el puente de Wheatstone a una tensión de + 5V, un generador de funciones para la aplicación de una señal tipo sinusoidal de + 10V de amplitud a las resistencias actuadoras y de un voltímetro para la medida manual de la salida en milivoltios del puente de Wheatstone. La figura 5.14 muestra el esquema eléctrico del montaje utilizado.

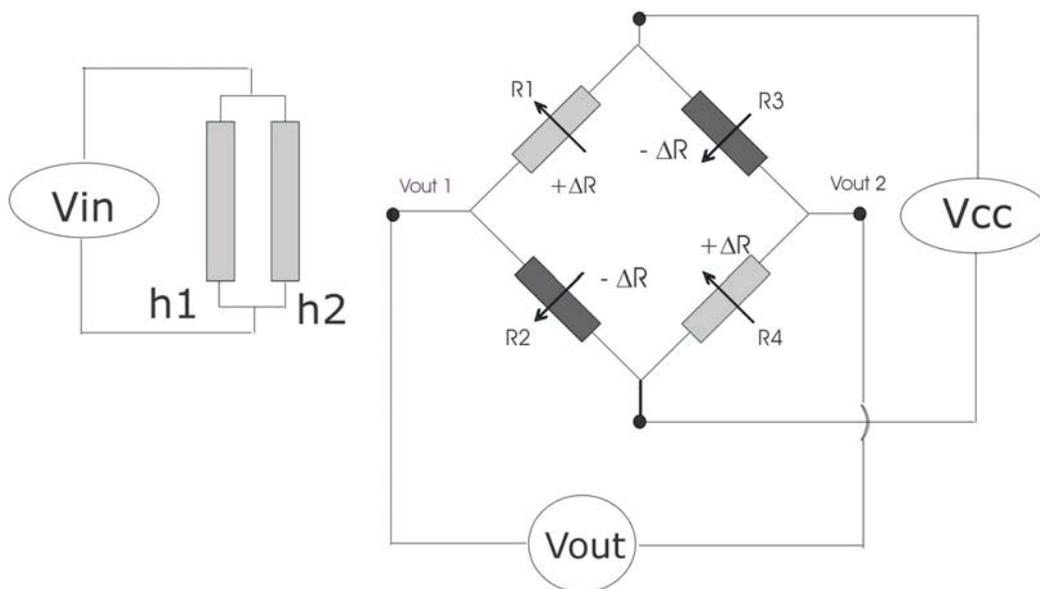


Figura 5.14: Esquema del montaje eléctrico utilizado para la caracterización eléctrica de las estructuras resonantes

Con este montaje se pueden obtener no sólo los valores de la frecuencia de resonancia y los factores de calidad medidos en aire sino también la curva de resonancia y la respuesta en frecuencia (espectro) de las estructuras. Con la caracterización óptica por interferometría se conoce con exactitud el valor de la frecuencia de resonancia para cada uno de los dispositivos que han sido caracterizados y partiendo de los valores medidos de forma óptica, se puede obtener la frecuencia de resonancia de forma eléctrica.

5.2.2.1. - Medida eléctrica de la resonancia en estructuras encapsuladas en base metálica

Para realizar las medidas se ha aplicado a las resistencias actuadoras una señal alterna, $V = 5 (1 + \sin wt)$, el puente de Wheatstone está polarizado a +5V y se mide la señal a la salida de las piezoresistencias. La siguiente tabla 5.6 muestra los valores de frecuencia y factor de calidad medidos en aire para algunas de las estructuras encapsuladas en bases metálicas. Se dan los valores de frecuencia de resonancia y de factor de calidad de estructuras de 5 y 15 μm de grosor de encapsuladas con un vidrio soldado a la base del chip, como ya se explicó en el capítulo de fabricación.

estructura (wmaxlma)	grosor de Si (μm)	fr (kHz)	factor de calidad Q
Ab voladizo (300x300)	15	99,079	1065
Ab voladizo (300x300)	15	98,124	1141
Ac voladizo (300x300)	15	99,049	1151
Aa voladizo (300x300)	15	97,929	57
Aa voladizo (300x300)	5	32,854	214
Aa voladizo (300x300)	5	35,362	282
Aa voladizo (300x300)	5	35,684	285
Aa voladizo (300x300)	5	35,866	256
Aa voladizo (300x300)	5	34,228	244
Ab voladizo (300x300)	5	35,232	115
Ab voladizo (300x300)	5	31,277	178
Ac voladizo (300x300)	5	35,979	194
Ac voladizo (300x300)	5	33,137	147
Ac voladizo (300x300)	5	35,131	200

Tabla 5.6: Resultados experimentales de la medida eléctrica de la frecuencia de resonancia y del factor de calidad en estructuras tipo voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa encapsuladas con vidrio en bases metálicas de la oblea tipo A de 5 y 15 μm de grosor

Para las estructuras tipo voladizo de 300 μm de longitud de masa con disposición de las resistencias de puente de Wheatstone tipo Aa, Ab o Ac (ver figura 5.2 a, b y c), las frecuencias de resonancia entran dentro del rango encontrado por simulación de frecuencias esperadas para este tipo de geometría. Este rango de frecuencias se ha obtenido teniendo en cuenta los efectos que produce el proceso de fabricación en la frecuencia de resonancia de las estructuras como son, el desalineamiento y el sobreaque que producen una modificación en la longitud del resonador, el módulo de Young equivalente del silicio y las desviaciones dadas por el fabricante en el grosor

de silicio de la oblea tipo SOI. El rango de frecuencias está estimado, para las estructuras tipo voladizo de 300 μm de longitud de masa, entre 28,6 kHz y 37,3 kHz en estructuras de 5 μm de grosor de silicio y para el caso de estructuras de 15 μm de grosor de silicio el rango de frecuencias estimado por simulación se encuentra entre 86,5 kHz y 102,6 kHz (ver capítulo 3).

Otro dato importante característico de los resonadores es el valor del factor de calidad. Para el correcto funcionamiento de las estructuras resonantes, es importante obtener un alto factor de calidad de modo que, cuanto mayor sea el factor de calidad tanto mejor es el dispositivo. Los valores experimentales del factor de calidad son semejantes para el caso de las estructuras tipo voladizo de 300x300 μm^2 de masa según que la configuración de las resistencias del puente de Wheatstone sea a, b o c. Estos valores se encuentran entorno a un valor igual a 1000 y 200, según que las estructuras sean de 15 o 5 μm de grosor respectivamente. Cuando se deposite el polímero como capa sensible sobre estas estructuras se supone que el efecto del polímero no sólo es el de modificar la amplitud de la respuesta sino que también queda modificado el factor de calidad.

A continuación en la tabla 5.7 se resumen los resultados experimentales de frecuencia y factor de calidad de estructuras encapsuladas sin vidrio y cortadas sin resina.

	estructura (wmaxima) (μm^2)	grosor de Si (μm)	fr (kHz)	factor de calidad Q
Ab	voladizo (300x300)	5	33,495	182
Ac	voladizo (300x300)	5	34,529	194
Aa	voladizo (300x300)	5	35,496	244
D	doble voladizo (1000x1000)	5	4,102	93
D	doble voladizo (1000x1000)	5	4,164	71
D	doble voladizo (1000x1000)	5	4,131	118
D	doble voladizo (1000x1000)	15	11,910	425
D	doble voladizo (1000x1000)	15	11,727	434
Ab	voladizo (300x300)	15	98,150	1001
Ac	voladizo (300x300)	15	91,294	748
Ac	voladizo (300x300)	15	93,998	810

Tabla 5.7: Resultados experimentales de la medida eléctrica de la frecuencia de resonancia y del factor de calidad en estructuras encapsuladas sin vidrio en bases metálicas en oblea tipo A de 5 y 15 μm de grosor

En la tabla 5.7 se muestran los valores de frecuencia de resonancia y de factor de calidad de estructuras de 5 y 15 μm de grosor de silicio y encapsuladas sin vidrio soldado a la base del chip y cortados sin resina, como ya se explicó en el capítulo de fabricación. Se muestran los valores de los chips individuales que han sido caracterizados de forma eléctrica y se establece un rango para el factor de calidad medido al aire. Para el caso de los dispositivos pequeños (Aa, Ab o Ac) se obtiene un rango de valores para el factor de entre 50 y 1100. En el caso de los dispositivos grandes entre 70 y 800.

Si se comparan los resultados obtenidos para las características de la resonancia en chips con y sin vidrio, y por tanto, cortados con y sin resina, se observa como los resultados se solapan y por tanto, como la resina no afecta de forma crítica en los resultados dinámicos.

Caracterizar las estructuras en resonancia significa obtener la curva de resonancia. En la figura 5.15 se muestran las curvas de resonancia las estructuras tipo Aa, Ab y Ac anteriormente mencionadas en la tabla 5.6.

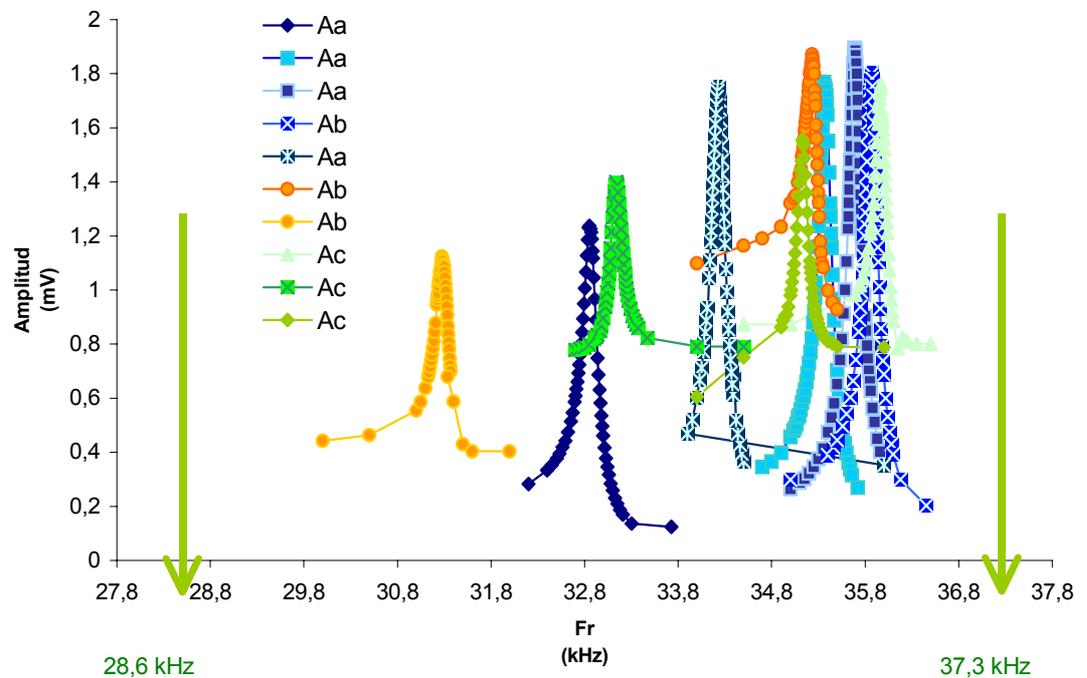


Figura 5.15: Curvas de resonancia para estructuras de 300 μm de longitud de masa y 5 μm de grosor encapsuladas en base TO8 con vidrio

En la figura 5.15 se muestran las curvas de resonancia para distintas estructuras de dimensiones 300 μm de longitud de masa encapsuladas en bases metálicas. Los resultados demuestran homogeneidad de valores de frecuencia de resonancia así como dichos valores quedan dentro del intervalo de frecuencias esperadas por simulación. Dicho rango está estimado teniendo en cuenta las desviaciones dadas por el fabricante en los

grosos de oblea SOI y teniendo en cuenta las variaciones que se producen en los parámetros geométricos tras la fabricación. Para las estructuras voladizo tipo Aa, Ab o Ac y 5 μm de grosor de silicio, este rango se encuentra entre 28,6 kHz y 37,3 kHz.

De modo análogo, se ha realizado la medida de la frecuencia de resonancia y del factor de calidad en estructuras encapsuladas en placa de circuito impreso diseñadas de modo específico para estas estructuras y aplicación. En la siguiente tabla 5.8 se dan los valores experimentales para estructuras de 15 μm de grosor y 1000 μm de longitud de masa.

estructura	grosor de silicio (μm)	vidrio	encapsulado diseño tipo	fr (kHz)	factor de calidad Q
voladizo (1000x1000)	15	no	B3.2*	11,757	206
voladizo (1000x1000)	15	no	B3.2*	11,829	473
voladizo (1000x1000)	5	si	B3.1*	3,413	42

*geometría y dimensiones del encapsulado especificados en anexo B

Tabla 5.8: Resultados experimentales de la medida eléctrica de la frecuencia de resonancia y del factor de calidad en estructuras encapsuladas sin vidrio en placa PCB de 15 μm y 5 μm de grosor

Los resultados experimentales que se obtienen para estructuras encapsuladas en placa de circuito impreso son del mismo orden que los factores de calidad encapsulados en bases metálicas para estructuras tipo voladizo de 1000x1000 μm^2 de masa. Las frecuencias de resonancia no entran dentro de los rangos que se establecen a través de las simulaciones y que estiman entre 3,88 kHz y 5,096 kHz en el caso de estructuras de 5 μm de grosor de silicio y, para el caso de 15 μm de grosor de silicio, establece el rango de frecuencia de resonancia esperada entre 12.12 kHz y 13,853 kHz. Para poder concluir será necesario realizar más encapsulados en placa de circuito impreso para estudiar si esta variación en la frecuencia

de resonancia del 3% en el caso de estructuras de 15 μm y del 12% en el caso de 5 μm de grosor de silicio, respectivamente es consecuencia del tipo de encapsulado.

5.2.2.2. - Análisis de la respuesta en frecuencia

En la figura 5.16 se muestra la respuesta en frecuencia de tres estructuras tipo voladizo a la salida del puente de Wheatstone. Se puede observar que la señal mecánica domina sólo en la zona de vecindad de la frecuencia de resonancia de la estructura. Por debajo de 100 Hz, debido a la actuación térmica se calienta la totalidad de la estructura y produce un gradiente de temperatura con una respuesta mayor incluso que la amplitud de la respuesta mecánica en resonancia (en el caso de una estructura que no esté cubierta por el polímero). Para frecuencias superiores a los 100 Hz, se puede observar un acoplamiento de tipo capacitivo debido a la proximidad existente entre la zona de actuación y de detección. Son importantes estas consideraciones de capacidades parásitas puesto que podrían ser no despreciables.

Estas consideraciones son importantes a la hora de diseñar el circuito que mantenga la resonancia de la estructura para el filtrado de aquellas frecuencias que resultan perjudiciales para el correcto funcionamiento del dispositivo

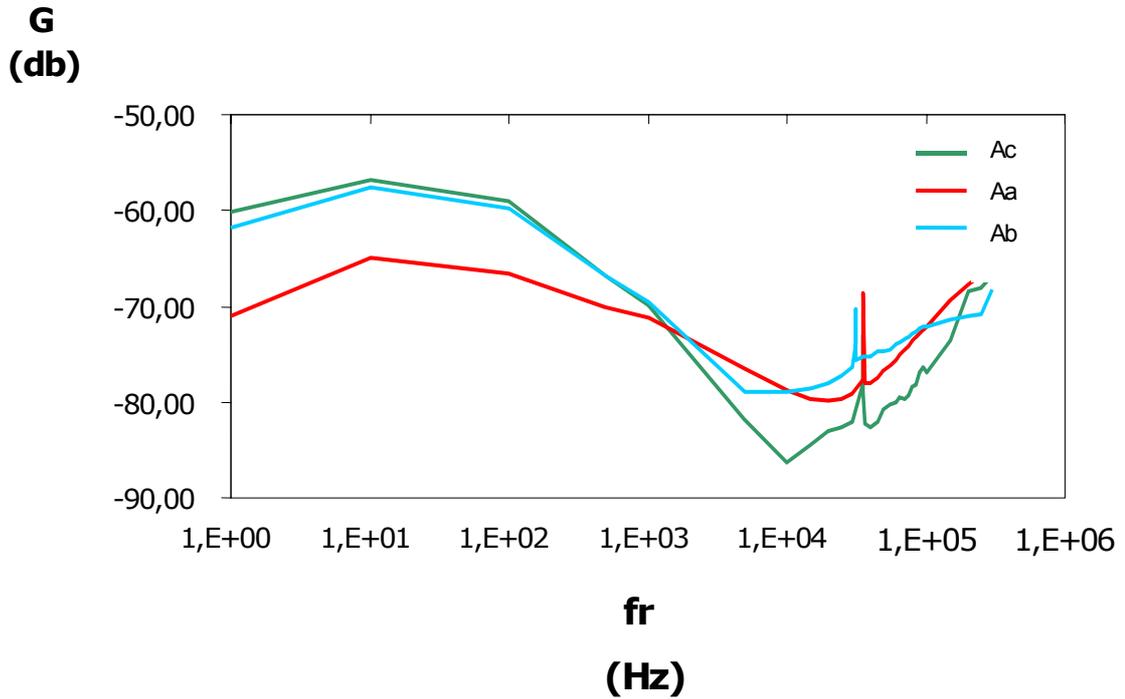


Figura 5.16: Respuesta en frecuencia de las estructuras tipo voladizo de 300 μm de longitud de masa para las tres configuraciones de puente de Wheatstone fabricadas excitadas termomecánicamente y medidas en puente de Wheatstone

5.2.2.3. - Medida eléctrica de la resonancia mediante circuito preamplificador

Una vez que los dispositivos han sido caracterizados ópticamente y eléctricamente, se procede a su caracterización eléctrica a través del montaje que se muestra en la figura 5.17 [201].

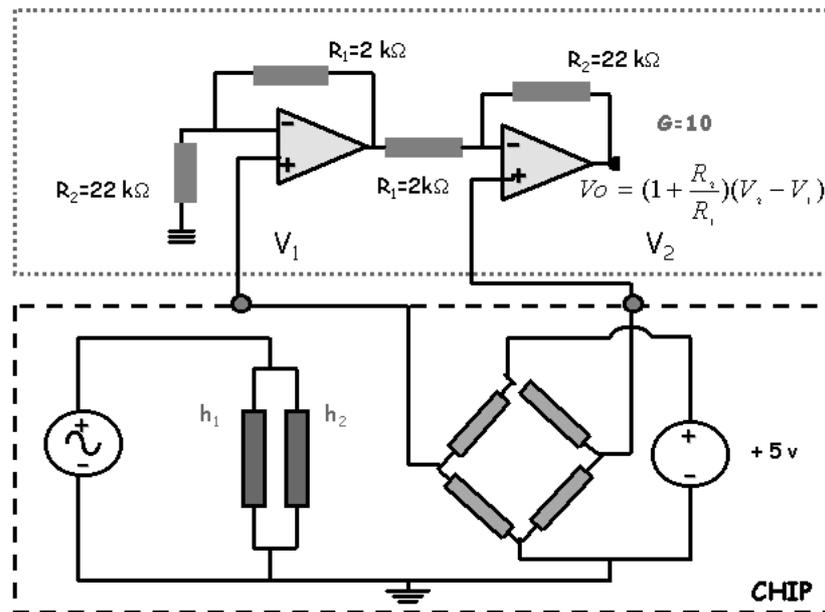


Figura 5.17: Esquema eléctrico del circuito amplificador y conexiones con la estructura [200]

El montaje de la figura 5.17 permite medir la función de transferencia entrada/salida de un circuito eléctrico. Las estructuras resonantes que se han fabricado, pueden ser consideradas eléctricamente como unas estructuras de dos puertos, con una resistencia de excitación (calefactores) que se corresponde con la entrada y una resistencia de detección (puente de Wheatstone) que corresponde a la salida. Los valores de las resistencias están elegidas para formar un filtro pasa alto. Mediante este montaje se obtiene una etapa de preamplificación de señal a la salida, en un factor 10.

En la figura 5.18 se muestra la respuesta de un voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa y $15 \mu\text{m}$ de grosor de silicio caracterizado mediante un circuito con una etapa preamplificación de la señal. Este circuito fue diseñado para dispositivos de frecuencia de resonancia de 90KHz por lo que funciona como un filtro pasa alta entre 30KHz y 170KHz. Esto explica la curvatura de la respuesta alrededor de 80KHz.

