



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada  
Sistemas de información y Comunicaciones

# Máster en Tecnologías de Telecomunicación



## Trabajo Fin de Máster

### Aportaciones al diseño y fabricación de transductores piezoresistivos sobre membranas en tecnología MetaIMUMPs de MEMSCAP

Autor: J. Acerina Sosa Herrera  
Tutor: Juan Antonio Montiel Nelson  
Fecha: Septiembre 2013



t +34 928 451 086 | iuma@iuma.ulpgc.es  
f +34 928 451 083 | www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira  
35017 Las Palmas de Gran Canaria





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada  
Sistemas de información y Comunicaciones

# Máster en Tecnologías de Telecomunicación



## Trabajo Fin de Máster

Aportaciones al diseño y fabricación de  
transductores piezoresistivos sobre membranas en  
tecnología MetaIMUMPs de MEMSCAP

### HOJA DE FIRMAS

**Alumno:** J. Acerina Sosa Herrera      Fdo.:

**Tutor:** Juan Antonio Montiel Nelson      Fdo.:

**Fecha:** Septiembre 2013



t +34 928 451 086 | iuma@iuma.ulpgc.es  
f +34 928 451 083 | www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira  
35017 Las Palmas de Gran Canaria





UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada  
Sistemas de información y Comunicaciones

# Máster en Tecnologías de Telecomunicación



## Trabajo Fin de Máster

Aportaciones al diseño y fabricación de  
transductores piezoresistivos sobre membranas en  
tecnología MetaIMUMPs de MEMSCAP

### HOJA DE EVALUACIÓN

Calificación: .....

Presidente

Fdo.:

Secretario

Fdo.:

Vocal

Fdo.:

Fecha: Septiembre 2013



t +34 928 451 086 | iuma@iuma.ulpgc.es  
f +34 928 451 083 | www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira  
35017 Las Palmas de Gran Canaria



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA  
**Instituto Universitario de Microelectrónica Aplicada**  
Sistemas de información y Comunicaciones



t +34 928 451 086 | iuma@iuma.ulpgc.es  
f +34 928 451 083 | www.iuma.ulpgc.es

Campus Universitario de Tafira  
35017 Las Palmas de Gran Canaria

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	Introducción .....	7
1.1	Objetivos .....	8
2	Estado del arte sobre sensores piezoresistivos .....	11
2.1	Piezoresistividad .....	11
2.2	Silicio y silicio poli-cristalino.....	14
2.3	Aplicaciones de sensores piezoresistivos .....	16
	Acelerómetros.....	16
	Sensores de presión .....	19
	Sensores táctiles .....	23
	Sensores de flujo .....	24
2.4	Diseño transductores piezoresistivos basados en membrana.....	28
3	Tecnología MetalMUMPS .....	31
4	Metodología para la optimización de piezoresistencias .....	35
4.1	Análisis con elementos finitos de la membrana .....	35
4.2	Optimización de las pendientes resistivas .....	40
4.3	Optimización del valor resistivo en reposo .....	46
4.4	Análisis de la interconexión del transductor piezoresistivo .....	49
4.5	Diseño físico de las piezoresistencias y ajuste de parámetros.....	52
5	Implementación con tecnología MetalMUMPs de MEMSCAP .....	63
5.1	Diseño jerárquico .....	63
5.2	Diseño en diferentes tamaños.....	67
6	Resumen de Resultados y Conclusiones .....	73
	Referencias.....	77



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Galga extensiométrica de tipo serpenteante helicoidal [1].	13
Figura 2.2: Acelerómetro piezoresistivo [1].	16
Figura 2.3: Proceso de fabricación de una masa unida a una viga voladiza a partir de una oblea de silicio [1].	17
Figura 2.4: Sensor de aceleración en plano [1].	18
Figura 2.5: Proceso de fabricación del sensor de aceleración de la Figura 2.4 [1].	19
Figura 2.6: Ejemplo de sensor de presión basado en membrana [1].	20
Figura 2.7: Vistas superior y transversal de un sensor de presión fabricado mediante micro-mecanización por superficie [1].	21
Figura 2.8: Proceso de fabricación de sensor de presión por micro-mecanizado por superficie [1].	22
Figura 2.9: Sensor piezoresistivo táctil [1].	24
Figura 2.10: Sensor piezoresistivos de tensión de rozamiento [1].	25
Figura 2.11: Proceso de fabricación de un sensor piezoresistivo de tensión de rozamiento [1].	26
Figura 2.12: Esquema de un AHC [1].	26
Figura 2.13: Proceso de fabricación del dispositivo de la Figura 2.12 [1].	27
Figura 2.14: Diseño de membrana compuesto por plataforma suspendida [23].	28
Figura 2.15: Membrana de silicio con piezoresistencias en puente de Wheatstone.	29
Figura 2.16: Puente de Wheatstone [16].	30
Figura 4.1: modelo sólido inicial del sensor de presión.	37
Figura 4.2: Desplazamiento del polisilicio a lo largo del eje Z .	37
Figura 4.3: Distribución del estrés en la capa de polisilicio.	39
Figura 4.4: Distribución de la componente en Y del estrés en el borde superior del diafragma.	40
Figura 4.5: Piezoresistencias en configuración de puente de Wheatstone.	41
Figura 4.6: Curvas de resistencia de PZR3 vs. presión para variaciones de <i>Edge_offset_x</i> .	42
Figura 4.7: Curvas de resistencia de PZR2 vs. presión para variaciones de <i>Edge_offset_y</i> .	43
Figura 4.8: Representación de las pendientes de las curvas de resistencia de PZR2 y PZR3 frente a <i>Edge_offset</i> .	44
Figura 4.9: Punto de corte de las pendientes resistivas de PZR2 y PZR3.	45
Figura 4.10: Pendientes resistivas de PZR2 y PZR3.	45
Figura 4.11: Curva de resistencia de PZR2 vs. Presión para PZR_Length = 90 $\mu\text{m}$ y PZR_Width = 23 $\mu\text{m}$ .	48
Figura 4.12: Curva de la componente X del estrés en las proximidades del borde derecho de la membrana.	48
Figura 4.13: Curva de resistencia de PZR3 vs. Presión para PZR_Length = 50 $\mu\text{m}$ y PZR_Width = 13 $\mu\text{m}$ .	49
Figura 4.14: PZR2 y PZR4 con conectores hacia el exterior de la membrana.	50
Figura 4.15: Nueva configuración para PZR1 y PZR3 con conectores hacia el exterior de la membrana.	51
Figura 4.16: Sistema de piezoresistencias.	53
Figura 4.17: Curva de resistencia de PZR_T frente a la presión.	55
Figura 4.18: Curvas de resistencia de CONN_1T y CONN_2T vs. Presión.	55
Figura 4.19: Curva de resistencia de PZR_TOP frente a la presión.	56
Figura 4.20: Curvas de resistencia de PZR_1R y PZR_2R frente a la presión.	57
Figura 4.21: Curva de resistencia de TAP_R vs. Presión.	58
Figura 4.22: Curva de resistencia del conjunto PZR_RIGHT vs. Presión.	58
Figura 4.23: Punto de corte de las pendientes resistivas de PZR_TOP y PZR_RIGHT.	60
Figura 4.24: Curva de resistencia de PZR_RIGHT frente a la presión.	60
Figura 4.25: Curvas de resistencia PZR_TOP y PZR_RIGHT vs. Presión.	61
Figura 5.1: <i>Layout</i> de las piezoresistencias y el electrodo de polisilicio.	64
Figura 5.2: <i>Layout</i> completo de la capa de polisilicio.	65
Figura 5.3: Diseño jerárquico del dispositivo a fabricar.	66

Figura 5.4: Distribución de la componente Y del estrés para distintos tamaños de membrana. .... 68  
Figura 5.5: Imagen de los diseños a fabricar en la oblea de la División MEMS del IUMA. .... 71

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Valores de longitud y ancho para PZR_TOP $\approx 4 \text{ K}\Omega$ . .....	54
Tabla 4.2: Valores de longitud y ancho para PZR_RIGHT $\approx 4 \text{ K}\Omega$ . .....	57
Tabla 4.3: Variación relativa de resistencia. ....	59
Tabla 4.4: Dimensiones y sensibilidad de las piezoresistencias. ....	61
Tabla 5.1: Dimensiones y sensibilidad de las piezoresistencias del diseño S <sub>1</sub> . ....	69
Tabla 5.2: Dimensiones y sensibilidad de las piezoresistencias del diseño S <sub>2</sub> . ....	69
Tabla 5.3: Dimensiones y sensibilidad de las piezoresistencias del diseño S <sub>3</sub> . ....	69



## 1 Introducción

Las medidas de magnitudes mecánicas –presión, deformación, entre otros– es una parte clave en muchos de los sistemas comerciales e industriales, por lo que los sensores para la medida de magnitudes mecánicas constituyen el mayor segmento de mercado de los dispositivos MEMS mecánicos.

En las últimas décadas, como resultado de los nuevos avances en el campo de los sistemas micro-electromecánicos (MEMS), los sensores basados en silicio han ganado presencia en el sector de la instrumentación.

Un sensor MEMS es, al menos, de un orden de magnitud menor que un sensor/actuador convencional. Además de ser fácilmente integrados en sistemas electrónicos, pueden presentar mejores características de rendimiento, tales como sensibilidad y resolución.

No obstante, en muchos casos para el desarrollo de dispositivos MEMS se requieren procesos de fabricación que el silicio mono-cristalino no permite, como es el micro-mecanizado por superficie (*surface micromachining*), que consiste en la creación de micro-estructuras por deposición y grabado de las diferentes capas en la parte superior del sustrato, o la litografía por volumen (*bulk micromachining*), que define estructuras dentro del sustrato mediante el grabado selectivo.

Este trabajo se centra en el diseño y fabricación de un transductor piezoresistivo sobre membrana con tecnología MetalMUMPs de MEMSCAP, para el desarrollo de sensores/actuadores de uso en aplicaciones biomédicas, el cual queda enmarcado dentro de los proyectos BATTLEWISE, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (TEC2011-29148-C02-01).

En particular, los transductores piezoresistivos se utilizarán para la medida indirecta de deformaciones de las membranas que los incluyan. A través de un

proceso de calibración posterior, se obtendrá el valor de la magnitud mecánica de interés. En el proyecto BATTLEWISE se utilizan sensores/actuadores basados en capacidades y en piezoresistencias. En este Trabajo de Fin de Máster se detallan qué aportaciones se han realizado en el diseño de un sensor/actuador basado en membrana. Este dispositivo permite medir presión, variar una capacidad entre electrodos –varactor– y actuar como una micro-bomba. Todo ello es posible gracias a la reversibilidad del dispositivo MEMS diseñado que puede actuar como sensor o como actuador.

Esta fase del proyecto está orientada a la calibración tecnológica con la finalidad de tener en cuenta la dispersión de proceso, mediante la fabricación de un conjunto de dispositivos escalados y la medida de muestras –dispersión de oblea y de dado. En la actualidad, no hay datos de dispersión de proceso del fabricante MEMSCAP. El dispositivo realizado contiene dos membranas, una de ellas –de 0.7  $\mu\text{m}$  de espesor en polisilicio– se deforma por campo eléctrico. Se ha elegido realizar la deformación por campo eléctrico, dada la dificultad y el coste asociado de empaquetar la muestra –prototipo– con conector de presión. La deformación mecánica de una membrana sometida a presión es equivalente a la deformación por campo eléctrico.

## 1.1 Objetivos

Como objetivo general, este trabajo pretende analizar y optimizar las variables de diseño de un transductor piezoresistivo sobre membrana de polisilicio de alta sensibilidad, para su integración en un sensor/actuador capacitivo fabricado con la tecnología MetalMUMPs de MEMSCAP. Por lo tanto, se establecen como objetivos específicos:

1. Simular y analizar el comportamiento mecánico de una membrana de polisilicio integrada en un dispositivo diseñado para su fabricación en tecnología MetalMUMPs.
2. Simular y analizar el comportamiento eléctrico de un conjunto de piezoresistencias ubicadas en la capa de polisilicio de dicho dispositivo.
3. Ajustar y optimizar los parámetros de diseño de las piezoresistencias para obtener un transductor de alta sensibilidad.
4. Implementar el transductor piezoresistivo con tecnología MetalMUMPs para la calibración tecnológica.

Como se observa a través de este conjunto de objetivos, la finalidad es la calibración tecnológica de sensores/actuadores basados en membranas en tecnología MetalMUMPS de MEMSCAP. Sin lugar a dudas, los errores sistemáticos que se deriven de las simulaciones han de estar controlados, mientras que los aleatorios –dispersión de proceso– se analizan con la calibración tecnológica.

La principal fuente de error sistemático, proviene de aquellos detalles constructivos que no han sido tenidos en cuenta en las simulaciones numéricas, bien por ser de segundo orden o superior, o bien por las propias limitaciones de recursos de computación.



## 2 Estado del arte sobre sensores piezoresistivos

El interés por las tecnologías MEMS ha crecido considerablemente en las últimas décadas en sectores como el energético, medioambiente, la automoción y la biomedicina, debido no sólo a las reducidas dimensiones que se consiguen, sino también a las altas prestaciones que presentan y a la posibilidad de combinar los dominios eléctrico y mecánico, entre otros, lo que permite un mejor control de los entornos en los que actúan.

Los métodos de detección que se emplean consisten en técnicas de detección óptica, mecánica, magnética y electromecánica, o una combinación de las anteriores.

Un ejemplo de detección electromecánica, son los sensores piezoresistivos que se basan en una propiedad de los materiales llamada piezoresistividad, por la cual la resistencia del material cambia con el estrés o la tensión de deformación que experimenta al ser sometido a algún tipo de fuerza o presión. Esto se debe a que la resistividad del material depende de la posición interna y del movimiento de sus átomos, que varían cuando se ven afectados por dicha tensión de deformación.

### 2.1 Piezoresistividad

En 1856, William Thomson, más comúnmente conocido como Lord Kelvin, descubrió por primera vez el efecto piezoresistivo al observar que la resistencia eléctrica de los cables de hierro y cobre cambiaba cuando eran sometidos a una fuerza mecánica. Este fenómeno pasó a ser conocido como efecto piezoresistivos o piezoresistividad.

Esta propiedad ha sido ampliamente aprovechada en el campo de los sensores micro-electromecánicos, puesto que proporciona un mecanismo fácil y

directo de transducción de energía y/o señal entre los dominios mecánico y eléctrico [1].

Si se considera un transductor de longitud  $l$  y de área de sección transversal  $A$ , el valor de la resistencia viene dado por

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Por tanto, el valor de la resistencia es determinado tanto por la resistividad volumétrica ( $\rho$ ) del material como por las dimensiones del mismo.

Así que, existen dos motivos por los que un elemento resistivo puede cambiar su resistencia. En primer lugar, las dimensiones -incluyendo la longitud y la sección transversal- cambian con el estrés al que se ve sometido el material cuando se deforma.

En este sentido, hay que tener en cuenta que el estrés transversal puede darse como respuesta a una carga longitudinal. Por ejemplo, si se incrementa la longitud del resistor, su sección transversal se reduce siguiendo la relación de Poisson.

En segundo lugar, la resistividad de ciertos materiales puede cambiar en función del estrés ( $\sigma$ ), siendo en este caso la magnitud del cambio mayor que lo que se puede lograr a partir de lo anterior.

Por tanto, una piezoresistencia puede definirse como un elemento cuya resistividad cambia al sufrir una tensión o estrés de deformación. El cambio relativo de resistencia debido a una deformación longitudinal se denomina factor de galga longitudinal, mientras que el cambio de resistencia debido a una

deformación transversal se llama factor de galga transversal. Para cada material, los factores de gauge longitudinal y transversal son distintos.

Un ejemplo de transductor cuyo funcionamiento está basado en el efecto piezoresistivo es la galga extensiométrica (en inglés *strain gauge*), que se emplea para la medición de magnitudes mecánicas como la presión, carga o deformación.

Este tipo de dispositivos suelen estar disponibles en forma de parches de plástico con revestimiento de metal que son adheridos a los elementos mecánicos objeto de análisis. Normalmente, se usa un conductor zigzagueante con el objetivo de incrementar la longitud del elemento resistivo y, por consiguiente, la cantidad de resistencia total por área (Figura 2.1) [1].

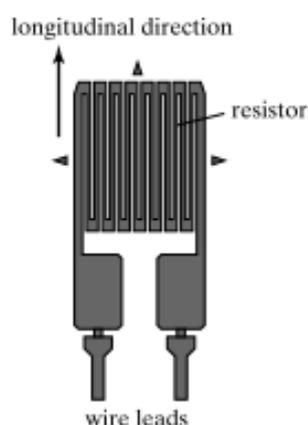


Figura 2.1: Galga extensiométrica de tipo serpenteante helicoidal [1].

A la hora de elegir una galga extensiométrica ha de tenerse en cuenta la precisión, la estabilidad a largo plazo, resistencia cíclica, rango de temperatura operacional, facilidad de instalación, elongación tolerable y estabilidad en ambientes hostiles. Para satisfacer estos requisitos, se comercializan galgas compuestas por finas capas de aleación de metal, en lugar de metal puro, fabricadas en vigas y membranas mecánicas usando procesos de integración monolíticos.

Aunque las galgas extensiométricas pueden soportar elongaciones mayores y presentan mayor robustez, su factor de galga es menor que el de los transductores piezoresistivos fabricados con materiales semiconductores, como el silicio.

## 2.2 Silicio y silicio poli-cristalino

Casi todos los materiales tienen propiedades piezoresistivas, sin embargo, Charles Smith, trabajando para los laboratorios Bell, publicó en 1954 las propiedades piezoresistivas del silicio y del germanio [2], después de descubrir que eran mucho más sensibles al efecto piezoresistivo que la mayoría de metales. De ahí que, en los años 60 empezaran a usarse delgadas membranas de silicio como sensores de presión. Este tipo de sensores se fabrican mediante el proceso de micro-mecanizado por volumen.

El silicio es un material excelente para la construcción de sensores de presión de pequeña magnitud, puesto que presenta una extraordinaria respuesta piezoresistiva. No obstante, para aumentar el efecto piezoresistivo suele emplearse silicio dopado selectivamente, siendo su coeficiente piezoresistivo  $\pi$  dependiente de la concentración y tipo de dopante, así como también de la orientación cristalográfica del material y de la temperatura del sustrato,  $T$  [1].

Si los ejes  $X$ ,  $Y$  y  $Z$  están alineados con los ejes  $\langle 100 \rangle$  de cristalización del silicio, la relación entre la resistividad y el estrés se expresa mediante la siguiente matriz

$$\begin{pmatrix} \Delta\rho_1/\rho_0 \\ \Delta\rho_2/\rho_0 \\ \Delta\rho_3/\rho_0 \\ \Delta\rho_4/\rho_0 \\ \Delta\rho_5/\rho_0 \\ \Delta\rho_6/\rho_0 \end{pmatrix} = [\pi][T] = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix}$$

donde  $\rho_0$  es la resistividad isotrópica del cristal que no está sometido a ninguna fuerza, y los términos  $\pi_{ij}$ , los componentes o coeficientes piezoresistivos.

Por lo tanto, sólo hay tres de estos coeficientes no nulos:  $\pi_{11}$ ,  $\pi_{12}$  y  $\pi_{44}$ , y han sido experimentalmente caracterizados por los valores  $6.6 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ ,  $-1.1 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$  y  $138.1 \times 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$ , respectivamente, para determinadas concentraciones de dopantes tipo-p. No obstante, ha de tenerse en cuenta que la matriz  $[\pi]$  es distinta para otras alineaciones y orientaciones no consideradas en este trabajo.

Por otro lado, a la hora de llevar a cabo el diseño de un componente piezoresistivo, la concentración de dopantes ha de seleccionarse de forma apropiada, tratando de alcanzar un equilibrio entre el valor resistivo deseado, el factor de galga y una baja dependencia con la temperatura.

A pesar de que el efecto piezoresistivo de polisilicio o silicio poli-cristalino, es algo menor que el del silicio mono-cristalino, en los años 80 se descubrieron algunas propiedades del polisilicio que resultaron ser ventajosas para su uso en la creación de micro-sensores de presión, como es la capacidad de poder ser depositado sobre un amplio rango de sustratos y la posibilidad del micro-mecanizado por superficie, lo cual lo hace apropiado para la fabricación de una gran variedad de dispositivos micro-mecánicos [3], como el que se pretende en este caso.

No obstante, según el artículo presentado en [4], recientemente un grupo de investigadores del *Royal Institute of Technology* de Estocolmo, en colaboración con otras dos universidades europeas, han descubierto que otro material —el grafeno— puede ofrecer una sensibilidad en sensores MEMS cien veces superior a los dispositivos fabricados en silicio.

## 2.3 Aplicaciones de sensores piezoresistivos

Durante años, la detección piezoresistiva ha sido usada en una amplia variedad de sensores. A continuación, se presentan algunos ejemplos representativos de dispositivos basados en este tipo de detección.

### Acelerómetros

Los acelerómetros piezoresistivos basan su funcionamiento en el principio por el cual una masa, al ser sometida a una aceleración, experimenta una fuerza inercial que provoca una deformación en los elementos de soporte, introduciendo un estrés y una tensión cuya magnitud permite inferir la aceleración aplicada.

En 1979, Roylance y Angell [5] crearon uno de los primeros ejemplos de acelerómetro micro-mecanizado, el cual se usaba en implantes biomédicos para medir la aceleración de las paredes del corazón.

