



Proyecto Fin de Carrera

Desarrollo y fabricación de un sensor de micro
fuerza para máquinas de medición por
coordenadas

Autor

Alejandro Sierra Granada

Director

Andreas Dietzel

Ponente

José Antonio Albajez García

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2013

Master's thesis

Masterarbeit

Development of a silicon and polymer three dimensional micro force sensor

Alejandro Sierra Granada

Matriculation number: 4249463

Technische Universität Braunschweig

Fakultät für Maschinenbau

Executed at the

Institut für Mikrotechnik

Examiner: Prof. Dr. Andreas H. Dietzel

Supervisor: Dipl.-Ing. Nelson Ferreira

Submitted on 22nd March 2013

Resumen

Este proyecto describe la fabricación y caracterización de un sensor de micro fuerza consistente en una mezcla de polímero y silicio que está en período de desarrollo por el Instituto de Microtecnología de Braunschweig (Alemania).

El objetivo de dicho sensor es su utilización como elemento sensible de un palpador por contacto para la nueva generación de máquinas de micro medición por coordenadas en las cuales se requieren fuerzas de palpado extremadamente bajas para no dañar el elemento medido así como elevadas precisiones (nanométricas).

Dentro de esta línea de investigación ya se han desarrollado anteriormente otros prototipos de sensores utilizando exclusivamente silicio que servirán de punto de partida para el presente trabajo. Así, el objetivo global de este PFC consistiría en la realización de un nuevo prototipo que introduzca en su estructura materiales poliméricos sustituyendo parte del silicio, y de esta manera lograr un sensor más flexible, sensible y económico.

Los resultados fueron satisfactorios, permitiendo continuar en futuras líneas de investigación probando otros polímeros para reemplazar al silicio anteriormente citado. Respecto a los resultados con los polímeros utilizados en este proyecto: uno tuvo un resultado insatisfactorio y el otro respondió correctamente durante todo el proceso de fabricación y tests realizados posteriormente.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer al Prof. Dr. Andreas H. Dietzel y al Instituto de Microtecnología de Braunschweig por la posibilidad de desarrollar mi proyecto de fin de carrera en un instituto con tanta capacidad y tecnología como es el IMT de Braunschweig.

Mis agradecimientos especiales para mi supervisor en Alemania el Dipl.-Ing. N. Ferreira quien me ayudó, enseñó y guió a través del desarrollo de mi proyecto de fin de carrera.

También debo dar las gracias a todo el personal técnico del IMT por su ayuda en cualquier momento que me era necesaria.

Por último, debo dar gracias al profesor encargado de llevar mi proyecto final de carrera y toda la documentación necesaria en Zaragoza, el Dr.-Ing. José Antonio Albajez, y por su ofrecimiento inicial de llevar mi proyecto en la Universidad de Zaragoza.

Tabla de contenidos

Resumen	II
Agradecimientos	III
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
1. Introducción	1
1.1 Introducción	1
1.2 Objetivos y alcance	2
2. Estado del arte	3
2.1 Sensores, generalidades y principio de funcionamiento del sensor desarrollado	3
2.1.1 Definición	3
2.1.2 Características principales de un sensor	3
2.1.3 Principio de funcionamiento del sensor desarrollado	4
2.1.4 Circuito de acondicionamiento: Puente de Wheatstone	6
2.2 Sensores de micro fuerza en 3D basados en silicio	8
2.2.1 Descripción general	8
2.2.2 Principio de funcionamiento	9
2.2.3 Fabricación	11
2.2.4 Diferentes diseños de estructura	12
2.2.5 Aplicación de los sensores de micro fuerza: Metroología dimensional	15
2.3 Caracterización de un sensor de micro fuerza	16
2.3.1 Sensibilidad	16
2.3.2 Propiedades mecánicas: dureza y deformación máxima	17
2.3.3 Midiendo las propiedades principales	18
2.4 Sensores de micro fuerza desarrollados	19
2.4.1 Membrana de silicio exclusivamente	19

2.4.2 Membrana desarrollada con un polímero.....	22
3. Fabricación de un sensor de micro fuerza con membrana polimérica.....	25
3.1 Introducción	25
3.2 Pasos para replazar la membrana de silicio por una polimérica	27
3.3 Polímeros utilizados.....	32
3.3.1 Poliamida.....	32
3.3.2 SU-8 5	35
3.3.3 PerMX 3050	36
4. Conclusión	37
5. Anexos	38
A. Fabricación con poliamida	38
B. Fabricación con PerMX 3050	51
C. Resultados y conclusiones	54
D. Proceso de fabricación de un sensor de micro fuerza con membrana polimérica realizada con PerMX 3050	61
E. Proceso de fabricación de un sensor de micro fuerza con membrana polimérica realizada con DuPont TM Kapton® polyimide film (50 µm).....	65
6. Bibliografía	69

Índice de figuras

Ilustración 2.1: Principio de funcionamiento de un sensor	3
Ilustración 2.2: Diagrama del tratamiento de una señal en un sistema de sensado	4
Ilustración 2.3: Esquema de un puente de Wheatstone completo con piezoresistores.	5
Ilustración 2.4 : Esquema de un piezoresistor [Web 05].....	6
Ilustración 2.5: Esquema de un puente de Wheatstone	7
Ilustración 2.6: Sensor que actúa detectando cambios de forma en la membrana	8
Ilustración 2.7: Los resultados de medida muestran la variación de la resistencia	9
Ilustración 2.8: Diagrama del principio de funcionamiento de un sensor de micro fuerza.....	9
Ilustración 2.9: Esfuerzos en la membrana causados por fuerzas aplicadas	10
Ilustración 2.10: Ilustración de un sensor de micro fuerza [Fer 12].....	10
Ilustración 2.11: Los 3 principales pasos de fabricación de un sensor.....	12
Ilustración 2.12: Esquema de un sensor de micro fuerza.	13
Ilustración 2.13: Diferentes diseños de membrana con un eje central	14
Ilustración 2.14: Esquema sencillo de una micro/nano MMC.	15
Ilustración 2.15: Esquema de un sensor de micro fuerza con los puentes de Wheatstone.....	16
Ilustración 2.16: Señal de salida en los puentes de Wheatstone.....	17
Ilustración 2.17: Gráfico de la dureza de un micro sensor fabricado en silicio [Tib 09].	17
Ilustración 2.18: Esquema del utilaje de medida de un sensor de micro fuerza.....	18
Ilustración 2.19. Esquema de un sensor en forma de cruz [Pha 08].....	19
Ilustración 2.20: Sensor de tres ejes con 24 piezoresistores [Büt 01].	21
Ilustración 2.21: Mejora del sensor anterior con menos piezoresistores [Büt 01].	22
Ilustración 2.22: Sensibilidades dependiendo del módulo de Young del material.....	24
Ilustración 3.1: Sensor desarrollado sin eje central.	25
Ilustración 3.2: Esquema del sensor de micro fuerza desarrollado	26
Ilustración 3.3: Paso antes de comenzar la adición del polímero.....	27
Ilustración 3.4: Polímero laminado en la superior de la oblea.	28
Ilustración 3.5: Polímero estructurado sobre la oblea, donde los pads han sido abiertos.	28
Ilustración 3.6: Estructuración de la parte trasera de la oblea	29
Ilustración 3.7: Estructuración con ICP de los últimos micrómetros.....	30
Ilustración 3.8: Sensor de micro fuerza correctamente desarrollado.....	30
Ilustración 3.9: Sensor defectuoso con la adhesión rota.....	31