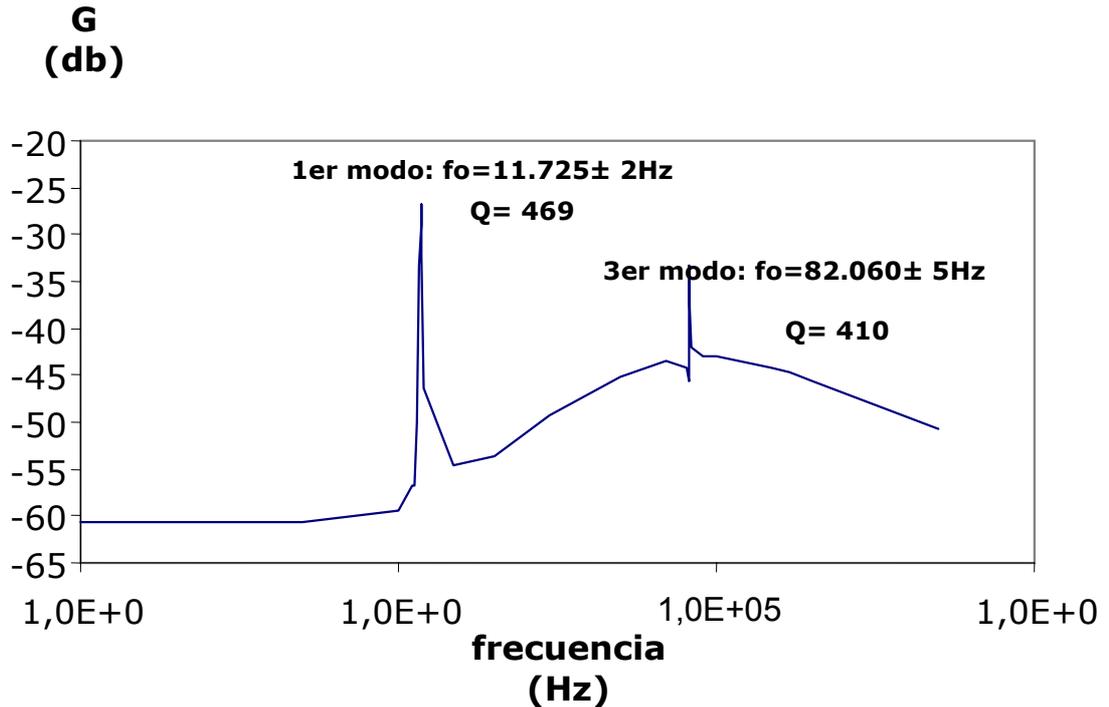


Figura 5.18: Diagrama de Bode para una estructura tipo voladizo de $15 \mu\text{m}$ de grosor de silicio y $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa caracterizada mediante un circuito que preamplifica la señal de salida del puente de Wheatstone

5.2.2.4. - Optimización de la señal

El tipo de señal de excitación influye en los resultados que se obtienen en la caracterización de los dispositivos, tanto en el valor de su frecuencia de resonancia como en la señal que se obtiene a la salida. En función de la señal que se aplica se observa un pequeño desplazamiento, del orden de Hertzios, de la frecuencia de resonancia. Por ejemplo, una estructura de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ caracterizada con una señal tipo 5 ($1 + \sin wt$) resuena a una frecuencia de resonancia de $33,495 \text{ kHz}$, mientras que polarizado con una señal ($6,1 + 0,61 \sin wt$) oscila a una frecuencia de $33,514 \text{ kHz}$. La variación de frecuencia es de 19 Hz .

Para la caracterización de las estructuras resonantes aplicamos una potencia que depende con V^2/R . La señal aplicada es tipo

$$V = V_{ac} + V_{dc} = A + B \text{ sen} wt$$

que al elevar al cuadrado introduce un término en coseno de la frecuencia doble que puede llegar a tener importancia en función de los valores de las amplitudes de voltaje constante y alterna.

Este voltaje se aplica a las resistencias actuadoras y en la potencia que se aplica se pueden distinguir tres términos:

$$P = \frac{1}{R} (A + B \text{ sen} wt)^2$$

$$P = \frac{1}{R} (A^2 + 0,5B^2 + 2AB \text{ sen} wt - 0,5B^2 \cos 2wt)$$

$$P = P_{dc} + P_{ac,1} + P_{ac,2}$$

La componente DC de la potencia aplicada P_{dc} supone una elevación de la temperatura de la estructura mientras que la componente dinámica $P_{ac,1}$ y $P_{ac,2}$, con frecuencias w y $2w$, producen una elevación dinámica de la temperatura. Esta parte dinámica además hace que la estructura entre en resonancia. De modo que, se va a estudiar que se obtiene la máxima la respuesta cuando $A = B$ mientras que sin embargo, se obtiene la máxima ganancia V_{out}/V_{ac} cuando $A \gg B$. En la figura 5.19 se muestran los resultados obtenidos para una estructura de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa para distintas potencias aplicadas en función del tipo de señal.

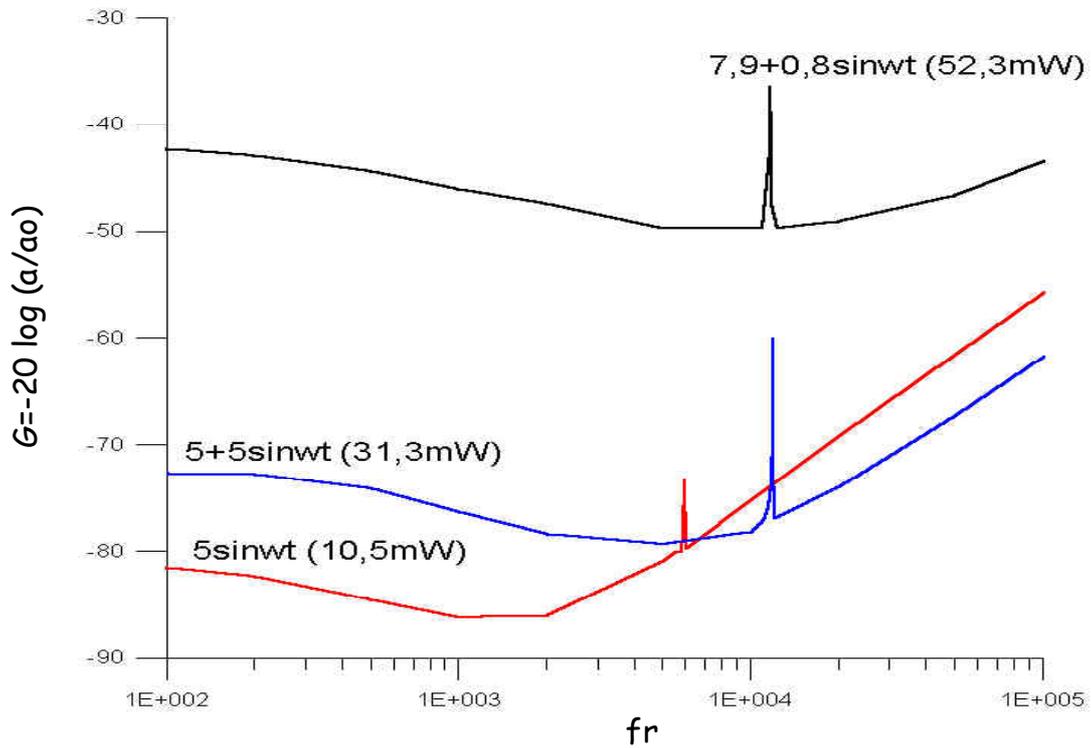


Figura 5.19: Diagrama de Bode de la respuesta en frecuencia del dispositivo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa en función de la señal de excitación

La figura 5.19 muestra los primeros resultados obtenidos al variar la señal de excitación que, como ya se ha dicho, se excita de forma general aplicando una señal en continuo más una señal en alterna. Se analizan tres casos.

El primero de los casos, cuando la señal en continua es cero, entonces al aplicar una señal de frecuencia w la fuerza aplicada le corresponde una frecuencia $2w$. Por eso en la gráfica de la derecha en ese caso la resonancia que ocurre a unos 12 KHz se ve excitada con una señal de entrada de 6 KHz. El segundo caso se analiza cuando $A = B$, así se obtiene una función de tipo sinusoidal que va de 0v a 10V. En este caso se consigue la máxima respuesta. Finalmente, en el tercer caso se toma un valor de $A_{dc} = 8V$ y

$A_{ac} = 0,8$ V y aunque la señal de salida es menor la ganancia (V_{out}/V_{ac}) en señal es mayor que en los casos anteriores.

De forma análoga, se ha realizado un estudio de la respuesta que se obtiene en función de la señal de excitación, pero con una misma potencia aplicada, para las estructuras de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa. En la tabla 5.9 se muestra los resultados obtenidos.

A (V)	B (V)	Vout (mV)	ganancia (dB)
6,09	0,61	9,4	- 36
5,00	5,00	50,8	- 40
0,00	8,66	41,2	-46

Tabla 5.9: Resultados experimentales de la salida y ganancia en función de la señal de excitación (a potencia constante) para una estructura tipo voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa

En la tabla 5.9 se puede verificar como la mayor señal se obtiene cuando las amplitudes en continua y en alterna son iguales mientras que en el caso de aplicar una señal en alterna muy pequeña aunque la respuesta es pequeña sin embargo la ganancia que se obtiene es máxima. En este caso, el término de coseno $2\omega t$ puede considerarse como despreciable.

Todas estas medidas se han realizado utilizando una etapa de preamplificación a la salida del puente de Wheatstone y con una ganancia de valor 50 aproximadamente.

5.2.2.5. - Medida de la frecuencia mediante circuito amplificador

Como ya se ha visto anteriormente se ha probado un circuito diseñado en el CNM (204) como circuito que preamplificaba la respuesta del dispositivo a la salida del puente de Wheatstone. Para mantener el dispositivo en resonancia, se deben de cumplir dos condiciones:

$$\Psi_{\text{resonador}} + \Psi_{\text{circuito}} = 2K\pi; K = 1,2,3,\dots \quad (5.4)$$

$$\left| H(w)_{\text{resonador}} \right| * \left[H(w)_{\text{circuito}} \right] = 1 \quad (5.5)$$

dónde Ψ es el ángulo de fase y $H(w)$ la función de transferencia del resonador y del bloque de realimentación del circuito electrónico. En la resonancia cuando la función de transferencia del dispositivo es máxima, el circuito debe amplificara señal y compensar su cambio de fase. Para mantener la amplitud de oscilación estable, la ganancia del circuito electrónico tiene que estar controlada. En estas circunstancias, la frecuencia de oscilación de todo el sistema "dispositivo – circuito" quedará fijada en la frecuencia natural de oscilación de la estructura resonante. Sin embargo, el circuito debería actuar filtrando las altas frecuencias que podrían afectar a la oscilación. De acuerdo con todos los requerimientos, en la figura 5.20 se muestra un esquema del circuito.

Este circuito está subdividido en distintos bloques [197]. La figura 5.21 muestra la fotografía del montaje utilizado para la caracterización.

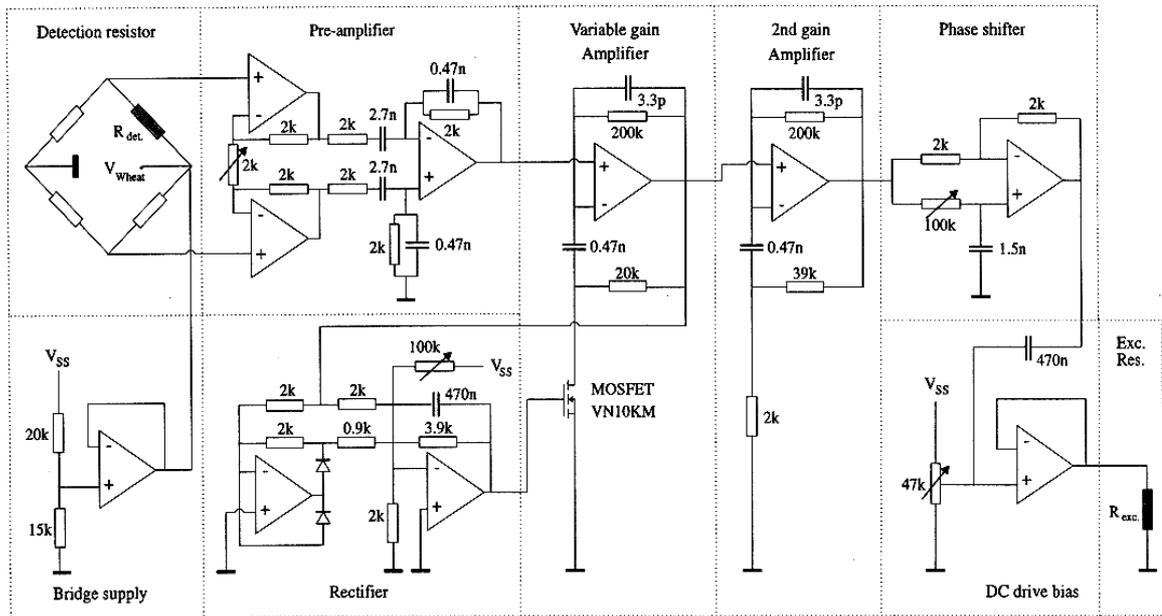


Figura 5.20: Esquema del circuito completo utilizado para mantener la resonancia en las estructuras

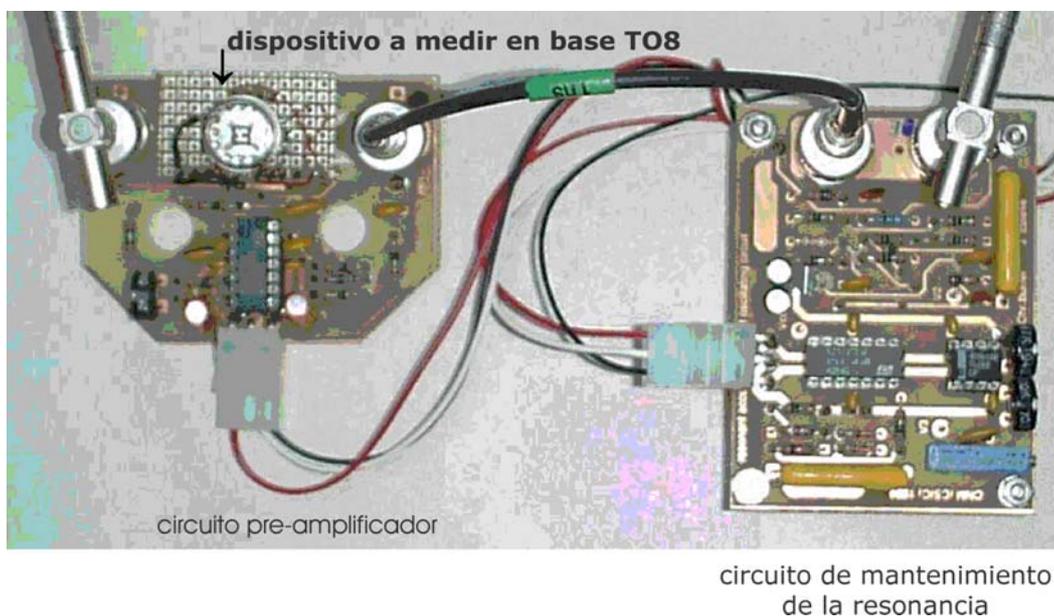


Figura 5.21: Fotografía del montaje experimental utilizado para la medida de la resonancia mediante un circuito que mantiene la estructura en resonancia

En la fotografía de la figura 5.21 se puede observar como el circuito con forma trapezoidal, en la parte izquierda, corresponde al circuito de preamplificación de la señal de salida en puente de Wheatstone, cuyo esquema se ha presentado en la figura 5.20. Este circuito contiene el zócalo para conexión del sensor encapsulado en base metálica. La parte de la derecha del circuito se corresponde con la parte que mantiene la estructura en resonancia. Este circuito con los valores indicados (ver capítulo 5, [200]) está ajustado para valores de frecuencia de los sensores entre 70 kHz y 120 kHz. De este modo, para las estructuras que se han fabricado se han verificado el funcionamiento del circuito completo mediante la caracterización de un dispositivo cuya frecuencia quede dentro del rango de frecuencias para el que está pensado. Por tanto, se caracterizó una estructura tipo voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa y $15 \mu\text{m}$ de grosor (ver figura 5.22) y cuya frecuencia teórica está calculada en 101 kHz.

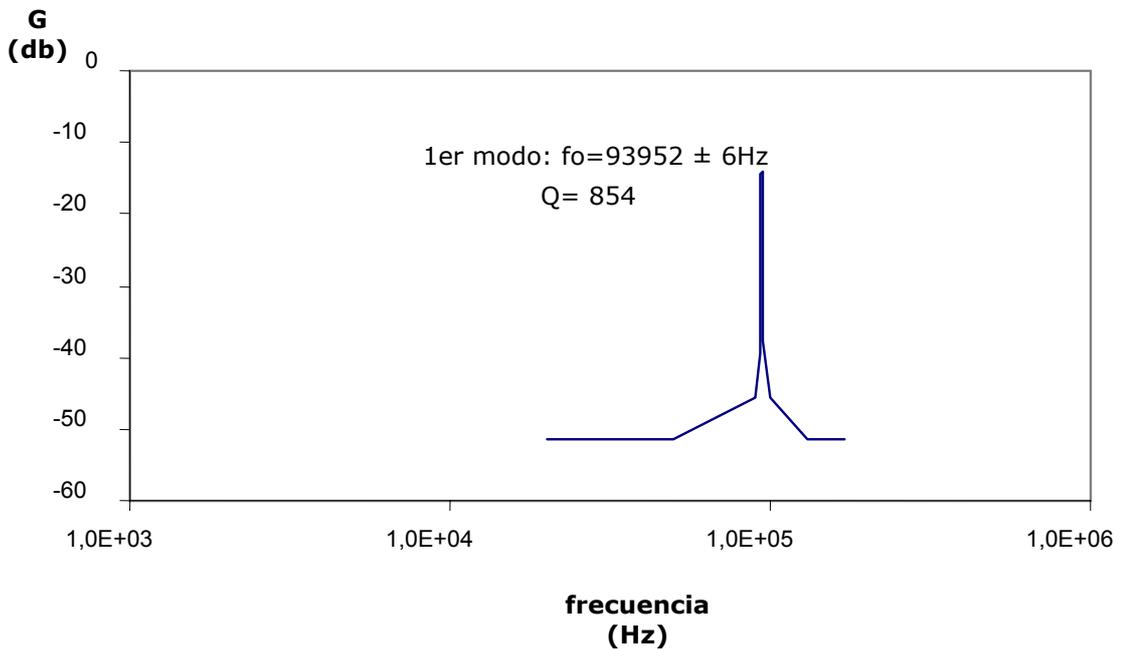


Figura 5.22: Diagrama de Bode para una estructura de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa caracterizada mediante el circuito completo

La figura 5.22 muestra el valor del pico de resonancia que se produce a 93,952 kHz y se obtiene un factor de calidad de 854.

Esta caracterización eléctrica de los dispositivos a través del circuito amplificador demuestra que es posible la utilización de un circuito, obteniendo una medida más "limpia" (poco nivel de ruido). Para las estructuras que se han diseñado se tendría que rediseñar el circuito para que entre dentro de los rangos de frecuencia de las estructuras fabricadas. Este montaje experimental permitiría depositar el polímero "on-line" visualizando el cambio de frecuencia en función de la masa de polímero depositada.

5.2.3. – Depósito de la capa sensible

A continuación se describe el proceso de depósito de la capa sensible y los parámetros de los que depende. Se presentan las pruebas y los resultados obtenidos tras el depósito de la capa sensible tanto para estructuras fabricadas en tecnología en superficie como en volumen.

5.2.3.1. – Modificación de la respuesta eléctrica

Hasta ahora se ha descrito el diseño, fabricación y caracterización de las estructuras mecánicas en tecnología en volumen. Como ya se ha explicado con anterioridad, el desarrollo de estas estructuras está pensado para su aplicación en la detección de gases volátiles.

Concretamente, en las estructuras que se presentan se hace uso de materiales poliméricos no conductores como material empleado como capa sensible a vapores. Mediante la técnica de spray por aerógrafo diferentes concentraciones de polímeros PEUT y PDMS se depositan con diferentes espesores en función del tiempo de pulverización, de la distancia del aerógrafo al dispositivo y de la concentración. Previamente al depósito, el

polímero se diluye a temperatura ambiente en diclorometano como disolvente adecuado para conseguir una mezcla homogénea. Los depósitos de polímeros han sido realizados en el Instituto de Física Aplicada (IFA) de Madrid por el grupo de sensores.

Optimizar el depósito de la capa sensible depende de parámetros como concentración, una baja concentración de polímero puede suponer un tiempo largo de depósito y una alta concentración podría llegar a obstruir el pulverizador. Para sprayar el polímero sobre las estructuras ha sido disuelto en diclorometano con concentraciones fijadas de 0.01 g/ml para el caso del PDMS y 0.0025 g/ml en el caso del PEUT. Hay que tener en cuenta que se pueden observar cambios en la concentración del polímero cuando el disolvente se haya evaporado. La distancia es otro de los parámetros que influye en el grosor de polímero depositado y cuya dependencia es inversamente proporcional con el cuadrado de la distancia ($\sim 1/d^2$). Los depósitos se realizan a una distancia entre 5 cm y 15 cm para las concentraciones anteriormente definidas. De modo que, para obtener capas muy delgadas se recomienda una mayor distancia. Por último, la dependencia con el tiempo del grosor de polímero, manteniendo constantes la distancia y concentración, se consigue mayor grosor de capa sensible cuanto mayor es el tiempo de sprayado [89].

Se ha depositado mediante la técnica de spray en un dispositivo tipo voladizo (tipo E) de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa polímero PEUT diluido con diclorometano en concentración de 2,5 mg/ml a diferentes tiempos de sprayado. En la figura 5.23 se muestran los resultados obtenidos.