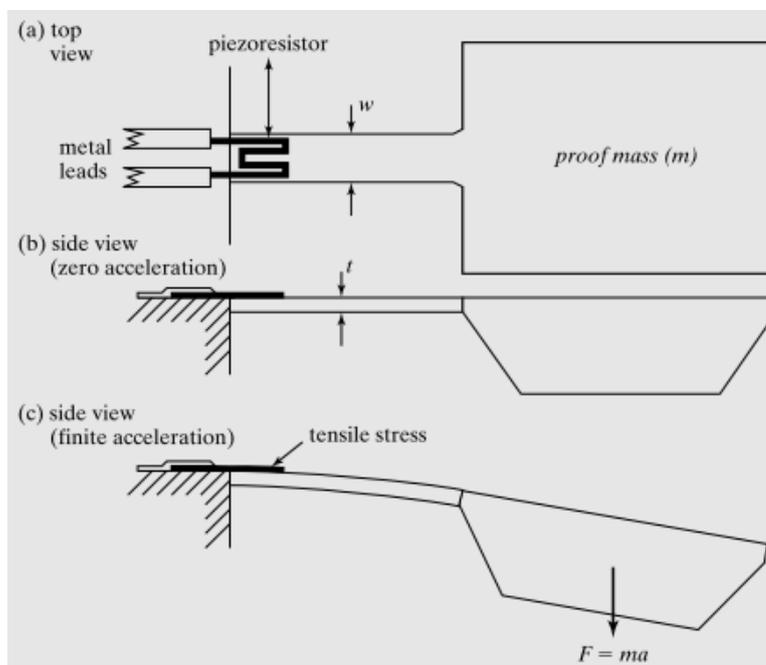


Figura 2.2: Acelerómetro piezoresistivo [1].

Este tipo de sensor consistía en una viga voladiza con uno de sus extremos empotrado y el otro extremo unido a una masa de prueba rígida, como ilustra la

Figura 2.2. Para medir el desplazamiento de dicha masa se ubicaban un conjunto de piezoresistencias dopadas tipo-p en la base de la viga.

La viga con la masa unida y las piezoresistencias se fabrica partiendo de una oblea de silicio tipo-n (100) que se recubre de óxido, el cual se perfora mediante un proceso fotolitográfico. La regiones expuestas se dopan con dopantes tipo-p para formar las piezoresistencias y los conectores, eliminando a continuación el óxido sobrante.

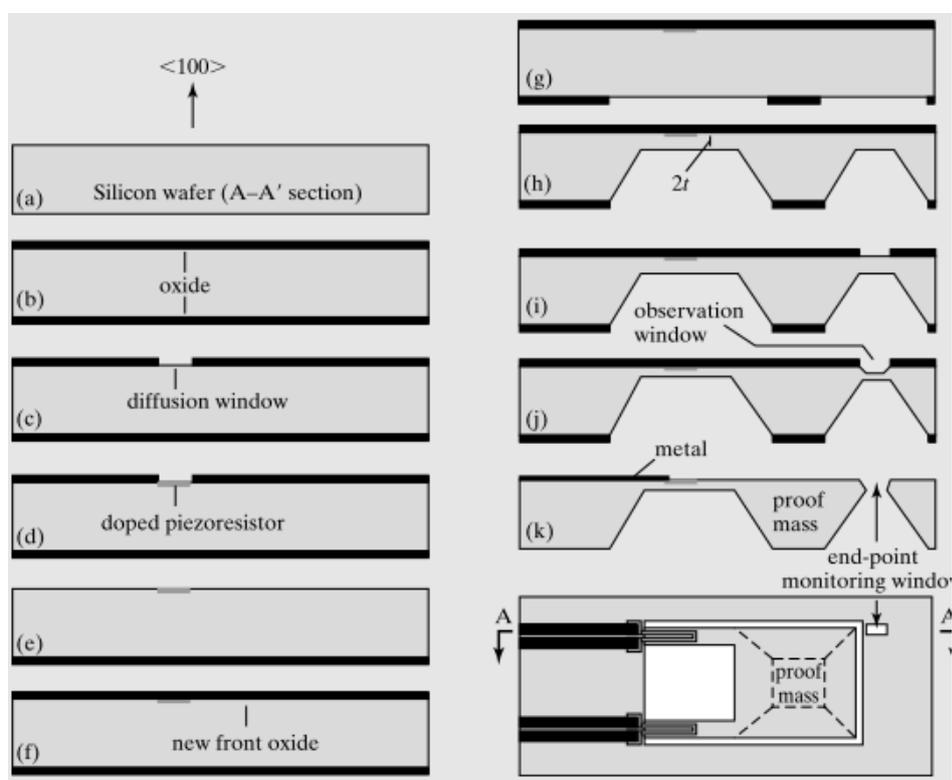


Figura 2.3: Proceso de fabricación de una masa unida a una viga voladiza a partir de una oblea de silicio [1].

Por otro lado, el óxido que recubre la otra cara de la oblea también se modela para crear dos cavidades en el silicio a través de un proceso de micro-mecanizado por volumen. Estas cavidades deben estar separadas de la superficie opuesta de la oblea una distancia aproximada de dos veces el ancho de la viga.

Por último, repitiendo el paso inicial se perfora la primera cara hasta alcanzar una de las cavidades anteriores, de manera que se origina el extremo libre de la masa. Este proceso se ilustra en la Figura 2.3.

También se han fabricado otro tipo de sensores para detectar la aceleración en el plano de la oblea (Figura 2.4), mediante grabado profundo por ion reactivo [6]. Esta técnica permite construir vigas y masas con anchos más reducidos y extremos más definidos.

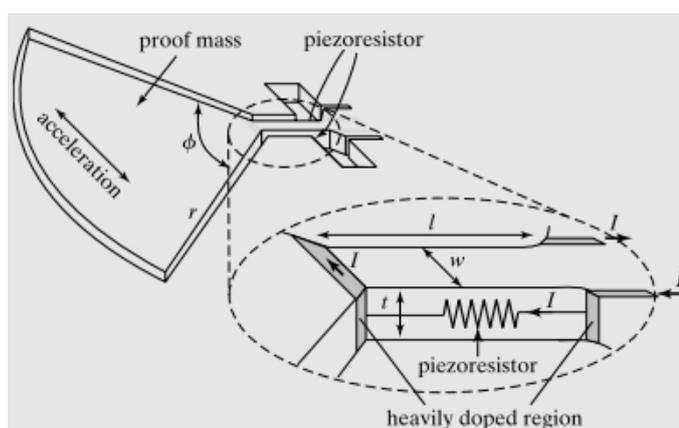


Figura 2.4: Sensor de aceleración en plano [1].

El proceso de fabricación comienza con un sustrato de silicio sobre aislante (SOI, del inglés *silicon-on-insulator*), el cual se construye a través de la oxidación, unión y pulido de una oblea estándar. El sustrato SOI cuenta con dos capas superficiales: una capa aislante de óxido de silicio bajo una capa de silicio (100) tipo-n dopada con fósforo, como se observa en la Figura 2.5.a.

En el primer paso, se forman las regiones fuertemente dopadas tipo-p donde se crean las conexiones (Figura 2.5.b). A continuación, se deposita una fina película de óxido de baja temperatura (LTO) para, mediante un proceso fotolitográfico, crear la máscara para el grabado profundo por ion reactivo que alcanza la capa de óxido aislante (Figura 2.5.d).

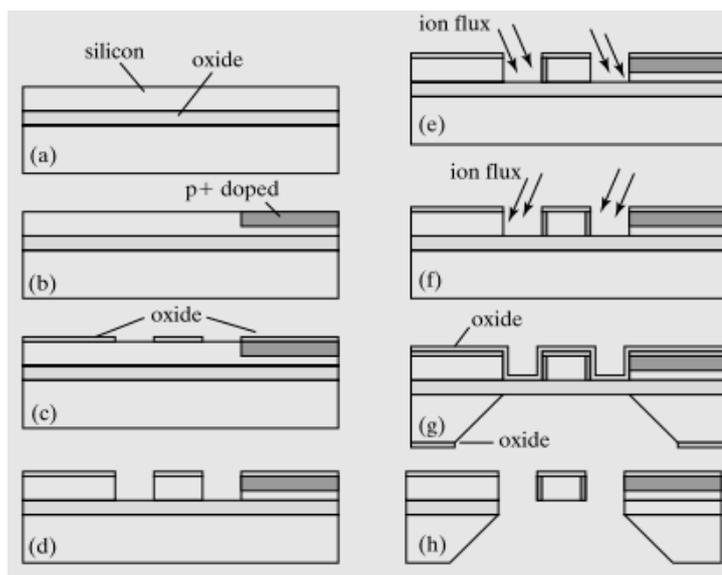


Figura 2.5: Proceso de fabricación del sensor de aceleración de la Figura 2.4 [1].

El siguiente paso consiste en la implantación de iones con un flujo que incide en la superficie horizontal expuesta. Para la implantación en las superficies verticales es necesario colocar la oblea de manera que el flujo oblicuo de iones permita el dopaje en dichas superficies (Figura 2.5.e y Figura 2.5.f). Usando máscaras foto-resistentes se restringe el dopaje a la región flexible, evitando así la formación de trayectorias de fuga alrededor del sensor. La película de LTO protege la superficie superior de la región flexible.

De nuevo, se recubre la oblea con otra capa de LTO (Figura 2.5.g), protegiéndola de la siguiente fase de grabado húmedo de silicio. Por último, esta última película y la capa original de aislante son eliminadas mediante un ácido que no ataca al silicio (Figura 2.5.h).

## Sensores de presión

Los sensores de presión basados en membrana fueron de los primeros dispositivos micro-mecanizados. Un ejemplo es el que se muestra en la Figura 2.6 [7]. Como puede observarse, las piezoresistencias se localizan en los cuatro bordes

del diafragma, coincidiendo con las regiones donde el material presenta el máximo estrés al aplicar una presión uniforme. Este tipo de sensores permiten alcanzar alta sensibilidad y uniformidad en su respuesta, de ahí la clave de su éxito.

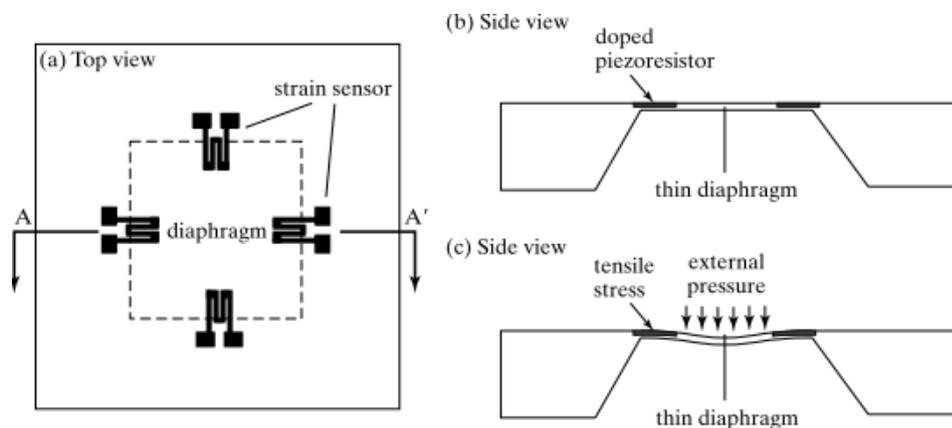


Figura 2.6: Ejemplo de sensor de presión basado en membrana [1].

Los elementos piezoresistivos embebidos se consiguen dopando selectivamente la membrana de silicio, mientras que el diafragma se forma mediante micro-mecanizado por volumen. Con esta técnica se logra controlar de forma precisa el espesor del diafragma.

No obstante, también se han desarrollado sensores de presión mediante el micro-mecanizado por superficie usando una fina capa de nitruro de silicio para actuar como membrana y silicio poli-cristalino o polisilicio como elemento piezoresistivo de detección [8][9]. Esta tecnología permite un mayor control sobre el ancho de la membrana, consiguiendo diafragmas aún más finos, lo que se traduce en mayor variación del estrés para un mismo tamaño de membrana y presión aplicada.

Un sensor fabricado con esta tecnología es el mostrado en la Figura 2.7. Se trata de una membrana suspendida sobre el sustrato que contiene ocho

piezoresistencias: cuatro de ellas localizadas en los centros de los bordes de la membrana y otras cuatro en el centro de la misma.

Cuando la membrana se deforma hacia abajo, las cuatro primeras experimentan estrés por tensión, mientras que el segundo grupo de piezoresistencias se ven sometidas a estrés por compresión. Por tanto, el cambio de resistencia de los elementos de los bordes es opuesto a de los componentes centrales. Esto hace que la sensibilidad sea mayor, cuando los dos grupos de piezoresistencias se conectan en una de las ramas de un puente de Wheatstone.

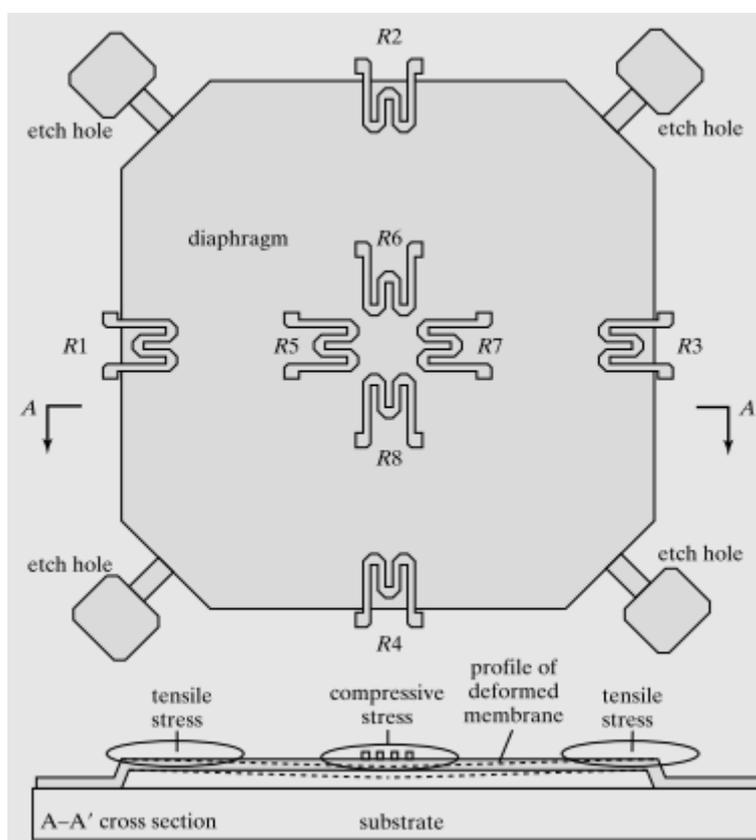


Figura 2.7: Vistas superior y transversal de un sensor de presión fabricado mediante micro-mecanización por superficie [1].

En la Figura 2.8 puede observarse el proceso de fabricación de este dispositivo. Inicialmente, el procedimiento es similar a los casos anteriores. Sin embargo, en este caso se deposita una capa de nitruro de silicio sobre un óxido de

sacrificio que se elimina mediante un ácido que accede a través de unos canales, creando una cavidad en el sustrato. Estas aperturas son selladas con vapor químico para, a continuación, poner una capa de silicio poli-cristalino que se modela de manera fotolitográfica. Finalmente, se deposita una capa de metal diseñada para servir como cables conductores.

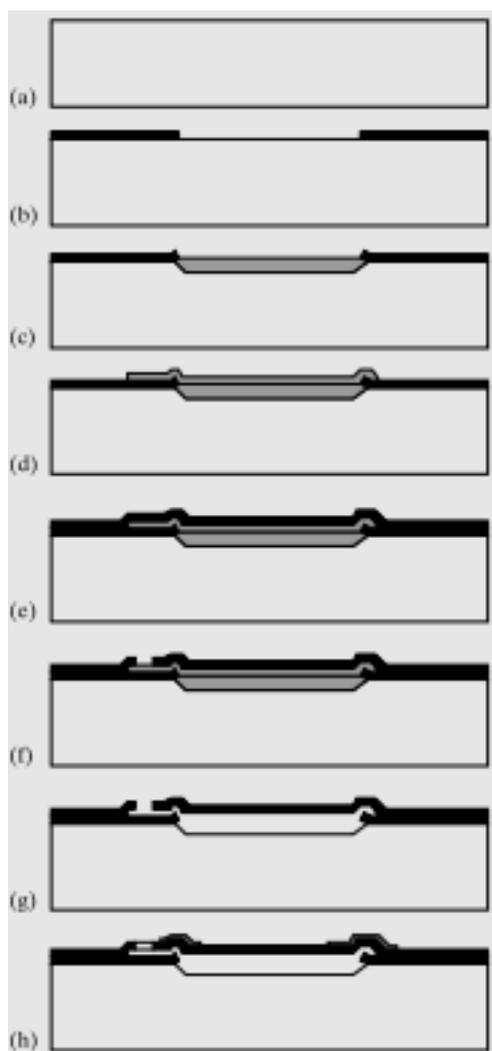


Figura 2.8: Proceso de fabricación de sensor de presión por micro-mecanizado por superficie [1].

Este proceso no implica gran consumo de tiempo, ni requiere procesos químicos agresivos como el grabado húmedo de silicio. Por consiguiente, el micro-mecanizado por superficie es compatible con las tecnologías de circuitos integrados.

## Sensores táctiles

Los sensores táctiles se usan para medir fuerzas de contacto y caracterizar perfiles de superficie y rugosidad. En esta ocasión, se describe un sensor táctil de silicio con múltiples ejes de sensibilidad y formado por un array de elementos mecánicos construidos mediante un proceso de micro-mecanizado por volumen [10].

Cada elemento consiste en una plataforma central móvil sujeta por cuatro puentes y suspendida sobre una cavidad, la cual permite grandes desplazamientos y un rango dinámico mayor (Figura 2.9). Cada puente contiene embebida una piezoresistencia cuyos cambios de resistencia proporcionan una medida directa de las distintas componentes de la tensión por estrés.

Cada piezoresistencia se conecta a una resistencia de referencia con valor nominal idéntico, formando un circuito de medio puente y proporcionando un voltaje de salida que se transfiere a un bus de datos.

Este sensor de array se construye en una oblea de silicio, con circuitería complementaria en MOS o CMOS, sobre la que se deposita una capa de nitruro de silicio usando un método de deposición por vapor químico. Esta capa constituye la base para la plataforma móvil y los puentes. Posteriormente, se cubre con otra capa de nitruro de silicio, pero esta vez usando vapor químico mejorado con plasma.

Tras completar la secuencia de pasos de la tecnología CMOS, la plataforma móvil y los puentes son liberados del sustrato usando grabado húmedo de volumen de silicio. Finalmente, el dispositivo se empaqueta electrónicamente y se encapsula con un elastómero y un soporte adhesivo.

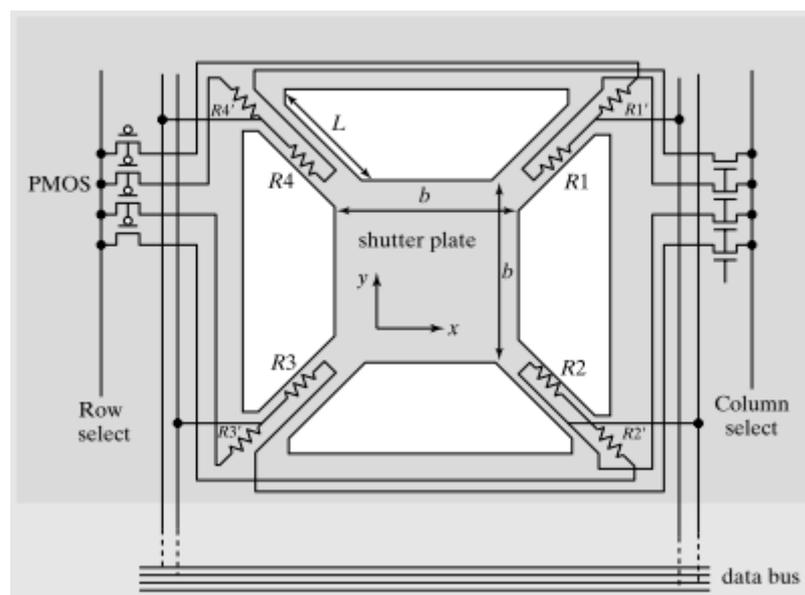


Figura 2.9: Sensor piezoresistivo táctil [1].

## Sensores de flujo

La detección de flujo es otra de las aplicaciones de los micro-sensores. Las micro-estructuras consiguen reducir el impacto en el flujo a medir. El flujo de fluidos puede ejercer sobre un elemento flotante una fuerza de elevación [19] [20], de arrastre [21] o transferir energía cinética [22] [23]. Dichas fuerzas pueden provocar que estas micro-estructuras se deformen, produciendo pequeños cambios en el estrés de los elementos flotantes o sus estructuras de soporte, lo cual puede ser detectado por piezoresistencias estratégicamente ubicadas.

Un tipo de sensor de fluidos piezoresistivo es el sensor de tensión de rozamiento debido a un flujo. Éste consiste en una plataforma suspendida y cuatro mecanismos de agarre [11], donde los que se colocan las piezoresistencias de silicio, como se muestra en la Figura 2.10.

El flujo sobre el elemento flotante y paralelo a la dirección longitudinal de los agarres genera una tensión de rozamiento en la parte superior de la plataforma. Esto provoca que los agarres se vean sometidos a fuerzas de arrastre,

haciendo que dos de ellos experimenten tensión de tracción y los otros dos, tensión de compresión.