Ilustración 3.10: Estructura de la poliamida [Web 04].....	32
Ilustración 3.11: Aberturas de poliamida usando el proceso de eliminación descrito	34
Ilustración 3.12: Velocidades de eliminación para una presión de 0.2 Torr [Tur 83].....	34
Ilustración 3.13: PerMX 3050 (azul) con dos polímeros de protección [Per da]	36
Ilustración 5.1: Oblea laminada con poliamida y SU-8 5 como adhesivo.	39
Ilustración 5.2: Oblea con una capa de aluminio sobre la poliamida.	39
Ilustración 5.3: Oblea con aluminio como máscara, preparado para estructurar la poliamida.	40
Ilustración 5.4: La oblea de la izquierda fue laminada a 80°C.	42
Ilustración 5.5: Detalle de una oblea estructurada a 200 W en el barrel etcher.	43
Ilustración 5.6: Velocidades de eliminación de poliamida.....	44
Ilustración 5.7: Test con la máquina ICP usando SF ₆ y O ₂ como combinación de gases.	45
Ilustración 5.8: Test con la máquina ICP usando SF ₆ , O ₂ y N ₂	45
Ilustración 5.9: Test con la máquina ICP usando SF ₆ , O ₂ y CF ₄	46
Ilustración 5.10: Velocidad de eliminación respecto al tiempo del proceso.	47
Ilustración 5.11: Visión microscópica de un pad estructurado.....	47
Ilustración 5.12: Fotografía de la cara inferior de una oblea.....	48
Ilustración 5.13: Zoom en la zona estructurada de una oblea.	49
Ilustración 5.14: Olas y efectos no deseados en la primera oblea probada.	52
Ilustración 5.15. PerMX 3050 correctamente estructurado.....	52
Ilustración 5.16: Obleas estructuradas con PerMX 3050 sobre ellas	53
Ilustración 5.17: Señal de salida frente a la posición en el eje Y. Sentido de 0 µm a 90 µm...55	55
Ilustración 5.18: Señal de salida frente a la posición en el eje Y. Sentido de 90 µm a 0 µm...55	55
Ilustración 5.19: Señal de salida frente a la posición en el eje Z. Sentido de 0 µm a 90 µm...56	56
Ilustración 5.20: Señal de salida frente a la posición en el eje Z. Sentido de 90 µm a 0 µm...57	57
Ilustración 5.21: Fuerza contra deformación en ambas direcciones principales.	58

Índice de tablas

Tabla 2.1: Sensibilidades en las direcciones vertical y horizontal	13
Tabla 2.2: Sensibilidades para el diseño de la membrana completa	20
Tabla 2.3: Sensibilidades para el diseño en forma de cruz (difusión P) [Pha 09].....	20
Tabla 2.4: Valores máximos de desplazamiento y fuerza de ambos diseños [Pha 09].	20
Tabla 2.5: Comparación entre la dureza.....	21
Tabla 2.6: Comparación entre las sensibilidades de una membrana.	23
Tabla 2.7: Comparación entre la dureza.....	23
Tabla 3.1: Propiedades más importantes de la poliamida utilizada.....	33
Tabla 3.2: Estructuración en plasma seco de poliamida PI-2611 [Chr 09]	34
Tabla 3.3: Propiedades de los diferentes tipo de SU-8.....	35
Tabla 5.1: Propiedades de los termoplásticos STAYSTIK®.	50
Tabla 5.2: Propiedades de la poliamida líquida comparadas con la poliamida en láminas.....	50
Tabla 5.3: Comparación de las características de un sensor de micro fuerza	59

1. Introducción

1.1 Introducción

El principal objetivo de este proyecto consiste en mejorar las características de cualquier sensor de micro fuerza desarrollado exclusivamente en silicio. Este proyecto se ha realizado en el “Instituto de Microtecnología de Braunschweig” que posee instalaciones avanzadas para el desarrollo de sensores de micro fuerza y para su calibración y testeo. Este principal objetivo fue intentado conseguir fabricando la membrana del sensor de micro fuerza con un polímero en vez de con silicio debido a que el silicio es demasiado frágil para aplicaciones industriales.

Para explicar el trabajo completo desarrollado en este proyecto, el presente documento se ha dividido en tres partes principales.

En primer lugar, la propia memoria comprende toda la recopilación de teoría estudiada y analizada sobre el mundo de los sensores de micro fuerza. Cómo son estos fabricados, testeados, su funcionamiento y presentando otros sensores de micro fuerza desarrollados por otros investigadores que han servido de base para este proyecto y como comparación de resultados. Además también se define como sustituir la membrana de silicio por una de polímero y se presentan los polímeros utilizados en el laboratorio.

La segunda parte, que engloba los anexos A y B, hace referencia a las técnicas de fabricación utilizadas para implementar cada uno de los dos polímeros utilizados en la membrana del sensor y en adición los problemas, tests y soluciones para la fabricación de la membrana con poliamida que fue inviable. Esta fabricación con poliamida englobó tres de los seis meses que duró la realización de este proyecto.

La última parte, anexo C, muestra los tests realizados al nuevo sensor de micro fuerza fabricado con polímero en la membrana. Estos tests se llevaron a cabo solo para la membrana con PerMX 3050 y corresponden a la medida de la sensibilidad y las características mecánicas principales del sensor. Los resultados son comparados con un sensor fabricado enteramente de silicio, señalando las características mejoradas y no mejoradas con el cambio de material.

Por último, en los anexos D y E, se muestran las hojas de procesos seguidas para la fabricación del sensor con ambos polímeros, muchos pasos no se encuentran detallados debido a que carecen de patente y no han sido desarrollados por el autor de este proyecto.

1.2 Objetivos y alcance

Los objetivos de este proyecto, tal y como fueron presentados y abordados al realizar el proyecto son:

- Revisión bibliográfica sobre sensores de micro fuerza.
- Selección de los polímeros que pueden ser utilizados en este sensor y procesados en el laboratorio (teniendo en cuenta los medios actualmente disponibles).
- Desarrollo de un sistema de fabricación tecnológicamente viable para este sensor con polímero incorporado.
- Caracterización de la mecánica y sensibilidad en los ejes principales: estudio de su precisión y resolución.
- Análisis de los resultados y sugerencias para su mejora posterior.

Analizando los objetivos previamente citados y comparándolos con el contenido ofrecido tanto en la presente memoria como en anexos adjuntos se puede afirmar que todos ellos han sido satisfactoriamente cumplidos; en especial teniendo en cuenta las dificultades que surgieron durante el desarrollo de este proyecto a causa de que un polímero resultó ser una mala elección, consumiendo la mitad del tiempo destinado al desarrollo del proyecto.

Hablando ahora respecto al alcance de este proyecto, debemos tener en cuenta que en el mundo industrial, cada vez más, las tolerancias y calidades finales son más restrictivas y exigentes imponiendo unas mediciones necesarias inferiores, en muchos casos, al micrómetro. Por lo tanto, cualquier investigación para mejorar cualitativamente el mundo de la micromedición es necesaria y útil. Este proyecto consigue mejorar un sensor cualitativamente mediante la simple implantación de dos pasos adicionales a un proceso de fabricación compuesto por alrededor de cuarenta etapas y mediante la utilización de un polímero cuyo coste material, comparado con el coste global del proceso, es perfectamente despreciable.

En conclusión, este proyecto presenta tanto una nueva dirección de investigación para implantar un polímero en sustitución de silicio en un sensor de micro fuerza, como mejora con el polímero finalmente desarrollado y fabricado (PerMX 3050), las características del sensor para poder ser utilizado más ampliamente en el mundo industrial.

2. Estado del arte

2.1 Sensores, generalidades y principio de funcionamiento del sensor desarrollado

2.1.1 Definición

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas (señales de entrada) y transformarlas en señales eléctricas (señales de salida) (Ilustración 2.1). Las señales de entrada pueden ser temperatura, intensidad luminosa, presión, fuerza, humedad, pH etc... Las señales de salida pueden ser un cambio en la capacidad de un condensador, en una resistencia, un voltaje o una corriente eléctrica [Web 01].