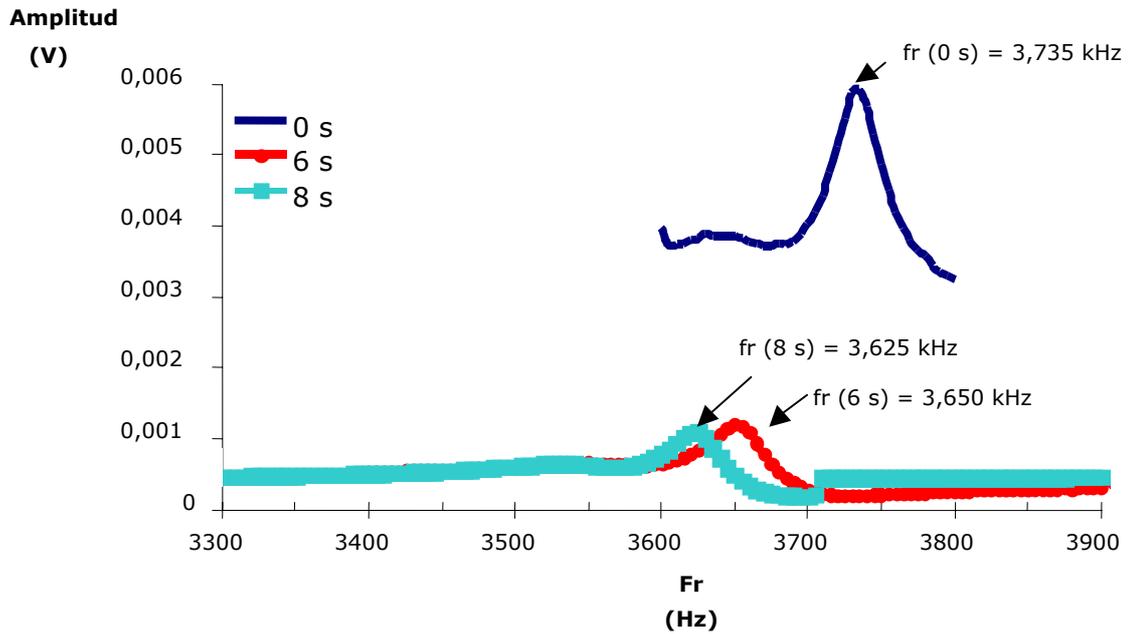


Figura 5.23: Desplazamiento de la frecuencia de resonancia para un dispositivo de $1000 \times 1000\ \mu\text{m}^2$ de masa sobre el que se ha sprayado polímero a diferentes tiempos

Suponiendo que la distancia se mantiene constante durante el proceso de depósito del polímero sobre la estructura, se observa en la figura 5.23 como el dispositivo inicialmente oscilaba a una frecuencia de resonancia de 3,735 kHz. Sobre la estructura se realiza un primer depósito mediante el sprayado del polímero PEUT en concentración optimizada de 2,5 mg/ml durante 6 segundos. La frecuencia de resonancia del dispositivo se desplaza a 3,650 kHz, es decir, tras el depósito de la capa sensible se produce una disminución de la frecuencia de resonancia de 85 Hz. A continuación, se realiza un segundo sprayado del polímero sobre una estructura durante 8 segundos, la frecuencia de resonancia de nuevo se desplaza hasta un valor de 3,625 kHz, es decir, el decremento de frecuencia ahora es de 110 Hz para un total de 8 segundos de sprayado. Por tanto, se comprueba y concluye que, manteniendo los parámetros de concentración y distancia constantes, tras el depósito del polímero a distintos tiempos se produce un

desplazamiento de su frecuencia de resonancia. Este incremento o variación depende del tiempo de sprayado de forma que, a mayor tiempo de exposición de la muestra frente al polímero la frecuencia va decayendo debido a que la presencia del polímero sobre la estructura supone un aumento de masa en el resonador y por tanto, una modificación de su frecuencia de resonancia.

A continuación se presentan las pruebas realizadas en estructuras fabricadas tanto en tecnología en superficie como en volumen.

5.2.3.2. - Depósito de la capa sensible en estructuras fabricadas en tecnología en volumen

Se han realizado unas primeras pruebas de depósito de polímero PEUT sobre estructuras encapsuladas en base metálica y fabricadas en tecnología de micromecanizado en volumen. Estas estructuras estaban caracterizadas antes del depósito del polímero y se han medido de nuevo, después del depósito del polímero, de este modo, y mediante unas simulaciones realizadas en ANSYS se ha estimado el grosor de la capa sensible depositada. Es decir, el incremento de frecuencia está relacionado con el grosor de polímero depositado sobre la estructura. Para el cálculo de los grosores de polímero depositado se ha supuesto que el polímero cubra toda la masa de la estructura de forma que la influencia del polímero en la respuesta de la estructura se deba a una modificación de la frecuencia de resonancia por un incremento de la masa del sistema y que no exista influencia en la constante elástica. En la siguiente tabla 5.10 se muestra un cuadro resumen con los valores de grosor de polímero estimados.

estructura ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)		h_{si} (μm)	t (sg)	f_r (kHz)	Δf_r (kHz)	$h_{polímero}$ ANSYS (μm)
doble voladizo (1000 x 1000)	D	15	30	12,297	- 0,313	1,8
doble voladizo (1000 x 1000)	D	15	30	12,139	- 0,430	2,5
voladizo (300 x 300)	Aa	15	90	99,378	- 14,234	10,9
doble voladizo (1000 x 1000)	D	5	30	4,44	- 1,101	10

Tabla 5.10: Resultados experimentales del cambio de frecuencia de resonancia en dispositivos fabricados en oblea tipo A y estimación del grosor de polímero depositado por ANSYS

En los resultados que se obtienen en la tabla 5.10, se observa como para una misma estructura de dimensiones $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa y para un mismo tiempo, distancia de depósito y concentración de polímero, los grosores de polímero estimados son de aproximadamente $2 \mu\text{m}$. También se puede observar como para una misma geometría y un mismo tiempo de depósito pero distinto grosor de estructura, el grosor de polímero estimado es mucho mayor. Esto implica que, la sensibilidad es mayor en las estructuras de $5 \mu\text{m}$ que en las de $15 \mu\text{m}$, ya que los cambios relativos de masa son más significativos proporcionalmente en las estructuras de $5 \mu\text{m}$ que en las de $15 \mu\text{m}$. Como ya se ha explicado, los grosores de polímero están estimados suponiendo que el polímero cubre toda la masa de la estructura, tal y como se explica en el capítulo 3. A continuación se muestra un ejemplo de uno de los dispositivos que han sido caracterizados tras el depósito de la capa sensible. En la figura 5.24, se muestra la frecuencia del primer y tercer modo de vibración del dispositivo tipo D (voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa) después que ha sido depositado el polímero.

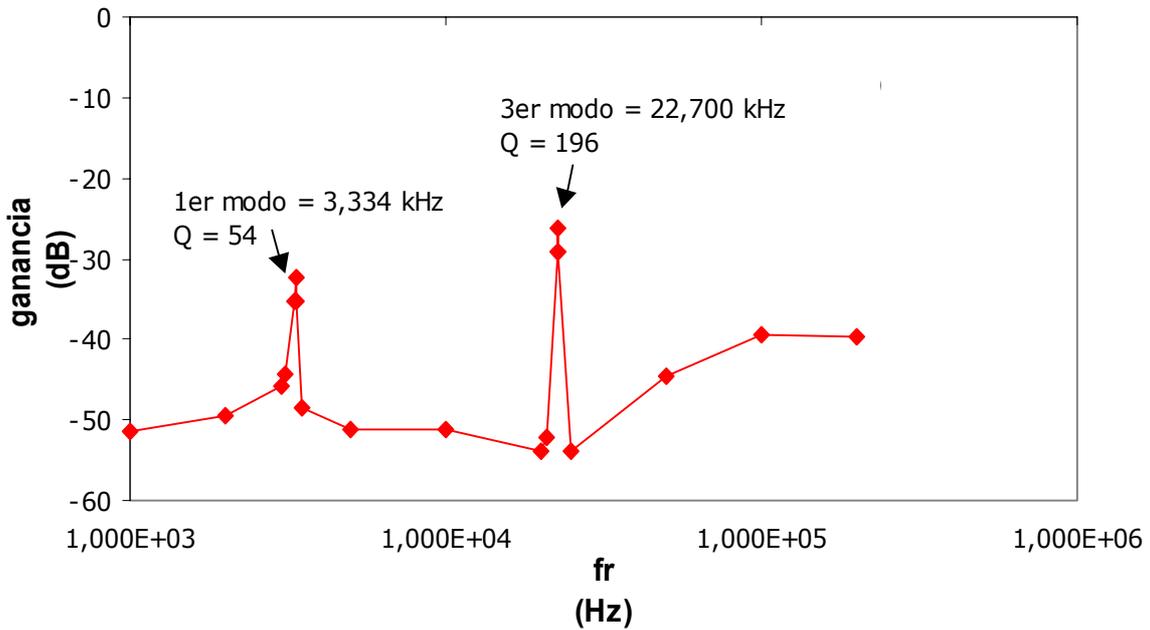


Figura 5.24: Diagrama de Bode del dispositivo tipo E de dimensiones 1000 x 1000 μm^2 de masa

Este dispositivo caracterizado previamente vibraba a una frecuencia de resonancia de 4,44 kHz. Tras el depósito de la capa sensible, la frecuencia de resonancia ha variado en $-1,101$ kHz. Esta variación en la frecuencia supone una estimación para el valor de grosor de polímero depositado de $10 \mu\text{m}$ cuando se considera que el polímero cubre toda la masa de la estructura.

De los resultados obtenidos en la tabla 5.10 se deduce que el tiempo de exposición puede resultar un tanto elevado para algunos de los dispositivos ya que se obtienen grosores de capa de polímero del doble de grosor de la capa de silicio de la estructura. Por tanto, se realizaron unos nuevos depósitos de polímero PEUT y PDMS manteniendo la distancia a la que se realizaron los sprayados ($d = 5$ cm) y disminuyendo el tiempo de exposición a la mitad, es decir a 15 segundos. Los resultados que se obtuvieron se muestran en la siguiente tabla 5.11. En esta ocasión se realizaron los depósitos sobre estructuras fabricadas en obleas tipo A y tipo B.

		dispositivo ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	olea tipo	fr,1 (Khz)	Q,1	polimero	fr,2 (Khz)	Q,2	incr,fr (Khz)
1	D	doble voladizo (1000x1000)	A	4.130	121	PDMS	3.585	137	- 0.545
2	Aa	voladizo (300x300)	A	94.009	969	PEUT	87.444	901	- 6.565
3	Aa	voladizo (300x300)	B	35.680	279	PEUT	31.109	203	- 4.571
4	Aa	voladizo (300x300)	B	35.516	280	PEUT	34.636	298	- 0.880
5	Ac	voladizo (300x300)	B	32.923	229	PDMS	24.292	165	- 8.631
6	D	doble voladizo (1000x1000)	B	4.328	131	PDMS	3.764	83	- 0.564
7	C	voladizo (1000x1000)	B	4.22	94	PEUT	4.21	100	- 0.212

Tabla 5.11: Resultados experimentales del cambio de frecuencia de resonancia en dispositivos olea tipo A y tipo B de 5 μm de grosor de silicio

Los resultados de la tabla 5.11 muestran los valores experimentales de la frecuencia de resonancia y factor de calidad antes y justo después de depositar el polímero sobre las estructuras. Como ya se ha comentado se ha depositado en las estructuras PEUT y PDMS mediante la técnica de spray con un aerógrafo durante 15 segundos y 5 centímetros de distancia. Con PDMS se han sprayado los dispositivos tipo D1, Ac5 y D6. Para los dispositivos D1 y D6, son estructuras de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa y se obtiene un cambio de frecuencia de 545 Hz y 564 Hz respectivamente. El dispositivo Ac5 de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa se produce un decremento de 8631 Hz tras el depósito del polímero. Con estos cambios de frecuencia y las simulaciones se puede estimar el grosor de polímero depositado y se estima en 5,5 μm y 5,7 μm para el caso de las estructuras D1 y D6 y de 7,5 μm en el caso de la estructura Ac5. Con PEUT se han sprayado los dispositivos DE7, Aa3, Aa4 y Aa2. En la estructura C7 de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa se obtiene un cambio de frecuencia de 212 Hz lo que se traduce en un grosor de capa de polímero depositada sobre la estructura de 1,9 μm aproximadamente. Los diseños Aa3, Aa4 y Aa2 cambia su frecuencia de

resonancia en 4571 Hz, 880 Hz y 6565 Hz respectivamente, lo que se traduce en un grosor de polímero de 3,8 μm para la estructura Aa3, 5 μm para la estructura Aa2 y 1,4 μm para la estructura Aa4. Las figuras 5.25 a y b muestran el polímero depositado sobre las estructuras para el caso de PEUT y PDMS.

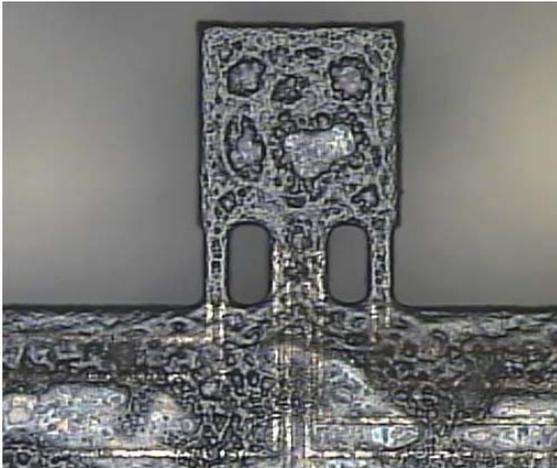


figura 5.25 a

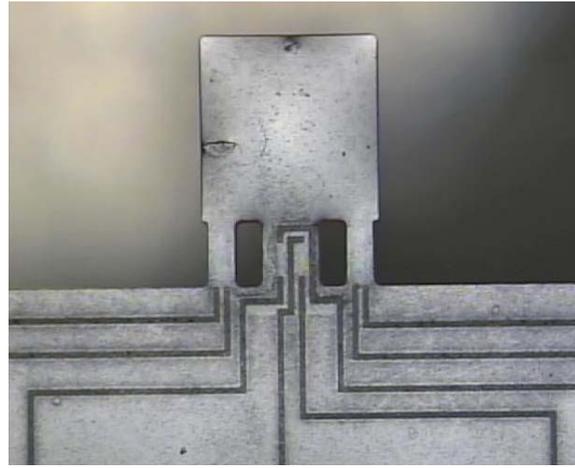


figura 5.25 b

Figura 5.25 a: Estructura voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa con polímero PEUT depositado (b) : Estructura voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa con polímero PDMS depositado

Los resultados de la tabla 5.11 demuestran como tras el depósito del polímero la frecuencia de resonancia cambia como también cambia su factor de calidad. Además hay que esperar a que el polímero se estabilice y el disolvente esté totalmente evaporado. Al cabo de 7 días de realizar el depósito de los polímeros sobre las estructuras, se caracterizaron de nuevo y los resultados se muestran en la tabla 5.12. El dispositivo Aa2 no pudo ser medido ya que se encuentra roto.

	dispositivo	fr,1	Q,1	polimero	fr,3	Q,3	incr,fr
	($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	(Khz)			(Khz)		(Khz)
1	D doble voladizo (1000x1000)	4.130	121	PDMS	3.588	61	- 0,518
2	Aa voladizo (300x300)	94.009	969	PEUT	roto	roto	roto
3	Aa voladizo (300x300)	35.680	279	PEUT	30.976	167	- 5,445
4	Aa voladizo (300x300)	35.516	280	PEUT	34.618	256	- 1,859
5	Ac voladizo (300x300)	32.923	229	PDMS	29.240	101	- 6,984
6	D doble voladizo (1000x1000)	4.328	131	PDMS	3.713	68	- 0,615
7	C voladizo (1000x1000)	4.22	94	PEUT	4.205	97	- 0,015

Tabla 5.12: Resultados experimentales del cambio de frecuencia de resonancia en dispositivos tipo A y tipo B a los 7 días de realizarse el depósito

Si se comparan los resultados de la tabla 5.11 con los resultados de la tabla 5.10, se puede observar como se ha producido un desplazamiento de la frecuencia de resonancia de las estructuras y como se ha modificado el valor del factor de calidad. Este desplazamiento se ha producido porque el disolvente que es necesario para la polimerización se ha evaporado. Estos cambios producen por tanto un cambio en el grosor de capa de polímero depositado. Como ejemplo, se considera el dispositivo Aa3 que pasa de un grosor de PEUT inicial de 3,8 μm a 4,5 μm o el D1, sprayado con PDMS, de 5,5 μm a 5,2 μm .

En la siguiente figura 5.26 se muestra la respuesta en frecuencia de los dispositivos de dimensiones 1000 x 1000 μm^2 de masa, que han sido sprayados con polímero

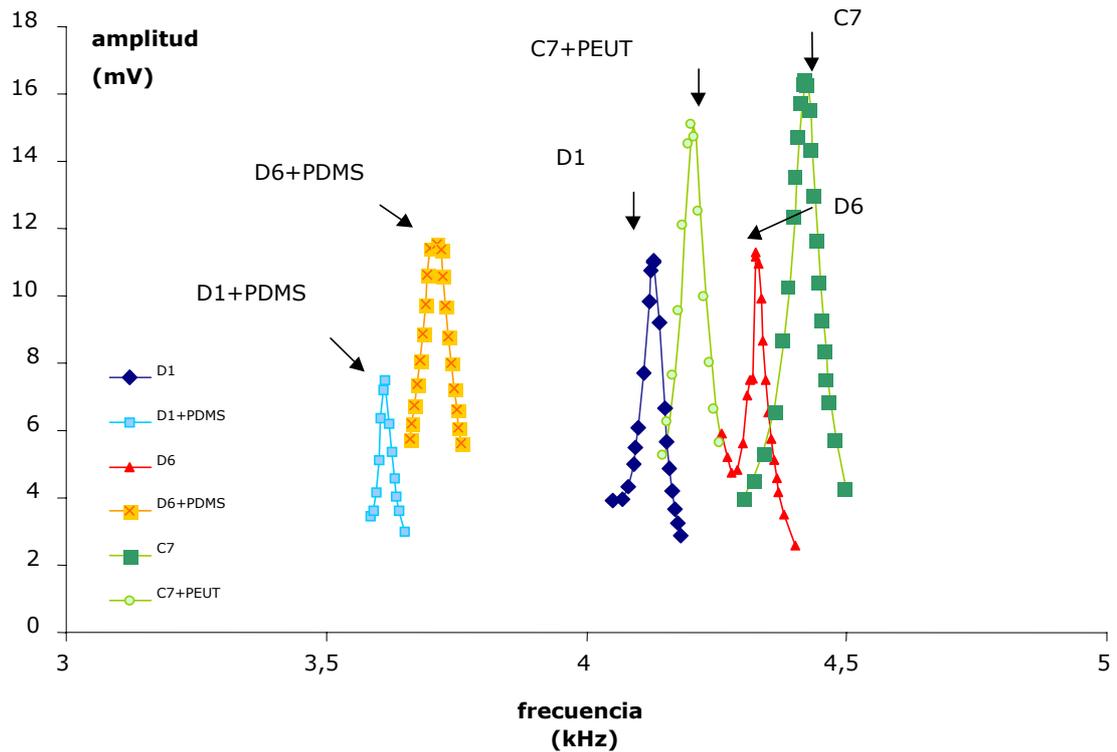


Figura 5.26: Respuesta en frecuencia de los dispositivos de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa y $5 \mu\text{m}$ de grosor de silicio antes y después de depositar la capa sensible

Una vez llegado a este punto ya se tienen substratos fabricados para detectar gases.

Si comparamos las estructuras que se han fabricado en ambas tecnologías con una estructura resonante de 380 kHz de frecuencia de resonancia y $3,7 \mu\text{m}$ de PEUT cuando se expone ante 1500 ppm de tolueno, se obtiene un cambio de frecuencia de 80Hz. Por ejemplo, para el caso de una estructura fabricada en tecnología superficial de 68 KHz de frecuencia de resonancia se esperaría un cambio de frecuencia del orden de 13 Hz. Para el caso de estructuras fabricadas en tecnología en volumen tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ de masa de $15 \mu\text{m}$ y $5 \mu\text{m}$ de grosor de silicio oscilan a una de frecuencia de resonancia 12 kHz y 4 kHz, se esperaría un incremento de frecuencia de 0,002 Hz y 0,02 Hz respectivamente. Estos resultados

demuestran que va a ser imposible medir. Sin embargo para el caso de estructuras voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa y $15 \mu\text{m}$ y $5 \mu\text{m}$ de grosor de silicio oscilan a una frecuencia de resonancia de 100 kHz y 34 kHz y se esperaría un incremento de frecuencia de 1 Hz y 7 Hz , aproximadamente.