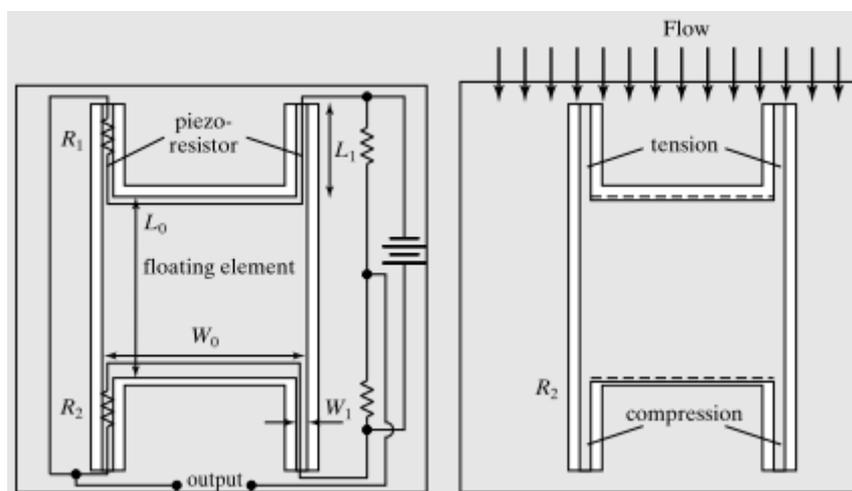


Figura 2.10: Sensor piezoresistivos de tensión de rozamiento [1].

La fabricación de este sensor implica un proceso con dos obleas Figura 2.11. La plataforma y los elementos de agarre consisten en una capa de silicio tipo-n ligeramente dopado (*wafer #1*) que se recubre con una capa de óxido de silicio, que determina la distancia entre la cara inferior del elemento flotante y el sustrato.

La segunda oblea, también de silicio, tiene una región epitaxial ligeramente dopada con dopantes tipo-n debajo de una región altamente dopada con boro. Ambas obleas se unen mediante una larga secuencia de pasos que conlleva la limpieza, hidratación, aclarado con agua desionizada, centrifugado, etc. Posteriormente, se disuelve el silicio de la segunda oblea, así como también se elimina la capa fuertemente dopada con boro hasta alcanzar la región epitaxial.

A continuación, a través de difusión de dopantes se forman dos regiones de contacto que alcanzan los extremos del dispositivo mediante una capa de metal

modelada. Por último, se deposita una capa de óxido para proporcionar pasivación contra la conducción y frente a ambientes cáusticos.

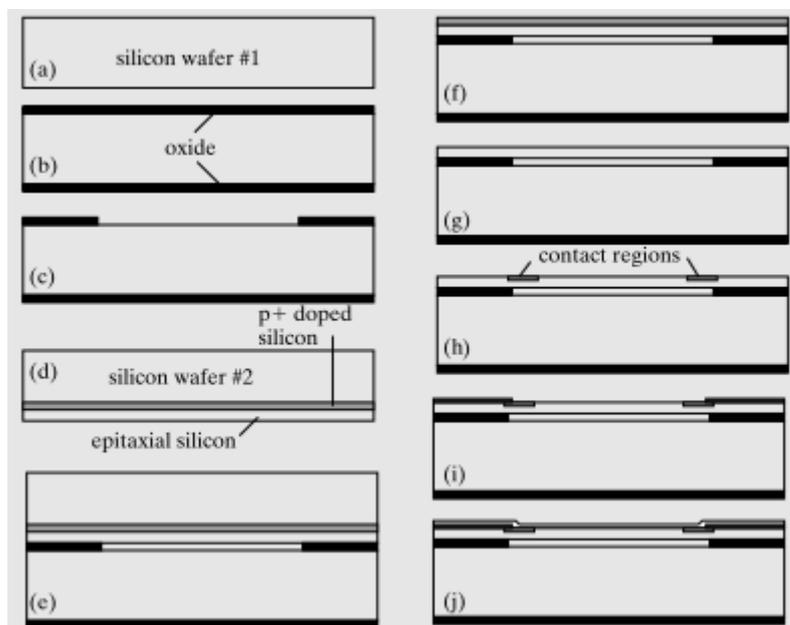


Figura 2.11: Proceso de fabricación de un sensor piezoresistivo de tensión de rozamiento [1].

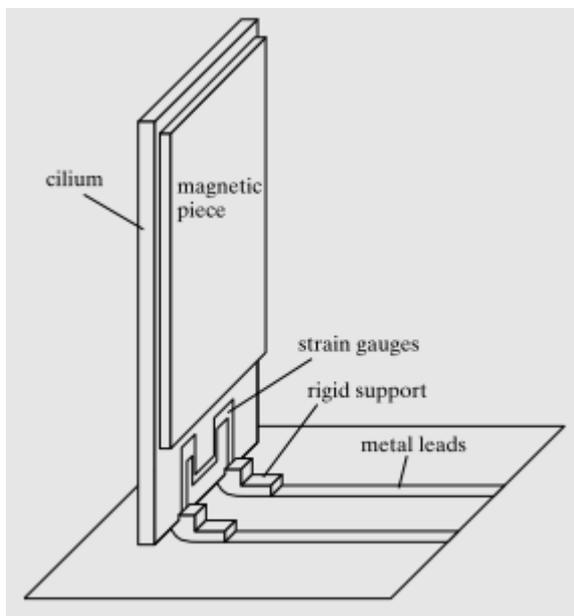


Figura 2.12: Esquema de un AHC [1].

Por otro lado, los sensores de caudal pueden basar su comportamiento en las células pilosas de algunos animales y son denominados *artificial haircell sensors* (AHC) [12]. La Figura 2.12 ilustra un AHC compuesto por una viga vertical

rígidamente unida al sustrato. Situado en la base de la viga, entre el cilio y el sustrato hay una galga extensiométrica, compuesta por una fina película de una aleación de níquel y cromo en un respaldo más grueso compuesta por un material polímero.

Cuando se aplica una fuerza a la viga vertical, ya sea por contacto con otro objeto o por la fuerza de arrastre que causa el flujo de un fluido, la viga refleja, causando estrés longitudinal en las componentes verticales de la galga.

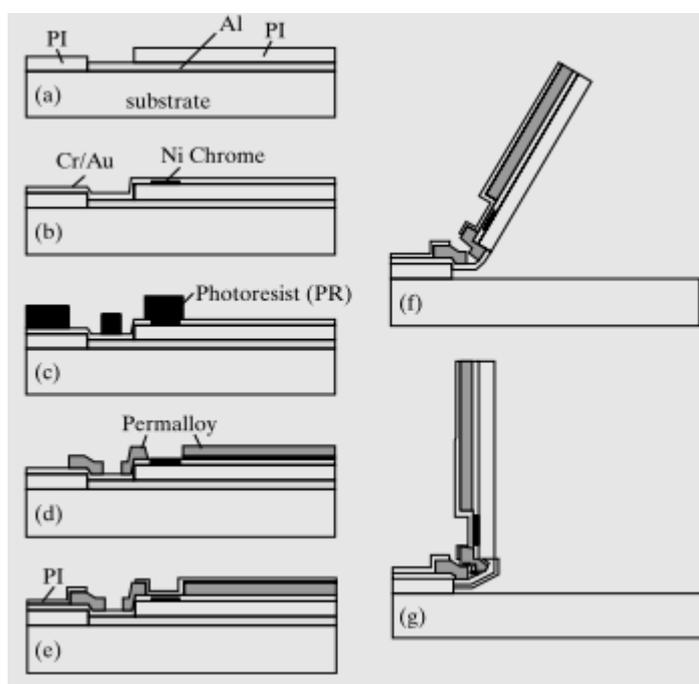


Figura 2.13: Proceso de fabricación del dispositivo de la Figura 2.12 [1].

El proceso de fabricación comprende una serie de pasos de metalización y deposición de polímero, tal y como se muestra en la Figura 2.13. Inicialmente, se evapora y modela una capa de aluminio de sacrificio sobre el sustrato. Después se hace girar el polímero que se modela de manera fotolitográfica.

A continuación, se forma la galga extensiométrica mediante evaporación de electrones. Para la formación de los conductores eléctricos y la bisagra se emplea

otro tipo de evaporación. El último paso del micro-mecanizado por superficie consiste en otra capa de polímero que actúa como recubrimiento protector.

## 2.4 Diseño transductores piezoresistivos basados en membrana

La mayoría de los micro-sensores de presión disponibles en el mercado basan su comportamiento en la deformación de membranas. Normalmente, se utiliza un diafragma deformable, con un espesor de tan sólo unas micras, que se somete a dos presiones -una a cada lado-, siendo una de ellas de referencia (sensor diferencial). Determinando cuánto deflecta dicho diafragma es posible conocer el valor de la presión aplicada. Una manera de determinar la deformación consiste en medir mediante pizoresistencias el estrés ( $\sigma$ ) al que se ve sometida dicha membrana al aplicarse la presión a medir.

El rendimiento de los transductores basados en membrana depende principalmente de la forma de ésta. En este sentido, se han publicado muchos estudios presentando sencillas membranas redondas, cuadradas y rectangulares [1], pero también se han propuesto diseños mucho más complejos, como por ejemplo con forma de cama elástica, compuesta por una plataforma suspendida, sujeta por cuatro vigas, como se ilustra en la Figura 2.14.

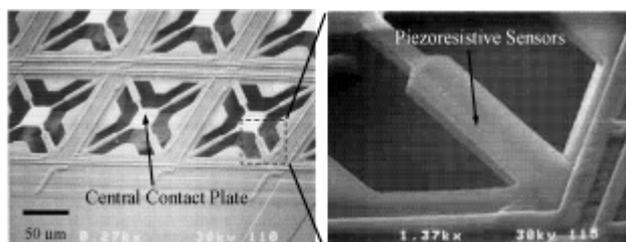


Figura 2.14: Diseño de membrana compuesto por plataforma suspendida [24].

Por tanto, un micro-sensor de presión básico es el compuesto por un sustrato cuadrado de silicio, polisilicio, u otros materiales. Dicho sustrato consta de un

diafragma, donde se aplica la presión y donde se coloca un conjunto de elementos piezoresistivos.

Estos elementos pueden situarse sobre la superficie de la membrana, o bien, integrarse en ella. En este último caso se emplean vigas de silicio dopado. Por el contrario, para colocarlas en la superficie, se deposita una capa de polisilicio o de metal. La Figura 2.15 muestra la sección transversal y la vista superior de un sustrato con cuatro piezoresistencias integradas en un diafragma cuadrado.

También, se han hecho estudios acerca de la influencia de la posición de los elementos piezoresistivos y la forma de éstos sobre los parámetros de sensibilidad y linealidad de los sensores.

En 1961, Pfann y Thurston publicaron un artículo en el que describían un sensor con piezoresistencias integradas en un sustrato de silicio mediante difusión de dopantes. En el mismo artículo propusieron la colocación de las piezoresistencias siguiendo la configuración de puente de Wheatstone (Figura 2.16), con el fin de conseguir alta sensibilidad y reducir la dependencia de los cambios de resistencia con la temperatura [14].

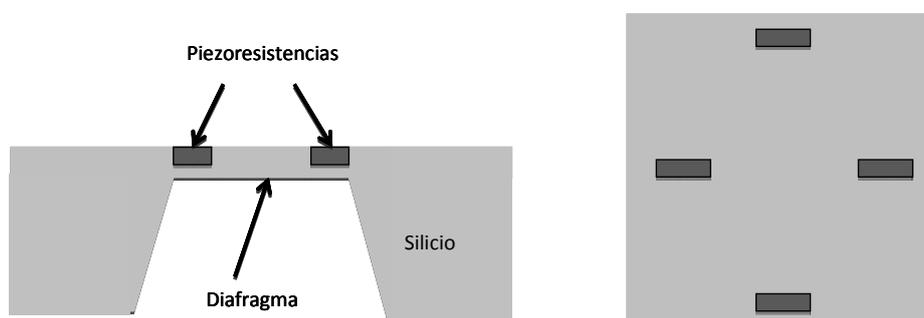


Figura 2.15: Membrana de silicio con piezoresistencias en puente de Wheatstone.

Dicha configuración, consiste en cuatro piezoresistencias formando un circuito cerrado y orientadas de forma que dos de ellas son capaces de detectar el

estrés en la dirección paralela a ellas y las otras dos en la dirección perpendicular. Así, el cambio de resistencia de las dos primeras es opuesto al de las otras dos.

Por último, cada vez más se busca que los dispositivos de detección requieran un bajo consumo de potencia, por lo que los valores típicos de resistencia están en el rango de  $100\ \Omega$  y  $3\ \text{k}\Omega$  con consumos entre  $3\ \text{mW}$  y  $250\ \text{mW}$ . Sin embargo, se ha conseguido incrementar el valor resistivo sin afectar a la sensibilidad del transductor [14].

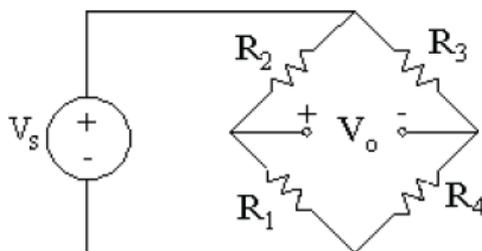


Figura 2.16: Puente de Wheatstone [16]

### 3 Tecnología MetalMUMPS

Como se ha visto anteriormente, existen diversos materiales y procesos de fabricación de micro-sensores piezoresistivos, además de la tecnología CMOS (*complementary metal-oxide-semi-conductor*), como por ejemplo el micro-mecanizado por volumen y el micro-mecanizado por superficie. La primera de ellas suele emplear el silicio como material dominante puesto que presenta grandes ventajas. Por otro lado, el micro-mecanizado por superficie permite el uso de otro tipo de materiales para construir membranas mucho más delgadas, consiguiéndose mayor sensibilidad frente a pequeñas variaciones de presión. Un ejemplo de este tipo de tecnologías es el proceso MetalMUMPS y que hace uso del polisilicio para implementar elementos resistivos, como se explica en esta sección.

Para la realización de este trabajo se ha diseñado el transductor propuesto con una tecnología que incluye el polisilicio entre sus capas. Esto es posible gracias a EURORACTICE, un programa que fue lanzado por la Comisión Europea en 1995 para ayudar a las universidades y otros centros de investigación europeos a reducir los riesgos y costes asociados al prototipado y fabricación de MEMS, ofreciendo el servicio *Multi-Project Wafer* dentro del programa MUMPs®.

El *Multi-User MEMS Processes*, o MUMPs®, es un programa comercial de la empresa MEMSCAP que permite el desarrollo de prototipos para la industria de MEMS, universidades y otras entidades, pudiendo optar a tres procesos estándar como parte del programa MUMPs®, cada uno con diferentes plazos de fabricación:

- POLYMUMPs, un proceso de micro-mecanizado por superficie de polisilicio de tres capas.
- MetalMUMPs, proceso de níquel electro-depositado.

- SOIMUMPs, proceso de micro-mecanizado de silicio sobre aislante.

En este caso, se decide aprovechar la oportunidad de fabricar el sensor-transductor diseñado con la tecnología MetalMUMPs, cuyo flujo de producción consta de los siguientes pasos de fabricación [16]:

1. Oblea base. Consiste en un sustrato de silicio (100) tipo N.
2. Óxido de aislamiento. Sobre la superficie de la oblea se deposita una capa de 2  $\mu\text{m}$  de óxido de silicio que proporciona aislamiento eléctrico del sustrato.
3. Óxido 1. Esta capa de PSG (*PhosphoSilicate Glass*) actúa como capa de sacrificio, tal que, al final del proceso es eliminada y se libera la capa Nitride 1 (descrita a continuación en el paso 4). La capa Óxido 1 define la región en la que se perfora el sustrato de silicio.
4. Nitride 1. Ésta es una capa de 0.35  $\mu\text{m}$  de nitruro de silicio de bajo estrés que, junto con la capa Nitride 2, proporciona un encapsulado protector para el polisilicio. Su trazado geométrico también define una capa de protección en el sustrato que determina dónde perforar el silicio (paso 12). También puede usarse para facilitar un enlace mecánico entre las estructuras de metal liberadas, las cuales están eléctricamente aisladas.
5. Poly. En este paso se pone una película de 0.7  $\mu\text{m}$  de polisilicio encima de la capa de Nitride 1. Mediante el grabado por iones activos (RIE) se excluyen las zonas donde no se desea que haya polisilicio. El área que permanece cubierto de polisilicio suele emplearse para formar elementos resistores, estructuras mecánicas o para conexionado eléctrico.

6. Nitride 2. A continuación de la capa de polisilicio, se pone una segunda capa de nitruro de silicio de bajo estrés de  $0,35\mu\text{m}$  de espesor.
7. Óxido 2. Esta segunda capa de óxido de sacrificio está formada por  $1.1\mu\text{m}$  de PSG, que se utiliza para liberar la capara mecánica de metal (paso 10).
8. Anclaje Metal. Los anclajes se consiguen depositando finas capas de cromo y platino en la parte inferior de los anclajes de Óxido 2. El paso Óxido 2 también provee el modelado para las estructuras de anclaje de metal.
9. Base de platino. Ésta es una capa de metal de  $500\text{ nm}$  de cobre protegido con una fina película de titanio. Esta capa proporciona continuidad eléctrica a través de la oblea para el paso de galvanización del metal y es eliminada al final del proceso de liberación, momento en el que también se eliminan las capas de sacrificio (Óxidos 1 y 2), mediante un proceso de KOH que a la vez origina una cavidad de  $25\mu\text{m}$  en el sustrato.
10. Metal. La combinación de  $20\mu\text{m}$  de níquel y  $0.5\mu\text{m}$  de oro forma la capa de metal. Las  $0.5\mu\text{m}$  de oro ofrecen un revestimiento adecuado y una baja resistencia de contacto con las conexiones eléctricas externas. Por lo tanto, esta capa actúa como primera capa mecánica y de interconexión eléctrica.
11. Sidewall Metal. Ésta es una última capa de revestimiento, de entre  $1$  y  $3\mu\text{m}$  de oro, que cubre los laterales seleccionados del metal, proporcionando un contacto de baja resistencia eléctrica y reduciendo las diferencias en las estructuras adyacentes de níquel galvanizado.



## 4 Metodología para la optimización de piezoresistencias

El comportamiento electromecánico de un transductor piezoresistivo se define durante la fase de diseño, tratando de encontrar el máximo rendimiento, en términos de sensibilidad y linealidad de la señal de salida. En este tipo de dispositivos se diferencian tres elementos: el diafragma, las piezoresistencias y el acondicionador de la señal –puente de Wheatstone, puente digital, entre otros. El primero de los elementos convierte la presión en estrés mecánico, mientras que las piezoresistencias transforman dicho estrés en un cambio de resistencia y, finalmente, el puente de Wheatstone -u otro acondicionador de la señal- permite conocer la tensión de salida como consecuencia del cambio de resistencia anterior.

Por lo que, la forma y las dimensiones del diafragma, así como también de las piezoresistencias, junto con la posición de éstas sobre el diafragma, es una parte importante en el diseño de un sensor de presión piezoresistivo.

En las secciones de la 4.1 a la 4.4 se explica la metodología a seguir para el diseño de las piezoresistencias, mientras que en el apartado 4.5 se describe el diseño final del sistema transductor piezoresistivo.

### 4.1 Análisis con elementos finitos de la membrana

Con el fin de optimizar el rendimiento del sensor piezoresistivo, es importante conocer el comportamiento mecánico de la membrana en la que se implementará el sistema de piezoresistencias que actuará como transductor. En esta sección se presenta el análisis de estrés y deformación que sufre una membrana de polisilicio fabricada con el proceso MetalMUMPs, cuando se aplica una fuerza sobre ella.

El comportamiento de la membrana depende de las propiedades del material (tensión residual incorporada, módulo de Young y relación de Poisson,

todos ellos definidos por el proceso), pero también de su geometría (espesor y forma) [1].

Para la simulación con el software de diseño CoventorWare, además de definir el proceso con el que se va a fabricar el dispositivo, también es necesario especificar los valores apropiados para los coeficientes piezoresistivos del polisilicio, los cuales pueden aproximarse a los valores típicos del silicio monocristalino dopado tipo-p que se indicaron en la Sección 2.2.

A continuación, se crea el modelo sólido (Figura 4.1.a) del dispositivo, definiendo su geometría. En este caso, se disponen dos capas de nitruro (en azul) y entre ambas, otra de polisilicio (en color ocre); todo esto colocado sobre un sustrato de silicio (verde) y separado con una capa de material aislante (gris).

El diseño resultante consiste en un prisma de  $600 \times 600 \mu\text{m}$  y altura definida por el ancho de las capas, cuyo valor viene determinado por el proceso. En la región central, entre el sustrato y el aislante se coloca un óxido de sacrificio para crear en el aislante un abertura de  $300 \times 300 \mu\text{m}$ . Al mismo tiempo, se produce una cavidad en el sustrato de iguales dimensiones que posibilita el desplazamiento de los materiales que se encuentran por encima del aislante, tal y como muestra la Figura 4.1.b. A su vez, se diseñan cada una de las capas de nitruro y de polisilicio formando un diafragma central que ocupa el mismo área que la cavidad anterior (Figura 4.1.c).