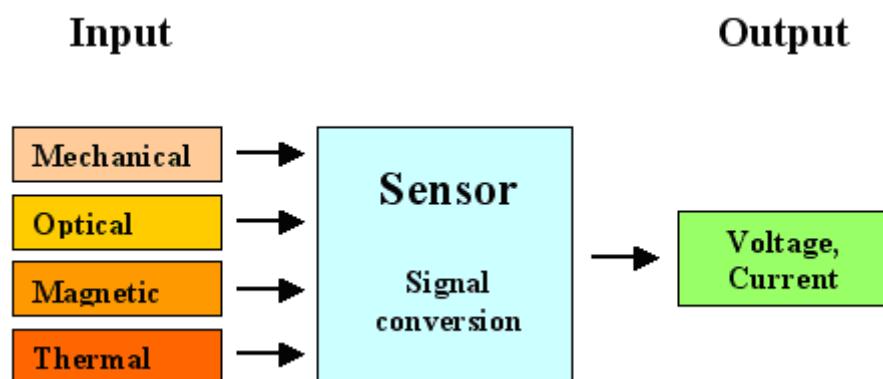


Ilustración 2.1: Principio de funcionamiento de un sensor

2.1.2 Características principales de un sensor

De acuerdo a [Web 01] las características principales de un sensor son:

- **Rango de medida:** La diferencia entre el valor más alto y más bajo que el sensor puede alcanzar.
- **Offset:** Valor de la señal de salida cuando la señal de entrada vale cero. Si la señal de salida presenta un valor distinto a cero, este valor se definirá como el punto de referencia (el offset del sensor).
- **Linealidad:** La capacidad de representar la dependencia de la señal de entrada con la señal de salida de una forma lineal.

- **Sensibilidad:** Mínima señal de entrada requerida para producir un cambio en la señal de salida.
- **Resolución:** Mínima variación de la señal de entrada que puede detectar el sensor.

Con todas estas ideas, se puede resumir que el sensor es un tipo de transductor que transforma la variable que se desea medir en otra variable que pueda ser medida e interpretada. Los sensores pueden ser de aplicación directa (como un termómetro de mercurio) o pueden estar conectados a un indicador usando un conversor analógico/digital, una computadora y un sistema de monitorización para representar valores (ver Ilustración 2.2).

Generalmente, la señal de salida de un sensor no es adecuada para una lectura directa o para su procesamiento, por lo que es necesario el uso de circuitos de acondicionamiento para adecuar esa señal de salida a niveles óptimos. Ejemplos de estos circuitos son puentes de Wheatstone, amplificadores y filtros electrónicos.

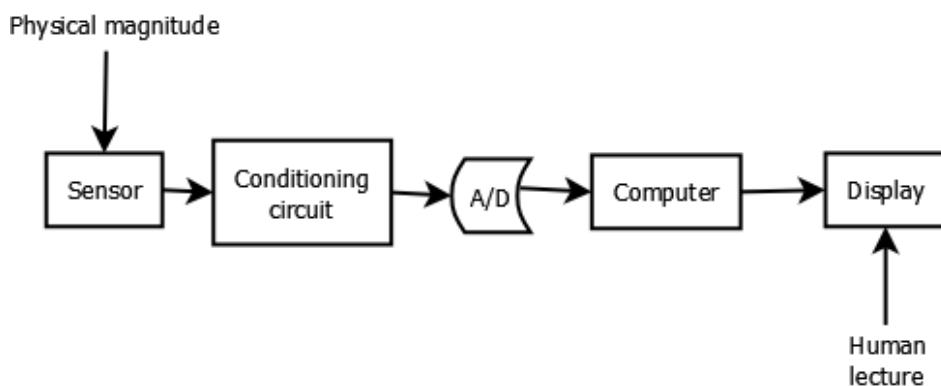


Ilustración 2.2: Diagrama del tratamiento de una señal en un sistema de sensado

2.1.3 Principio de funcionamiento del sensor desarrollado

El principio del funcionamiento del sensor desarrollado corresponde a **cuatro puentes de Wheatstone completos configurados con piezoresistores** (Ilustración 2.3).

A continuación se procederá a explicar el principio de funcionamiento de los piezoresistores y del circuito electrónico localizado en el sensor.

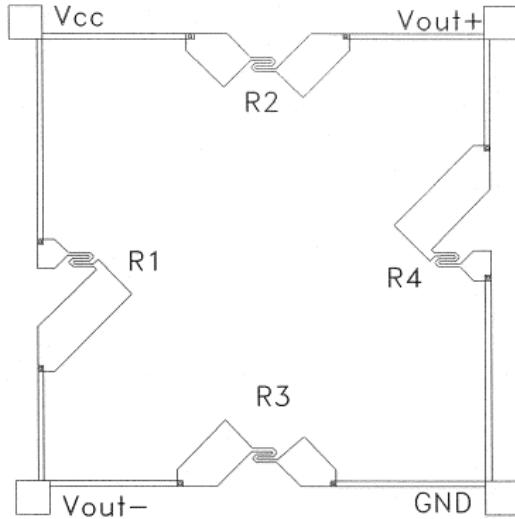


Ilustración 2.3: Esquema de un puente de Wheatstone completo con piezorresistores.

- **Piezorresistores:**

De acuerdo a [Tan 01], los piezorresistores están basados en el efecto piezorresistivo, efecto que es exhibido por varios materiales: conductores metálicos como aleaciones o semiconductores como silicio y germanio. Este efecto permite que la resistencia eléctrica de estos materiales se vea afectada debido a una tensión aplicada. En la Ilustración 2.4, un esquema de un piezorresistor es mostrado. Definiendo con ecuaciones este efecto piezorresistivo, debemos introducir el factor de galga (GF):

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (1)$$

Donde ε es el esfuerzo y $\Delta R/R$ es el cambio fraccional de la resistencia con el esfuerzo.

Este cambio de resistencia en un piezorresistor puede ser descrito como una función de las tensiones longitudinal y transversal aplicadas a él:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad (2)$$

Donde π_l y π_t son los coeficientes longitudinal y transversal y σ_l y σ_t son las tensiones aplicadas longitudinalmente y transversalmente respectivamente.

De acuerdo a las ecuaciones (1) y (2), los piezorresistores son resistencias que cambian su resistividad por la aplicación de una tensión longitudinal o transversal. El coeficiente piezorresistivo (π) puede ser determinado por:

$$\pi(N, T) = P(N, T) \cdot \pi(300K) \quad (3)$$

Donde N [átomos/cm³] es la concentración de impurezas, T [K] es la temperatura, $P(N,T)$ es el factor piezoresistivo (función de N y T), $\pi(300\text{ K})$ es el coeficiente estándar a 300K y $\pi(N,T)$ es el coeficiente a temperatura T y con N concentración de impurezas.

Viendo la ecuación (3) se observa que es importante controlar, durante el proceso de difusión en un sensor piezoresistivo la temperatura y la concentración de impurezas para tener aproximadamente el mismo coeficiente piezoresistivo y que la resistencia dependa exclusivamente de la tensión aplicada.

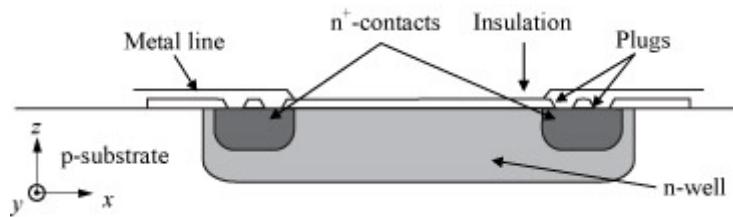


Ilustración 2.4 : Esquema de un piezoresistor [Web 05]

Resumidamente, cuando una tensión longitudinal o transversal es aplicada a un piezoresistor, un cambio en la resistencia se produce, este cambio puede ser función de la magnitud y sentido de la tensión así como del coeficiente piezoresistivo [Tan 01].