5.2.3.2.1. – Comparación de los resultados obtenidos para el depósito de la capa sensible en estructuras fabricadas en tecnología en superficie y en volumen

En el capítulo 2 se ha explicado la tecnología de fabricación de estructuras mecánicas móviles para su aplicación como posible substarto en la fabricación de sensores. Las dimensiones propuestas para esta tecnología son dimensiones pequeñas (de $100 \times 10 \mu\text{m}^2$) y se definen por el ataque de una capa sacrificial de óxido de $1 \mu\text{m}$ de grosor. Se ha estudiado en este capítulo 2, como estas estructuras cuyo principio de actuación es electrostático como para evitar el colapso de las estructuras, es necesario que el desplazamiento no sea superior a un tercio del gap definido. La experiencia demostrada por la parte de desarrollo químico, sugiere que, depositar capas gruesas favorece la sensibilidad del dispositivo.

De este modo, se realiza el depósito de la capa sensible (PEUT) sobre las estructuras fabricadas en tecnología en superficie mediante la técnica de spray, con el uso de un aerógrafo. Se realizaron unas primeras pruebas de depósito sobre las estructuras móviles y se comprobó que:

- (a) El polímero se encuentra sobre toda la superficie del chip ya que el depósito se realiza sin máscara y por spray.
- (b) El polímero llena el gap de aire colapsando las estructuras. El polímero "resbala" sobre la superficie de polisilicio y rellena el gap de $1 \mu\text{m}$ pegando las estructuras al substrato.

- (c) Alinear para depositar la capa sensible sobre las estructuras no es posible mediante esta técnica hasta que no se tenga optimizada el depósito del material sensible en función de la tecnología y del tipo de estructura.

Se concluye que, el depósito de la capa sensible es drástico para el caso de la tecnología de micromecanizado en superficie. Es necesario no sólo alinear la capa sensible con respecto a las estructuras, sino que también será necesario depositar capas delgadas de forma que no rellenen el gap definido de 1 μm .

5.2.3.3. - Caracterización de los substratos fabricados en tecnología en volumen con gases

Una vez se ha realizado el depósito de la capa sensible sobre las estructuras fabricadas se procede a realizar el estudio de la respuesta en frecuencia ante la presencia de gases. Estas pruebas han sido realizadas en el laboratorio del Instituto de Física Aplicada (IFA) de Madrid. Exponer los substratos ante una concentración alta de tolueno no tiene mucho sentido ya que la dosis letal del tolueno es de 500 ppm. Por este motivo, se comprueba la respuesta de estos substratos ante la presencia de hasta 395 ppm de tolueno.

Se han realizado dos pruebas con dos dispositivos de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa. El primer dispositivo vibraba a una frecuencia de 33,564 kHz sin polímero. Tras el depósito de la capa sensible, se obtiene un decremento de la frecuencia de resonancia de 13,750 kHz. Este decremento está asociado a un grosor de polímero de 11,4 μm . Se ha expuesto el sensor a diferentes concentraciones de tolueno, obteniéndose un cambio de frecuencia de 1,46 Hz para 395 ppm. En la figura 5.27 se muestra la respuesta para una estructura tipo voladizo de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa ante la presencia de distintas concentraciones de tolueno.

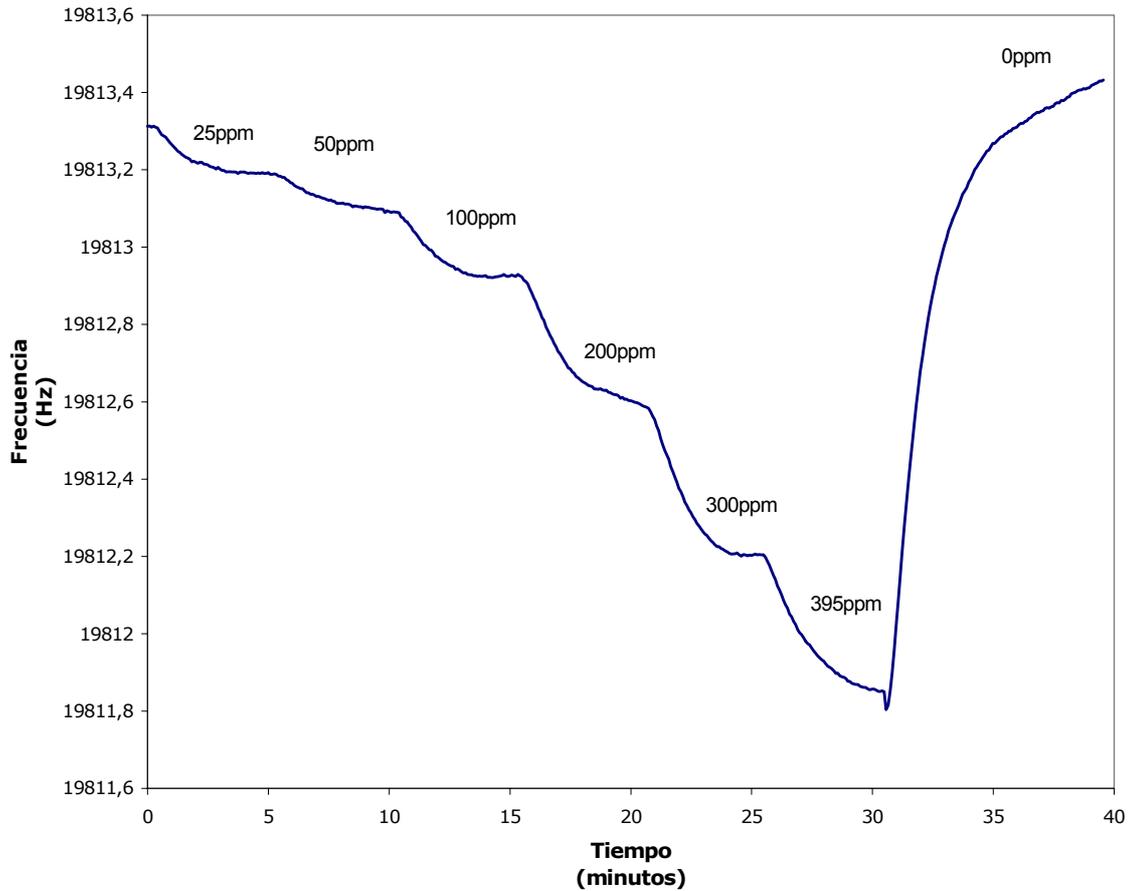


Figura 5.27: Respuesta de un sustrato de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa tipo A ante la presencia de distintas concentraciones de tolueno

En la figura 5.27 se muestra como la respuesta en frecuencia va decreciendo en función de la concentración de tolueno. Por ejemplo, para una concentración de 25 ppm se obtiene un decremento en la frecuencia de 0,13 Hz, para 50 ppm se obtiene 0,2 Hz hasta la máxima concentración de tolueno, de 395 ppm que se obtiene un decremento de frecuencia de 1,46 Hz. Esta gráfica demuestra que los sustratos que se han fabricado en tecnología en volumen son apropiados para detectar gases.

De forma análoga, se considera otra estructura de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa. Esta estructura tenía una frecuencia de resonancia de 34,324 kHz antes de

depositar la capa sensible. Tras el depósito de la capa polimérica, la estructura resuena a 28,416 kHz produciendo un decremento de la frecuencia de resonancia de 5,908 kHz. Este decremento está asociado a un grosor de 5 μm de polímero depositado que se estima por simulación. Se ha expuesto el sensor a una concentración de 395 ppm de tolueno se produce un decremento de la frecuencia de 1 Hz. Estos resultados coinciden con los valores que se habían estimado en el apartado anterior, teniendo en cuenta que se exponía la estructura a una concentración de tolueno 3 veces mayor que la del experimento que se presenta en este trabajo. En la figura 5.28 se muestra la respuesta del substrato ante la presencia de 395 ppm de tolueno.

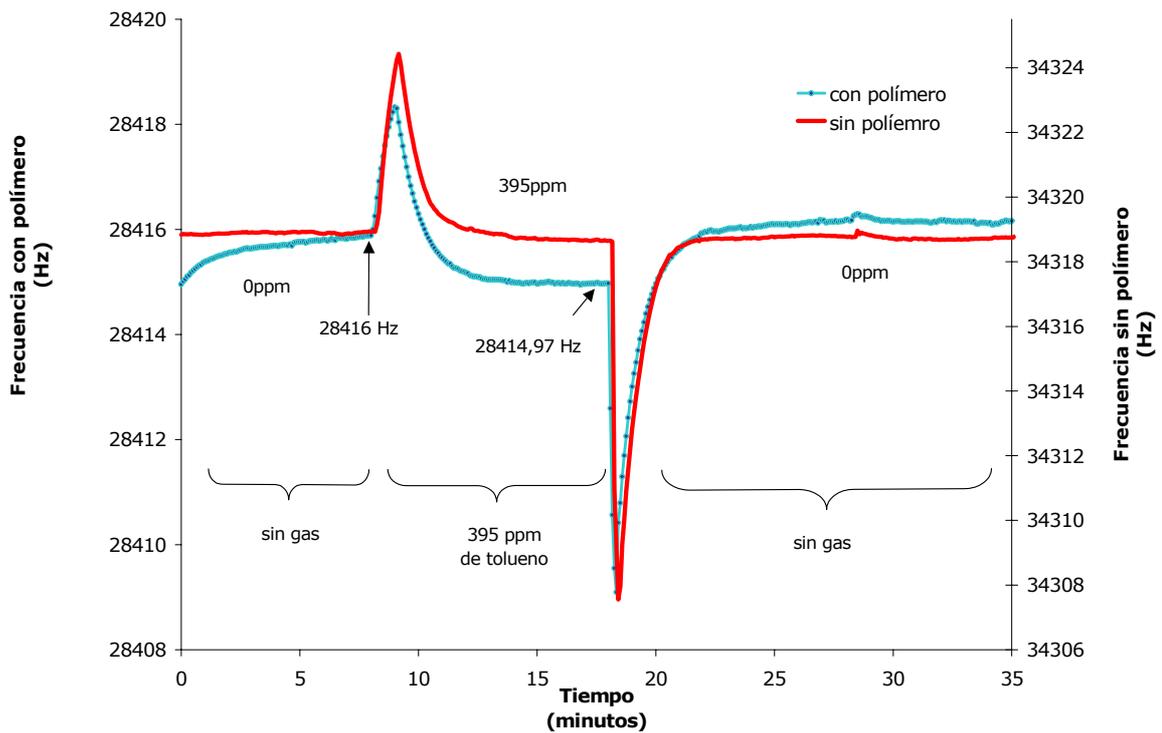


Figura 5.28: Respuesta del sensor tipo A fabricado en oblea tipo B de 5 μm de grosor ante la presencia de tolueno

El experimento de la figura 5.28, se realiza a presión constante con un flujo constante de 100 ml/min. De forma que, a 0 ppm únicamente fluye gas portador o aire sintético. Cuando se abren las electroválvulas que dan lugar al paso del tolueno, se producen unas pequeñas sobrepresiones y depresiones en la respuesta que preceden a cada variación debida al gas problema. Esta respuesta se debe al efecto en el amortiguamiento que produce el aire sobre la estructura.

Para concluir el trabajo, se realiza un estudio comparativo de las tecnologías que se han utilizado para la fabricación de estructuras que servirán de sustrato para la detección de volátiles.

5.3. – Estudio comparativo entre las estructuras fabricadas en tecnología en superficie con las fabricadas en tecnología en volumen

Como ya se ha explicado en el capítulo de introducción, el objetivo de este trabajo ha consistido en el estudio de la viabilidad de dos tecnologías de micromecanizado del silicio (una en superficie y otra en volumen) para la fabricación de sustratos que combinados con las técnicas de depósito de la capa sensible tipo polimérica se utilizarán para la detección de vapores.

En general, las estructuras fabricadas en tecnología superficial están formadas por una capa de polisilicio de 2 μm de grosor y un gap de 1 μm de aire. El principio de actuación es electrostático y el de detección está basado en un cambio en la corriente de drenador de un transistor puerta flotante. Se fabricaron estructuras tipo puente en dos versiones: doble puerta y puerta extendida, (de 500x50 μm^2). La idea de fabricar estructuras tipo puente en esta tecnología está basada en el hecho de que al definir las estructuras en tres dimensiones por el grabado de una capa sacrificial de óxido son estructuras más rígidas que las estructuras tipo voladizo y por tanto, es más difícil que colapsen tras el proceso de fabricación. Situación

crítica en las estructuras tipo voladizo, ya que un gradiente de estrés en sentido contrario al deseado produciría estructuras cuyo extremo toca con el substrato.

Con esta tecnología en superficie, es posible fabricar estructuras de pequeñas dimensiones y frecuencias de resonancia de 68,5 kHz que a priori, tienen mayor sensibilidad que las estructuras fabricadas en tecnología en volumen (es de esperar un decremento de 14 Hz y que se corresponde al doble del decremento que se espera para las estructuras más pequeñas fabricadas en volumen). Estas estructuras se han caracterizado de forma cuasi - estática, se ha demostrado su movimiento de forma óptica para ambas versiones (DP y PEXT). Las características I_{ds} - V_{ds} para cada una de las versiones que se han fabricado demuestra que la versión PEXT es mejor para medir la resonancia que la versión DP. En este último caso es necesario rediseñar el tamaño del transistor para obtener valores de corriente mayores, como ya se dijo en el capítulo 2.

Como las estructuras fabricadas sirven como substrato para la detección de gases volátiles, el depósito de una capa polimérica como capa sensible por spray demuestra que, el polímero rellena el gap de aire y colapsa las estructuras. Por este motivo, en este trabajo no se han presentado resultados de estructuras fabricadas en tecnología en superficie y se pospone su caracterización una vez se tenga controlado el proceso de depósito de la capa sensible.

En cambio, las estructuras que se han fabricado en tecnología en volumen son de 5 μm o 15 μm de grosor de capa de silicio y se fabrican dos tipos de obleas en función del grosor de óxido de silicio sea de 1000Å o de 500Å y del grosor de la capa de aluminio sea de 0,7 μm o de 1,5 μm . Se fabrican estructuras tipo voladizo y tipo puente. El principio de actuación que se ha propuesto para este tipo de estructuras y tecnología es actuación tipo electrotérmica y detección piezoresistiva. Las estructuras tipo puente son

más insensibles y no se han caracterizado mas que por interferometría. Las estructuras tipo voladizo fabricadas en esta tecnología tienen dimensiones de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ y $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$. En esta tecnología se ha demostrado que son mejores las estructuras pequeñas que las grandes, y las más delgadas frente a las gruesas, ya que son más sensibles.

En esta tecnología el depósito de la capa sensible no es crítico ya que no hay problema de colapso de las estructuras con el sustrato. Se ha comprobado la respuesta de los sensores ante la presencia de gases

Estos resultados demuestran que la tecnología en superficie es mejor que la tecnología en volumen para fabricar sensores de gases pero es mucho más complicada y cara y requiere de un estudio de compatibilidad de la tecnología con el depósito de la capa sensible.

En las siguientes tablas 5.13 y 5.14 se muestra un resumen de las principales ventajas e inconvenientes asociadas a cada tipo de tecnología.

	ventajas	inconvenientes
Tecnología superficial	Potencia de consumo limitada por el voltaje de colapso	Proceso más largo y complicado que requiere 9 niveles fotolitográficos
	Reduce dimensiones	El precio por chip es de 10 €
	Aumenta sensibilidad	La capa sensible queda depositada sobre todo el chip y rellena el gap colapsando las estructuras
	Los decrementos esperados son el doble en tecnología en superficie que en volumen	Rediseñar tamaño del transistor, requiere diseñar un nuevo juego de máscaras
		Compatibilizar el depósito de la capa sensible

Tabla 5.13: Principales ventajas e inconvenientes asociadas a la tecnología de micromecanizado en superficie

	ventajas	inconvenientes
Tecnología en volumen	Potencia máxima consumida del orden de 80 mW	Estructuras grandes
	Proceso más sencillo que requiere 6 niveles fotolitográficos	Máxima sensibilidad esperada de 7 Hz
	La reducción de niveles implica un proceso mucho más barato. Reduce el coste en un 28 % frente al proceso en superficie	
	El precio por chip es de 2 €, aproximadamente	
	El depósito de la capa sensible por spray no es crítico	

Tabla 5.14: Principales ventajas e inconvenientes asociadas a la tecnología de micromecanizado en volumen

5.4. - Conclusiones

En este capítulo de caracterización se presentan resultados para las estructuras fabricadas en tecnología en volumen.

Inicialmente, las estructuras se han caracterizado a nivel de oblea y de forma automática mediante carta de puntas, obteniendo los valores de resistencias y offset de las distintas geometrías.

Como ya se ha explicado en el capítulo de fabricación se procesan dos tipos de obleas (tipo A y B) en función de los grosores de las capas depositadas. Los valores obtenidos para las resistencias actuadoras y resistencias de puente de Wheatstone demuestran unos resultados homogéneos para las obleas tipo A y B. Evidentemente, los valores de offset para un mismo tipo de estructura fabricada en oblea tipo A o B, es distinta puesto que son distintos los grosores de óxido y aluminio que han sido depositados.

Se ha comprobado experimentalmente la temperatura máxima estática que alcanzan las estructuras tipo voladizo de 1000 μm y 300 μm de longitud de masa mediante el uso de una cámara infrarroja. Para el caso de las estructuras de 300 μm no se considera un buen método de medida de la temperatura ya que se comete un error en la medida del 45%. Sin embargo, los resultados experimentales se han corroborado con los estimados por simulación obteniéndose unos resultados coincidentes para la estructura de 1000 μm de longitud de masa. Se ha obtenido una temperatura máxima experimental de 45,8°C frente a la temperatura obtenida por simulación y que se estimó en 45°C. El error en la medida es inferior al 10% y, en consecuencia, se considera apropiado el método de medida.

Se han comprobado experimentalmente los desplazamientos estáticos de las estructuras tipo voladizo y tipo puente de 1000 μm de longitud de masa, cuando se aplica tensión en continua a las resistencias actuadoras. El método de medida que se utiliza es un microscopio confocal obteniendo unos valores experimentales que coinciden con los estimados por simulación mediante acoplamiento térmico – estructural de los modelos usados. Se comprueba como las estructuras tipo puente son más rígidas, puesto que para una misma potencia aplicada los desplazamientos son menores y por tanto, menos sensibles.

A continuación se realiza la medida dinámica de las estructuras, principalmente se presentan resultados para las estructuras tipo voladizo ya que son más sensibles.

Se miden las estructuras de forma óptica por interferometría obteniendo los valores que caracterizan la resonancia como son la amplitud, la frecuencia de resonancia y el factor de calidad. Además mediante el método de interferometría se puede determinar en qué modo de vibración oscilan las estructuras.

Dado que el principio de detección es piezoresistivo a través de 4 resistencias configuradas en forma de puente de Wheatstone, se realiza la medida eléctrica de la resonancia de las distintas estructuras encapsuladas tanto en base metálica como en placa de circuito impreso. Los resultados que se han obtenido son los esperados dado que las frecuencias de resonancia para cada chip individual caracterizado entra dentro del rango de frecuencias que se habían estimado por simulación según el tipo de geometría y para todas las dimensiones fabricadas. Los factores de calidad que se obtienen medidos en aire, varían entre 40 y 450 para las estructuras tipo voladizo de 1000 μm de longitud de masa y un rango que varía entre 50 y 1150 para el caso de las estructuras tipo voladizo de 300 μm de longitud de masa. Para algunos de los chips individuales se muestran las curvas de resonancia. Las estructuras resonantes fabricadas son tanto mejores cuanto mayor sea su factor de calidad. Antes del depósito de la capa sensible se concluye que las estructuras mejores para la aplicación que se presenta son las estructuras de 300 μm de longitud de masa.

Una vez se ha comprobado el correcto funcionamiento de las estructuras resonantes se deposita una capa sensible de tipo polimérica para la fabricación del sensor de gas.

El depósito de la capa sensible se realizó en el Instituto de Física Aplicada mediante aerógrafo. Los parámetros de los que depende el depósito del polímero son la concentración de polímero dentro de la mezcla con disolvente, la distancia entre el aerógrafo y la muestra y el tiempo de pulverización. Estos parámetros están optimizados para cada tipo de polímero utilizado. Los polímeros que se depositan son PEUT y PDMS.

Se ha realizado el depósito de polímero PEUT sobre estructuras tipo puente fabricadas en tecnología en superficie. Los resultados demuestran la necesidad de compatibilizar la técnica de depósito de la capa sensible con la

tecnología ya que el polímero colapsa las estructuras rellenoando el gap de aire.

Se han depositado PEUT y PDMS sobre estructuras fabricadas en tecnología en volumen. Se comprueba la estabilidad de las medidas realizadas tras el depósito de la capa sensible para asegurar que el disolvente ha sido evaporado por completo y que el cambio de frecuencia se debe exclusivamente a la contribución del polímero en masa.

Se miden las nuevas frecuencias de resonancia obteniéndose un incremento de frecuencia en función de la masa de polímero que ha quedado depositada sobre la estructura. Con la medida del incremento de frecuencia de resonancia y las simulaciones realizadas en ANSYS, se estiman los grosores de la capa de polímero depositada y se calculan dentro del rango entre 1,5 μm y 7,5 μm , en función del tipo de estructura y tipo de polímero depositado.