Una vez mallado el modelo sólido, se definen las condiciones de contorno. En este caso, se identifican las zonas del dispositivo que permanecen fijas (la superficie inferior del aislante) y se establece la superficie sobre la que se aplica la fuerza (resaltada en amarillo en la Figura 4.1.d, correspondiente al área ocupada por el diafragma de la capa superior de nitruro).

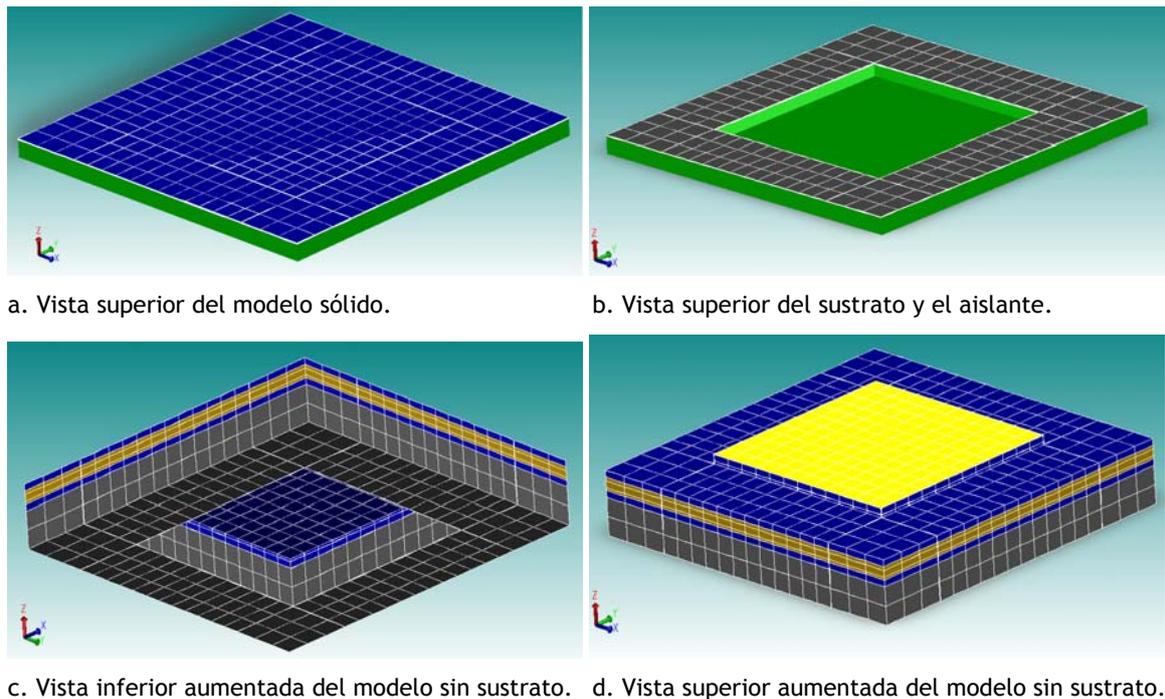


Figura 4.1: modelo sólido inicial del sensor de presión.

A continuación, para el análisis mecánico de la membrana se emplea la herramienta MemMech Solver de CoventorWare que, utilizando el método de elementos finitos, permite conocer el desplazamiento y el estrés que sufre el material debido a las fuerzas aplicadas.

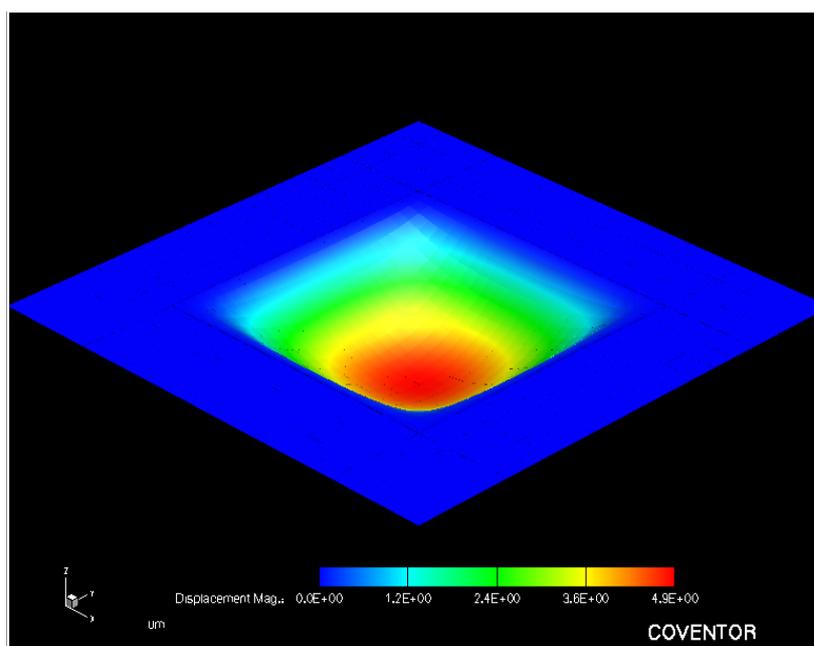


Figura 4.2: Desplazamiento del polisilicio a lo largo del eje Z .

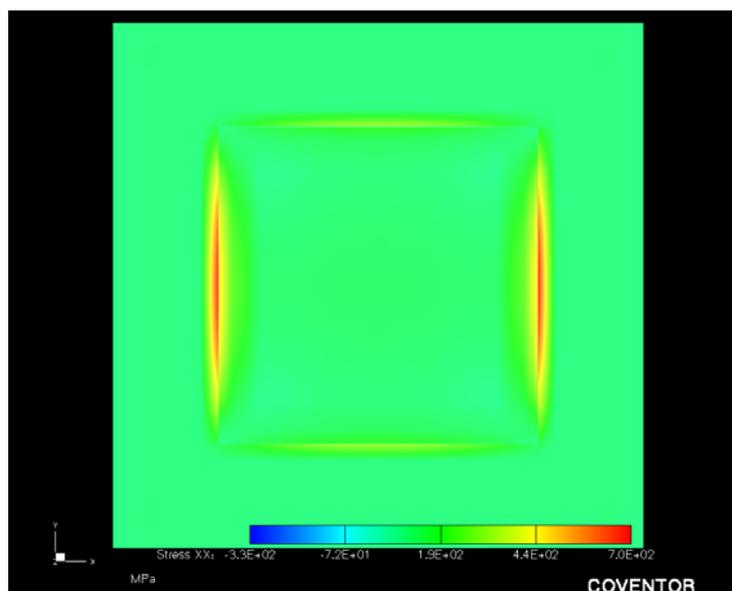
Para medir la presión arterial y ritmo cardiaco es necesario que el sensor que se diseña opere en el rango de 0-40 KPa (0-300 mmHg) [17], por lo que para el estudio que se pretende llevar a cabo se utiliza un valor de presión ejercida en dicho rango.

Así, para una presión de 25 KPa aplicada sobre la superficie del diafragma de la capa superior de nitruro, la fuerza ejercida se transmite también a la capa de polisilicio, provocando que ésta se deforme, con lo que el material de esa región se desplaza en el eje Z, alcanzando un desplazamiento máximo en el centro del diafragma de 4.9  $\mu\text{m}$ , como se aprecia en la Figura 4.2.

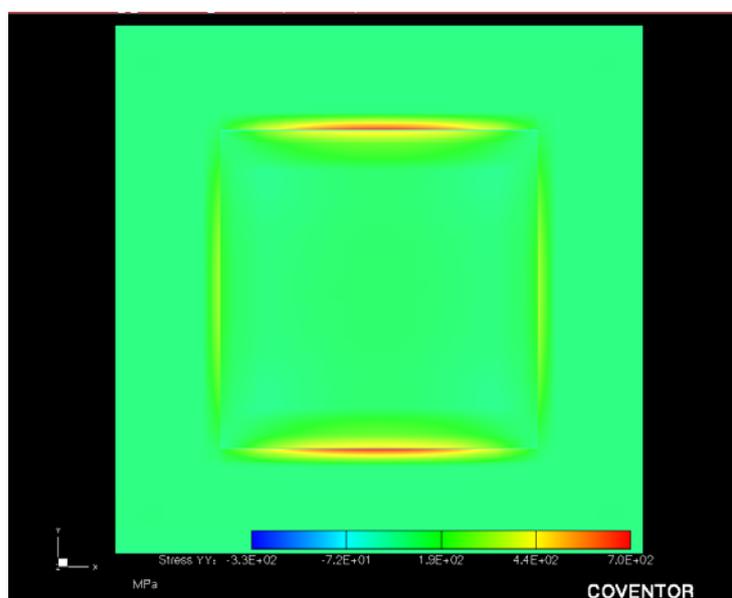
Por otro lado, la distribución del estrés a la que se ve sometida la capa de polisilicio es similar a lo largo de los ejes X e Y, concentrándose y alcanzando valores máximos entorno al centro de los bordes del diafragma, tal y como muestran la Figura 4.3.a y Figura 4.3.b.

Según lo anterior y debido a que la sensibilidad de los elementos piezoresistivos es proporcional al estrés que sufre el material, parece apropiado situar las piezoresistencias en las zonas donde el estrés debido a la deformación del polisilicio alcanza valores máximos, esto es, en los extremos del diafragma de dicha capa.

La Figura 4.4 muestra la curva de la componente en Y del estrés en los bordes superior e inferior del diafragma, de donde se deduce que la mayor concentración está comprendida entorno a  $\pm 45 \mu\text{m}$  del centro de dicho borde. Esto mismo ocurre para la componente X del estrés alrededor del centro de los laterales de la membrana.



a. Distribución longitudinal del estrés en el eje X.



b. Distribución longitudinal del estrés en el eje Y.

Figura 4.3: Distribución del estrés en la capa de polisilicio.

Fuera del alcance de este Trabajo Fin de Máster, queda la optimización de los esfuerzos de computación. A modo de resumen, se indica que una simulación del comportamiento de la membrana para un valor de deformación, consume una gran cantidad de recursos. En particular, se han utilizado los nodos de computación femes, icor, iris, loto, soo, cuyas características están disponibles en la intranet del servicio de infraestructuras de red del IUMA; y en los nodos de más potencia de cómputo –iris, loto– una simulación con FEM utilizando una malla de baja

resolución consume todos los recursos de memoria de estas máquinas y el tiempo de CPU está en torno a las 12 horas. No cabe duda que cuanto mayor sean los detalles constructivos, más recursos de memoria y tiempo de cálculo se precisan.

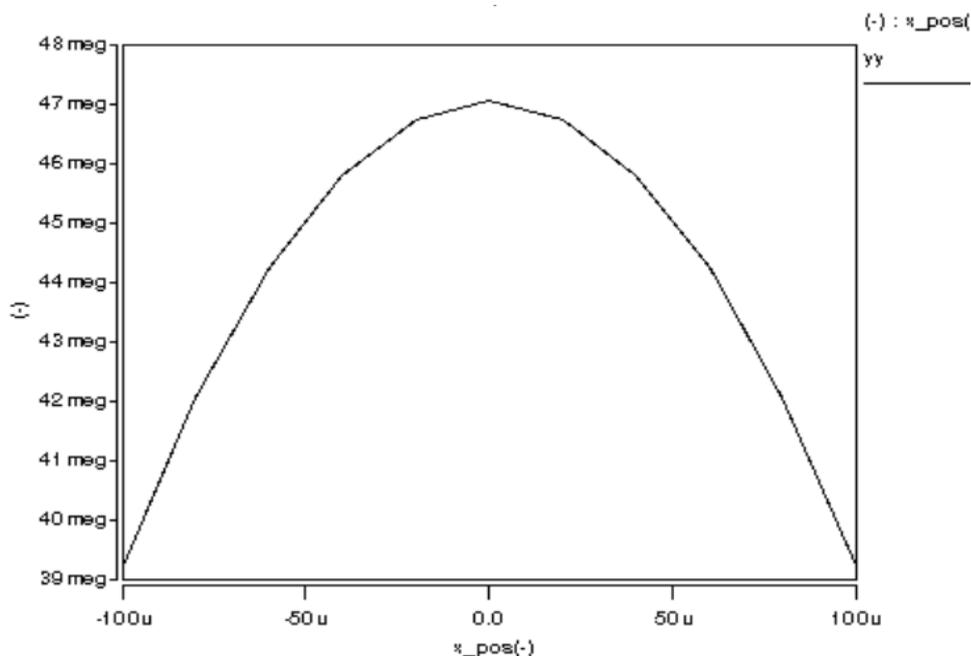


Figura 4.4: Distribución de la componente en Y del estrés en el borde superior del diafragma.

## 4.2 Optimización de las pendientes resistivas

La sensibilidad de un elemento piezoresistivo viene dado por el cociente entre la pendiente de la resistencia de dicho elemento cuando se representa frente a variaciones de presión y el valor de resistencia original ( $\Delta R/R$ ). Por otro lado, este cambio relativo de resistencia ha de ser linealmente proporcional al estrés debido a la deformación del material.

En la sección anterior se comprobó que la distribución del estrés alcanza valores máximos entorno al centro de los bordes del diafragma. En esta sección, se comprueba la sensibilidad de los elementos piezoresistivos cuando se colocan en dichas zonas.

Para conocer la sensibilidad resistiva, mediante la utilidad Saber Sketch de CoventorWare se simula el comportamiento eléctrico de cuatro piezoresistencias

en la membrana de polisilicio, colocadas siguiendo la configuración de puente de Wheatstone, como se ilustra en la Figura 4.5. De esta manera, quedan ubicadas en los bordes del diafragma y sobre en los ejes X e Y, con origen de coordenadas ubicado en el centro de la membrana.

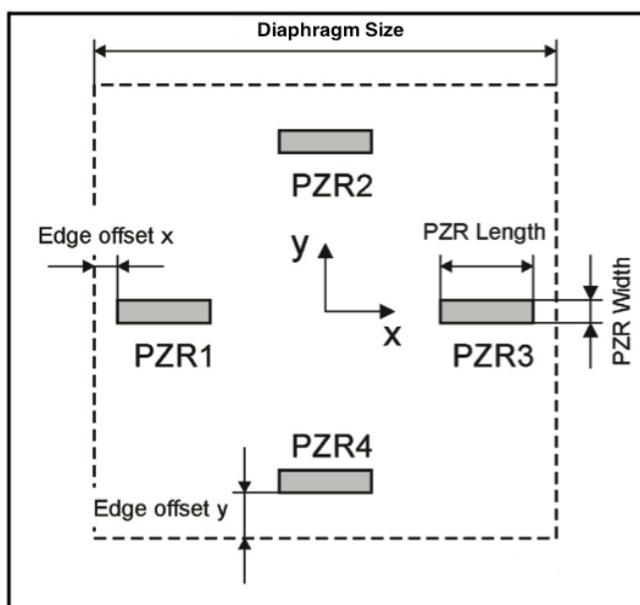


Figura 4.5: Piezoresistencias en configuración de puente de Wheatstone.

A su vez, las piezoresistencias se orientan de forma que la componente longitudinal de dos de ellas quede en paralelo con los bordes más próximos –PZR2 y PZR4– y las otras dos en perpendicular –PZR1 y PZR3–.

Por consiguiente, al ejercerse una fuerza o presión uniforme en toda la superficie del diafragma, la deformación de la membrana provoca que PZR2 y PZR4 se vean afectadas por una tensión en su componente transversal, que hace que aumente su ancho; mientras que PZR1 y PZR3 se ven afectadas por dicha tensión en su componente longitudinal, haciendo que se incremente la longitud de las mismas.

Así, esta configuración no sólo permite detectar variaciones muy pequeñas de la resistencia, sino que también reduce el efecto que tiene la temperatura sobre dichas variaciones [18].

Para localizar las posiciones de máxima sensibilidad se hace un estudio del cambio de resistencia de dichos elementos para un rango de presiones de entre 0 y 25 KPa, variando la distancia con respecto a los bordes (en la figura esto se presenta mediante las variables *Edge\_offset\_x* y *Edge\_offset\_y*).

Para ello, basta comparar dos de las cuatro piezoresistencias -una colocada en paralelo y la otra perpendicular a los bordes-, puesto que el comportamiento de las otras dos es equivalente. En este caso, se examinan los resultados de PZR2 y PZR3, por estar situadas en la parte positiva de los ejes X e Y.

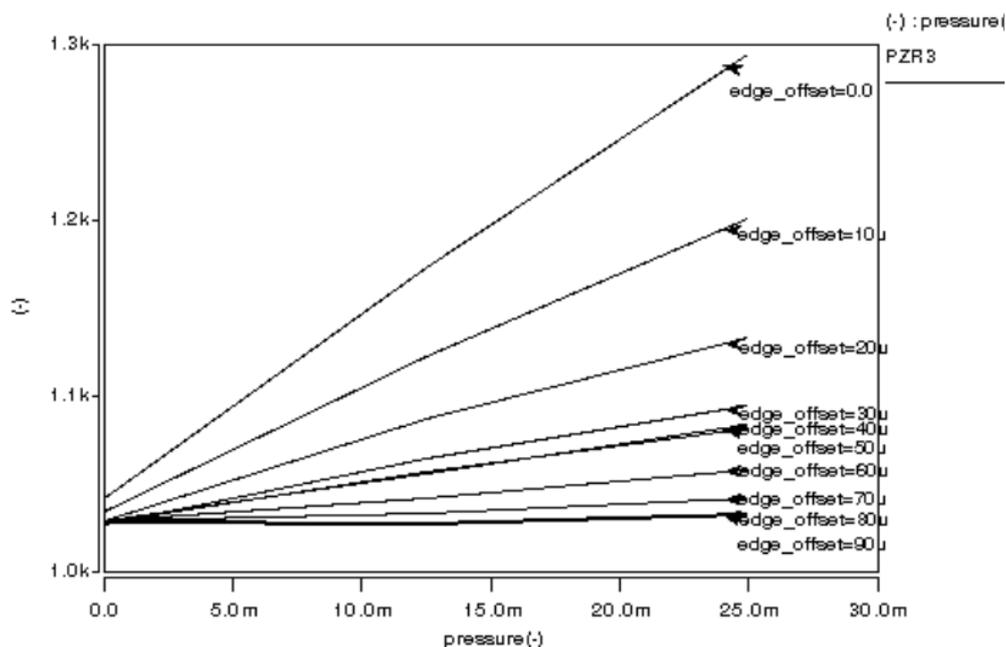


Figura 4.6: Curvas de resistencia de PZR3 vs. presión para variaciones de *Edge\_offset\_x*.

Por otro lado, se eligen inicialmente piezoresistencias de dimensiones reducidas (*PZR\_Length* y *PZR\_Width* igual a 5 μm), con el fin de que éstas permitan detectar las áreas donde el diferencial de estrés por unidad de área es

alto. Por tanto, para estos valores y variando la distancia con respecto a los bordes, se obtienen los resultados que se muestran en la Figura 4.6 y Figura 4.7.

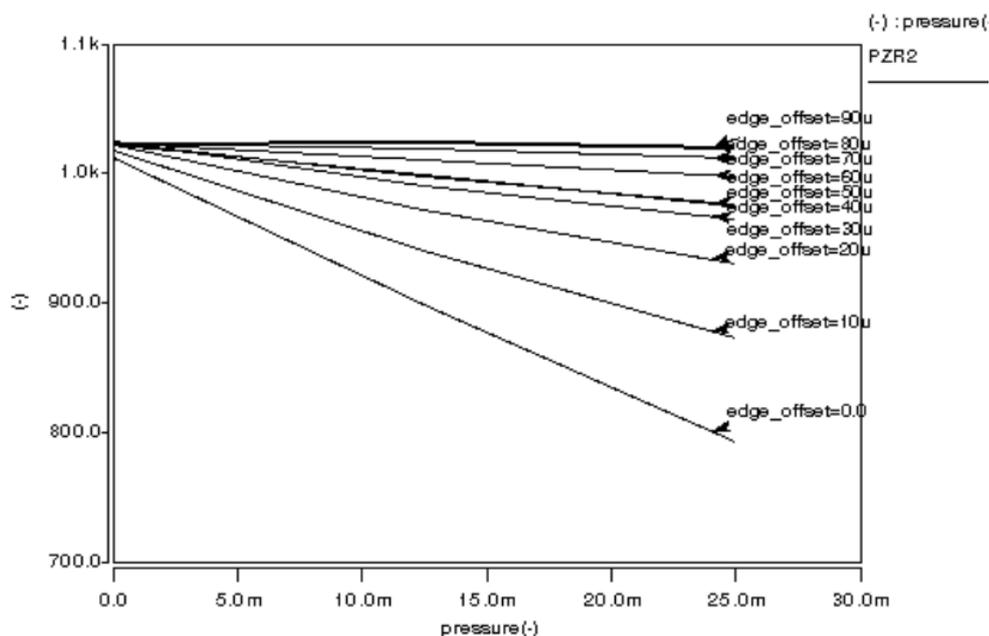


Figura 4.7: Curvas de resistencia de PZR2 vs. presión para variaciones de *Edge\_offset\_y*.

De dichas figuras se deduce que la variación de resistencia de ambas piezoresistencias es prácticamente lineal cuando están más cerca de los bordes (*Edge\_offset* = 0 μm). Por otro lado, como era de esperar, para esas mismas posiciones, ambas piezoresistencias experimentan la máxima variación.

Esto último también puede observarse mediante la representación de la pendiente correspondiente a las curvas de resistencia para distintos valores de *Edge\_offset* (Figura 4.8).