El micro sensor de fuerza fabricado en este proyecto está basado en el efecto piezoresistivo. Este sensor utiliza piezoresistores desarrollados mediante el dopado de silicio y conectados en una configuración de puente de Wheatstone (ver capítulo 2.3 para información más detallada).

2.1.4 Circuito de acondicionamiento: Puente de Wheatstone

Para configurar los piezoresistores y paliar los efectos no deseados como cambios de temperatura o ruido eléctrico se utiliza una configuración en puente de Wheatstone. Esta configuración es usada ampliamente en el mundo de los sensores debido a su simplicidad.

La configuración en puente de Wheatstone es un circuito eléctrico con cuatro resistencias colocadas como muestra la Ilustración 2.5. Usando un voltaje de entrada (V_s) el voltaje entre los terminales A y B es:

$$V_{A-B} = \left(\frac{R_4}{R_2+R_4} - \frac{R_3}{R_3+R_1} \right) V_s \quad (4)$$

Donde R_1 , R_2 , R_3 y R_4 son los piezoresistores y V_{A-B} es el voltaje de salida.

Entonces, de acuerdo a la ecuación (4), el voltaje de salida es cero cuando los piezoresistores poseen la misma resistencia. Cuando se produce una desviación en la resistencia de una o más piezoresistores causada por una tensión externa o por tolerancias de fabricación, la señal de salida presenta una variación. Este es el principio de funcionamiento de un micro sensor de fuerza utilizando piezoresistores configurados en un circuito de puente de Wheatstone.

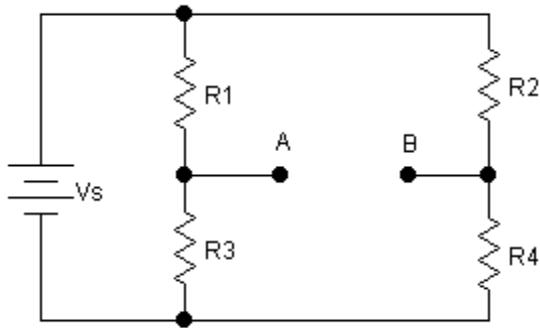


Ilustración 2.5: Esquema de un puente de Wheatstone

2.2 Sensores de micro fuerza en 3D basados en silicio

2.2.1 Descripción general

Los sensores de micro fuerza son sensores con la capacidad de medir micro fuerzas (centenares de miliNewtons). Diferentes modelos están disponibles dependiendo de la aplicación del sensor (ver capítulo 2.2.4 para diferentes diseños). El sensor de micro fuerza desarrollado en este proyecto está desarrollado en silicio de tipo-n y usa piezoresistores como sistema de medida (capítulo 2.2.2).

Los sensores de micro fuerza, de acuerdo a la definición general de un sensor (capítulo 2.1.1), son dispositivos capaces de transformar una fuerza aplicada en la membrana (detectándolo con un cambio en la resistencia de los piezoresistores localizados en él) en un voltaje. La Ilustración 2.6 muestra un esquema de un sensor de micro fuerza donde la lámina de polímero ejerce de membrana y los dispositivos para detectar cambios son estructuras con piezoresistores. Este es el principio de funcionamiento de todos los sensores de micro fuerza basados en una estructura piezoresistora.

En la Ilustración 2.7 una conversión entre fuerza aplicada en la membrana y un cambio en la resistividad es mostrada en los tres ejes de medida. Dependiendo de la dirección de la fuerza (X, Y o Z) algunos piezoresistores actuarán y detectarán la fuerza y otros no presentarán cambio alguno.

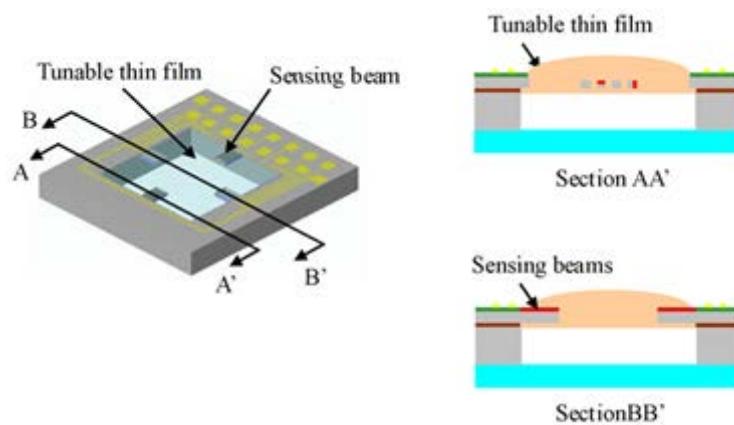


Ilustración 2.6: Sensor que actúa detectando cambios de forma en la membrana [Wen 07]

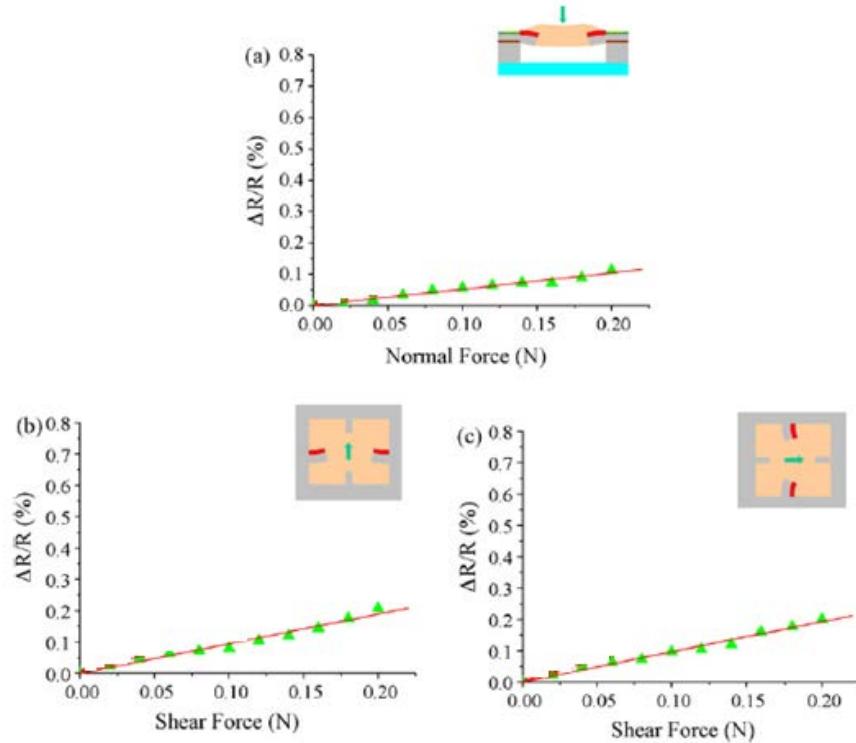


Ilustración 2.7: Los resultados de medida muestran la variación de la resistencia con cargas normales (a) y cargas laterales (b) y (c) [Wen 07]

2.2.2 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento de un sensor de micro fuerza está basado en un cambio del voltaje de salida debido a un cambio en la fuerza aplicada. La Ilustración 2.8 muestra un esquema de este proceso, la fuerza aplicada en la membrana causa la deformación de ésta; esta deformación hace un cambio en la resistividad de los piezoresistores. Este cambio en la resistencia modifica los parámetros del puente de Wheatstone y causa un voltaje de salida diferente del original (que es necesario ajustar a cero voltios).