La capa de polímero sobre las estructuras modifica la respuesta eléctrica de las estructuras cambiando su frecuencia de resonancia, disminuyendo la amplitud y disminuyendo el factor de calidad.

Se comparan los resultados en función de las tecnologías utilizadas para la fabricación de los substratos que servirán para fabricar sensores químicos para la detección de volátiles. Fabricar estructuras en tecnología en superficie de 500x50 μm^2 de masa supone reducir 3,6 veces el área de una estructura de 300x300 μm^2 fabricada en tecnología en volumen. Esta reducción en dimensiones afecta en la sensibilidad del dispositivo final, el cambio de frecuencia esperado es doble (14 Hz frente a 7 Hz) para estructuras fabricadas en superficie frente a las estructuras fabricadas en volumen.

Se han expuesto estructuras de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de masa y $5 \mu\text{m}$ de grosor de silicio fabricadas en tecnología en volumen ante la presencia de tolueno. Como ejemplo, en una estructura de frecuencia de resonancia de $33,564 \text{ kHz}$, tras el depósito de la capa sensible se produjo un decremento en la frecuencia de $13,750 \text{ kHz}$. Este decremento se asoció a un grosor de polímero de $11,4 \mu\text{m}$. Finalmente, tras la exposición del sensor ante una concentración de 395 ppm de tolueno se detectó un decremento en la frecuencia de $1,46 \text{ Hz}$. De forma análoga, en otra estructura de frecuencia de resonancia antes del depósito del polímero que era de $34,324 \text{ kHz}$, se midió tras el depósito de la capa polimérica, una frecuencia de $28,416 \text{ kHz}$ produciéndose un decremento de $5,908 \text{ kHz}$. Este decremento está asociado a un grosor de $5 \mu\text{m}$ de polímero. Finalmente, tras la exposición del sensor a una concentración de 395 ppm de tolueno se detectó un decremento de la frecuencia de 1 Hz . Se concluye como la cantidad de polímero determina la variación en frecuencia tras la exposición ante el gas, de forma que, a mayor grosor de polímero más variación en frecuencia.

Al final del capítulo se han comparado los resultados que se han obtenido para cada una de las tecnologías. Se concluye que la tecnología en superficie es una tecnología que requiere un proceso de fabricación más largo, más complicado y por tanto, más caro. Es una tecnología que permite fabricar estructuras más pequeñas. Esta reducción implica un aumento en la frecuencia de resonancia y por tanto, un aumento en la sensibilidad esperada. Esta tecnología requiere de un estudio posterior para compatibilizar la técnica de depósito de la capa sensible. Como contrapartida, la tecnología en volumen es más sencilla y barata que la anterior (para un proceso de 6 obleas reduce el coste en un 28%). Es una tecnología en la que el depósito de la capa sensible no es crítico y queda demostrado por los resultados que se han obtenido. Se obtienen los cambios de frecuencia y de factor de calidad no dificulta la medida ante la presencia de gas.

Capítulo 6:

Conclusiones y perspectivas de futuro

El objetivo de este trabajo es el de estudiar la viabilidad de las tecnologías de micromecanizado del silicio para la fabricación de estructuras mecánicas que se aplicarán en la detección de gases volátiles. Dada la futura aplicación de las estructuras desarrolladas se ha tenido en cuenta, en todo momento, la combinación de ambas tecnologías con las técnicas de depósito de materiales sensibles tipo polimérico y por tanto, con su compatibilidad.

Las principales conclusiones que se desprenden de este trabajo han sido:

Para el caso de estructuras fabricadas en tecnología superficial:

La tecnología que se presenta es una evolución de una tecnología de micromecanizado en superficie que estaba desarrollada en el CNM. Esta tecnología dispone de una capa estructural de polisilicio de 2 μm de espesor sobre una capa sacrificial de 1 μm de óxido de silicio. A este proceso, se

han introducido una serie de variaciones tecnológicas con el fin de mejorar el comportamiento de los dispositivos.

Se ha diseñado un conjunto de estructuras móviles verticales tipo puente con dimensiones entre 100 μm y 800 μm de longitud y d entre 5 μm y 50 μm de anchura. Los dispositivos que se fabrican tienen un principio de actuación electrostático mediante un electrodo de polarización situado bajo el polisilicio de 2 μm de grosor. Se ha diseñado un sistema de detección del movimiento mediante la integración de dispositivos activos tipo transistor en los que la tensión de puerta depende de la posición de la estructura de polisilicio flotante. Este método ya se había utilizado anteriormente pero se ha mejorado diseñando dos tipos de transistores MOS con puerta de polisilicio que se han denominado de "doble puerta o DP" y de "puerta extendida o PEXT".

Desde el punto de vista tecnológico, se han introducido mejoras en la tecnología inicialmente disponible consistentes en la implementación de un óxido de campo tipo LOCOS para mejorar el aislamiento entre dispositivos y para reducir las capacidades parásitas de las pistas de conexión. Asimismo, se han diseñado las estructuras de forma que el transistor de lectura tenga siempre un polisilicio de puerta directamente sobre el óxido de puerta, de las mismas características que las de un transistor de una tecnología estándar CMOS. Si bien encima de dicho transistor se deposita una capa de nitruro de silicio que protege el transistor del grabado húmedo del óxido sacrificial, se ha estudiado el efecto de eliminar dicha capa de nitruro sobre la zona de polisilicio de puerta. El óxido de puerta seleccionado ha sido el estándar de 780Å.

También se ha incidido en la simplificación del proceso de corte de los dados con las estructuras móviles mediante la introducción de una etapa de precorte de las obleas antes de liberar las estructuras. De esta forma la individualización de los dados se puede realizar de forma manual sin

necesidad de utilizar una sierra, que provocaría el colapso de las estructuras al ponerlas en contacto con el agua de refrigeración de la cuchilla de corte. Este fenómeno llamado "sticking" es uno de los principales problemas que debe ser solucionado durante el proceso de fabricación de las estructuras.

El proceso tecnológico desarrollado consta de 76 etapas. Se ha observado que uno de los pasos más críticos para conseguir estructuras móviles con mínimo gradiente de estrés es la etapa de depósito y recocido de la capa de polisilicio estructural. El proceso de fabricación ha servido también para corroborar que las mejoras tecnológicas propuestas han sido efectivas y que el proceso de fabricación está suficientemente consolidado dando resultados uniformes.

En la caracterización cuasi - estática de las estructuras móviles, también se han observado ciertas inestabilidades en las medidas eléctricas debido a las cargas móviles que han provocado la aparición de asimetrías en las características eléctricas $I_{ds} - V_{gs}$ así como un desplazamiento de la respuesta que se esperaba para la estructura tipo doble puerta. Sin embargo este efecto no ha imposibilitado la operación de la estructura polarizándose a bajas frecuencias, puesto que en este caso la estructura sigue la señal de excitación con el correspondiente movimiento mecánico.

Las estructuras tipo puente que se han caracterizado a bajas frecuencias, demuestran que la estructura tipo puerta extendida es más adecuada como sensor que la estructura doble puerta con las dimensiones fabricadas

Se concluye que, las estructuras fabricadas en tecnología de micromecanizado superficial son útiles para la integración de sensores de gases tipo resonante. Sin embargo, es necesario conseguir unos procesos de grabado que no afecten negativamente a las características eléctricas de los transistores de medida. En este sentido, se puede pensar en diseñar nuevas estructuras con nuevas dimensiones y tamaños de transistor, para

la caracterización de estructuras que serán adecuadas como resonadores. Asimismo, dada la aplicación de estas estructuras en la detección de gases, será necesario desarrollar una nueva técnica de depósito de la capa sensible que sea compatible con la tecnología que se ha desarrollado.

Para el caso de estructuras fabricadas en tecnología en volumen:

Se fabrican estructuras tipo puente y tipo voladizo con sustrato SOI de 5 μm y 15 μm sobre un óxido enterrado de 2 μm . Las dimensiones de las estructuras fabricadas oscilan entre 300 μm y 1000 μm de longitud de masa y de anchura. Los dispositivos que se fabrican tienen un principio de actuación electrotérmico y de detección piezoresistivo.

Se analiza el principio de actuación que está basado en el efecto bimetal. Se concluye que la efectividad del efecto bicapa depende del tipo de material así como de la relación entre los grosores de los materiales que la formen, ya que dependen de los coeficientes de dilatación térmica. En esta ocasión se utiliza el silicio y el óxido de silicio como materiales que definen la bicapa. De forma que, el óxido de silicio se encuentra situado sobre las resistencias actuadoras (calefactoras) recubriéndolas por completo.

El principio de detección está basado en la propiedad piezoresistiva del silicio. El diseño de las piezoresistencias considera todas las resistencias iguales y se configuran en forma de puente de Wheatstone. La posición de las piezoresistencias es muy importante en el funcionamiento de las estructuras y se sitúan en aquellos puntos de la estructura donde la oscilación cause el mayor estrés mecánico. Desde el punto de vista tecnológico, las piezoresistencias están calculadas para que el efecto de la temperatura no influya en el valor de los coeficientes piezoresistivos de forma drástica.

El proceso de fabricación consta de 59 etapas. Se han fabricado dos tipos de obleas de 5 μm de silicio con 1000 \AA y 500 \AA de óxido de silicio y 0,7 μm y 1,5 μm de aluminio, obleas tipo A y B respectivamente. También se obtienen resultados para una oblea tipo B de 15 μm de grosor de silicio. En el proceso de serrado de los chips se ha evaluado la posibilidad de realizar un corte de los chips sin necesidad de soldar una oblea de vidrio. Este proceso de serrado con oblea de vidrio es el proceso estándar de serrado para la individualización de los chips, que se realiza para el caso de los acelerómetros y de los sensores de presión. En este caso y fruto de este estudio, se concluye que para el caso de las estructuras tipo resonador no es necesario soldar una oblea de vidrio, ya que supone una reducción en el rendimiento de los chips disponibles inferior al 15%.

Se proponen como encapsulado las bases metálicas y las placas de circuito impreso. Se miden las características de la resonancia como frecuencia y factor de calidad obteniéndose unos valores que entran dentro de los rangos establecidos por simulación.

Se depositan PEUT y PDMS como capa sensible mediante aerógrafo. El depósito no es crítico ya que se tienen 450 μm de margen por debajo de cada estructura. Se miden las nuevas frecuencias de resonancia obteniéndose un decremento de frecuencia en función de la masa de polímero que ha quedado depositada sobre la estructura. Con la medida la variación de frecuencia de resonancia y las simulaciones realizadas en ANSYS, se estiman los grosores de la capa de polímero depositada y se calculan dentro del rango entre 1,5 μm y 7,5 μm , en función del tipo de estructura y tipo de polímero depositado.

La capa de polímero sobre las estructuras modifica la respuesta eléctrica de las estructuras cambiando su frecuencia de resonancia, disminuyendo la amplitud y disminuyendo el factor de calidad.

Se miden los substratos fabricados ante la presencia de 395 ppm de tolueno. Se obtienen unos cambios de frecuencia del 0,005%. Aunque los cambios son muy pequeños son perfectamente detectables. Sin embargo, se considera que es necesario encontrar polímeros con mejores sensibilidades para depositar sobre las estructuras micromecánicas propuestas. Otra alternativa adicional, consiste en trabajar en el diseño de los circuitos que permitan mejorar la sensibilidad en la frecuencia.

Se concluye el trabajo comparando los resultados obtenidos para ambas tecnologías. Tanto la tecnología de micromecanizado en superficie como en volumen son tecnología adecuadas para fabricar estructuras resonantes para la aplicación en la detección de gases volátiles. Se ha visto como a priori, con la tecnología de micromecanizado en superficie es posible fabricar estructuras más pequeñas y por tanto con sensibilidades mayores que en la tecnología de micromecanizado en volumen. El principal inconveniente asociado a la tecnología en superficie consiste en la técnica de depósito del material sensible cuando los espesores que se obtienen al depositar son grandes.

En el caso de estructuras fabricadas en tecnología en volumen, varias son las actuaciones que se plantean para un futuro y que consisten en:
Estudiar la influencia del grosor de la capa de polímero sobre la sensibilidad de las estructuras. Depositar distintos materiales poliméricos en distintas estructuras dentro de un mismo chip y estudiar su respuesta ante una mezcla de gases. Definir y calibrar el sensor químico. Desarrollar un circuito que controle la respuesta en frecuencia de los dispositivos. Disminuir dimensiones y diseñar nuevas geometrías que permitan ganar sensibilidad.

ANEXO A:

Descripción de los juegos de máscaras para la fabricación de estructuras resonantes

A.1. - Descripción del juego de máscaras CNM136

Para la fabricación de los dispositivos resonantes micromecanizados en superficie se ha diseñado un juego de máscaras con referencia CNM136 que consta de nueve niveles. En la tabla A.1 se detallan cuáles son las diferentes máscaras su finalidad y características físicas del campo, contorno y ventanas de alineamiento para cada una de ellas.

Para el alineamiento de las máscaras se diseñan unos motivos. En general, cada máscara contiene una cruz para alinear contra un nivel anterior y uno o más cuadrados sobre los que se alinearán las cruces de los posteriores. Sin embargo en una tecnología como la que se presenta en la que se realizan tanto dispositivos activos como estructuras móviles obtenidas por ataques de capas sacrificiales, hay que tomar precauciones especiales para dichos motivos de alineamiento. En primer lugar, los motivos de alineamiento de todos los niveles deben permanecer en la superficie de la oblea después de los ataques de las capas sacrificiales y en segundo lugar,

los alineamientos deben minimizar al máximo el error de alineamiento, especialmente para las capas que definen los dispositivos activos.

Para asegurar el buen funcionamiento de las marcas, se han diseñado de forma redundante en dos secuencias de cruces y cuadros, que se han fijado a la oblea mediante unos marcos especiales. Las marcas se han colocado en el chip central superior.

MÁSCARA	DEFINICIÓN	CAMPO	CONTORNO	VENTANA	ALINEA CON
GASAD	Definición de áreas activas	Claro	opaco	opaca	****
POLY1	Depósito de polisilicio para la definición de áreas electrostáticas y puerta del transistor	Claro	transparente	transparente	GASAD
WINDOW	Apertura de óxidos en zona de contactos	Oscuro	transparente	transparente	POLY1/NIT
NIT	Apertura de nitruro en zona de contactos	Oscuro	transparente	transparente	POLY1/NIT
OXI1	Definición de capa sacrificial	Claro	transparente	transparente	POLY1/NIT
OXI2	Definición de las estructuras de anclaje y sellado	Oscuro	transparente		OXI1/POLY1
POLY2	Definición de zonas de polisilicio MST	Claro	opaco	opaca	OXI2/POLY1
METAL	Metalización	Claro	transparente	transparente	POLY2/POLY1
RIEFINAL	Definición y liberación de estructuras móviles	Oscuro	opaco		POLY1/METAL

Tabla A.1: Descripción de las máscaras diseñadas para la tecnología superficial desarrollada.

Se han diseñado dispositivos tipo voladizo y puente junto con otras estructuras de test con diferentes geometría y dimensiones [184], [202]. También se han fabricado resonadores laterales y masas suspendidas con esta misma tecnología. Estos dispositivos están integrados en chips de 1920 x 1920 μm^2 . La idea de utilizar estas dimensiones consiste en disponer los

contactos de tal forma que se pueda utilizar, para la caracterización de los dispositivos, una carta de 24 puntas (CP7x7a-14) estándar del CNM.

Dentro de cada uno de los chips se han diseñado hasta cuatro estructuras diferentes. En la figura A.1 se muestra uno de los chips fabricados.

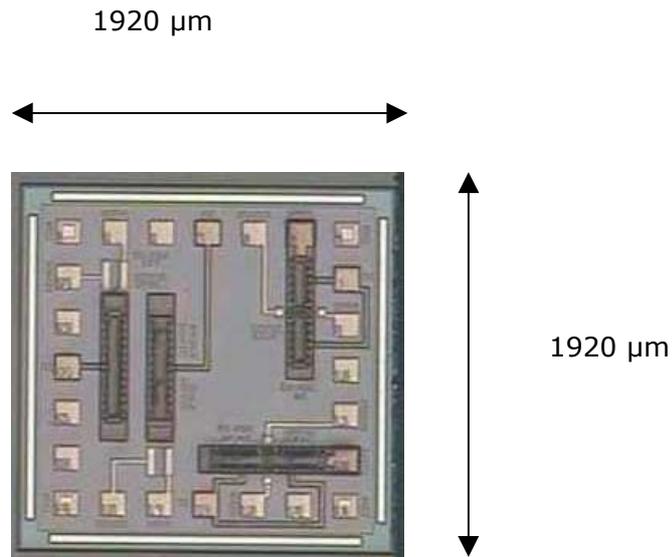


Figura A.1: Chip formado por cuatro dispositivos tipo puente DP y PEXT de $500 \times 500 \mu\text{m}^2$

Dado el pequeño tamaño de las estructuras y por tanto, el reducido tamaño de los chips, se utilizan módulos formados por agrupaciones de 9 chips con un tamaño final $5760 \times 5760 \mu\text{m}^2$. Con estas dimensiones resulta más sencillo el encapsulado y la posterior caracterización. En figura A.2 se muestra la distribución de los dispositivos dentro de cada uno de los chips para los módulos. Estos módulos se repetirán periódicamente en toda la superficie de la oblea.

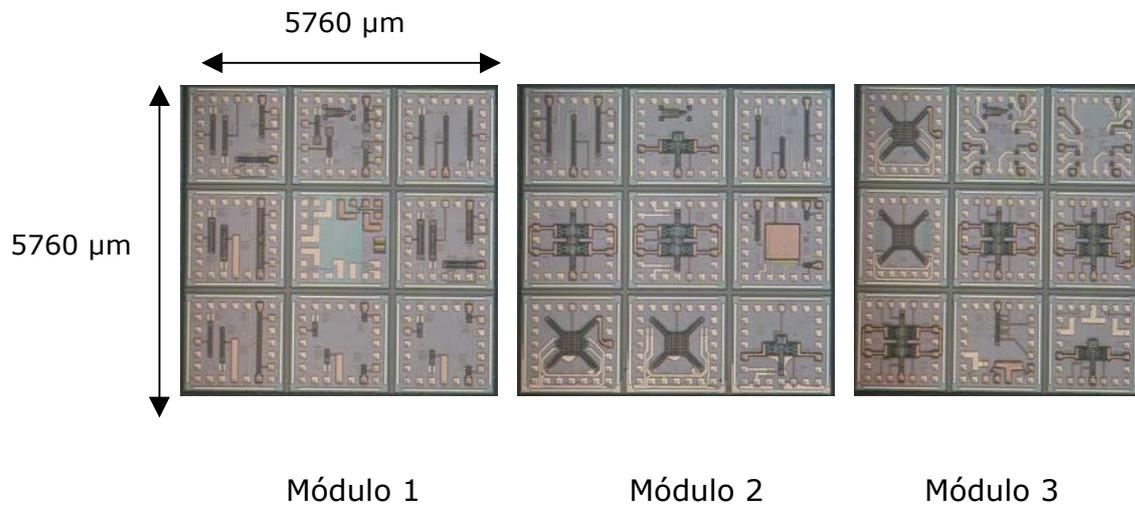


Figura A.2: Fotografía de cada uno de los módulos fabricados

A.2. - Descripción del juego de máscaras CNM148

Para la fabricación de las estructuras en tecnología en volumen, ha sido necesario diseñar un nuevo juego de máscaras de 6 niveles con referencia CNM148. Este juego de máscaras está pensado para la fabricación de dispositivos resonantes en tecnología micromecanizada en volumen mediante obleas SOI disponibles. En la siguiente tabla A.2 se define la secuencia de las diferentes máscaras utilizadas para la fabricación de estos dispositivos en esta tecnología.

MÁSCARA	DEFINICIÓN	CARA	CAMPO
L9	Máscara que deja marca para motivos de alineamiento doble cara	componente	oscuro
KOH	Máscara que abre la capa de nitruro por el dorso de la oblea (preparación para ataque anisotrópico)	dorso	claro
Piezo	Máscara que define las piezoresistencias	componente	oscuro
Contact	Máscara de apertura del óxido para contactos	componente	claro
Alu_si	Depósito de aluminio para contactos	componente	claro
Rie_si	Máscara para definición de estructura	componente	oscuro

Tabla A.2: Descripción esquemática de la secuencia de las máscaras diseñadas para la tecnología en volumen desarrollada para la fabricación de estructuras resonantes.

Con este nuevo juego de máscaras han sido diseñadas fundamentalmente estructuras con geometría tipo voladizo y tipo puente. Las dimensiones de las estructuras para los voladizos y puentes varían desde las 450 μm a 1150 μm y 800 μm a 1300 μm de longitud de resonador respectivamente y como ya han sido descritas en el capítulo de diseño. La figura A.3 muestra el layout de los chips que han sido diseñados y caracterizados.