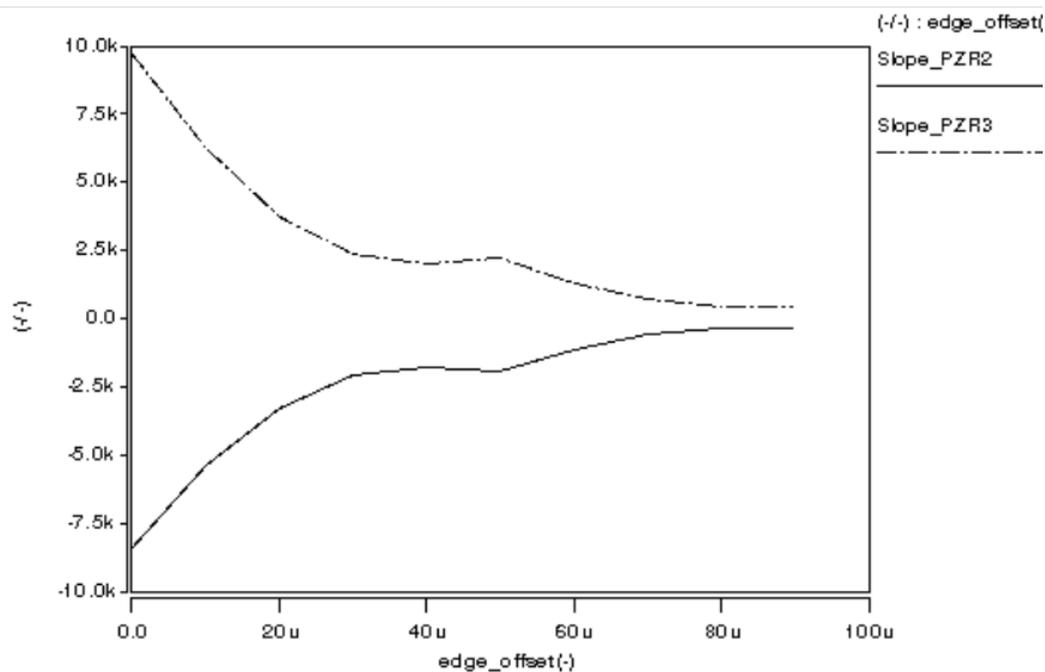


Figura 4.8: Representación de las pendientes de las curvas de resistencia de PZR2 y PZR3 frente a *Edge\_offset*.

En dicha figura se aprecia que las pendientes para PZR2 y PZR3 son inversas, lo que indica la diferencia entre el incremento que experimenta el ancho de PZR2 (con el aumento de presión disminuye su resistencia), y el aumento de longitud de PZR3 (incrementa su resistencia con la presión).

Sin embargo, esta variación de resistencia en valores absolutos no es igual, pues la variación relativa de PZR2 es algo menor que la de PZR3. Esto indica que las piezoresistencias son más sensibles con respecto a variaciones en su longitud que en su ancho. De ahí que sea necesario desplazar PZR3 para obtener variaciones similares a PZR2.

La Figura 4.9 muestra el desplazamiento que debe aplicarse a PZR3 para que su comportamiento coincida con el de PZR2. Con este cambio las pendientes de resistencia de ambas son similares, tal y como ilustra la Figura 4.10.

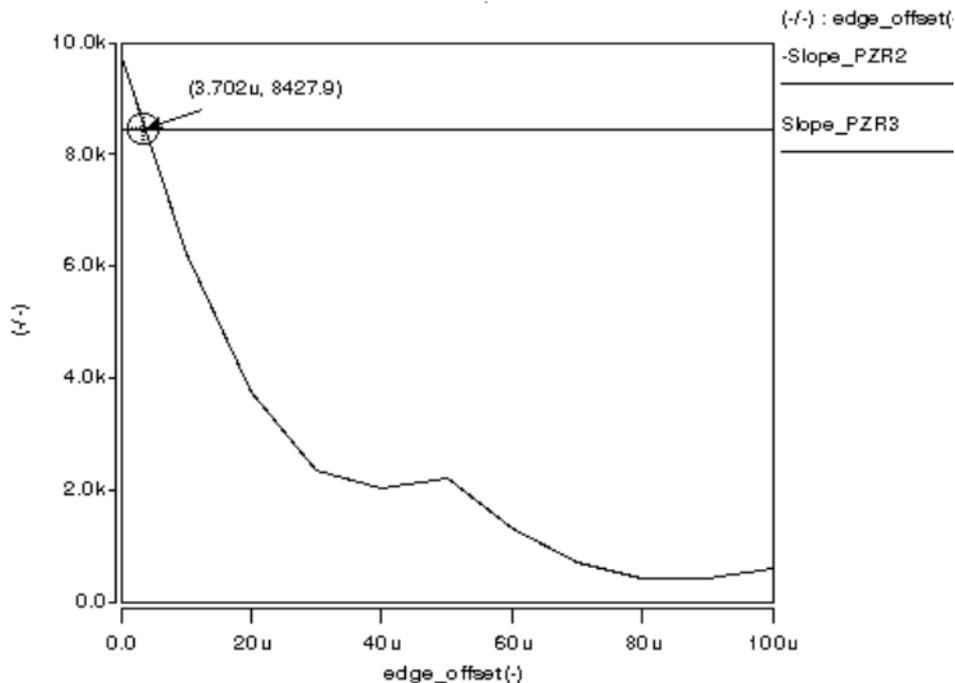


Figura 4.9: Punto de corte de las pendientes resistivas de PZR2 y PZR3.

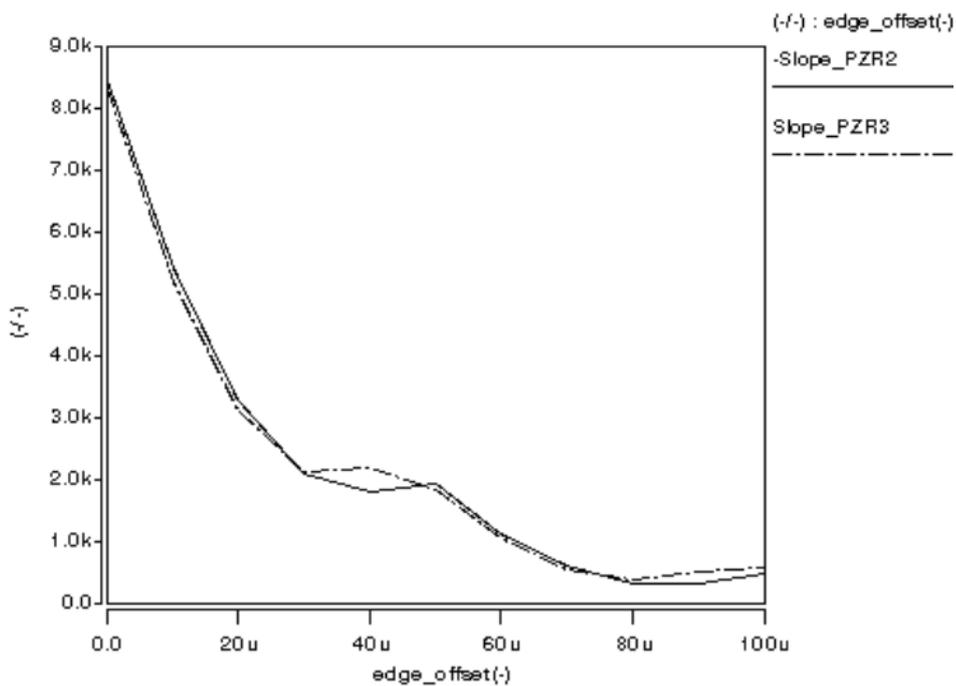


Figura 4.10: Pendientes resistivas de PZR2 y PZR3.

Por tanto, es necesario alejar la piezoresistencia PZR3 del borde de la membrana, en detrimento de su sensibilidad, con el fin de asemejar su comportamiento al de PZR2.

### 4.3 Optimización del valor resistivo en reposo

El valor resistivo de cualquier material depende de las propiedades del mismo y de sus dimensiones. En esta sección se ajustan estos parámetros para obtener el valor de resistencia deseado en reposo.

En este caso, el espesor de las piezoresistencias se ha ajustado al de la capa de polisilicio ( $0.7 \mu\text{m}$ ), que viene determinado por el proceso. Por lo tanto, el valor resistivo de cada elemento piezoresistivo es función de su ancho y longitud.

El acondicionador de señal en el que se utilizarán las piezoresistencias precisa que cada componente piezoresistivo posea un valor de resistencia de  $4 \text{ K}\Omega$  en reposo, es decir, cuando no se aplica ninguna fuerza y, por tanto, el elemento no se ve afectado por ninguna tensión de deformación. También requiere que la variación relativa de resistencia sea, al menos, del 1%.

Con la herramienta Saber Sketch de CoventorWare, es posible ajustar las dimensiones de cada piezoresistencia para que su valor resistivo sea el deseado. Para ello, se realizan simulaciones en las que se hace variar el ancho y la longitud de cada una (*PZR\_Length* y *PZR\_Width*).

En este proceso ha de tenerse en cuenta la sensibilidad del dispositivo, esto significa buscar la ubicación donde el estrés debido a una deformación hace que la variación de resistencia sea máxima.

Según se vio en el apartado 4.1, el área de máximo estrés dada una fuerza aplicada está entorno al centro de los límites de la membrana. Si se considera de nuevo un sistema de ejes de coordenadas con origen en el centro del diafragma, el estrés se concentra sobre los bordes, a una distancia de  $45 \mu\text{m}$  a ambos lados de cada eje.

Por lo tanto, sería conveniente que las piezoresistencias ocuparan ese espacio. En tal el caso, para que el valor resistivo de PZR2 sea  $4\text{ K}\Omega$ , su longitud puede fijarse a  $90\text{ }\mu\text{m}$  ( $2 \times 45\text{ }\mu\text{m}$ ) y el valor de su ancho, según las simulaciones realizadas, se estima en  $23.167\text{ }\mu\text{m}$ .

Sin embargo, el ajuste de la longitud y el ancho ha de hacerse teniendo en cuenta no sólo el resto del diseño en el que van a ser integradas las piezoresistencias, sino también las limitaciones de fabricación.

La tecnología MetalMUMPs sólo admite incrementos múltiples de  $0.25\text{ }\mu\text{m}$  en las máscaras [16], por lo que las dimensiones de las piezoresistencias habrán de cumplir esta condición. No obstante, durante la fase de implementación se comprobará que el ancho y la longitud han de ser múltiples de  $0.5\text{ }\mu\text{m}$  para que el perfil de cualquier piezoresistencia centrada en los ejes coincida con el *grid* de diseño recomendado por el fabricante.

Según lo anterior, el ancho de PZR2 habría de ajustarse a  $23\text{ }\mu\text{m}$ , por ser el múltiplo de  $0.5$  más próximo. Como consecuencia, el valor de resistencia aumenta levemente por encima de  $4\text{ K}\Omega$ , como puede apreciarse en la Figura 4.11, pero se asume como una desviación inevitable por las limitaciones de la tecnología.

Para el ajuste de PZR3 se procede de forma similar, pero tomando en consideración la componente X del estrés en el lado derecho del diafragma. Puesto que esta piezoresistencia se encuentra en perpendicular al borde, en este caso resulta de interés conocer la variación de estrés a lo largo del eje X.

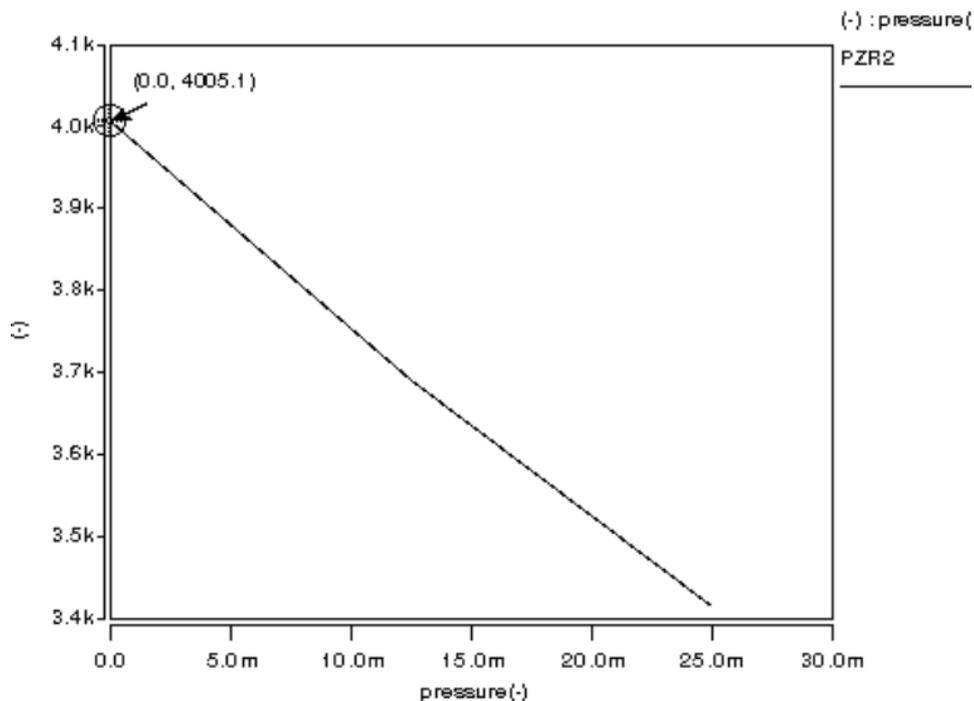


Figura 4.11: Curva de resistencia de PZR2 vs. Presión para PZR\_Length = 90  $\mu\text{m}$  y PZR\_Width = 23  $\mu\text{m}$ .

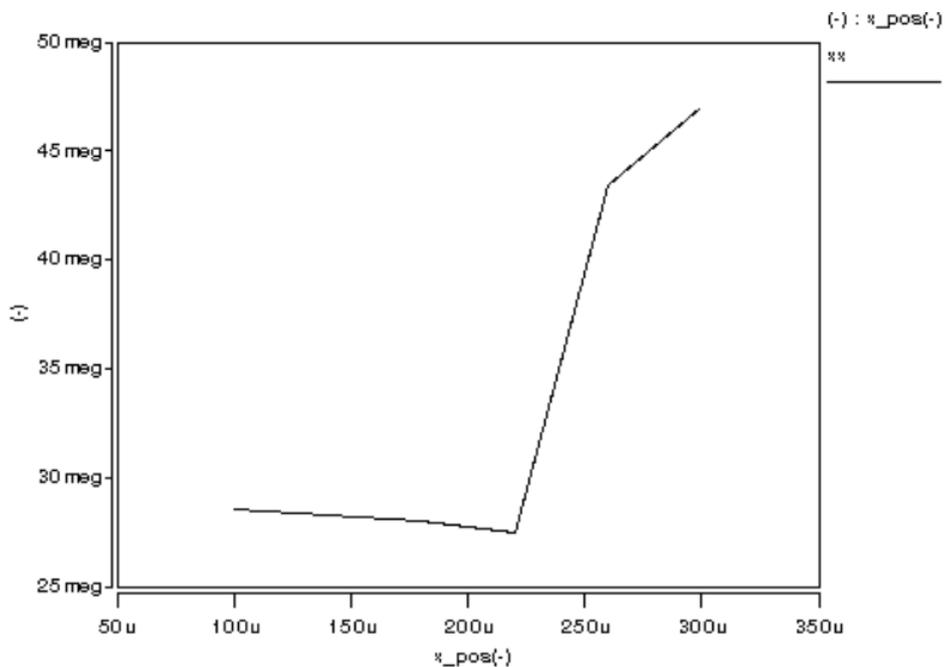


Figura 4.12: Curva de la componente X del estrés en las proximidades del borde derecho de la membrana.

En la Figura 4.12 se aprecia que la máxima distribución del estrés a lo largo del eje X está entre  $x = 250 \mu\text{m}$  y  $x = 300 \mu\text{m}$  (próximo el límite de la membrana). Por tanto, lo más conveniente es que la longitud de PZR3 cubra dicha distancia ( $PZR3\_Length = 50 \mu\text{m}$ ).

Al igual que se hizo para PZR2, mediante simulación se obtiene que el ancho ha de ser  $PZR3\_Width = 12.73 \mu\text{m}$  para que el valor de resistencia sea  $4 \text{ K}\Omega$ . Sin embargo, ha de ajustarse a  $13 \mu\text{m}$  por las limitaciones de la tecnología, provocando un ligero descenso del valor de resistencia respecto al valor deseado, como se aprecia en la Figura 4.13.

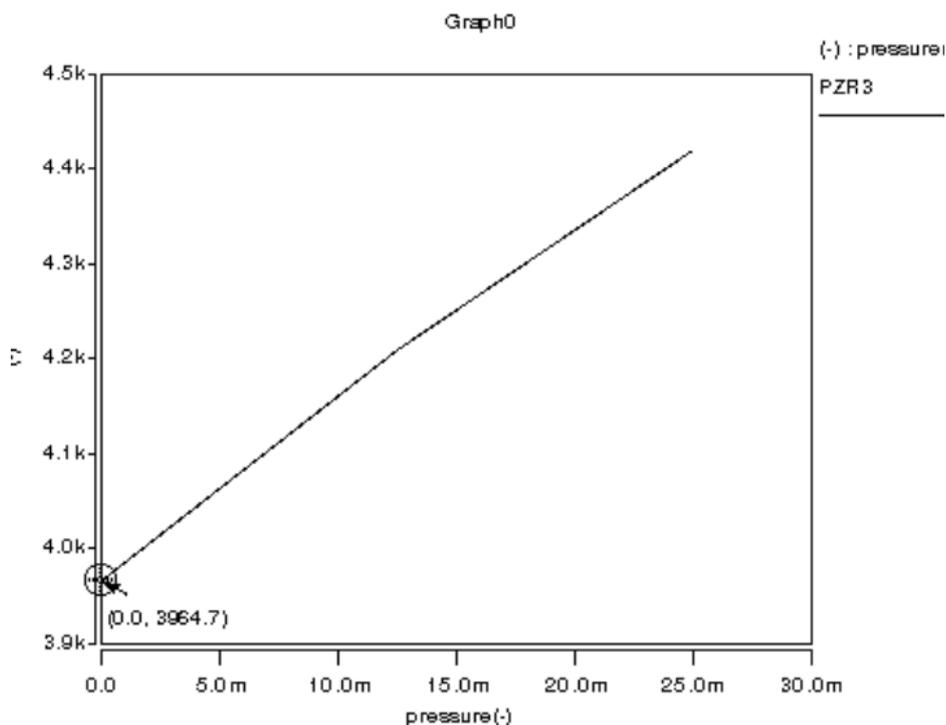


Figura 4.13: Curva de resistencia de PZR3 vs. Presión para  $PZR\_Length = 50 \mu\text{m}$  y  $PZR\_Width = 13 \mu\text{m}$ .

#### 4.4 Análisis de la interconexión del transductor piezoresistivo

Como se ha explicado anteriormente, la disposición de cuatro piezoresistencias colocadas siguiendo la configuración de puente de Wheatstone permite detectar variaciones muy pequeñas de resistencia, además de reducir el efecto que tiene la temperatura sobre dichas variaciones.

Sin embargo, dicho esquema no resulta práctico a la hora de realizar medidas una vez fabricado el dispositivo, puesto que no facilita el acceso a cada uno de los extremos de las piezoresistencias con el fin de obtener datos reales de tensión, resistencia, etc. Por consiguiente, en esta sección se considera un nuevo

esquema de piezoresistencias en el que se incorporan elementos adicionales que conectan dichos extremos con la parte más externa del diseño, de forma que sea posible obtener medidas de cada piezoresistencia.

Para el caso de PZR2 y PZR4 parece obvio que basta insertar un terminal en cada extremo, de la manera que se ilustra en la Figura 4.14, para conectarlas con la parte exterior de la membrana.

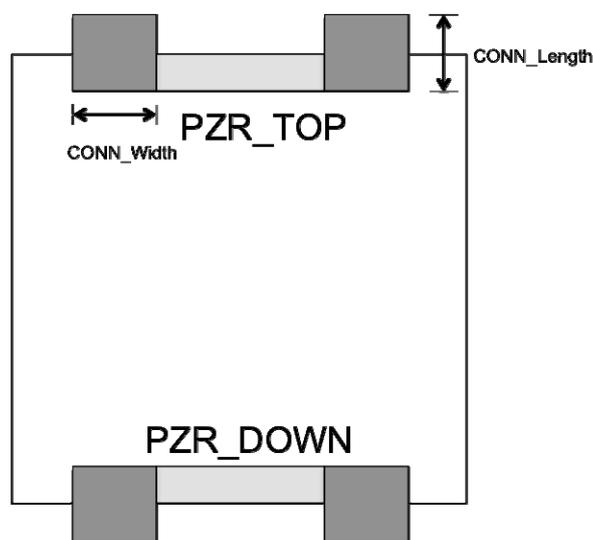


Figura 4.14: PZR2 y PZR4 con conectores hacia el exterior de la membrana.

Hay que tener en cuenta que cada conector es una nueva piezoresistencia, con lo que se crean dos sistemas de piezoresistencias, cada uno compuesto por 3 elementos piezoresistivos, teniendo cada elemento su valor de resistencia. Por lo tanto, cada conector introduce un incremento en el valor resistivo a las piezoresistencias originales.

Con el fin de que estos nuevos elementos afecten lo menos posible al funcionamiento del transductor, se intenta ajustar las dimensiones de los conectores para que sus valores de resistencia no superen el orden de unos pocos cientos de ohmios. Sin embargo, esto supone incrementar de forma desmesurada el

área ocupada por dichos conectores, por lo que se opta por considerarlos parte del transductor.