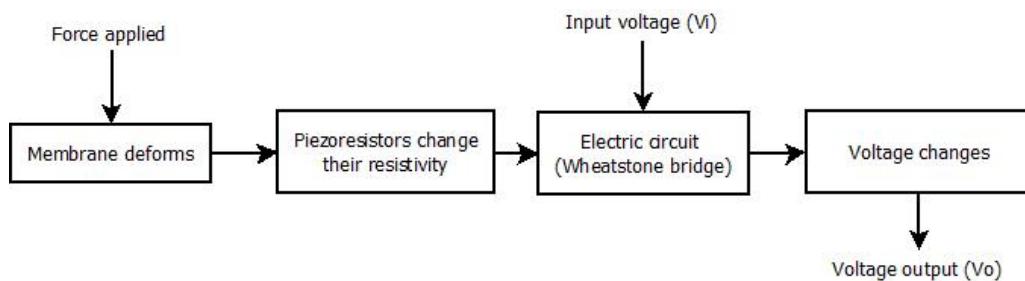


Ilustración 2.8: Diagrama del principio de funcionamiento de un sensor de micro fuerza

Los sensores de micro fuerza desarrollado en el IMT (Instituto de Microtecnología de Braunschweig) están basado en este principio de funcionamiento. Son desarrollados con una membrana de silicio con forma de cruz o bien una membrana completa. Esta membrana consiste de tres partes: un marco, una membrana intrínseca y opcionalmente un eje (Ilustración 2.9 y 2.10). Estos diferentes diseños son descritos en el capítulo 2.2.4. Los piezoresistores tienen la función de medir la tensión de tracción o compresión en la membrana (Ilustración 2.9). Las tensiones de tracción y compresión son causadas por una fuerza ejercida en un palpador pegado al eje o a la membrana directamente. El palpador es usado para aplicaciones relacionadas con la metrología (capítulo 2.2.5). Cuatro grupos de cuatro piezoresistores están situados alrededor del eje que están configurados en un puente de Wheatstone [Tib 08].

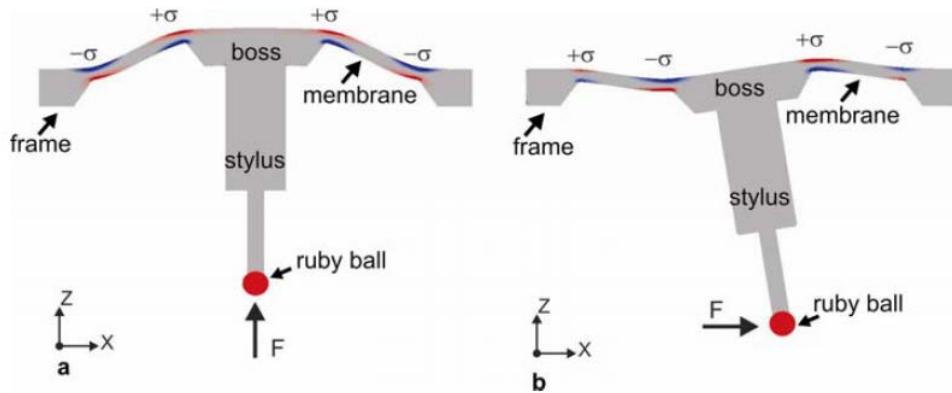


Ilustración 2.9: Esfuerzos en la membrana causados por fuerzas aplicadas en el palpador (stylus). Los piezoresistores se desarrollan donde se dan esos esfuerzos [Tib 09]

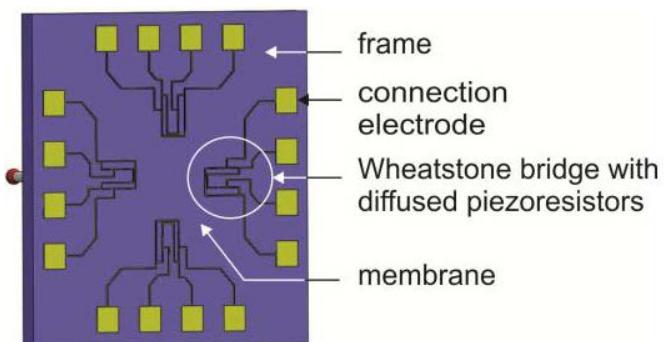


Ilustración 2.10: Ilustración de un sensor de micro fuerza [Fer 12]

2.2.3 Fabricación

Existen tres principales etapas en la fabricación de un sensor de micro fuerza; el completo proceso de fabricacion del micro sensor de fuerza de este proyecto está disponible en el anexo A. Este capítulo es un vistazo global de los pasos importantes que son comunes a todos los sensores de micro fuerza con el principio de funcionamiento descrito en el capítulo 2.2.2.

Los principales pasos de fabricación de un micro sensor de fuerza de acuerdo a la referencia [Tib 08] son:

1- Difusión (Ilustración 2.11a):

Usando una oblea de silicio {1 0 0} de tipo n, el primer paso es crear los piezoresistores difundiendo impurezas en el silicio. Estas impurezas están desarrollados difundiendo boro en el sustrato y calentándolo a una temperatura de alrededor de 900°C. Con este proceso los piezoresistores son creados en la cara top de la oblea.

2- Cableado (Ilustración 2.11b):

El siguiente paso consiste en el diseño de las conexiones entre los piezoresistores y los pads (contactos externos). Este cableado de aluminio es desarrollado utilizando diferentes máscaras con las conexiones necesarias. Usualmente este cableado es desarrollado en aluminio y los pads son desarrollados en oro para mejor conexión con el sistema exterior.

3- Estructurado (Ilustración 2.11c):

Crear una capa de óxido nítrico y estructurarla permite realizar el proceso de estructurado correctamente. Este último proceso consiste en estructurar el silicio que compone la oblea y opcionalmente, crear un eje (mencionado en el capítulo 2.2.2). La oblea es estructurada utilizando un proceso de grabado en mojado y posteriormente, para su acabado, un proceso de grabado en seco. En el proceso de grabado en mojado, el silicio es eliminando creando un ángulo de 54,7° con la horizontal. En el proceso de grabado en seco, el silicio es eliminado con un ángulo de 90° con la horizontal.

En estos pasos, la oblea puede ser fabricada de muchas formas, por ejemplo, cambiando la máscara para la difusión de los piezoresistores permite crear otras configuraciones de ellos, o cambiando la mascara para la estructuración final permite crear un sensor con otra estructura (con o sin eje en su centro). Diferentes estructuras de micro sensores de fuerza son mostrados en el capítulo 2.2.4.

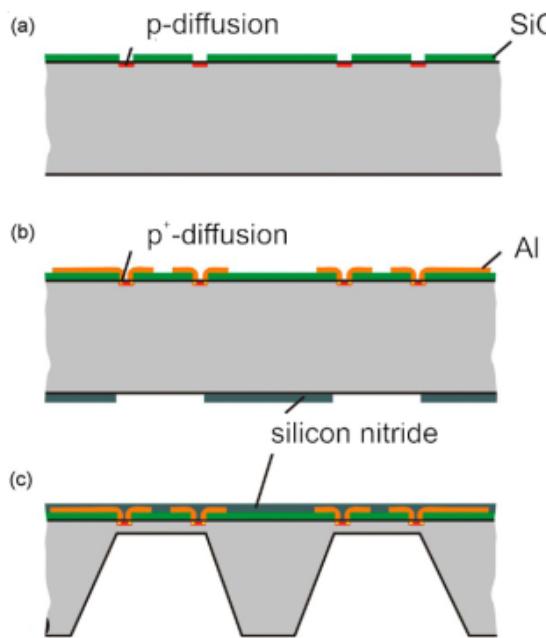


Ilustración 2.11: Los 3 principales pasos de fabricación de un sensor de micro fuerza, que pueden ser subdivididos en pequeños pasos [Tib 08].