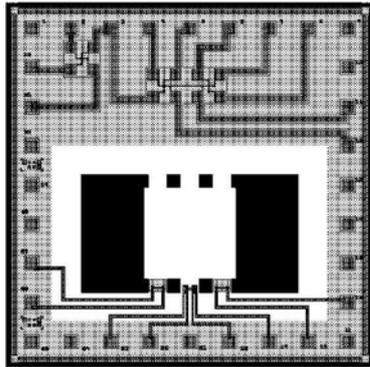


Figura A.3a

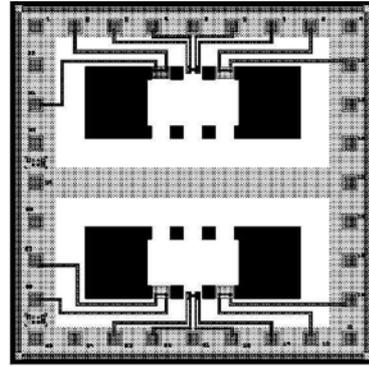


Figura A.3b

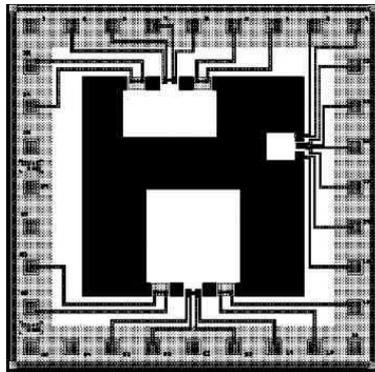


Figura A.3c

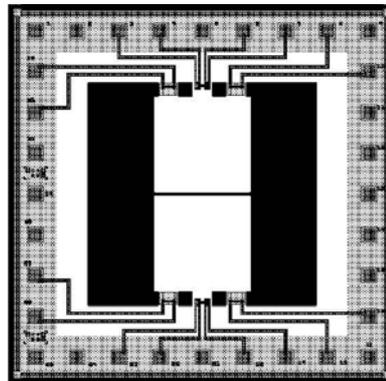


Figura A.3d

Figura A.3: Layout de los distintos chips diseñados para las estructuras fabricadas tipo voladizo y tipo puente (a) puente de 1000 μm de longitud de masa (estructura tipo F) (b): puentes de 500 μm de longitud de masa (estructura tipo G) (c) tres voladizos de longitudes de masa de 1000, 500 y 300 μm (estructura tipo D y A) (d) doble voladizo de 1000 μm de longitud de masa (estructura tipo E).

A.2.1. - Estructuras de test

En el desarrollo de una tecnología microelectrónica es importante el diseño de estructuras de test cuyo objetivo consiste en la obtención de los parámetros que modelen y caractericen los procesos de la tecnología que se desarrolla así como el rendimiento del proceso de fabricación.

Las estructuras de test nos permiten obtener y analizar información de la tecnología, ya no sólo para cada una de las diferentes obleas sino de

diferentes puntos dentro de la misma oblea. De este modo, es importante repetirlas en toda la superficie de la oblea para la obtención de la mayor cantidad de información posible. Por esto, cuando se desarrolla una tecnología es importante tener en cuenta el diseño de una estrategia para el test. Esta estrategia va a facilitar a través de técnicas de caracterización eléctrica o física la obtención de los parámetros que la caracterizan.

Las estructuras de test a incorporar en un nuevo juego de máscaras vienen definidas por la tecnología a usar, por los parámetros a medir y por la técnica de medida. El modo de realización de las medidas es determinante para la buena disposición tanto de los dispositivos como de las estructuras de test dentro del chip. Esta disposición de dispositivos y estructuras de "testeo" puede estar adecuada a una serie de unidades básicas utilizadas como modelos si queremos una posterior caracterización automática. La elección de estas unidades básicas o chips depende de cómo son los dispositivos y de cómo están distribuidos los contactos. El acceso a estos chips se realiza mediante el uso de una carta de puntas o sistema de cartografía para el caso de automatización, sin embargo, los chips deben poderse caracterizar mediante una mesa de puntas manual.

Estas estructuras de test constituyen el método de medida para la determinación de los parámetros tecnológicos, eléctricos y estructurales de la tecnología que se desarrolla. En este caso, la tecnología que se ha utilizado para la fabricación de dispositivos resonantes en tecnología en volumen mediante substratos SOI, es una tecnología que ya se ha utilizado con anterioridad en el CNM para la fabricación de acelerómetros y sensores de presión. Por este motivo, se trata de una tecnología sencilla en la que los parámetros se tienen optimizados y por ello, el principal interés de introducir estructuras de test viene motivado por la medida de los parámetros eléctricos como resistencias de contacto y resistencias cuadro (estructuras CBR y Van der Pauw) [203], la medida del nivel de profundidad

de la implantación (Spreading Resistance) y la introducción de un chip de test específico que se pasa a describir a continuación.

Este chip de test específico está formado por una serie de voladizos de distintas dimensiones tal y como se muestra en el layout de la figura A.4. Las dimensiones son para los voladizos de 100 μm de anchura y sus longitudes varían desde 100 μm hasta 1600 μm . Para los voladizos de 300 μm de anchura y longitudes de 300 μm , 500 μm y 1000 μm y finalmente, para los voladizos de 500 μm de anchura y longitudes de 500 μm y 1000 μm . Estos voladizos están fabricados sin capa de óxido ni de aluminio, por tanto el único modo de actuación para su caracterización es mediante excitación mecánica a partir de substratos piezoeléctricos o PZT, como se vió en el apartado de caracterización y el modo de detección ha de ser óptico mediante interferometría.

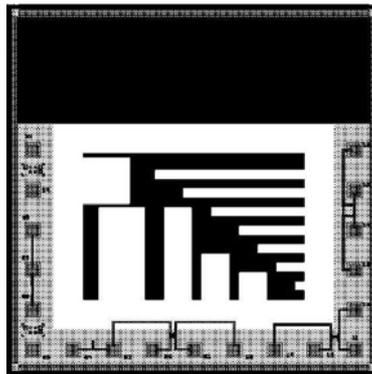


Figura A.4: Layout del chip de test específico diseñado para el juego de máscaras CNM148 y que permitirá determinar el módulo de Young del silicio.

Estas estructuras nos van a servir para estimar el módulo de Young del silicio. Normalmente, este dato se toma de la literatura y con esta medida experimental del módulo de Young del silicio se podrán ajustar las simulaciones.

ANEXO B:

Descripción de las dimensiones del encapsulado

Como ya se ha explicado en el capítulo 4, el encapsulado es una tarea fundamental para el funcionamiento final del dispositivo. De las posibilidades de encapsulado disponibles en el CNM se han elegido tres, un encapsulado en sustrato piezoeléctrico, en base TO8 y en placa PCB, cuyas geometrías y dimensiones se pasan a describir de forma esquemática.

B.1. – Encapsulado en sustrato piezoeléctrico

Los sustratos piezoeléctricos utilizan la propiedad de convertir una señal eléctrica en una señal mecánica o viceversa. De forma que, al aplicar una corriente alterna entre las dos caras de un disco cerámico piezoeléctrico, éste entra en vibración a la frecuencia aplicada, siendo su máxima amplitud cuando dicha frecuencia coincide con la frecuencia de resonancia. Se usa esta propiedad de los sustratos piezoeléctricos para la excitación mecánica de los resonadores que se han fabricado.

B.1.1. - Ficha técnica de los sustratos cerámicos piezoeléctricos

$\phi = 27 \text{ mm}$

Alimentación: 30 Vpp máx

Frecuencia: 2,6 kHz – 6,5 kHz

Nivel acústico: 85 db 12 Vpp a 30 cm

Capacidad: $20\ 000 \pm 30\ %$ pf

Temperatura de trabajo: $- 10 + 60\ ^\circ\text{C}$

B.1.2. - Ventajas

- Bajo consumo
- Larga vida
- No producen interferencias
- Elevado nivel acústico
- Alta fiabilidad
- Pequeño tamaño y peso

B.1.3. - Esquema dimensionado

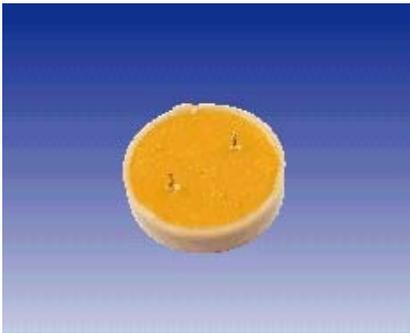


figura B.1a

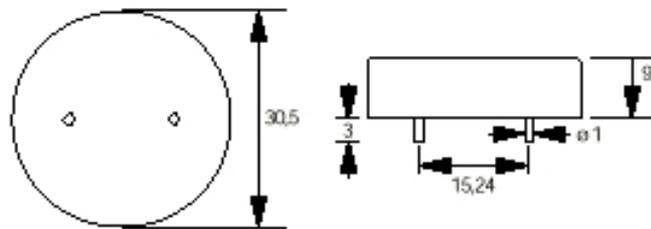


figura B.1b

Figura B.1a: Fotografía del substrato piezoeléctrico **(b)** Esquema en dimensiones de los discos cerámicos piezoeléctricos

B.1.4. - Curva de respuesta

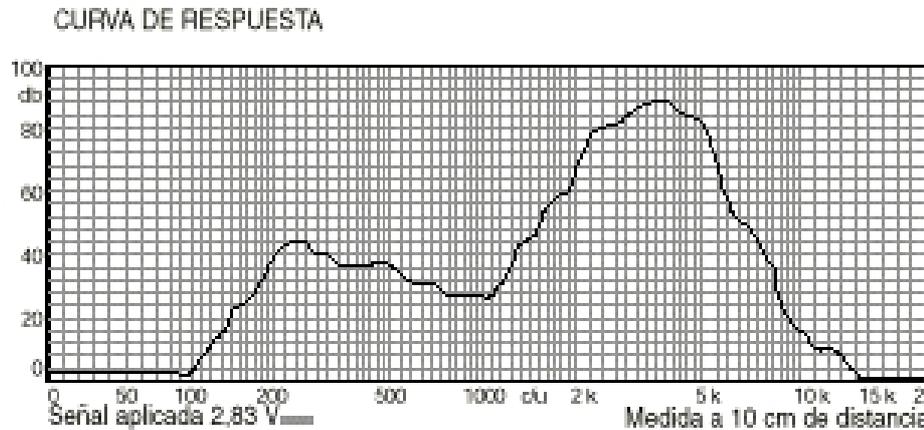


Figura B.2: Curva de la respuesta en frecuencia de un disco cerámico piezoeléctrico de 4,1 kHz

B.1.5. - Montaje experimental para la caracterización en sustrato piezoeléctrico

Conocidas las especificaciones de los discos cerámicos piezoeléctricos, se utilizan como sustrato para la excitación mecánica de las estructuras resonantes fabricadas. Dado el principio de actuación, se caracterizarán ópticamente por interferometría. En la figura B.3 se muestra el esquema del montaje experimental utilizado para la caracterización de las estructuras.

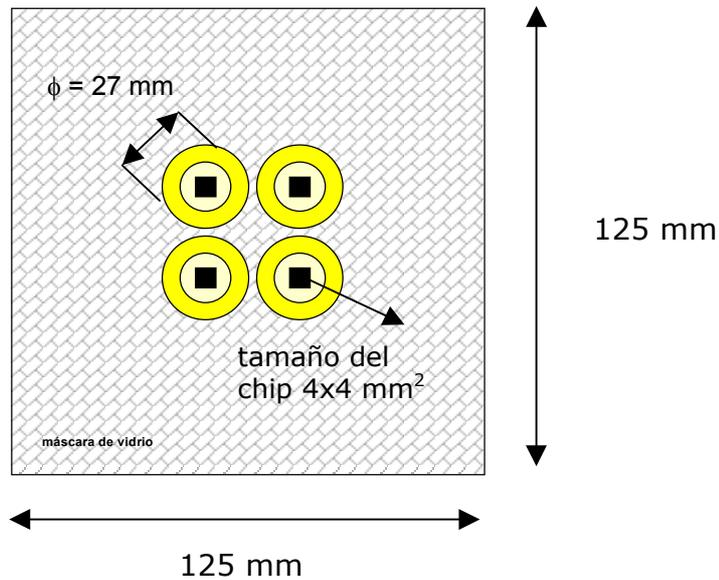


Figura B.3: Esquema dimensionado del montaje experimental sobre sustrato piezoeléctrico para caracterización de las estructuras mediante excitación mecánica y detección óptica por interferometría.

Este montaje consta de un sustrato de vidrio sobre el cual se han pegado los resonadores a los discos cerámicos y éstos a su vez al sustrato de vidrio mediante una epoxi. La principal característica de la epoxi utilizada es que ha de tratarse de una epoxi dura para que no introduzca amortiguamiento en la estructura y modifique su frecuencia de resonancia.

B.2. – Encapsulado en base metálica

El uso de un encapsulado tipo metálico, como son las bases TO8, está recomendado para aquellas aplicaciones en las que no se alcancen elevadas temperaturas. A continuación se dan las especificaciones técnicas para este tipo de encapsulado y se muestra un esquema en dimensiones en la figura B.4.

B.2.1. – Especificaciones

$\phi = 15,5 \text{ mm}$

Base: níquel o Au

Número de pines: 6 - 16

$\Delta T_{\text{máx}}^a: \angle 113^{\circ}\text{C}$

$I_{\text{máx}}: \angle 1,4 \text{ A}$

$V_{\text{máx}}: \angle 3,8 \text{ V}$

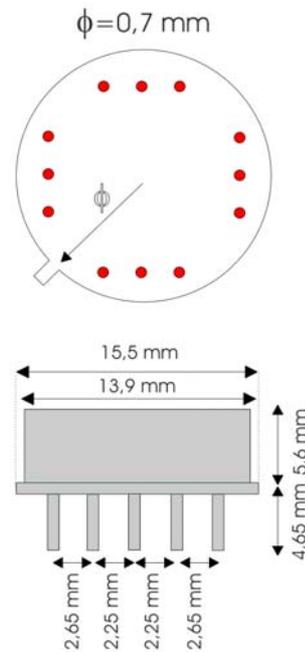


figura B.4

Figura B.4: Esquema de las características y dimensiones del encapsulado en base TO8 para los dispositivos resonantes.

B.3. - Encapsulado en placa de circuito impreso

Los materiales comerciales PCB se caracterizan por ser un tipo de encapsulado muy versátil ya que se diseñan en función del dispositivo y montaje final de medida. El tipo de encapsulado es de baja calidad pero muy barato. Los diseños de las geometrías que aquí se presentan constituyen los prototipos para realizar el estudio del comportamiento de la estructura y viabilidad para el montaje final de medida.

B.3.1. - Especificaciones técnicas

Placas de cobre simple o doble de 305 g/m²

Espesor: 1,6 mm

Dimensiones: 100 x 160 mm² a 233,4 x 220 mm²

B.3.2. - Diseños para encapsulado en placa PCB

A continuación, se muestran las geometrías y dimensiones de los encapsulados diseñados en placa PCB.

Diseño B3.1

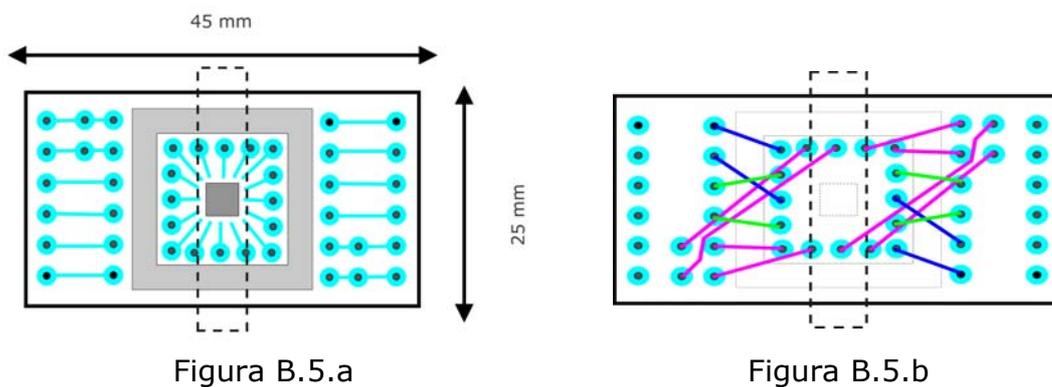


Figura B.5.a: Esquema superior de la cara componente del encapsulado fabricado en placa PCB **(b)** esquema posterior de la cara dorso donde se muestra el conexionado para dos estructuras.

Diseño B3.2

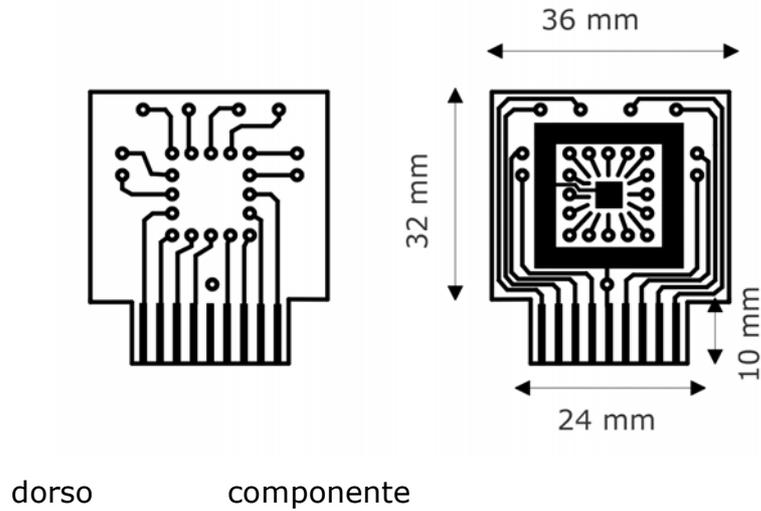


Figura B.3: Esquema y dimensiones de la cara dorso y componente respectivamente de la placa PCB de doble cara diseñada.

Diseño B3.3

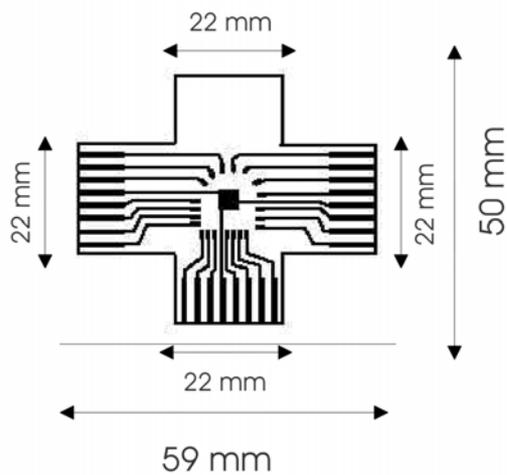


Figura B.4: Esquema y dimensiones de la placa PCB de una sola cara diseñada para encapsulado de estructuras resonantes.

En todos los diseño que se han realizado para encapsulado en placa PCB, permite utilizar la cápsula de la figura 4.8 para la caracterización futura con gases.

ANEXO C:

Relación y descripción de archivos incluidos en el CD

A continuación se relacionan el contenido del CD que se incluye al final de esta tesis y que resulta de interés. El CD está dividido en tres carpetas. En la primera carpeta se incluye una copia digital de esta tesis. En la segunda carpeta se incluyen los videos de las caracterizaciones de las estructuras fabricadas en tecnología superficial y finalmente, es la tercera carpeta se incluyen los videos obtenidos por simulación para las estructuras fabricadas en tecnología en volumen.

TESIS DOCTORAL

Esta carpeta contiene una copia digital en formato pdf de esta tesis.

TECNOLOGÍA DE MICROMEKANIZADO SUPERFICIAL

En la caracterización cuasi-estática de las estructuras fabricadas en tecnología superficial, se realiza una caracterización de tipo óptica a bajas frecuencias.

Caracterización cuasi-estática de una estructura tipo puente versión doble puerta

El vídeo que se presenta muestra el movimiento de la estructura por reflexión de la luz sobre la superficie del polisilicio de 2 μm de grosor cuando se polariza el electrodo de atracción electrostática a una tensión $10\text{sen}3t$ y la puerta flotante (G2) de polisilicio se polariza a +2V. El transistor está polarizado con $V_B=V_S=0\text{V}$ y $V_D=0,1\text{V}$.

Caracterización cuasi-estática de una estructura tipo puente versión puerta extendida

De forma análoga al caso anterior, el vídeo demuestra el movimiento mecánico de la estructura por reflexión de la luz que incide sobre su superficie cuando la puerta G2 está polarizada a con una señal $10\text{sen}3t$ y el transistor está polarizado con $V_B=V_S=0\text{V}$ y $V_D=0,1\text{V}$.