Para PZR1 y PZR3 el conexionado no resulta tan obvio como en el caso anterior. Teniendo en cuenta los ohmios adicionales, de nuevo, se trata de buscar un esquema en el que sea necesario el menor número de conectores y que éstos ocupen la menor área posible. Por lo que se llega a la configuración mostrada en la Figura 4.15.

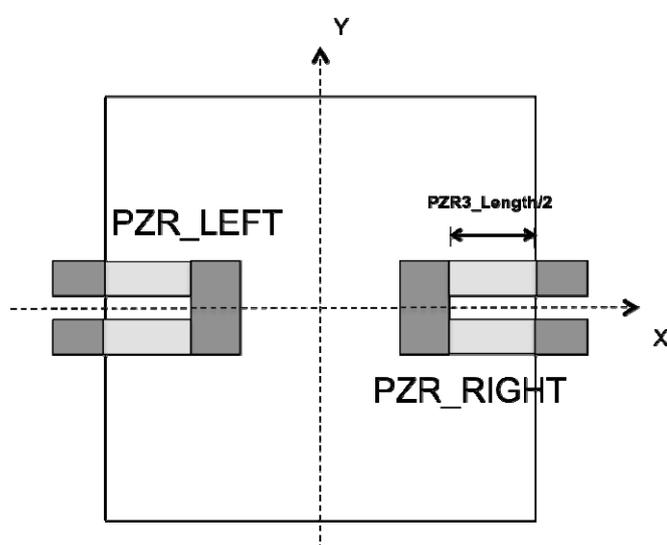


Figura 4.15: Nueva configuración para PZR1 y PZR3 con conectores hacia el exterior de la membrana.

En esta ocasión, se ha dividido PZR3 en dos piezoresistencias equivalentes, cada una con la mitad de longitud que la anterior, y enlazadas entre ellas a través de una nueva piezoresistencia, además de haber introducido los elementos conectores con el exterior.

Otra diferencia con la configuración original es que ahora las nuevas parejas de resistencias dejan de estar situadas sobre el eje X y pasan a ser simétricas con respecto a dicho eje. Así, se asegura que el comportamiento de las piezoresistencias superiores debido al estrés que les afecta sea similar al comportamiento de las que se encuentran por debajo del eje X.

No obstante, se intenta que éstas estén lo más próximas al eje, para aprovechar la alta sensibilidad de dicha zona. Pero en este punto, de nuevo han de tenerse en cuenta las limitaciones de la tecnología pues el fabricante recomienda una separación mínima entre elementos del mismo material de 5  $\mu\text{m}$ .

Sin embargo, puesto que los conectores se encuentran en una zona afectada por la fuerza ejercida, esto significa que se contrarresta el buen funcionamiento del sistema inicial de piezoresistencias y se reduce el efecto de la configuración en puente de Wheatstone. Por lo tanto, es necesario un nuevo diseño para alcanzar los objetivos que se pretenden, ajustando de nuevo las dimensiones y posición de cada piezoresistencia.

#### 4.5 Diseño físico de las piezoresistencias y ajuste de parámetros

Una vez se han analizado todos los elementos y factores que intervienen en el diseño del transductor piezoresistivo que se pretende fabricar, y después de las modificaciones introducidas en el apartado 4.4, en la sección actual se rediseña el sistema de piezoresistencias de la capa de polisilicio y vuelven a ajustar los parámetros que afectan a la sensibilidad y valor de resistencia.

En base a las consideraciones anteriores, el nuevo esquema de piezoresistencias es el mostrado en la Figura 4.16.

Con el nuevo diseño es necesario ajustar los parámetros que afectan a la sensibilidad y valor de resistencia, es decir la posición y dimensiones de cada elemento piezoresistivo.

Para el objetivo que se pretende alcanzar, es necesario garantizar una sensibilidad suficiente para detectar cambios de presión de baja magnitud, por lo que se busca que la variación relativa de resistencia de cada grupo de piezoresistencias sea superior al 1%.

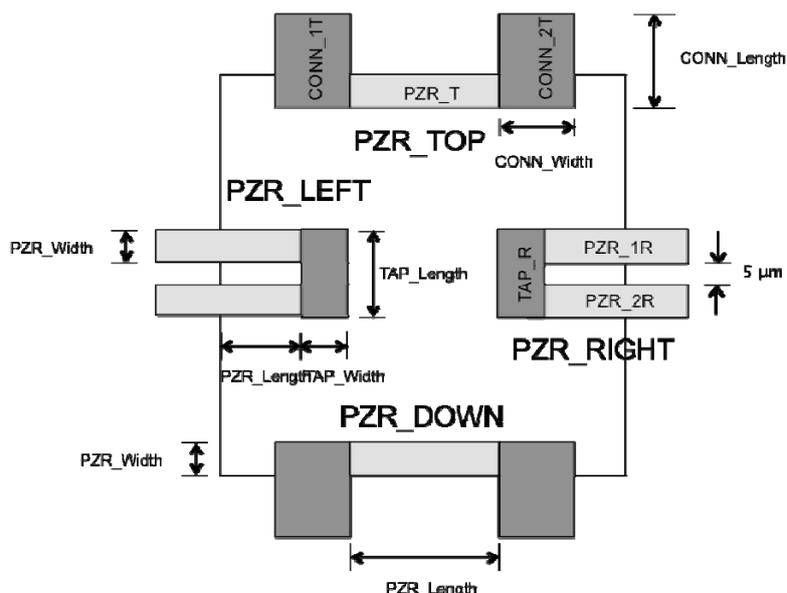


Figura 4.16: Sistema de piezoresistencias.

Como puede observarse en la Figura 4.16, los conectores están orientados de forma perpendicular a las piezoresistencias que formaban el transductor originalmente, además se ven afectados por el estrés debido a la deformación del diafragma, así que se dan algunos inconvenientes a solventar.

Con el fin de facilitar el análisis y solución de dichos problemas, se consideran los grupos de piezoresistencias **PZR\_TOP** y **PZR\_RIGHT**. Así, por un lado se tiene que **CONN\_1T** y **CONN\_2T** contrarrestan el funcionamiento de **PZR\_T** y, por otro lado, **TAP\_R** descompensa la salida del sistema **PZR\_RIGHT**.

Además, puesto que la longitud de los conectores **CONN\_1T** y **CONN\_2T** ha de ser igual a la suma del ancho de **PZR\_T** más la distancia desde la misma hasta la zona de conexión, a  $50 \mu\text{m}$  del borde del diafragma, esto introduce una considerable desviación de resistencia con respecto al valor nominal.

Por otro lado, **PZR\_1R** y **PZR\_2R** también se extienden hasta la zona de conexión, por lo que esto junto a **TAP\_R** provocan un incremento en la resistencia del sistema, que habrá de compensarse.

Como ya se mencionó en la Sección 4.3, el valor de resistencia en reposo se puede ajustar mediante simulaciones en las que se varían las dimensiones de los elementos piezoresistores hasta conseguir el valor deseado ( $4\text{ K}\Omega$ ). No obstante, ha de tenerse en cuenta que el aumento del área ocupada por las piezoresistencias y sus conectores va en detrimento del rendimiento del sensor capacitivo.

Para el caso de PZR\_TOP, la desviación puede compensarse asignando un valor alto a CONN\_Width. Además, es necesario reducir las dimensiones de PZR\_T sin descuidar que ésta ocupe la mayor área posible, con el fin de garantizar que su contribución a la sensibilidad del sistema sea superior que la de los conectores.

Para las dimensiones mostradas en la Tabla 4.1, las curvas de resistencia de los elementos de PZR\_TOP son las que se observan en la Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19.

	PZR_T	CONN_1T	CONN_2T
Longitud ( $\mu\text{m}$ )	56.5	83.0	83.0
Ancho ( $\mu\text{m}$ )	23.0	100.0	100.0

Tabla 4.1: Valores de longitud y ancho para PZR\_TOP  $\approx 4\text{ K}\Omega$ .

De la Figura 4.17 y la Figura 4.18 puede desprenderse que, tal y como se deseaba, se ha logrado que el cambio relativo de resistencia de PZR\_T alcance el 17.45%, frente al 4.12% de los conectores CONN\_1T y CONN\_2T. Por lo que la contribución de PZR\_T a la sensibilidad del sistema de piezoresistencias PZR\_TOP predomina sobre la de los conectores.

En la Figura 4.19, se observa que el comportamiento del conjunto de piezoresistencias PZR\_T mantiene la linealidad deseada y que la variación relativa de resistencia es del 8.41%.

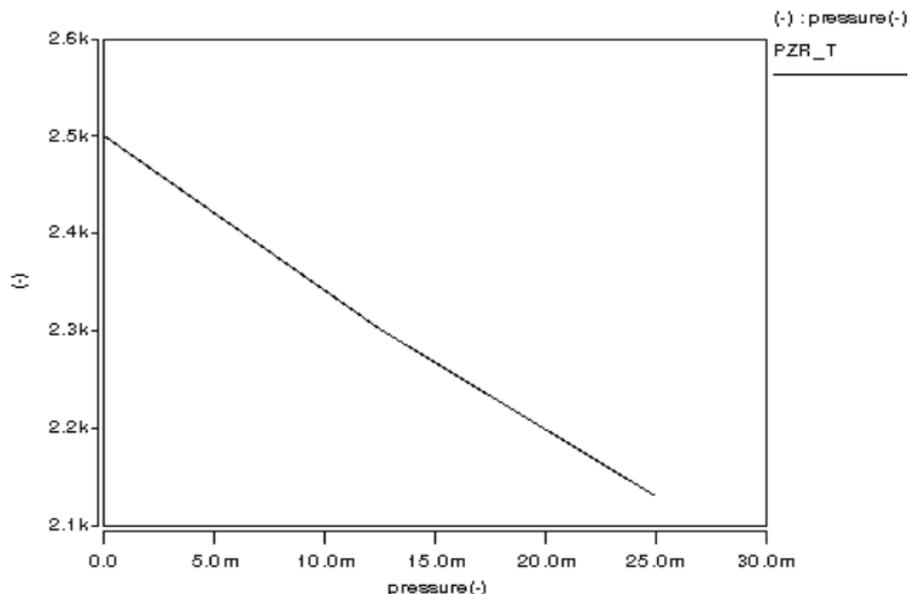


Figura 4.17: Curva de resistencia de PZR\_T frente a la presión.

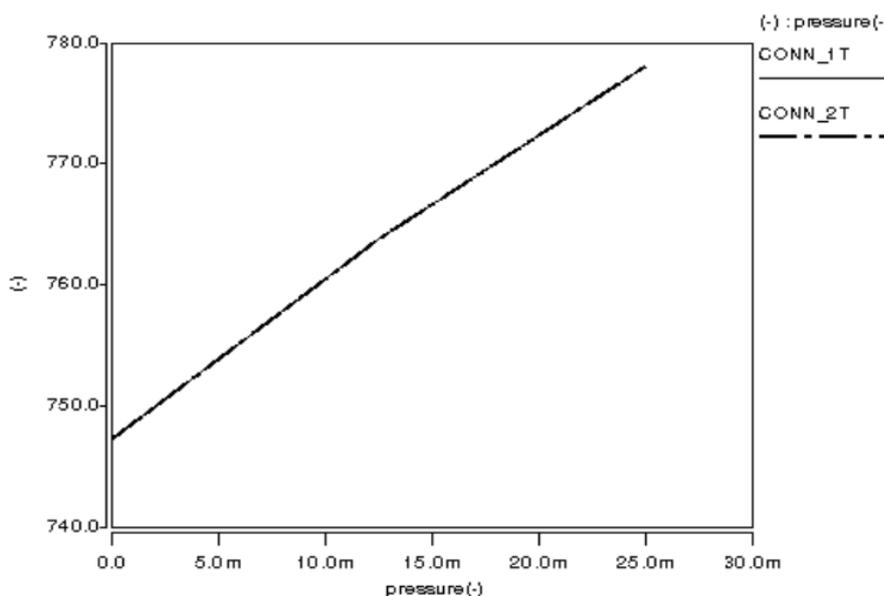


Figura 4.18: Curvas de resistencia de CONN\_1T y CONN\_2T vs. Presión.

En cuanto al grupo de piezoresistencias que componen PZR\_RIGHT, inicialmente se ha considerado extender PZR\_1R y PZR\_2R hasta la zona de conexión (a 50µm del borde de la membrana). Pero esto provoca que para conseguir una resistencia del conjunto igual a 4 KΩ, el comportamiento del TAP\_R sea el que predomine con respecto a las otras dos piezoresistencias.

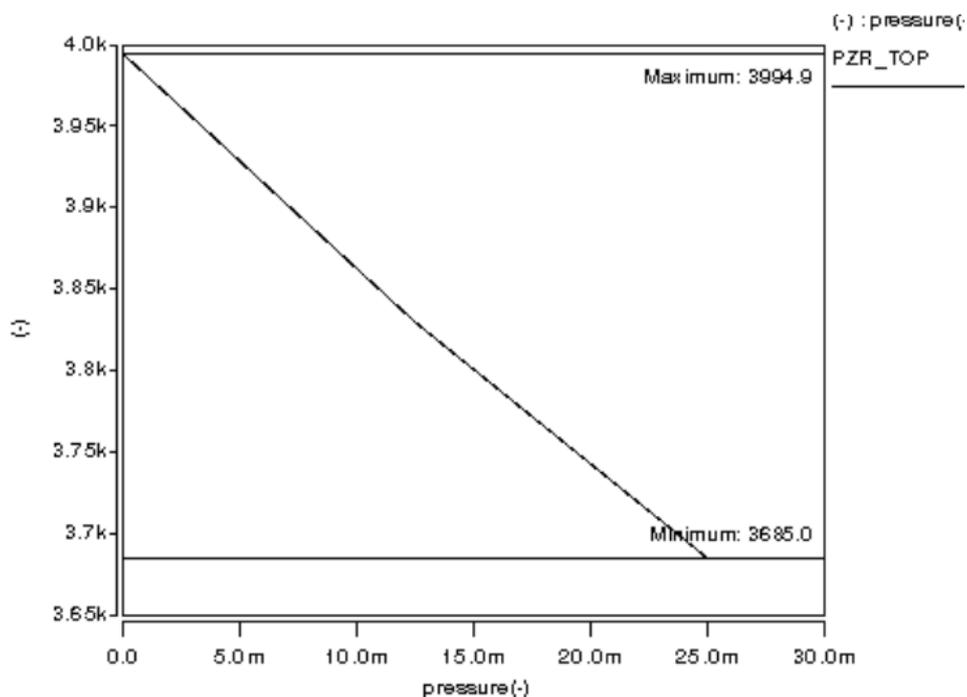


Figura 4.19: Curva de resistencia de PZR\_TOP frente a la presión.

Por lo tanto, se ha decidido añadir conectores adicionales para alcanzar la zona de conexión, lo cual significa un aumento fijo de la resistencia, pero que no es sensible a las variaciones de presión. Además, dimensionados adecuadamente el incremento de resistencia es asumible.

No obstante, la inclusión de TAP\_R sigue provocando un aumento de resistencia variable con la presión. Asimismo, su longitud coincide con el ancho de PZR\_1R y PZR\_2R y la separación entre éstos, con lo que aumentar este ancho implica aumentar también la longitud de TAP\_R, cosa que puede contrarrestar el efecto de PZR\_1R y PZR\_2R.

Por consiguiente, hay que buscar un equilibrio entre las dimensiones de cada elemento, de forma que el valor de resistencia en reposo esté entorno a 4 KΩ y el funcionamiento del sistema sea el deseado.

Para los valores que aparecen en la Tabla 4.2, los resultados de cada elemento de PZR\_RIGHT son los que se ilustran en la Figura 4.20, Figura 4.21 y Figura 4.22.

	PZR_1R	PZR_2R	TAP_R
Longitud ( $\mu\text{m}$ )	38.0	38.0	67.0
Ancho ( $\mu\text{m}$ )	23.5	23.5	82.5

Tabla 4.2: Valores de longitud y ancho para PZR\_RIGHT  $\approx 4 \text{ K}\Omega$ .

Como puede observarse en las Figura 4.20 y Figura 4.21, también en esta ocasión se ha conseguido que la contribución de PZR\_1R y PZR\_2R sea superior que la del elemento de conexión TAP\_R, con unas variaciones relativas de resistencia de 13.77% y 0.75%, respectivamente, lo cual significa que la sensibilidad de TAP\_R no afecta significativamente a la del conjunto PZR\_RIGHT. No obstante, este conector TAP\_R sufre un cambio de linealidad considerable a partir de cierta presión que, por suerte no afecta de forma notable a la linealidad de la salida final.

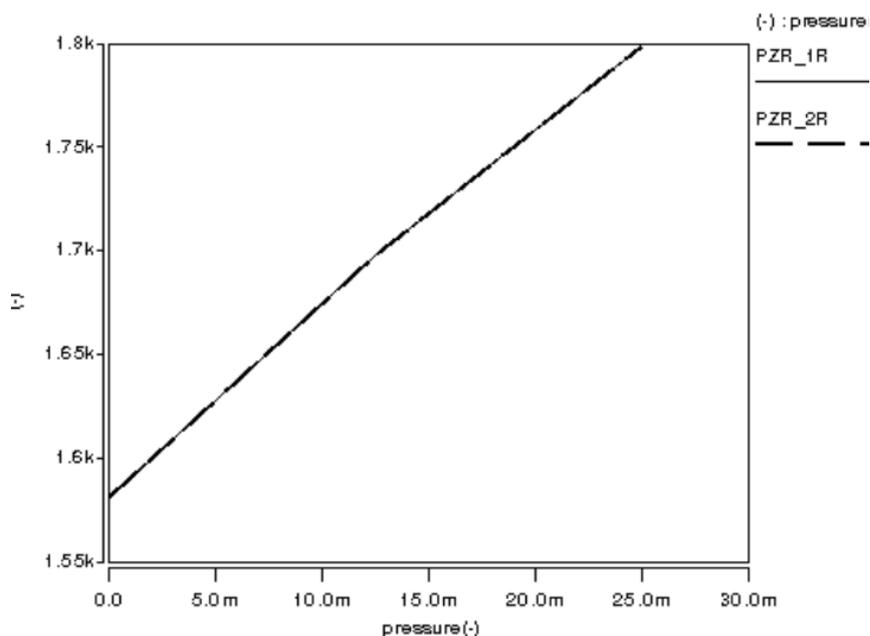


Figura 4.20: Curvas de resistencia de PZR\_1R y PZR\_2R frente a la presión.

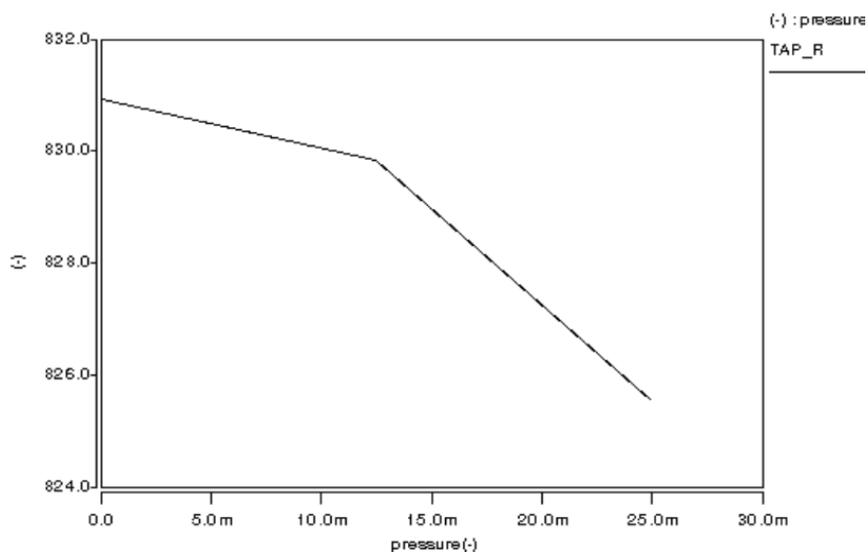


Figura 4.21: Curva de resistencia de TAP\_R vs. Presión.

De esta forma, se logra el resultado que se muestra en la Figura 4.22, donde se aprecia que la variación relativa en la resistencia del grupo de piezoresistencias PZR\_RIGTH es del 10.67%.