2.2.4 Diferentes diseños de estructura

Existen diferentes estructuras para los sensores de micro fuerza con piezoresistores desarrollados en silicio y el principio de funcionamiento descrito en el capítulo 2.2.2 están disponibles. En este capítulo los diferentes cambios que pueden ser desarrollados en la estructura de un sensor están agrupados en 3 puntos:

1- Cambios en la configuración de los piezoresistores:

En el desarrollo de los piezoresistores se han probado diferentes configuraciones para mejorar la sensibilidad del sensor (ver capítulo 2.3.1). Los piezoresistores pueden ser configurados de cuatro diferentes formas (Ilustración 2.12) y sus sensibilidades son mostradas en la Tabla 2.1. El sensor desarrollado en este proyecto se desarrolló en las cuatro configuraciones distintas, pero el resultado final solo se midió para la configuración transversal (por falta de tiempo para realizar las medidas finales).

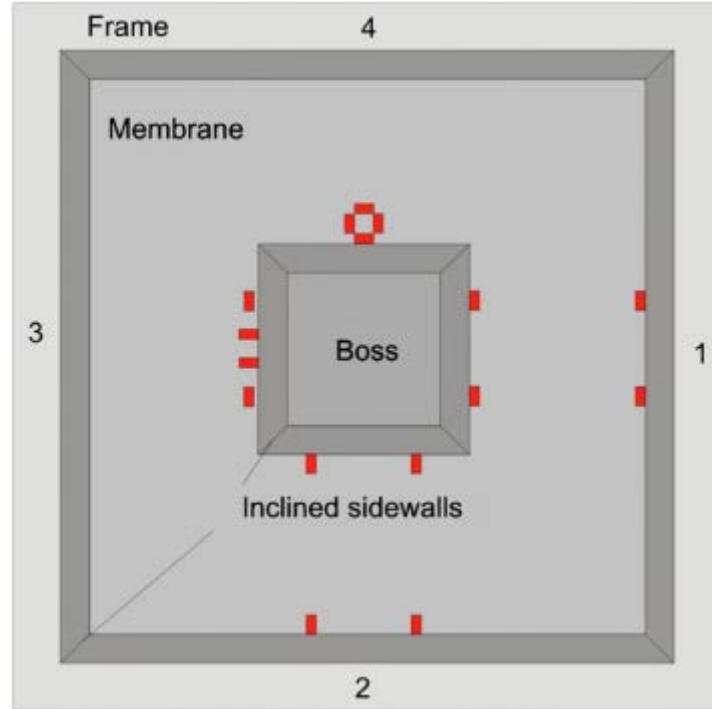


Ilustración 2.12: Esquema de un sensor de micro fuerza representando las cuatro diferentes configuraciones de piezorresistores. La configuración de 1 es transversal, 2 longitudinal, 3 es forma-T y 4 es configuración cuadrática [Tib 08].

Tabla 2.1: Sensibilidades en las direcciones vertical y horizontal de todos los diseños mostrados en la Ilustración 2.12 [Tib 08].

Sensibilidad	Dirección vertical		Dirección horizontal	
	mV/V/ μ m	mV/V/mN	mV/V/ μ m	mV/V/mN
Longitudinal	5.31±0.09	0.7±0.03	0.7±0.14	2.51±0.06
Transversal	3.97±0.072	0.79±0.017	0.7±0.001	2.57±0.04
Cuadrática	3.48±0.016	0.37±0.033	0.4±0.028	1.68±0.07
Forma-T	5.67±0.08	0.74±0.04	0.74±0.014	2.92±0.14

2- Cambios en el material de la membrana:

Este cambio es el que el presente proyecto analiza en profundidad. El material de la membrana en numerosos trabajos con estos sensores es silicio, pero las propiedades pueden ser mejoradas si utilizamos un polímero en la membrana. Dos polímeros han sido probados en este proyecto y los resultados son comparados con otro sensor desarrollado exclusivamente en silicio [Pha 09].

3- Cambios en la estructura de la membrana:

Propiedades como la sensibilidad y la dureza (ver capítulo 2.3) pueden ser ajustados variando el diseño de la membrana. Por ejemplo, una membrana en forma de cruz proporciona mayor sensibilidad comparada con una membrana plana. Es importante además tener la misma dureza en los tres ejes principales de medida por una simplicidad del hardware externo. Todos estos diseños pueden tener un eje central para sujetar el palpador. Los diseños pueden verse en la Ilustración 2.13.

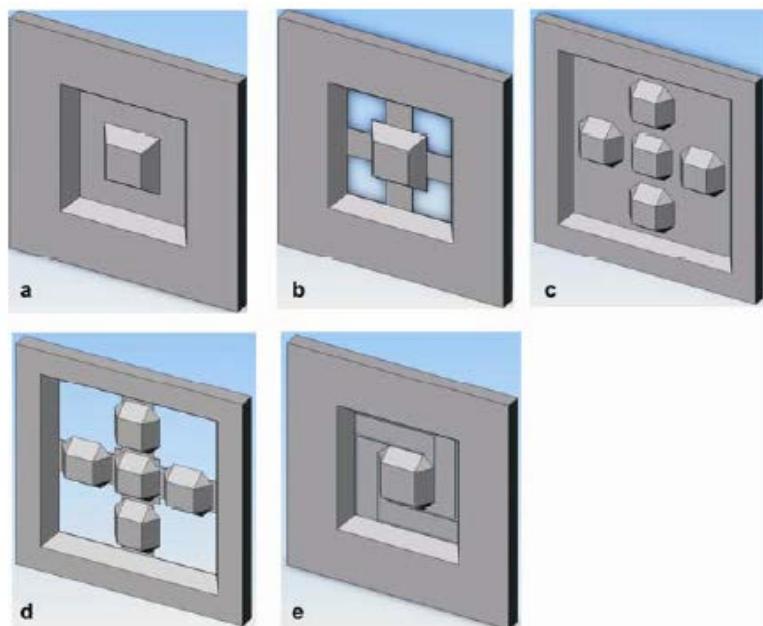


Ilustración 2.13: Diferentes diseños de membrana con un eje central: a) plana, b) cruz, c) cinco ejes, d) cinco ejes en forma de cruz y e) esvástica [Tib 09].

2.2.5 Aplicación de los sensores de micro fuerza: Metroología dimensional

El principal campo de aplicación de estos sensores de micro fuerza es la micrometrología; estos sensores son fabricados para realizar máquinas de medición por coordenadas de ultra precisión (MMCs). Estas máquinas son vitales en la micrometrología porque la precisión de las MMCs convencionales es demasiado baja para mediciones de nanómetros, con una incertidumbre de unos pocos micrómetros [Dan 12].

Las MMCs pueden determinar geometrías en 1D y 3D de piezas. El sensor está conectado al palpador de la máquina que tiene la función de comunicar esfuerzos desde la punta del mismo hasta la membrana del sensor. La configuración principal para realizar esto puede verse en la Ilustración 2.14 [Fer 12]. Cuando la punta del palpador (usualmente una esfera) toca el objeto a medir, unos esfuerzos mecánicos tienen lugar en la membrana que llevan a cambios de resistencia en los piezoresistores del sensor. Los cambios en estas resistencias son convertidos en señales eléctricas que determinan el desplazamiento del palpador [Dan 12].

El progreso en este campo ha permitido conseguir una incertidumbre de unos pocos nanómetros. Todas las MMCs de alta tecnología que son capaces de conseguir esa precisión llevan un sensor de similar diseño al descrito en este proyecto [Dan 12].