TECNOLOGÍA DE MICROMECHANIZADO EN VOLUMEN

Se incluyen los vídeos obtenidos de caracterización óptica por interferometría de una estructura tipo voladizo de $1000 \times 1000 \mu\text{m}^2$ para los tres primeros modos. Para cada uno de los modos se obtienen frecuencia de resonancia y amplitud de la vibración.

modo 1

La estructura oscila a una frecuencia de resonancia de 12,508 KHz con una amplitud de 965,8 nm

modo 2

La estructura oscila a una frecuencia de resonancia de 35,88 KHz con una amplitud de 141,7 nm

 **modo 3**

La estructura oscila a una frecuencia de resonancia de 85,39 KHz con una amplitud de 134,0 nm

Bibliografía

- [1] H.Baltes, O.Paul and O.Brand. "Micromachined thermally based CMOS microsensors", Proceedings of the IEEE, vol. 86, no. 8, 1998, p. 1660-1678.
- [2] A.Bakker and J.H,Huijsing. "High-accuracy CMOS smart temperature sensors", International Series in Engineering and Computer Science, vol. 595, Klumer 2000.
- [3] M.A.P.Pertijs and J.H.Huijsing. "Transistor temperature measurement for calibration of integrated teperature sensors", Instrumentation and Measurement Technology Conference 2002, Proceedings of the 19th IEEE, vol.1, 21-23, May. 2002, p.755-758.
- [4] T.Nenov and Z.Nenova. "Multifunctional temperature sensor", MIEL 2002, 23rd International Conference, vol. 1, 12-15, May. 2002, p.257-260.
- [5] M.A.Benítez. "Puesta a punto de una tecnología de micromecanización superficial y su aplicación a la fabricación de sensores y activadores", Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, junio 1996.
- [6] L.Svensson, J.A.Plaza, M.A.Benítez, J.Esteve and E.Lora-Tamayo. "Surface micromachining technology applied to the fabrication of a FET pressure sensor", Journal Micromechanical Microengineering, vol. 6, 1996, p.80-83.
- [7] E.Hynes, M.O'Neill,D.McAuliffe, H.Berney, W.A.Lane, G.Kelly and M.Hill. "Development and characterisation of a surface micromachined FET pressure sensor on a CMOS process", Sensors and Actuators A Physical, vol. 76, no. 1-3, 1999, p. 283-292.
- [8] M.Esashi, S.Sagiyama, K.Ikeda, Y.Wang and H.Miyashita. "Vacuum sealed silicon micromachined pressure sensors", Proceedings of the IEEE, vol.86, no. 8, Aug.1998, p. 1627-1639.
- [9] P.Melvas, E.Kalvesten, and G.Stemme. "A surface micromachined resonant beam pressure sensor", Micro Electro Mechanical Systems, 2001. The 14th IEEE International Conference, 21-25, Jan. 2001, p.38-41.
- [10] G.Lutz. "Semiconductor radiation detectors", Springer, 1999.

- [11] N.Tsoufanidis. "Measurements and detection of radiation", Taylor & Francis, segunda edición, 1995.
- [12] G.F.Knoll, "Radiation detection measurement", John Wiley & Sons, 2000.
- [13] C.M.Gregory and J.V.Hatfield. "Fabrication methods for integrated biosensors", Advances in Sensors, IEEE Colloquium, 7 Dec.1995, p. 10/1-10/5.
- [14] R.D.Coller and K.J.Bundy. "Biosensors using enzyme inhibition principles for in vivo, environmental and defense applications", IEEE Region 5, 2003, Annual Technical Conference, 11 April 2003, p.11-14.
- [15] G.V.Tjoutrina, A.V.Zarikova, V.A.Zanin, T.B.Berezov, I.Moser, G.Jobst, E.Aschauer, P.Svasek, M.Varahram and G.Urban. "Miniaturized thin film biosensors sensitive to glutamate and glutamine", Voprosy Meditsinskoi Khimii vol.43, no. 1, 1997, p.22-30.
- [16] Z.Trajanoski, P.Wach, G.Jobst, G.Urban, P.Kotanko, and F.Skrabal. "Portable Device for Continuous Blood Sampling and Continuous Ex Vivo Blood Glucose Monitoring", Biosensors and Bioelectronics, vol.11, no.5, 1996, p. 479-487.
- [17] F.Udrea and J.W.Gardner. "SOI CMOS gas sensors" Sensors 2002. Proceedings of IEEE, vol. 2, 12-14 June 2002, p. 1379-1384.
- [18] J.W.Gardner, M.Cole and F.Udrea. "CMOS gas sensors and smart devices", Sensors 2002. Proceedings of IEEE, vol. 1, 12-14 June, p. 721-726.
- [19] R.T.Howe and R.S.Muller. "Resonant microbridge vapor sensor" IEEE Transactions on Electron Devices, vol. Ed.33, no. 4, April 1986, p. 499-506.
- [20] J.Mitrovics, H.Ulmer, U.Weimar and W.Göpel. "Sensor system for gas and odor analysis: Improvements by combining several transducer principles", Integrated Microsystems, Eurosensors XII, 13-16, September 1998, p. 602-605.
- [21] C.Moldovan, B-H.Kim, S.Raible and V.Moagar. "Simulation and microfabrication polysilicon structures as mass sensitive sensors for gas detection", Semiconductor Conference International 2000, CAS 2000 proceedings, vol. 2, 10-14 Oct., p. 459-462
- [22] G.Barkó, R.Németh and I.Halavay. "Investigation of the reliability of piezoelectric chemical sensors", Analytica Chimica Acta, vol. 480, no.2, 2003, p. 307-316.

- [23] C.Hagleitner, A.Hierlemann, O.Brand and H.Baltes. "CMOS single chip gas detection systems-part I", *Sensor Update*, vol. 12.
- [24] C.Hagleitner, A.Hierlemann, and H.Baltes. "CMOS single chip gas detection systems-part II", *Sensor Update*, vol. 12.
- [25] C.Vancura, M.Rüegg, Y.Li, D.Lange, C.Hagleitner, O.Brand, A.Hierlemann and H.Baltes. "Magnetically actuated CMOS resonant cantilever gas sensor for volatile organic compounds", *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th International Conference on 2003*, vol. 2, June 9-12, p. 1355-1358
- [26] T.Thundat, G.Y.Chen, R.J.Warmack, D.P.Allison and E.A.Wachter. "Vapor detection using resonating microcantilevers", *Analytical Chemistry*, vol. 67, no. 3, 1995, p. 519-521.
- [27] D.Lange, C.Hagleitner, O.Brand and H.Baltes. "CMOS resonant beam gas sensing system with on-chip self excitation", *Micro Electro Mechanical Systems, MEMS 2001. The 14th IEEE International Conference on*, 21-25 Jan 2001, p. 547-552.
- [28] A.A.Hierlemann, D.Lange, C.Hagleitner, N.Kerness, A.Koll, O.Brand and H.Baltes. "Application specific sensor systems based on CMOS chemical microsensors", *Sensors and Actuators B Chemical*, Vol.70, 1-3, 2000, p. 2-11.
- [29] W.F.Wilkens and A.D.Hatman. "An electronic analog for the olfactory processes", *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 116, no. A2, 1964, p. 608.
- [30] H.Baltes, D. Lange, and A.Koll. "The electronic nose in Lilliput", *IEEE Spectrum*, vol. 35, no. 9, Sept. 1998, p. 35-38
- [31] J.W.Gardner and P.N.Bartlett. "A brief history of electronic noses", *Sensors and actuators B Chemical*, vol. 18, no. 1-3, 1994, p. 210-211.
- [32] H.Troy Nagle, R.Gutiérrez Osuna, and S.S.Schiffman. "The how and why of electronic noses", *IEEE Spectrum*, vol.35, no. 9, Sept. 1998, p. 22-34.
- [33] E.Llobet, J.Brezmes, X.Vilanova and X.Correig. "Sistemas de olfato electrónico. Estado actual y perspectivas de futuro", *Mundo electrónico*, octubre 1998, p. 64-68.
- [34] H.Baltes, A.Koll and D.Lange. "The CMOS MEMS nose- fact or fiction?", *ISIE 1997, Portugal*, p. ss152-ss157.

- [35] H.Baltes, O.Brand, C.Hagleitner, A.Hierlemann, N.Kerness, A.Koll D.Lange and R.Vogt. "CMOS integrated chemical sensors for application specific microsensors", Proceedings of ISOEN 1999, Tübingen, p. 95-98.
- [36] J.Goschnick. "An electronic nose in consumer applications for condition monitoring", Proceedings of SENSORS 2001, p. 123-128.
- [37] U.De Vries. "On line sensor system for supervision of natural gas processing facilities based on electronic nose technology", Proceedings of SENSORS 2001, p. 129-132.
- [39] H.P.Lang, F.M.Battiston, M.K. Baller, R. Berger, J-P.Ramseyer, P.Fornaro, E.Meyer, H-J.Güntherodt, C.Andreoli, J.Brugger, M.Despont, P.Vettiger, J.H.Fabian, T.Mezzacasa, L.Scandella, Ch.Gerber and J.K.Gimzewski. "An electronic nose based on a micromechanical cantilever array". D.J. Harrison and VanDengBerg, editors, uTAS'98 Workshop, Banff (Canada), 1998, p. 57- 60.
- [40] H.P.Lang, M.K.Baller, R.Berger, Ch.Gerber, J.K.Gimzewski, F.M.Battiston, P.Fornaro, J.P.Ramseyer, E.Meyer and H.J.Güntherodt. "An artificial nose based on a micromechanical cantilever array", Analytica Chimica Acta, vol. 393, no. 1-3, 1999, p.59-65.
- [41] R.Stella, J.N.Barisci, G.Serra, G. G. Wallace, D. de Rossi. "Characterisation of olive oil by an electronic nose based on conducting polymer sensors", Sensors and Actuators B Chemical, vol.63, no. 1-3, 2000, p.1-9.
- [42] P.Boilot, E.L.Hines, M.A.Gongora and R.S.Folland. "Electronic noses inter-comparison, data fusion and sensor selection in discrimination of standard fruit solutions", Sensors and actuators B Chemical, vol. 88, no.1, 2003, p. 80-88.
- [43] H.V.Shurmer, J.W.Gardner, and P.Corcoran. "Intelligent vapor discrimination using a composite 12-element sensor array", Sensors and Actuators B Chemical, Vol.1, no. 1-6, 1990, p. 256-260.
- [44] H.V.Shurmer, P.Corcoran and J.W.Gardner. "Integrated arrays of gas sensors using conducting polymers with molecular sieves", Sensors and Actuators B Chemical, vol. 4, no. 1-2, 1991, p. 29-33.
- [45].J.V.Hatfield, P.Neaves, P.J.Hicks, K.Persaud, K.Persaud and Travers. "Towards an integrated electronic nose using conducting polymer sensors", Sensors and Actuators B Chemical, vol.18, no. 1-3, 1994, p. 221-228.
- [46] J.W.Gardner and P.N.Bartlett. "Application of conducting polymer technology in microsystems", Sensors and Actuators A Physical, vol. 51, no.1, 1995, p. 57-66.

- [47] R.Casalini, M.Kilitziraki, D.Wood and M.C.Petty. "Sensitivity of the electrical admittance of a polysiloxane film to organic vapours", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 56, no. 1-2, 1999, p. 37-44.
- [48] R.Lucklum, B.Henning and P.Hautmann. "Quartz microbalance sensors for gas detection", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 27, no. 1-3, 1991, p. 717-722.
- [49] I.Sugimoto, M.Nakamura and H.Kuwano. "Molecular sensing using plasma polymer films (on quartz) ", *Solid-State Sensors and Actuators. TRANSDUCERS'91, International Conference 24-27 June 1991*, p. 994-997.
- [50] K.D.Schierbaum, A.Gerlach, M.Hang and W.Göpel. "Selective detection of organic molecules with polymers and supramolecular compounds: application of capacitance quartz microbalance and calorimetric transducers", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 31, no. 1-3, 1992, p. 130-137.
- [51] S.J.Martín, V.E.Granstaff, G.C.Frye and A.J.Ricco. " Using quartz crystal microbalances to simultaneously sense mass accumulation and solution properties", *Solid-State Sensors and Actuators, 1991, TRANSDUCERS'91, International Conference, 24-27 June 1991*, p. 785-788.
- [52] K.D.Schierbaum, A.Hierlemann and W.Göpel. "Modified polymers for reliable detection of organic solvents: thermodynamically controlled selectivities and sensitivities", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 19, no. 1-3, 1994, p. 448-452.
- [53] H.Wohltjen and R.Dessy. "Surface Acoustic Wave probe for chemical analysis I. Introduction and instrument description", *Analytical Chemistry*, vol. 51, no. 9, 1979, p. 1458-1464.
- [54] W.Buff. "SAW sensors", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 30, no. 1-2, 1992, p. 117-121.
- [55] C.T.Chuang, R.M.White and J.J.Bernstein. "A thin membrane surface acoustic wave vapor sensing device", *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-3, no. 6, June 1982. p. 145-148.
- [56] C.Hagleitner, A.Koll, R.Vogt, O.Brand and H.Baltes. "CMOS capacitive chemical microsystem with active temperature control for discrimination of organic vapors", *Transducers 1999, Sendai, Japan*, p. 1012-1015.
- [57] T.S.Lammerink, M.Elwenspoek and J.H.J.Fluitman. "Frequency dependence of thermal excitation of micromechanical resonators", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 27, no. 1-3, 1991, p. 685-689.

- [58] P.Lu, F.Shen, S.J.O'Shea, K.H.Lee and T.Y.Ng. "Analysis of surface effects on mechanical properties of microcantilevers", *Materials Physics Mechanics*, vol. 4, 2001, p.51-55.
- [59] G.Gerlach, K.Sager and A. Schroth. "Simulation of a humidity-sensitive double-layer system", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 18, no. 1-3, 1994, p. 303-307.
- [60] Y.Sakai, Y.Sadaoka and H.Fukumoto. "Humidity sensitive and water resistive polymeric materials", *Sensors and Actuators*, vol. 13, no. 3, 1988, p. 243-250.
- [61] E.Delamarche, H.Schmid, B.Michel and H.Biebuyck. "Stability of molded polydimethylsiloxane microstructures", *Advanced Materials*, vol. 9, no. 9, 1997, p. 741-746.
- [62] W.Göpel and K.D.Schierbaum. "SnO₂ sensors: current status and future prospects", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 27-29, 1995, p.1-12.
- [63] M.Jaeglet, J.Woellenstein, T.Meisinger, G.Mueller, T.Becker, C.Bosch and V.Braunmühl. "Micromachined thin film SnO₂ gas sensors in temperature pulsed operation mode", *Eurosensors XIII*, 1998, p. 225-228.
- [64] C.N.R.Rao, A.R.Raju, K.Vijayamohanan. "Gas sensors materials", *Proceedings of New Material*, 1992, p. 1-37.
- [65] D.Lee. "Fabrication and sensing characteristics of micro gas sensor for nitrogen oxides gas detection", *Transducers*, 1999, p. 1028-1031.
- [66] L.Hayakawa, I.Iwamoto, K.Kikuta, and S.Hirano. "Gas sensing properties of platinum dispersed- TiO₂ thin film derived from precursor", *sensors and Actuators B Chemical*, vol. 62, no. 1, 2000, p. 55-60.
- [67] E.Comini, G.Sberveglieri, M. Ferroni, and G.Martinelli. "TiO: A novel material for NO₂ monitoring", *Eurosensors XIII*, 1999, p. 851-854.
- [68] M.Penza, C,Martucci, and G.Cassano. "Nox gas sensing characteristics of WO₃ thin films activated by noble metals (Pd, Pt, Au) layers", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 50, no. 1, 1998, p. 52-59.
- [69] M.Penza, C,Martucci, V.I.Anisimkin, and L.Vasanelli. "Deposition of doped and undoped ZnO thin films for gas sensors", *Materials Science Forum*, vol. 203, 1996, p. 137-142.
- [70] I.Sayago, J.Gutiérrez, L.Aés, J.I.Robla, M.C.Horrillo, J.Getino and J.A. Agapito. "The interaction of different oxidizing agents on doped tin oxide", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 24-25, 1995, p. 512-515.

- [71] F.Quaranta, R.Rella, P.Siciliano, S.Capone, M.Epifani and L.Vasanelli. "Sol-gel thin oxide films activated with Pd, Pt and Os and their application for monitoring an pollutants", Eurosensors XIII, 1999, p. 89-92.
- [72] J.N.Zernel. "Ion-sensitive field effect transistors and related devices", Analytical Chemistry, vol. 47, no. 2, 1975, p. 255-268.
- [73] H.Sondgren, F.Winquist and I.Lundstrom. "Artificial neural networks and statistical pattern recognition improve MOSFET gas sensor array calibration", Transducers, 1991, p. 574-577.
- [74] H.Lorenz, M.Peschke, H.Riess and I.Eisele. "Technology and application of suspended gate field effect transistors for gas detection".
- [75] M.Peschke, H.Lorenz, H.Riess and I.Eisele. "Recognition of hydrogen and amonia by modified gate metallization of the suspended gate FET", Sensors and Actuators B Chemical, vol 1, no. 1-6, 1990, p. 21-24.
- [76] R.P.Manginelli, J.H.Smith, A.J.Ricco, D.J.Moreno, R.C.Hughes, R.J.Huber and S.D.Senturia, Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island, SC, 1996, p.23-27.
- [77] R.P.Manginelli, J.H.Smith, and A.J.Ricco., Proc. 4th Annual Symposium on Smart Structures and Materials SPIE, 1997, p. 273-284.
- [78] R.Aigner, M.Dieti, R.Kalterloher and V,Klee. "Si-planar pellistor: designs for temperature modulated operation", Transducers 1995, p. 839-842.
- [79] Cs.Dücsö, M.Ádám, P.Fürjes, M.Hirschfelder, S.Kulinyi and I.Bàrsony. "Explosion-proof monitoring of hidrocarbons by micro pellistor".
- [80] W.Göpel, J.Hesse, and J.N.Zemel. Sensors: A comprehensive Survey, , Chemical and biochemical sensors, Weinheim, VCH, vol. 2/3, 1991.
- [81] B.R.Eggins, Chemical Sensors and Biosensors, Chichester, Wiley, 2002.
- [82] J.W.Gardner, Microsensors, Chichester, Wiley, 1994.
- [83] G.Harsányi. "Polymeric sensing films: new horizons in sensorics?", Sensors and Actuators A Physical, vol. 46, no. 1-3, 1995, p. 85-88.
- [84] M.Haug, K.D.Scherbaum, G.Gauglitz and W.Göpel. "Chemical sensors based upon polysiloxanes: comparison between optical, quartz microbalance, calorimetric and capacitance sensors", Sensors and Actuators B Chemical, vol. 11, no. 1-3, 1993, p. 383-391.
- [85] M.Mautef, S.Raible, H.Ulmer, F.E.Prins, U.Weimar, D.P.Kern and W. Göpel. "Detection of volatile organic compounds (VOCs) with polymer

coated cantilevers", Sensor Arrays and multi sensor Systems, Eurosensors XII, 1998, p. 1083-1086.

[86] K.D.Schierbaum, A.Hierlemann and W.Göpel. "Modified polymers for reliable detection of organic solvents: thermodynamically controlled selectivities and sensitivities", Sensors and Actuators B Chemical, vol. 18-19, 1994, p. 448-452.

[87] O.Brand, M.Hornung, D.lange and H.Baltes. "CMOS resonant microsensors", SPIE 1998, vol. 3514, p. 238-250.

[88] D.Lange, A.Koll, O.Brand and H.Baltes. "CMOS chemical microsensors based on resonant cantilever beams", Conference on Smart Structures and Materials, Proceedings of SPIE 1998, vol. 3328, p. 233-243.

[89] A.koll, A.Kummer, O.Brand and H.Baltes. "Discrimination of volatile organic compounds using CMOS capacitive chemical microsensors with thickness adjusted polymer coating", Conference on Smart Electronics and MEMS, SPIE 1999, vol. 3673, p. 308-317.

[90] t.Krekler, R.Erbach, F.Kaufmann, B.Hoffmann and W.Moritz. "Superposition on sensitivities in sensors with hydrophobic polymers on field effect devices", Sensors and Materials, vol. 8, no. 2, 1996, p. 99-112.

[91] C.Cornila, A.Hierlemann, R.Lenggenhager, P.Malcovati, H.Baltes, G.Noetzel, U.Weimar and W.Göpel. "Capacitive sensors in CMOS technology with polymer coating", Sensors and Actuators B Chemical, vol. 25, no. 1-3, 1995, p. 357-361.

[92] E.P.Steiner, A.Hierlemann, C.Cornila, G.Noetzel, M.Bachtold, J.G.Korvink, W.Göpel and H.Baltes. "Polymer coated capacitive microintegrated gas sensor", Transducers 1995, p. 814-817.

[93] J.Brugger, G.Beljakovic, M.Despont, H.Biebuyck, N.F.de Rooij and P.Vettiger. "Low-cost PDMS seal ring for single side wet etching of MEMS structures", Sensors and Actuators A Physics, vol. 70, no. 1-3, 1998, p. 191-194.

[94] D.Lange, C.Hagleitner, O.Brand and H.Baltes. "CMOS resonant beam gas sensor with integrated amplifier", Transducers 1999, p. 1020-1023.

[95] H.E.Endres and S.Drost. "Optimization of the geometry of gas sensitive interdigital capacitors", Sensors and Actuators B Chemical, vol. 4, no.1-2, 1991, p. 95-98.

[96] M.Maute, S.Raible, F.E.Prins and D.P.Kern. "Detection of volatile compounds (VOCs) with polymer coated cantilevers: change in resonances of thermal noise", Transducers 1999, p. 636-639.