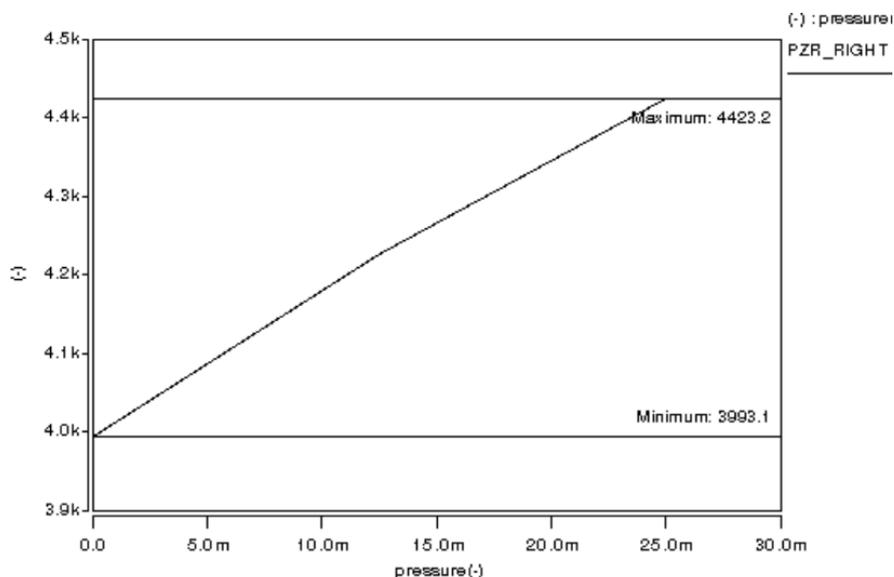


Figura 4.22: Curva de resistencia del conjunto PZR\_RIGHT vs. Presión

La Tabla 4.3, recoge la variación relativa de resistencia de cada una de las piezoresistencias estudiadas. De dicha tabla se deduce que los conectores apenas repercuten en la sensibilidad de PZR\_TOP y PZR\_RIGHT, siendo las piezoresistencias PZR\_T y PZR\_1R y PZR\_2R las más sensibles a las deflexiones de

la membrana. De esta forma, se garantiza la efectividad del puente de Wheatstone en el nuevo diseño.

Piezoresistencia	$\Delta R/R$ (%)
PZR_T	17.45
CONN_1T	4.12
CONN_2T	4.12
PZR_TOP	8.41
PZR_1R	13.77
PZR_2R	13.77
TAP_R	0.75
PZR_RIGHT	10.67

Tabla 4.3: Variación relativa de resistencia.

Sin embargo, también se aprecia que la sensibilidad de PZR\_RIGHT es algo mayor que la de PZR\_TOP, por lo que habrá que desplazar el primer grupo de piezoresistencias en busca de una localización donde su sensibilidad sea similar a la de PZR\_TOP.

En la Figura 4.23, se muestra el desplazamiento que se le aplica al conjunto PZR\_RIGHT para aproximar su sensibilidad a la de PZR\_TOP. Así la respuesta de PZR\_RIGHT a la variación de presión es la que se observa en la Figura 4.24, siendo su nueva variación relativa de resistencia igual a 8.20%, la cual es equiparable a la de PZR\_TOP.

Finalmente, aunque no se haya podido alcanzar el valor exacto de 4 K $\Omega$  para cada grupo de piezoresistencias, la desviación no es significativa y el funcionamiento integrado del sistema de piezoresistencias no se ve afectado por

ello. Esto puede apreciarse en la Figura 4.25, donde se representan las curvas de resistencia de PZR\_TOP y PZR\_RIGHT.

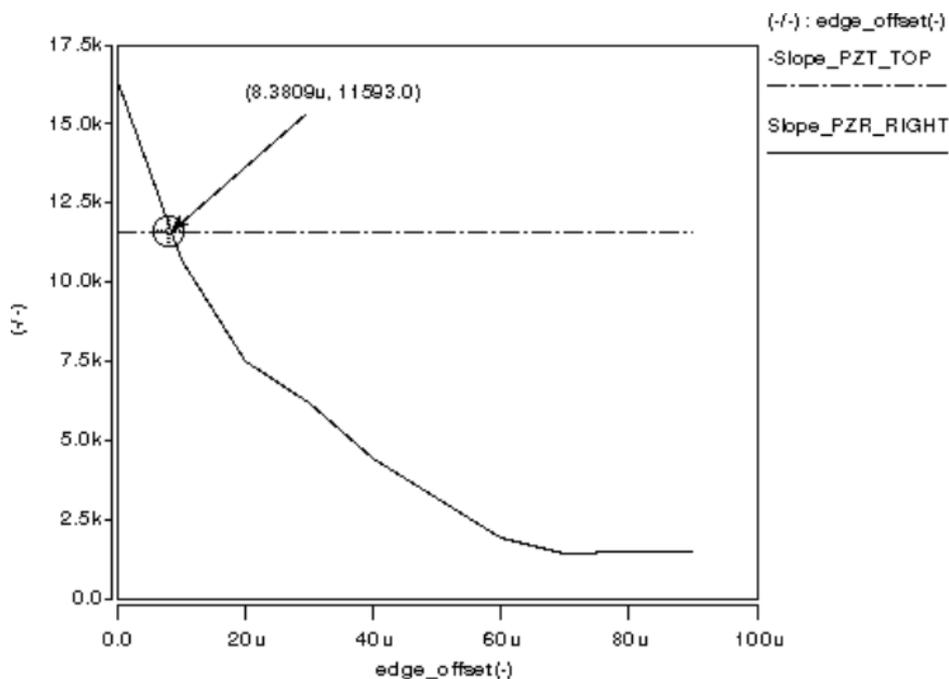


Figura 4.23: Punto de corte de las pendientes resistivas de PZR\_TOP y PZR\_RIGHT.

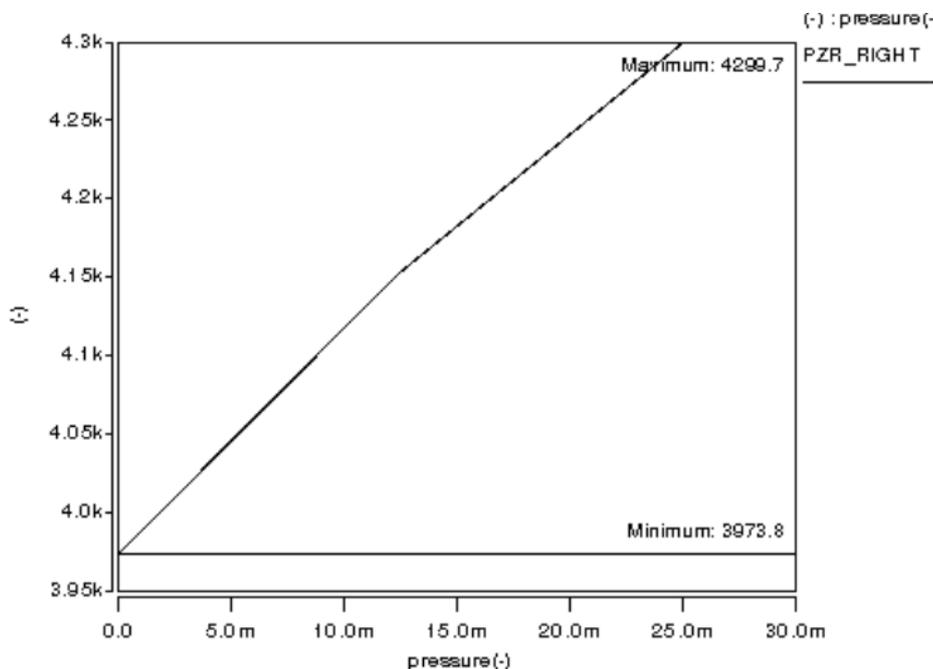


Figura 4.24: Curva de resistencia de PZR\_RIGHT frente a la presión.

Asimismo, en esta figura se aprecia la linealidad del comportamiento de cada conjunto de piezoresistencias y se observa que la salida de PZR\_TOP es

inversamente proporcional a la salida de PZR\_RIGHT, lo cual asegura el correcto funcionamiento del transductor piezoresistivo diseñado.

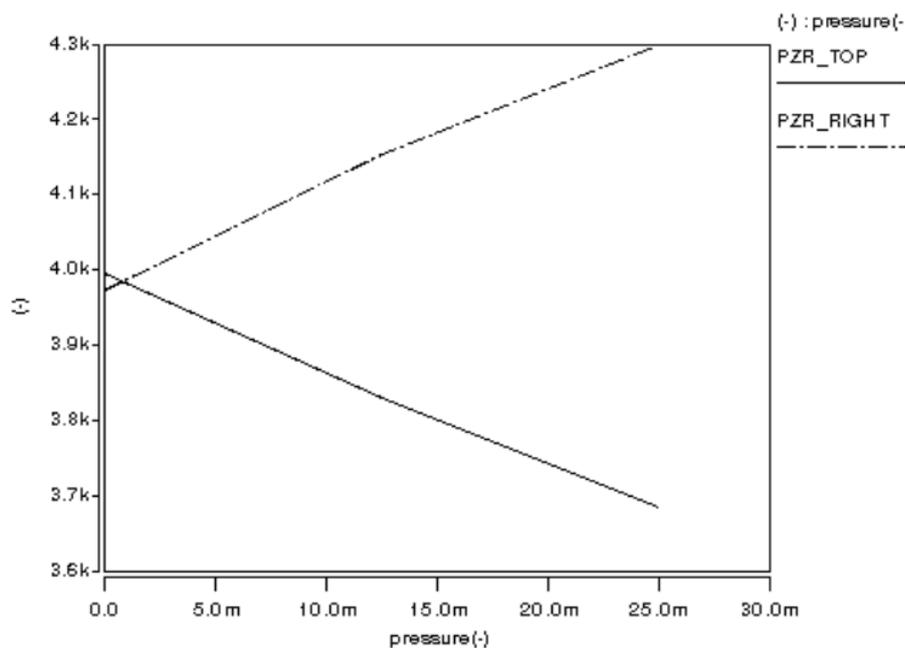


Figura 4.25: Curvas de resistencia PZR\_TOP y PZR\_RIGHT vs. Presión.

	Longitud (μm)	Ancho (μm)	$\Delta R/R$ (%)
PZR_TOP	83.0	256.5	8.41
PZR_T	56.5	23.0	17.45
CONN_1T	83.0	100.0	4.12
CONN_2T	83.0	100.0	4.12
PZR_RIGHT	120.5	67.0	8.20
PZR_1R	38.0	23.5	9.83
PZR_2R	38.0	23.5	9.83
TAP_R	67.0	82.5	0.34

Tabla 4.4: Dimensiones y sensibilidad de las piezoresistencias.

Por último, a modo de resumen, se presenta la Tabla 4.4 que recoge las dimensiones de cada una de las piezoresistencias descritas anteriormente, así como las variaciones relativas de resistencia, y donde se observa que cada conjunto permite detectar presiones con una sensibilidad superior al 1%.

## 5 Implementación con tecnología MetalMUMPs de MEMSCAP

La tecnología MetalMUMPs del fabricante MEMSCAP consiste en un proceso de superposición de materiales con micro-mecanizado por superficie, como se describió en la Sección 3. Esto implica que el desarrollo del diseño ha de ser entendido como un proceso jerárquico, de forma que cada fase del proceso de fabricación repercute durante la etapa de diseño.

En este capítulo se detalla el proceso de diseño jerárquico, teniendo en cuenta las limitaciones y pormenores de la fabricación con esta tecnología.

### 5.1 Diseño jerárquico

Una vez desarrollado el sistema de piezoresistencias que compone el transductor piezoresistivo, se procede a su integración con el sensor/actuador capacitivo o varactor. Las piezoresistencias se utilizan para medir la deformación de la membrana –medida indirecta. Este diseño de prototipo permite calibrar la tecnología MetalMUMPS de MEMSCAP para la realización de sensores/actuadores basados en membrana.

El sensor capacitivo está diseñado para que detecte las variaciones de capacidad entre la capa de polisilicio y la capa superior de nitruro, generadas por la deflexión de ésta última.

A la hora de diseñar el sensor capacitivo se ha tenido en cuenta la ubicación y dimensiones de los elementos piezoresistivos, con el fin de que el funcionamiento de ambos sistemas sea el apropiado y con un alto rendimiento.

Por tanto, la membrana de polisilicio donde se ha diseñado el transductor piezoresistivo actúa también como uno de los electrodos del sensor capacitivo. Esto obliga a separar la región donde están ubicadas las piezoresistencias del resto de la membrana, para que no se produzcan cortocircuitos entre las señales de

ambos sistemas, por lo que la disposición de las piezoresistencias y el electrodo de polisilicio queda de la manera que se ilustra en la Figura 5.1.

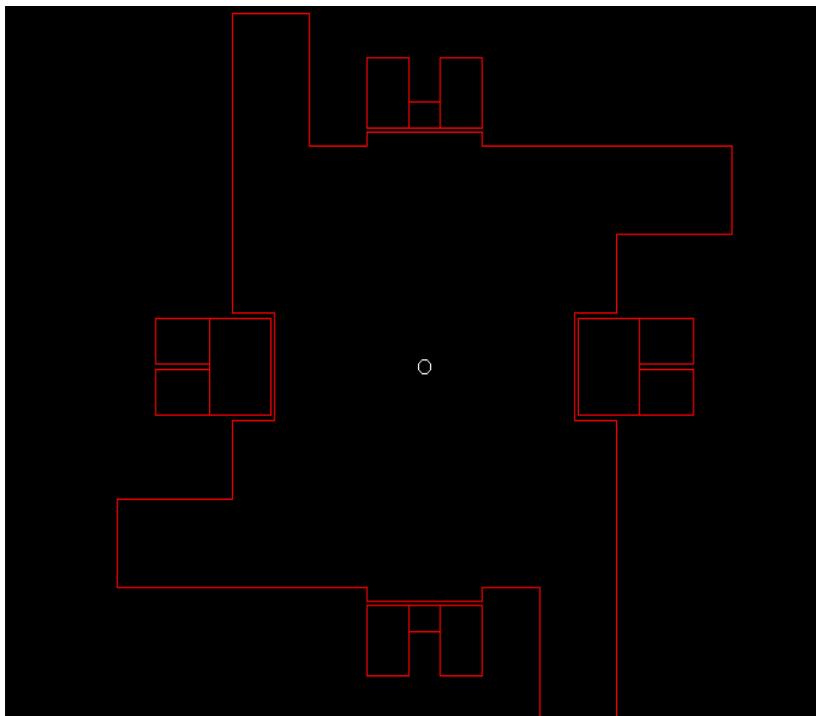


Figura 5.1: *Layout* de las piezoresistencias y el electrodo de polisilicio.

Al haber separado las piezoresistencias del resto de la membrana, ahora el comportamiento de éstas dependerán de la deflexión de la capa superior de nitruro, por lo que el estudio de la variación de estrés visto en el apartado 4.1 y los desarrollos posteriores siguen siendo válidos.

A este diseño en polisilicio se le añaden las conexiones donde podrán tomarse medidas, tanto del transductor piezoresistivo como del sensor capacitivo, lo que implica un nuevo aumento en el valor de resistencia que se va a medir. No obstante, se ha tratado que dicho incremento no fuera notable.

Igualmente, es imprescindible incluir las perforaciones necesarias para permitir el paso del ácido que elimina la capa de óxido inferior y que a su vez crea la cavidad en el sustrato. Por lo tanto, la capa de polisilicio queda como se muestra en la Figura 5.2.

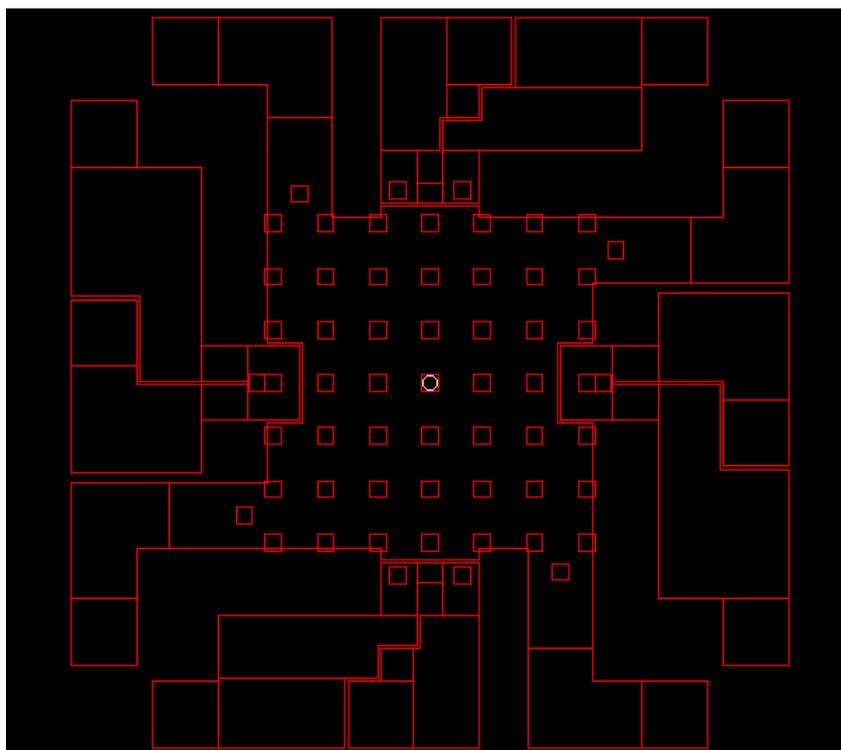


Figura 5.2: *Layout* completo de la capa de polisilicio.

Como se observa en la imagen, dichas perforaciones ocasionan una pérdida de área en el polisilicio que reduce el rendimiento del varactor, y también de las piezoresistencias, ya que siguiendo las reglas de diseño, no se ha podido eludir la perforación de las mismas para permitir que el ácido pudiera eliminar el óxido existente justo debajo de ellas.

Además, en el caso de las piezoresistencias de los lados y simétricas al eje X, durante el proceso de optimización se intentó que éstas estuvieran lo más próximas al eje para aprovechar la alta sensibilidad de dicha zona. Pero en este punto, si bien el fabricante recomienda una separación mínima de 5  $\mu\text{m}$  entre elementos del mismo material, el proceso de fabricación requiere perforar las capas superior e inferior de nitruro con agujeros de 5 $\times$ 5  $\mu\text{m}$  e impone una separación mínima entre los límites de éstos con el polisilicio de otros 5  $\mu\text{m}$ . Por tanto, la separación entre piezoresistencias debía ser, al menos, de 20  $\mu\text{m}$ .

No obstante, con el fin de evitar perforar las piezoresistencias principales (las paralelas al eje X), los agujeros se han desplazado hasta los conectores. Sin embargo, esta medida tampoco es del todo satisfactoria, ya que al reducir el área ocupada por éstos se incrementa la resistencia del componente.

Adicionalmente, el proceso impone que la distancia máxima entre perforaciones sea de 100  $\mu\text{m}$ , así que cualquier fragmento de material con dimensiones superiores es perforado. De esto también hay que percatarse a la hora de dimensionar las piezoresistencias.

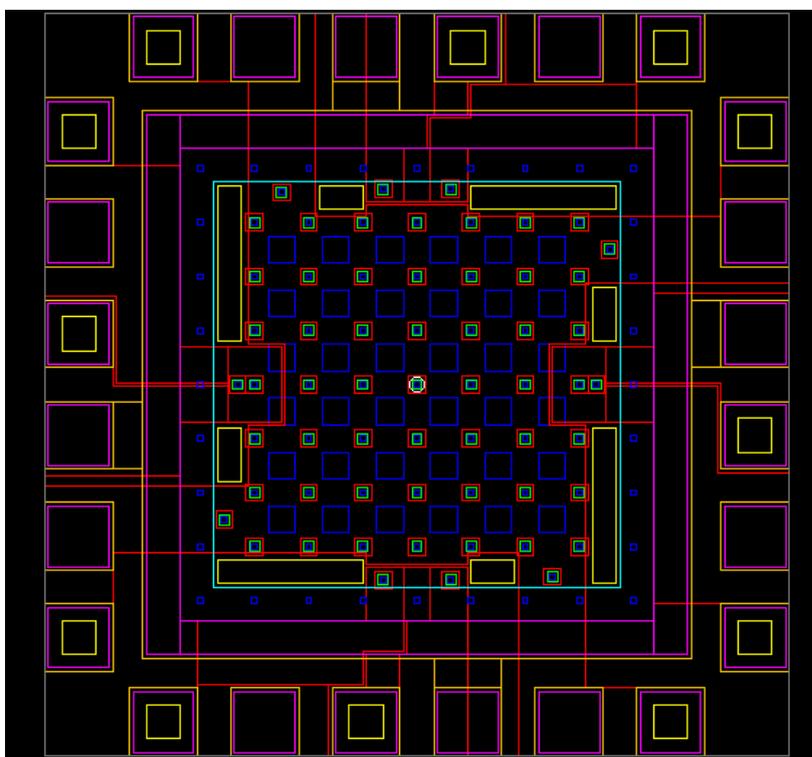


Figura 5.3: Diseño jerárquico del dispositivo a fabricar.

El desarrollo del resto de capas de material también tiene sus propias limitaciones —reglas de diseño—, por lo que éstas van añadiéndose de forma jerárquica al diseño del dispositivo, resultando el *layout* final que se presenta en la Figura 5.3. En el dispositivo desarrollado, también se incluyen la periferia que permite medir y alimentar la membrana con una estación de puntas de prueba. Los tipos de *pads* utilizados son SGS (*Signal-Ground-Signal*) y GSG (*Ground-Signal-*

*Ground*). Todas las piezoresistencias están conectadas a *pads* del tipo SGS. La membrana en polisilicio, que está aislada de las piezoresistencias, está conectada a pads tipo GSG. La membrana en metal está conectada a pads tipo GSG.

## 5.2 Diseño en diferentes tamaños

Sin lugar a dudas, tal y como ha quedado reflejado, las dimensiones de las piezoresistencias influyen en las prestaciones del sensor/actuador. Por otro lado, no hay que perder de vista que se desea realizar una calibración tecnológica. En este caso, puesto que la tecnología MetalMUMPS establece un ancho determinado para cada capa, no es posible modificar el ancho de la capa de polisilicio, donde se localizan dichas piezoresistencias. Sin embargo, sí es posible variar la superficie de la capa, por lo que se han realizado tres versiones distintas del dispositivo diseñado inicialmente en las que se ha cambiado el perímetro de la membrana, pero manteniendo su forma cuadrada.