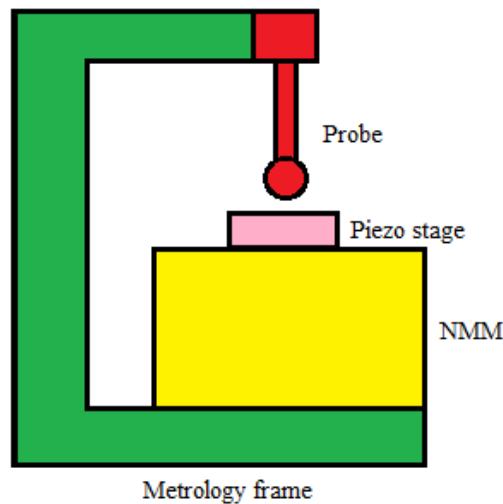


Ilustración 2.14: Esquema sencillo de una micro/nano MMC.

2.3 Caracterización de un sensor de micro fuerza

En este capítulo dos de las más importantes características para la caracterización de un sensor de micro fuerza son explicadas. Estas dos características generalmente explicadas son:

- **Sensibilidad:** Como explica el capítulo 2.1.2, la sensibilidad representa la menor cantidad de cambio en la magnitud de medida detectable. La sensibilidad es un cociente entre dos magnitudes (por ejemplo: $\Delta V_{\text{output}} / \Delta V_{\text{input}}$).
- **Rigidez:** Es la capacidad de un material de resistir deformación en respuesta a una fuerza aplicada en él.

2.3.1 Sensibilidad

Nombrando los cuatro puentes de Wheatstone que configuran un micro sensor de fuerza como A, B, C y D (Ilustración 2.15), las sensibilidades en las tres direcciones principales (X, Y y Z) pueden ser calculadas usando estas ecuaciones:

$$S_z = A + B + C + D \quad (5)$$

$$S_x = A - C \quad (6)$$

$$S_y = B - D \quad (7)$$

Donde S_i representa la señal transformada en la dirección i y A-D son las pendientes de la función que representa el cambio de las señales de salida de los cuatro puentes de Wheatstone contra la deformación [mV/V/ μm]. El resultado ideal es tener las cuatro pendientes iguales, sin embargo, es complicado tener cuatro puentes con iguales piezoresistores [Tib 08].

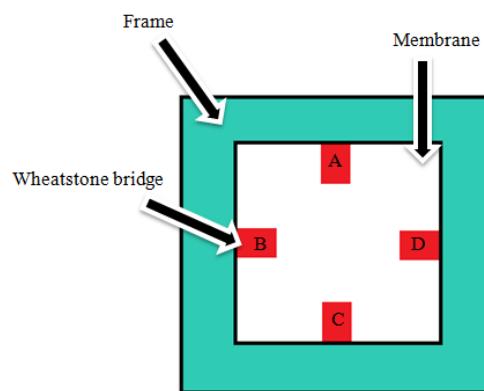


Ilustración 2.15: Esquema de un sensor de micro fuerza con los puentes de Wheatstone.

La razón de usar solo dos puentes en las ecuaciones (6) y (7) cuando aplicamos una fuerza lateral al palpador es porque los dos puentes no nombrados muestran resultado nulo. No cambian su resistividad porque la fuerza lateral no les afecta. Ver la Ilustración 2.16 para un ejemplo de gráficas de los cuatro puentes dependiendo de la dirección de la fuerza aplicada.

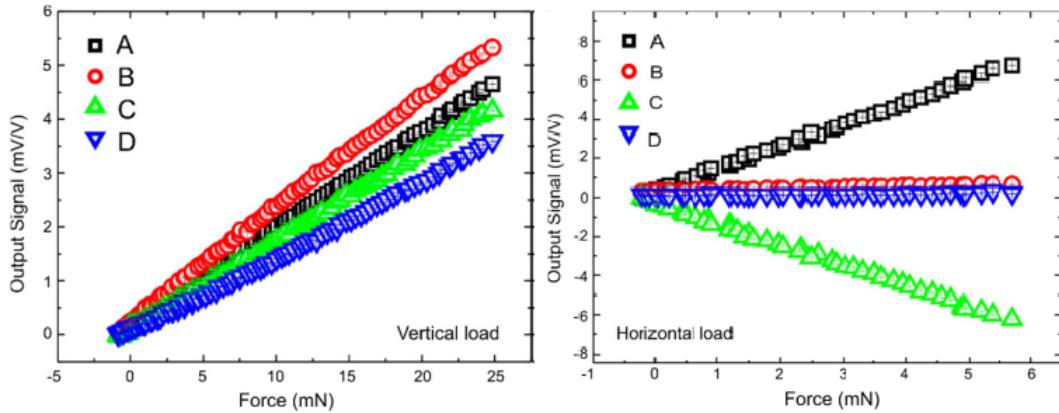


Ilustración 2.16: Señal de salida en los puentes de Wheatstone aplicando una carga vertical (izquierda) y una carga lateral (derecha) [Tib 08].

2.3.2 Propiedades mecánicas: dureza y deformación máxima

La dureza y la deformación máxima son las características mecánicas más importantes de un sensor de micro fuerza. La primera característica representa la deformación que ocurre en la membrana del sensor dependiendo de la fuerza aplicada en él, sus unidades son [$\text{mN}/\mu\text{m}$] (fuerza contra deformación), ver Ilustración 2.17 para un ejemplo gráfico de ello. La segunda característica es la máxima deformación que la membrana del sensor puede alcanzar sin destruir cualquier parte mecánica o eléctrica de él, su unidad es [μm].

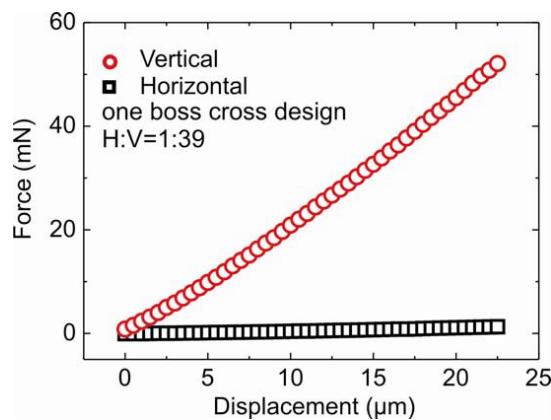


Ilustración 2.17: Gráfico de la dureza de un micro sensor fabricado en silicio [Tib 09].

2.3.3 Midiendo las propiedades principales

Para medir la sensibilidad y las propiedades mecánicas principales antes citadas, muchos utilajes están disponibles y explicados en diferentes artículos y tesis. En el Instituto de Microtecnología de Braunschweig se encuentra un utilaje disponible, desarrollado por otros investigadores, que permite medir todas las propiedades explicadas.

Usando la Ilustración 2.18 como un esquema de referencia, el utilaje para la medida consiste en un palpador con una bola de rubí en su punta adherido a un posicionador vertical operado manualmente. El micro sensor de fuerza se monta en ese palpador y se conecta además a una entrada y salida de voltaje para excitar eléctricamente y medir la señal de salida de los piezoresistores. Esta primera parte determina la sensibilidad del sensor a medir.

Para aplicar fuerza externa al palpador y medir además la fuerza aplicada a él, el sistema utiliza un sensor de micro fuerza comercial adherido a un cuerpo móvil operado por un motor. Este cuerpo móvil realiza el movimiento necesario para proveer un contacto entre el sensor comercial y el palpador. La fuerza aplicada al palpador (que es propagada al sensor de micro fuerza a medir) es medida por este sensor comercial, y el desplazamiento del palpador es medido por el mismo cuerpo móvil.