- [97] M.Haug, K.D.Schierbaum, H.E.Endres, S.Drost and W.Göpel. "Controlled selectivity of polysiloxane coatings: their use in capacitance sensors", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 32, no. 1-3, 1992, p. 326-332.
- [98] H.P.Lang, M.K.Baller, R.Berger, Ch.Gerber, J.K.Gimzewski, F.M.Baniston, P.Fornaro, J.P.Ramseyer, E.Meyer, and H.J.Güntherodt. "An artificial nose based on a micromechanical cantilever array", *Analytica Chimica Acta*, vol. 393, 1999, p. 59-65.
- [99] B.H.Kim, F.E.Prins, D.P.Kern, S.Raible, and U.Weimar. "Multicomponent analysis and prediction with a cantilever array based gas sensor", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 78, no. 1-3, 2001, p. 12-18.
- [100] C.Hagleitner, D.Lange, N.Kerness, A.Kummer, W.H.Song, A.Hierlemann, O.Brand and H.Baltes. "CMOS single-chip multisensor gas detection system", *Micro Electro Mechanical Systems, 2002, The Fifteenth IEEE International Conference on*, 20-24 Jan 2002, p. 244-247.
- [101] A.Hierlemann, D.Lange, C.Hagleitner, N.Kerness, A.Koll, O.Brand and H.Baltes. "Application-specific sensor systems based on CMOS chemical microsensors", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 70, no. 1-3, 2000, p. 2-11.
- [102] R.K.Jensen, S.Koncek and M.Zinbo. "Liquid phase autoxidation of organic compounds at elevated temperatures. Kinetics and mechanisms of the formation of cleavage products in heptadecane", *Journal of the American Chemical Society*, vol. 101, 1992, p. 7742.
- [103] D.P.de Jesus, C.A.Neves and C.L.do Logo. "Determination of boron by using quartz crystal resonator coated with N-Methyl-D-Glucamine modified poly(epichlorhydrin)", *Analytical Chemistry*, vol. 74, 2002, p. 3274.
- [104] F.L.Dickert, P.Forth, P.A.Lieberzeit and G.Voigt. "Quality control of automotive engine oils with mass sensitive chemical sensors- QCMs and molecularly imprinted polymers" *Journal Analytical Chemistry*, vol. 366, 2000, p. 1327.
- [105] M.R.Deakin and D.A.Buttry. "Electrochemical applications of the quartz crystal microbalance", *Analytical Chemistry*, vol. 61, 1989, p. 1147.
- [106] J.Zhang, B.Senger, P.Sheat, J-C.Voegel and P.Lavalle. "Studying polyelectrolyte multilayer films by QCM-D", <http://www.q-sense.com/main.applications.html>

- [107] K.K.Kanazawa and J.G.Gordon. *Analytical Chemistry*, vol. 57, 1985, p. 1770-1771.
- [108] Y.R.Rob, H.B.Kim, Y.J.Lee, H.M.Cho, J.S.Chong and S.Baik. "Development of SAW gas sensor for monitoring SO_x gas", *Proceedings of Ultrasonics Symposium*, 1995, vol. 1, p. 473-476.
- [109] C.Caliendo et al. "Piezoelectric AlN film for SAW devices applications", *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symp. (USA)*, 1993, vol. 1, p. 249-252.
- [110] H.Ieki and M.Kadoia. "ZnO thin films for high frequency SAW devices", *Proceedings of IEEE Ultrasonics Symp.*, 1999, vol. 1, p. 281-289.
- [111] J.D.Zook, D.W.Burns, H.Guckel, J.J.Sniegowski, R.L.Engelstad and Z.Feng. "Characteristics of polysilicon resonant microbeams", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 35, no.1, 1992, p. 51-59.
- [112] R.Legtenberg and H.A.C. Tilmans. "Electrostatically driven vacuum-encapsulated polysilicon resonators. Part I. Design and fabrication", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 45, no. 1, 1994, p. 57-66.
- [113] H.A.C. Tilmans and R.Legtenberg. "Electrostatically driven vacuum-encapsulated polysilicon resonators. Part II. Theory and performance", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 45, no. 1, 1994, p. 67-84.
- [114] F.Babarada, D.S.Popescu, C.Dunare, M.Babarada, C.Gingu, D. Dascalu, F.Craclunolu and C.Danila. "Vacuum encapsulated polysilicon resonators with electrostatic excitation and capacitive detection", *Proceedings of the MME 1996*, p. 300-302.
- [115] M.W.Judy and R.T.Howe. "Polysilicon hollow beam lateral resonators", *IEEE* 1993, p. 265-271.
- [116] W.C.Tang, M.G.Lim, and R.T.Howe. "Electrostatically balanced comb drive for controlled levitation", *IEEE* 1990, p. 23-27.
- [117] W.C.Tang, H.Nuguyen and R.T.Howe. "Laterally driven polysilicon resonant microstructures", *Sensors and Actuators*, vol. 20, no. 1-2, 1989, p. 25-32.
- [118] C.Burrer and J.Esteve. "Thermally driven micromechanical bridge resonators", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 42, no. 1-3, 1994, p. 680-684.
- [119] J.Yang, T.Ono and M.esashi. "Mechanical behaviour of ultrathin microcantilever", *Sensors and Actuators B Chemical*, vol. 82, 2000, p. 102-107.

- [120] R.A.Buser and N.F. de Rooij. "Resonant silicon structures", *Sensors and Actuators*, vol. 17, no. 1-2, 1989, p. 145-154.
- [121] J.D.Zook and D.W.Burns. "Resonant microbeam strain transducers", *IEEE* 1991, p. 529-532.
- [122] K.Wang, Y.Yu, A-C Wong and C. T-C Nguyen. "VHF free-free beam high-Q micromechanical resonators", 12th International IEEE Micro Electro Mechanical Systems Conference, 1999, p. 453-458.
- [123] G.Stemme. "Resonant silicon sensors", *Journal Micromechanical microengineering*, vol. 1, 1991, p. 113-125.
- [124] J.D.Zook and D.W.Burns. "Characteristics of polysilicon resonant microbeams", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 35, no. 1, 1992, p. 51-59.
- [125] R.A.Buser and N.F.de Rooij. "Very high Q-factor resonators in monocrystalline silicon", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 21, no. 1-3, 1990, p. 323-327.
- [126] Y.Ahn and H.Guckel. "Fabrication process for high Q-polysilicon beam resonators", *Sensors and Materials*, vol. 12, no. 3, 2000, p. 143-162.
- [127] R.T.Howe and R.S.Muller. "Resonant microbridge vapor sensor", *IEEE Transaction on Electron Devices*, vol. Ed.33, no.4, 1986.
- [128] W.C.Tang, M.G.Lim, and R.T.Howe. "Electrostatic comb-drive of lateral polysilicon resonators", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 21, no. 1-3, 1990, p. 328-331.
- [129] J.A.Plaza. "μAcelerómetros de silicio". Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra, octubre de 1997.
- [130] S.S.Lee, and R.M.White. "Self-excited piezoelectric cantilever oscillators", *Transducers* 1995.
- [131] N.Elejalde, F.Y.Ogrin, S.L.Lee, Y.Su, G.Ensell, A.G.R.Evans and A.Brunnschweiler. "Development of a device to measure small mass changes based on resonating microfabricated structures", *Micromechanics Europe Workshop (MME)*, 1989.
- [132] C.Linder and N.F.de Rooij. "Investigations on free standing polysilicon beams in view of their application as transducers", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 21, no. 1-3, 1990, p. 1053-1059.
- [133] M.Haug, K.D.Schierbaum, G.Gauglitz and W.Göpel. "Chemical sensors based upon polysiloxanes comparison between optical, quartz microbalance,

calorimetric and capacitance", Sensors and Actuators B Chemical, vol. 11, no. 1-3, 1993, p 383-391.

[134] D.S.Ballantine, R.M.White, S.J.Ricco, G. C.Frye, E.T.Zellers and H.Wohltjen. "Acoustic Wave Sensors, Design and Physico-chemical applications", CA Academic, 1997.

[135] K.E.Petersen. "Silicon as a mechanical material", Proceedings of the IEEE, vol. 70, no. 5, 1982, p. 420-456.

[136] Foundry Service: Surface Micromachining. (Mathias.Illing@rt.bosch.de)

[137] Robert Bosch Micromachining Foundry Service.

[138] S.Renard. "Industrial MEMS on SOI", MME 1999, p. 214-218.

[139] P.Seppälä, J.Kiihamäki, A.Oja, T.Varpula and K.Vepsäläinen. "Micromechanical resonator based on SOI structure", MME 1999, p. 101-104.

[140] Multi project wafer EPI-SOI surface micromachining. Design rules. Version 03/99. Laboratoire d'électronique de technologie et d'instrumentation LETI.

[141] <http://mems.mcnc.org>

[142] M.A.Benitez, J.Esteve and J.Bausells. "Bulk silicon micro electromechanical devices fabricated from commercial BESOI substrates", Micromechanical systems, Proceedings of the IEEE, 1995, p. 404-407.

[143] M.A.Benitez, J.Esteve and J.Bausells. "Bulk silicon microelectromechanical devices fabricated from commercial bonded and etched-back silicon-on-insulator substrates", Sensors and Actuators A Physical, vol. 50, no. 1-2, 1995, p. 99-103.

[144] S.Kassegne, M.Madou, R.Whitten, J.Zoval, E.Mather, K.Sarkar, D.Hodko and S.Maity. "Design issues in SOI-based high sensitivity piezoresistive cantilever devices", http://www.digitaladdis.com/sk/SPIE_CantileverPaper.pdf

[145] A.Prak, T.S.J.Lammerink and J.H.J.Fluitman. "Review of excitation and detection mechanisms for micromechanical resonators", Sensors and Materials, vol. 5, no. 3, 1993, p. 143-181.

[146] O.Brand and H.Baltes. "Micromachined resonant sensors- An Overview", Sensors Update.

- [147] K.Petersen, F.Pourahmadi and J.Brown. "Resonant beam pressure sensor fabricated with silicon fusion bonding", *Solid-State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS'91, International Conference, 24-27 June, 1991*, p. 664-667.
- [148] S.Bouwstra, R.Legtenberg, H.A.C.Tilmans and M.Elwenspoek. "Resonating microbridge mass flow sensor", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 21, no. 1-3, 1990, p. 332-335.
- [149] M.A.Grétillat, C.Linder, and N.F.de Rooij. "Multilayer polysilicon resonators including shielding for excitation and detection", *Transducers 1993*, p. 292-295.
- [150] T.S.J.Lammerink, M.Elwenspoek, R.H.Van Ouwkerk, S.Bouwstra and J.H.J.Fluitman. "Performance of thermally excited resonators", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 21, no. 1-3, 1990, p. 352-356.
- [151] T.Ivanov, T.Gotszalk, P.Grabiec, E.Tomerov and I.W.Rangelow. "Thermally driven micromechanical beam with piezoresistive deflection readout", *Microelectronic Engineering*, vol. 67-68, 2003, p. 550-556.
- [152] H.Jianqiang, Z.Changchun, L.Junhua and H.Yongning. "Dependence of the resonance frequency of thermally excited microcantilever resonators on temperature", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 101, no. 1-2, 2002, p. 37-41.
- [153] N.Elejalde, F.Y. Ogrin, S.L.Lee. "Development of a device to measure small mass changes based on resonating microfabricated structures", *MME 1990*, p. 105-108.
- [154] H.C.Nathanson, W.E.Newel, R.A.Wickstrom and J.R.Davis. "The resonant gate transistor", *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. Ed.14, no.3, 1967, p. 117-133.
- [155] A.Weinert and G.I.Andersson. "High resolution resonant double gate transistor for oscillating structures", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 90, no. 1-2, 2001, p. 20-30.
- [156] E.Hynes, M.O'Neil, D.McAuliffe, H.Berney, W.A.Lane, G.Kelly and M.Hill. "Development and characterisation of a surface micromachined FET pressure sensor on a CMOS process", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 76, no. 1-3, 1999, p. 283-292.
- [157] H.A.C.Tilmans, D.J.Untema and H.J.Fluitman. "Single element excitation and detection of (micro)mechanical resonators", *Solid-State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS'91, International Conference 1991, 24-27 June, 1991*, p. 533-537.

- [158] Ph.Luginbuhl, G-A.Racine, Ph.Lerch, B.Romanowicz, K.G.Brooks, N.F.de Rooij, Ph.Renand and N.Setter. "Piezoelectric cantilever beams actuated by PZT sol-gel thin film", Eurosensors IX, 1995, p. 413-416.
- [159] R.E.Hetrick. "Vibrating Cantilever mass flow sensor", Sensors and Actuators A Physical, vol. 21, no. 1-3, 1990, p. 373-376.
- [160] S.S.Lee and R.M.White. "Self-excited piezoelectric cantilever oscillators", Eurosensors IX, 1995, p. 417-420.
- [161] S.P.Beeby and N.M.White. "Silicon micromechanical resonator with thick-film printed vibration excitation and detection mechanisms", Sensors and Actuators A Physical, vol. 88, no. 3, 2001, p. 189-197.
- [162] D.L. De Voe. "Piezoelectric thin film micromechanical beam resonators", Sensors and Actuators A Physical, vol. 88, no. 3, 2001, p. 263-272.
- [163] K.Y.Yasumura, J.A.Chiaverint and T.W.Kenny. "Thermoelastic dissipation in silicon nitride microcantilevers", Transducers 1999, p. 564-567.
- [164] M.Maute, S.Raible, F.e.Prins, D.P.Kern, H.Ulmer, U.Weimar and W.Göpel. "Detection of volatile organic compounds (VOCs) with polymer coated cantilevers", Sensors and Actuators B Chemical, vol. 58, no. 1-3, 1999, p. 505-511.
- [165] B.H.Kim, F.E.Prins, D.P.Kern, S.Raible and U.Weimar. "Multicomponent analysis and prediction with a cantilever array based gas sensor", Sensors and Actuators B Chemical, vol. 78, no. 1-3, 2001, p. 12-18.
- [166] S.Bouwstra, F.R.Blom, T.S.J.Lammerink, H.Yntema, P.Schrap, J.H.J.Fluitman, and M.Elwenspoek. "Excitation and detection of vibrations of micromechanical structures using a dielectric thin film", Sensors and Actuators, vol. 17, no. 1-2, 1989, p. 219-223.
- [167] D.J.Ijtema and H.A.C.Tilmans. "Static and dynamic aspects of an air gap capacitor", Sensors and Actuators A Physical, vol. 35, no. 2, 1992, p. 121-128.
- [168] L.Rosengren, J.Söderkvist and L.Smith. "Micromachined sensor structures with linear capacitive response", Sensors and Actuators A Physical, vol. 31, no. 1-3, 1992, p. 200-205.
- [169] J.M.Lysko, E.Stolarski and R.S.Jachowicz. "Capacitive silicon pressure sensor based on the one side wafer processing", Solid-State Sensors and Actuators, 1991. TRANSDUCERS'91, International Conference on, 24-27 June 1991, p. 685-688.

[170] M.Bao, H.Yang, H.Yin and S.Shen. "Effects of electrostatic forces generated by the driving signal on capacitive sensing devices", *Sensors and Actuators A Physical*, vol. 84, no. 3, 2000, p. 213-219.

[171] M.C.Petty and R.Casalini. "Gas sensing for the 21st century: The case for organic thin films", *Engineering Science and Education Journal*, vol. 10, no. 3, 2001, p. 99-105.

[172] <http://plc.cwru.edu/tutorial/enhanced/files/polymers/therm/therm.htm>

[173] University of Nottingham. School of Mechanical Materials, Manufacturing Engineering & Management. Polymer Engineering. "Review of polymer structure", p. 1-7.

[174] <http://www.vistatek.com/stereo.html>

[175] M.A.Benítez, J.A.Plaza, J.Esteve, L.Svensson. "Descripción del conjunto de máscaras CNM047 para la fabricación de dispositivos micromecanizados en superficie: micromotores, acelerómetros y sensores de presión", *Nota técnica CNM*, nº. 86/95, diciembre 1995.

[176] J.A.Plaza, M.A.Benitez, L.Svensson, J.Esteve and E.Lora-Tamayo. "New FET accelerometer based on surface micromachining", *Euroensors X*, Leuven, Belgium, 1996.

[177] M.A.Benitez, J.A.Plaza, L.Svensson, J.Esteve and E.Lora-Tamayo. "Electrical test structures for polysilicon mechanical characterisation", *7th Micromechanics Europe Workshop, MME 1996*.

[178] J.A.Plaza, M.A.Benitez, E.Farrés, and J.Esteve. "Adaptación de un transistor para la detección de aceleraciones y vibraciones mediante micromecanización superficial", *CDE 1997*.

[179] J.A.Plaza, J.Esteve and E.Lora-Tamayo. "Cantilever beam accelerometer with selftest system: Simulation, technology and experimental results"

[180] M.A.Benitez, J.Esteve, M.S.Benrakkad, J.R.Morante, J.Samitier and J.A.Schweitz. "Stress profile characterization and test structures analysis on single and double ion implanted LPCVD polycrystalline silicon", *Transducers 1995*.

[181] M.Morata, J.A.Plaza, M.A.Benitez, E.Figueras and C.Cané. "Development of silicon resonator on surface micromachining", *Actas de la Conferencia de Dispositivos Electrónicos, 2001, Granada, 15 y 16 de febrero de 2001*, p. 237-240.

[182] M.Morata, J.A.Plaza, M.A.Benitez, E.Figueras and C.Cané. "Surface micromachined beams with floating gate transistor", 12th micromechanics europe workshop, MME 2001, 16th-18th september 2001, Cork (Ireland), p. 261-264.

[183] E.Figueras, M.Morata, J.A.Plaza, J.Amírola, A.Rodríguez and C.Cané. "Characterisation of surface micromachined beams with floating gate transistor", IECON 2002, Sevilla.

[184] M.Morata. "Diseño y fabricación de estructuras mecánicas móviles con detección mediante transistores MOS de puerta flotante", Trabajo de Investigación de Tercer Ciclo, UAB, diciembre 2001.

[185] D.E.Alarcon y D.R.Perera. "AF4.- Leyes de comportamiento de los materiales", VI Curso de especialista Universitario en teoría y aplicación práctica del método de los elementos finitos. Ingeciber S.A.

[186] Gere y Timoshenko. "Mecánica de Materiales", 4^a edición, Thomson editores, 1998.

[187] F.Shen, P.Lu, S.J.O'Shea, K.H.Lee and T.Y.Ng. "Thermal effects on coated resonant microcantilevers", Sensors and Actuators A Chemical, vol. 95, 2001, p.17-23.

[188] Y.Kanda, "A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon", IEEE Transaction of Electronic Devices. vol. 29, 1982, p. 64 – 70.

[189] Ansys 6.0 Documentation, tutorials.

[190] M.Morata, E.Figueras, I.Gracia, L.Fonseca, C.Cané. "Thermal and mechanical simulation of bulk resonators", Design, Test and Packaging, DTIP 2003, Cannes.

[191] <http://www.abor.de>

[192] "CMOS Integrated Chemical Sensors for Application Specific Micronoses", H.Blates, O. Brand, C.Haigleitmer, A. Hierlemann, N.Kerness, A.Koll, D. Lange, R. Vogt, Procesings of ISOEN, 1999, p. 95-98,.

- [193] "CMOS Resonant Beam Gas Sensing System with On-Chip Self Excitation", D. Lange, C. Hagleitmer, O. Brand and H. Baltes, 2001, p. 547-552.
- [194] <http://shinetsu.co.jp>
- [195] <http://www.siliconquest.com>
- [196] <http://www.universitywafer.com/>
- [197] Christian Burrer. "Design, fabrication and characterisation of resonant silicon accelerometers", Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, 1995.
- [198] "*Micromachining and micropackaging of transducers*", Elsevier Science Publishers B.V, 1985, pp.41-61.
- [199] "*Mechanism of Anodic Bonding of Silicon to Pyrex Glass*", Techn. Digest of the IEEE Solid State Sensor and Actuator Workshop, 1988, p. 109-110.
- [200] Journal of applied physics, 1965, vol.36, no.1.
- [201] Christian Burrer. Trabajo de investigación de Tercer Ciclo
- [202] M.Morata. "Descripción del juego de máscaras CNM136 para la fabricación de dispositivos resonantes verticales y laterales micromecanizados en superficie: voladizos, puentes y acelerómetros", Nota técnica, 2000.
- [203] O.Paul, P.Ruther, L.Plattner and H.Baltes. "A Thermal van der Pauw Test structure", IEEE Transactions on semiconductor manufacturing, vol. 13, no. 2, May 2000.

Nomenclatura utilizada

A continuación se detalla en la siguiente tabla , la nomenclatura que ha sido utilizada para nombrar las estructuras en función de su geometría, dimensiones y configuración de las resistencias del puente de Wheatstone.

estructura/chip	dimensiones (μm x μm)	configuración resistencias	nomenclatura
voladizo	300 x 300	a	Aa
voladizo	300 x 300	b	Ab
voladizo	300 x 300	c	Ac
voladizo	1000 x 500	estándar	B
voladizo	1000 x 1000	estándar	C
doble voladizo	1000 x 1000	estándar	D
puente	1000 x 1000	estándar	E
puente	1000 x 500	estándar	F