La Figura 5.4 muestra la distribución de la componente Y del estrés entorno al centro del borde superior del diafragma para las tres dimensiones de membrana realizadas. Esta distribución es similar para la componente X del estrés que se experimenta en los bordes laterales.

Como se puede observar, este estrés es mayor para membranas más grandes, por lo que para los nuevos trazados geométricos cabe esperar una mejora de la sensibilidad de las piezoresistencias en dichas zonas.

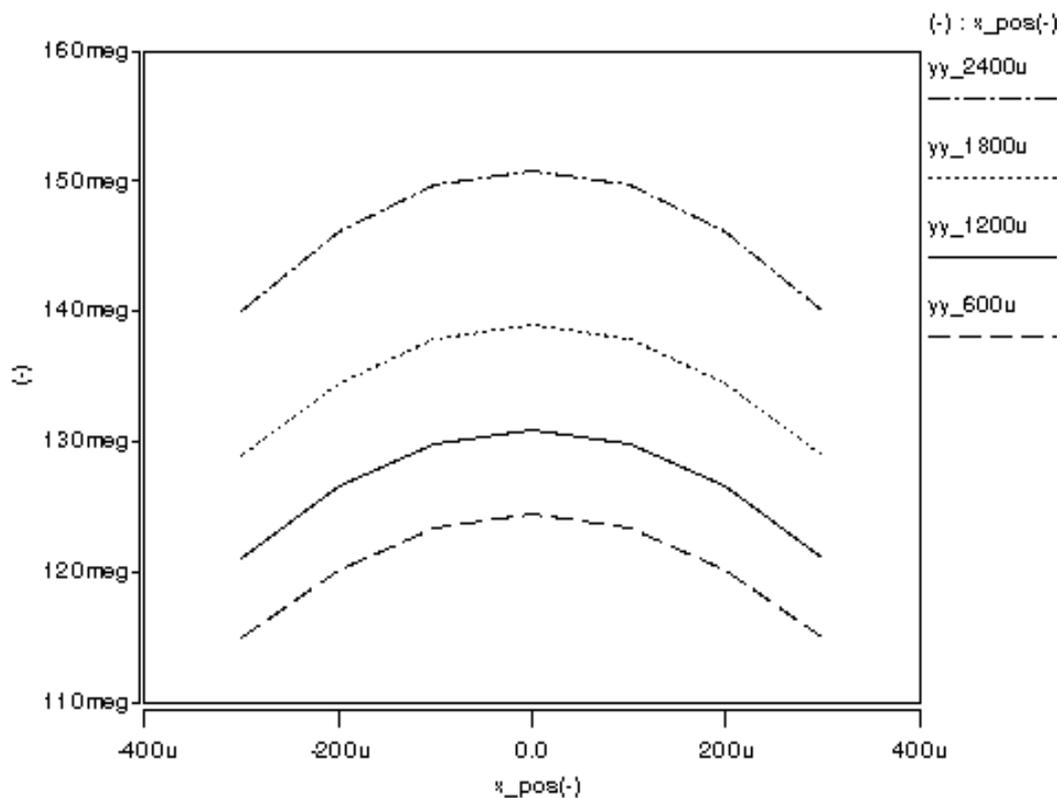


Figura 5.4: Distribución de la componente Y del estrés para distintos tamaños de membrana.

Si se denomina  $S_0$  al diseño inicial, cuya membrana era de  $600 \times 600 \mu\text{m}$ , los nuevos modelos son:

- $S_1$ :  $1200 \times 1200 \mu\text{m}$
- $S_2$ :  $1800 \times 1800 \mu\text{m}$
- $S_3$ :  $2400 \times 2400 \mu\text{m}$

Es decir, con esto se desea conocer el comportamiento de las versiones doble, triple y cuádruple del diseño  $S_0$ . Para cada uno de los casos, se ha simulado y diseñado de nuevo el sistema de piezoresistencias, siguiendo la metodología descrita en el capítulo 4, obteniéndose los valores mostrados en la Tabla 5.1, Tabla 5.2 y Tabla 5.3.

$S_1$	Longitud ( $\mu\text{m}$ )	Ancho ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta R/R$ (%)
PZR_TOP	75.0	300.0	14.29
PZR_T	75.0	25.0	8.82
CONN_1T	75.0	112.5	3.44
CONN_2T	75.0	112.5	3.44
PZR_RIGHT	300.0	105.0	14.61
PZR_1R	100.0	50.0	15.91
PZR_2R	100.0	50.0	15.91
TAP_R	105.0	200.0	5.61

Tabla 5.1: Dimensiones y sensibilidad de las piezoresistencias del diseño  $S_1$ .

$S_2$	Longitud ( $\mu\text{m}$ )	Ancho ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta R/R$ (%)
PZR_TOP	75.0	450.0	2.75
PZR_T	76.0	25.0	12.70
CONN_1T	75.0	187.0	22.55
CONN_2T	75.0	187.0	22.55
PZR_RIGHT	540.0	105.0	4.17
PZR_1R	96.0	50.0	4.77
PZR_2R	96.0	50.0	4.77
TAP_R	105.0	444.0	5.88

Tabla 5.2: Dimensiones y sensibilidad de las piezoresistencias del diseño  $S_2$ .

$S_3$	Longitud ( $\mu\text{m}$ )	Ancho ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta R/R$ (%)
PZR_TOP	70.0	500.0	2.35
PZR_T	62.0	20.0	3.22
CONN_1T	70.0	219.0	1.05
CONN_2T	70.0	219.0	1.05
PZR_RIGHT	660.0	85.0	5.55
PZR_1R	75.5	40.0	5.40
PZR_2R	75.5	40.0	5.40
TAP_R	85.0	584.5	9.79

Tabla 5.3: Dimensiones y sensibilidad de las piezoresistencias del diseño  $S_3$ .

En primer lugar, comparando la Tabla 4.4 del anterior capítulo con la Tabla 5.1, puede apreciarse que los sistemas PZR\_TOP y PZR\_RIGHT del diseño  $S_1$  alcanzan sensibilidades mayores que los del diseño inicial  $S_0$ , como era de esperar. Sin embargo, las piezoresistencias actuando individualmente no alcanzan valores tan favorables.

También, puede observarse que la variación relativa de resistencia del diseño  $S_1$  es mayor que en el resto de diseños. Esto se debe a que las piezoresistencias de grandes dimensiones dejan de tener un comportamiento lineal, lo cual distorsiona la variación relativa de resistencia.

Por lo tanto, aunque se disponga de área suficiente para hacer crecer las piezoresistencias y alcanzar resultados óptimos en cuanto a sensibilidad y exactitud del valor resistivo, y tratando de reducir la contribución de los conectores, no es posible mantener la linealidad del sistema.

Por otro lado, durante el proceso de implementación con la tecnología MetalMUMPS, al igual que ocurrió con el sistema  $S_0$ , también han surgido contratiempos relacionados con las reglas de diseño. En esta ocasión, debido a las dimensiones de algunas piezoresistencias no ha sido posible evitar perforarlas, con la consecuente alteración que esto supone en el comportamiento de las mismas.

No obstante, todos los diseños presentados en este documento han sido integrados con los correspondientes elementos capacitivos y han sido implementados para su fabricación, tal y como se observa en la Figura 5.5, donde también pueden apreciarse otros diseños del equipo de investigadores de la División MEMS del IUAMA.

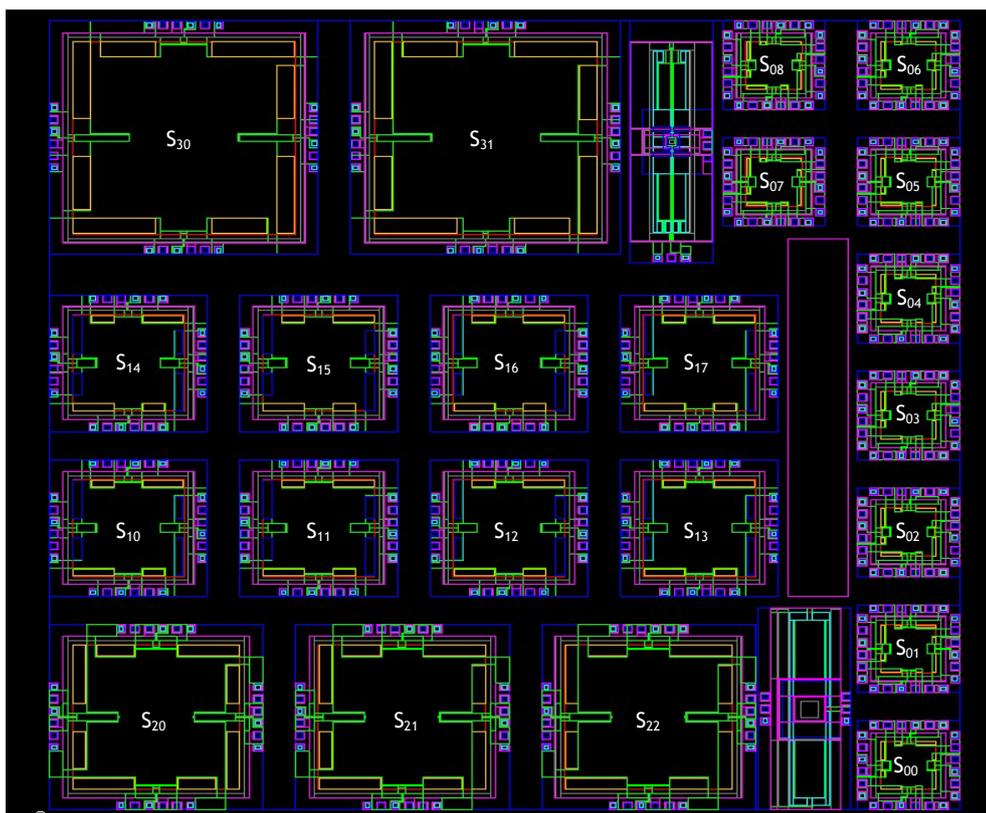


Figura 5.5: Imagen de los diseños a fabricar en la oblea de la División MEMS del IUMA<sup>1</sup>.

A modo de resumen, los diseños denominados  $S_{00}...S_{08}$  son variantes constructivas del  $S_0$ , situados en el lateral del dado. De igual forma los diseños denominados  $S_{10}...S_{17}$  son variantes del  $S_1$ , los  $S_{20}...S_{22}$  son variantes del  $S_2$ , y los  $S_{30}...S_{31}$  del  $S_3$ . Estas variantes constructivas se consultaron y discutieron con el fabricante de la tecnología. El fabricante suministra hasta un total de 45 muestras distintas que corresponden a 45 obleas distintas. Midiendo los dados  $S_x$  para una muestra se obtienen dispersiones de dado para diferentes tamaños de membranas. Midiendo las muestras se obtienen las dispersiones de oblea para diferentes tamaños de membrana.

<sup>1</sup> Nótese que dada la resolución de la imagen existen detalles constructivos que no se visualizan. Estos detalles constructivos distintos dan lugar a las variantes de dispositivos implementados.



## 6 Resumen de Resultados y Conclusiones

A partir del análisis mediante elementos finitos del estrés de una membrana cuadrada de polisilicio a la que se le aplica una presión uniforme en toda su superficie, se ha identificado que las regiones donde este estrés alcanza su máxima magnitud es entorno al centro de los bordes.

En base a esto, se ha realizado el estudio de la sensibilidad de un conjunto de piezoresistencias colocadas en dicha membrana siguiendo una configuración de puente de Wheatstone, como la que se mostró en la Figura 4.5. Este estudio ha permitido optimizar la pendiente resistiva de cada piezoresistencia, ubicándolas donde éstas experimentan mayor sensibilidad frente a la presión ejercida. Además, se ha obtenido que la respuesta resistiva de dichos elementos es un cambio lineal con respecto al cambio de presión.

También, se ha observado que el comportamiento de las piezoresistencias orientadas en paralelo a los lados del diafragma no es idéntico al funcionamiento de los elementos orientados en perpendicular, siendo las segundas más sensibles que las primeras. Lo cual significa que los elementos piezoresistivos son más sensibles a las variaciones en su longitud que a las variaciones de su ancho.

De ahí que haya sido necesario desplazar las piezoresistencias con orientación perpendicular hacia el centro de la membrana, en detrimento de su sensibilidad. De esta manera, se ha conseguido equiparar el comportamiento en valor absoluto de ambas piezoresistencias, pero manteniendo sus pendientes opuestas.

Por otro lado, debido a la necesidad de conectar los terminales de las piezoresistencias con el exterior de la membrana, ha sido preciso incorporar elementos conectores. En consecuencia, se consideró el esquema presentado en la

Figura 4.16, donde cada elemento adicional supone un incremento extra en el valor de resistencia del conjunto, además de afectar al funcionamiento lineal del sistema transductor.

Por tanto, para dicho esquema se han ajustado las dimensiones de todos los elementos a los valores de la Tabla 4.4, para que cada grupo de piezoresistencias alcance en reposo un valor de resistencia conjunto de  $4\text{ K}\Omega$ , y consiguiendo que cada grupo cuente con una variación relativa ( $\Delta R/R$ ) superior al 1%, tal y como se deseaba.

Por consiguiente, las simulaciones realizadas aportan datos satisfactorios en términos de sensibilidad y linealidad en el comportamiento del transductor. Por lo que, se integra con el sensor capacitivo (fuera del objeto de este trabajo) desarrollado para actuar conjuntamente.

Posteriormente, una vez ajustados ambos sistemas para un rendimiento apropiado, se procede al diseño jerárquico basado en capas para la fabricación con la tecnología MetalMUMPs de MEMSCAP.

En este punto, surgen algunos aspectos asociados a la fabricación y limitaciones de la tecnología MetalMUMPs, que no fueron considerados durante las fases anteriores, y que pueden afectar al funcionamiento tanto de la parte piezoresistiva como de la capacitiva.

Merece especial atención, las reglas relacionadas con las perforaciones de materiales, principalmente del polisilicio. Es decir, durante el proceso de fabricación, inicialmente entre las capas de nitruro, polisilicio y el sustrato se colocan unas capas de óxido de sacrificio que posteriormente se eliminan mediante una solución ácida.

Para permitir el paso de dicho ácido hasta la capa más interna de óxido es necesario perforar todas las capas superiores, para lo cual se establecen unas condiciones determinadas, que perjudican no sólo el funcionamiento del sistema de piezoresistencias diseñado, sino también la capacidad del sensor capacitivo integrado.

Por otro lado, durante el dimensionado y posicionamiento de las piezoresistencias también han de tenerse en cuenta las reglas relativas al *grid* de diseño, pues si bien se permiten saltos de máscara múltiplos de  $0.25\ \mu\text{m}$ , las dimensiones de cualquier elemento han de ser múltiplo de  $0.5\ \mu\text{m}$  para que su perfil coincida con el *grid* de diseño recomendado por el fabricante.

Pese a todo lo anterior, se consiguió superar todas las pruebas de verificación previas a la fabricación, con lo que una vez se disponga de los dispositivos enviados a fabricar, se procederá a la comprobación de las medidas reales, con el fin de obtener una comparativa entre los resultados de las simulaciones y los valores reales.

En lo que concierne exclusivamente al trabajo realizado, se indica lo siguiente. Según las simulaciones realizadas, el transductor piezoresistivo sobre membrana diseñado permite obtener un comportamiento lineal y alcanzar valores de sensibilidad satisfactorios para detectar pequeñas deflexiones.

Sin embargo, la tecnología MetalMUMPs conlleva algunas limitaciones que repercuten en el diseño del sistema de piezoresistencias, por lo que, el funcionamiento del dispositivo una vez fabricado puede que difiera con respecto al comportamiento esperado. Esta no coincidencia se debe, por un lado a las reglas de diseño de micro-perforado y por otro lado a la dispersión de proceso.

Nótese que el micro-perforado es un detalle constructivo que no ha sido posible simular dada las limitaciones de recursos de cómputo actuales. De aquí, que habrá un error sistemático en las simulaciones realizadas, pero al no ser aleatorio, con una posterior calibración se eliminan.

Por tanto, a pesar de la posibilidad de que los resultados del prototipo una vez fabricado no coincidan con los obtenidos durante las simulaciones llevadas a cabo, se puede concluir que se ha conseguido alcanzar los objetivos propuestos para este trabajo.

## Referencias

- [1] C. Liu, "Piezoresistive Sensors", in *Foundations of MEMS*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2006, pp 207-244.
- [2] G.K. Johns. "Modeling piezoresistivity in silicon and polysilicon," *Journal of Applied Engineering Mathematics*, vol 2, Apr 2006.
- [3] P. J. French. "Polysilicon: a versatile material for Microsystems," *Sensors and Actuators A*, vol 99, no. 1-2, pp 3-12, Apr 2002.
- [4] R. Colin Johnson. (2013, July 12). *Graphene MEMS Outperforms Silicon* [Online]. Available: [http://www.electronics-eetimes.com/en/graphene-mems-outperforms-silicon.html?cmp\\_id=7&news\\_id=222917591](http://www.electronics-eetimes.com/en/graphene-mems-outperforms-silicon.html?cmp_id=7&news_id=222917591)
- [5] Angell, J.B., S.C. Terry, and P.W. Barth, "Silicon Micromechanical Devices," *Scientific American Journal*, vol 248, p. 44-55, Apr 1983.
- [6] Partridge, A., et al., "A High-Performance Planar Piezoresistive Accelerometer," *IEEE Journal of Microelectromechanical Systems*, vol 9, no 1, pp 58-66, Mar 2000.
- [7] Sugiyama, S., M. Takigawa, and I. Igarashi, "Integrated Piezoresistive Pressure Sensor with Both Voltage and Frequency Output," *Sensors and Actuators A*, vol 4, pp 113-120, 1983.
- [8] J. Liu, "Integrated Micro Devices for Small-Scale Gaseous Flow Study," in *Electrical Engineering*. Pasadena, CA, Institute of Technology, 1994, pp 169. 7
- [9] Lee, W.Y., M. Wong, and Y. Zohar, "Pressure Loss in Constriction Microchannels," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol 11, no 3 pp 236-244, Jun 2002.
- [10] Kane, B.J., M.R. Cutkosky, and T.A. Kovacs, "A Traction Stress Sensor Array for Use in High-Resolution Robotic Tactile Imaging," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol 9, no, pp 425-434, Dec 2000. 9
- [11] J. Shajii, K.Y. Ng, and M.A. Schmidt, "A Microfabricated Floating-Element Shear Stress Sensor Using Wafer-Bonding Technology," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol1, no 2, pp 89-94, Jun 1992.
- [12] J. Chen, et al., "Towards Modular Integrated Sensors: The Development of Artificial Haircell Sensors Using Efficient Fabrication Methods," in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Las Vegas, NV, pp 2341-2346, Oct 2003.
- [13] K.Y. Madhavi, M. Krishna, C.S. Chandrashekhara Murthy, "Effect of Diaphragm Geometry and Piezoresistor Dimensions on the Sensitivity of a Piezoresistive Micropressure Sensor using Finite Element Analysis," *International Journal of Emerging Science and Engineering (IJESE)* vol 1, no 9, pp 35-40, Jul 2013.
- [14] K.Y. Madhavi, M. Krishna, C.S. Chandrasekhara. "Design of a Piezoresistive Micropressure Sensor using Finite Element Analysis," *International Journal of Computer Applications*, vol 70, no 3. 2013.
- [15] J. A. Montiel-Nelson et al., "Low-Power MEMS Pressure Sensor for Wireless Biomedical Applications," *IEEE MWSCAS*, Seoul, pp 1-4, Aug 2011.
- [16] *MetalMUMPs Design Handbook*, 4<sup>th</sup> ed, MEMSCAP Inc, 2012, pp 4-14.

- [17] A.L. Herrera-May, B.S. Soto-Cruz, et al., “Electromechanical analysis of a piezoresistive pressure micro-sensor for low-pressure biomedical applications,” *Revista Mexicana de Física*, vol 55, no 1, pp 14-24. Feb 2009.
- [18] P.O. Castro, E.F. Camacho. “Medidores de presión y de nivel,” in *Control e Instrumentación de Procesos Químicos*, Madrid, España, Síntesis, 1997, ch 17, pp 362-365.
- [19] Svedin, N., et al., “A New Silicon Gas-Flow Sensor Based on Lift Force,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol 7, no 3, pp 303-308, Sep 1998.
- [20] Svedin, N., E. Kalvesten, and G. Stemme, “A New Edge-Detected Lift Force Flow Sensor,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol 12, no 3 pp 344-354, Jun 2003.
- [21] Schmidt, M.A., “Wafer-to-Wafer Bonding for Microstructure Formation,” *Proc. IEEE*, vol 86, no 8, pp 1575-1585, Aug 1998.
- [22] Fan, Z., et al., “Design and Fabrication of Artificial Lateral-Line Flow Sensors”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol 12, pp 655-661, Sep 2002.
- [23] Svedin, N., E. Stemme, and G. Stemme, “A Static Turbine Flow Meter with a Micromachined Silicon Torque Sensor,” 14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Microelectromechanical Systems, Interlaken, Switzerland, Jan 2001, pp 208 - 211.
- [24] T. Lomas, A. Tuantranont and A. Wisitsoraat. “Polysilicon Piezoresistive Tactile Sensor Array Fabricated by PolyMMUMPs Process,” in 5<sup>th</sup> *IEEE SENSORS*. Daegu, 2006, pp 1313-1316.