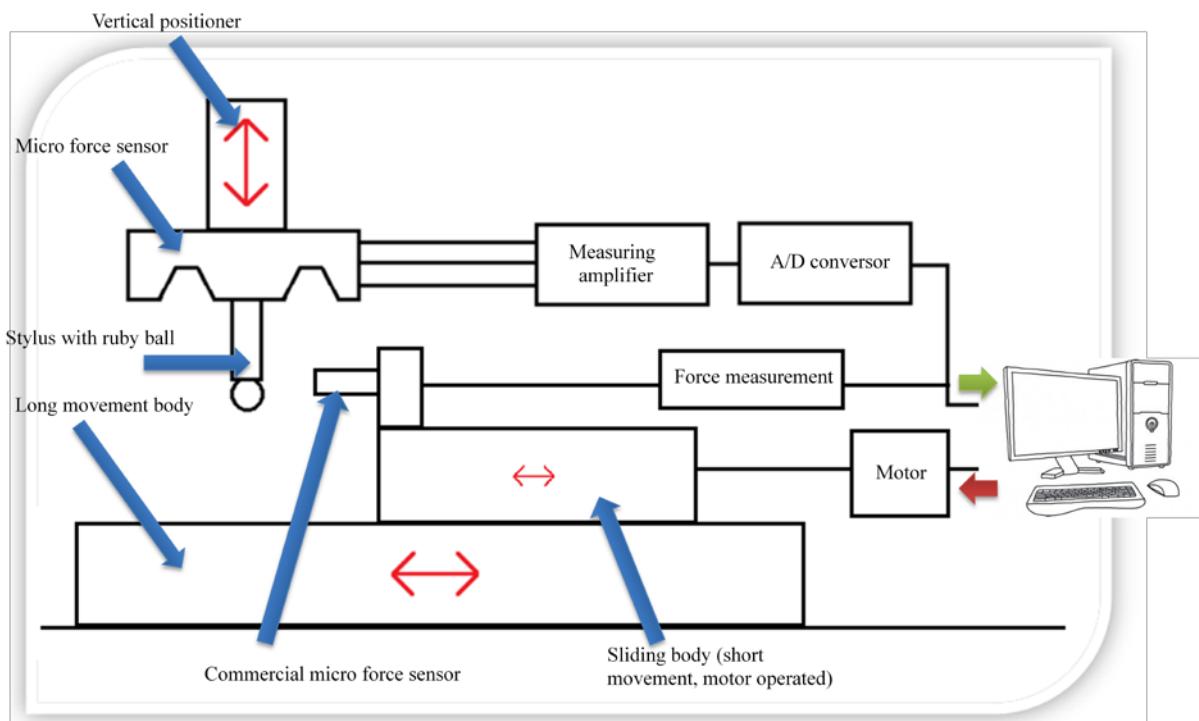


Ilustración 2.18: Esquema del utilaje de medida de un sensor de micro fuerza.

2.4 Sensores de micro fuerza desarrollados

De acuerdo a tesis y artículos, se han desarrollado diferentes investigaciones en los sensores de micro fuerza utilizando silicio o membrana con un polímero. En este capítulo, algunos de ellos serán introducidos, poniendo especial atención a los trabajos de [Pha 09] y [Kra 10]. [Pha 09] fabricó un sensor de micro fuerza con una membrana de silicio con muchos diseños diferentes. Este trabajo servirá de referencia para comparar los resultados de este proyecto con los de un sensor desarrollado en silicio exclusivamente debido a que en la tesis [Pha 09] las características principales fueron medidas con el mismo utilaje que este proyecto utiliza. [Kra 10] utiliza un polímero similar para desarrollar un sensor con un eje central, pero utiliza galgas extensiométricas en vez de piezoresistores.

2.4.1 Membrana de silicio exclusivamente

- Sensor de micro fuerza con cuatro puentes de Wheatstone

De acuerdo a la referencia [Pha 09], esta tesis relata la realización de un sensor de micro fuerza con una membrana completa o en forma de cruz (Ilustración 2.19). Los resultados de las sensibilidad de todos los diseños desarrollados en esta tesis se encuentran en la Tabla 2.2 y en la Tabla 2.3. Es importante centrarse en el diseño en forma de cruz debido a que el sensor desarrollado en este proyecto posee ese mismo diseño, una membrana con cuatro aberturas.

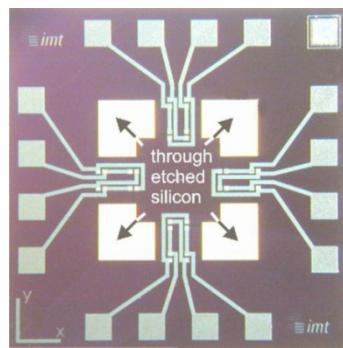


Ilustración 2.19. Esquema de un sensor en forma de cruz [Pha 08].

Esta tesis describe como medir las propiedades principales de un sensor de micro fuerza y las diferentes sensibilidades para todas las disposiciones disponibles de los piezoresistores (transversal, longitudinal, forma T y cuadrática). Para este proyecto la única disposición probada es la forma transversal. Sin embargo, en las siguientes tablas, todas las sensibilidades de todas las disposiciones son mostradas.

Tabla 2.2: Sensibilidades para el diseño de la membrana completa (con piezoresistores desarrollados con difusión P) [Pha 09].

Sensibilidad	Dirección vertical		Dirección horizontal	
	S_{Az} [mV/V/ μ m]	S_{Fz} [mV/V/mN]	S_{Ax} [mV/V/ μ m]	S_{Fx} [mV/V/mN]
Longitudinal	5.31±0.09	0.70±0.03	0.70±0.14	2.21±0.06
Transversal	3.97±0.07	0.79±0.03	0.70±0.02	2.57±0.04
Cuadrática	3.48±0.02	0.37±0.03	0.40±0.03	1.68±0.07
Forma T	5.67±0.08	0.74±0.04	0.74±0.02	2.92±0.14

Tabla 2.3: Sensibilidades para el diseño en forma de cruz (difusión P) [Pha 09].

Sensibilidad	Dirección vertical		Dirección horizontal	
	S_{Az} [mV/V/ μ m]	S_{Fz} [mV/V/mN]	S_{Ax} [mV/V/ μ m]	S_{Fx} [mV/V/mN]
Longitudinal	6.02±0.05	3.01±0.04	0.68±0.04	11.3±0.5
Transversal	8.14±0.40	1.26±0.04	0.70±0.09	4.1±0.4
Cuadrática	5.11±0.10	0.65±0.03	0.69±0.02	3.2±0.2
Forma T	7.90±0.06	1.96±0.02	0.99±0.06	7.5±0.5

Dos tablas más se encuentran disponibles a partir de este párrafo (Tabla 1.4 y Tabla 1.5). Estas dos tablas representan las propiedades mecánicas de los trabajos de [Pha 09].

Tabla 2.4: Valores máximos de desplazamiento y fuerza de ambos diseños [Pha 09].

Máximos	Membrana completa		Membrana en forma de cruz	
	Dir. Vertical	Dir. Horizontal	Dir. Vertical	Dir. Horizontal
Desplazamiento [μ m]	30	140	30	141
Fuerza [mN]	150	30	93	25

Tabla 2.5: Comparación entre la dureza de una membrana completa y una membrana en forma de cruz (ambas en silicio) testeadas en los tres ejes principales [Pha 09].

Dureza	Membrana completa	Membrana en forma de cruz
k_z [mN/ μm]	12.39	6.51
$k_{x,y}$ [mN/ μm]	0.40	0.19
$k_z : k_{x,y}$	31:1	34:1

- **Sensor de tres ejes de micro fuerza fabricado en silicio**

De acuerdo a [Büt 01], este sensor tiene muchas similitudes con el sensor fabricado en este proyecto. El elemento de sensado de este sensor consiste en un membrana con eje central y una aguja adherida a ese eje como componente táctil. Los piezoresistores están integrados en esta membrana y miden las deformaciones de la misma.

Viendo la Ilustración 2.20, este sensor posee tres puentes de Wheatstone y cada de ellos proporciona la señal de salida de cada fuerza correspondiente, sin necesitar más circuitería externa. Esta es una ventaja comparándolo con el sensor del presente proyecto.

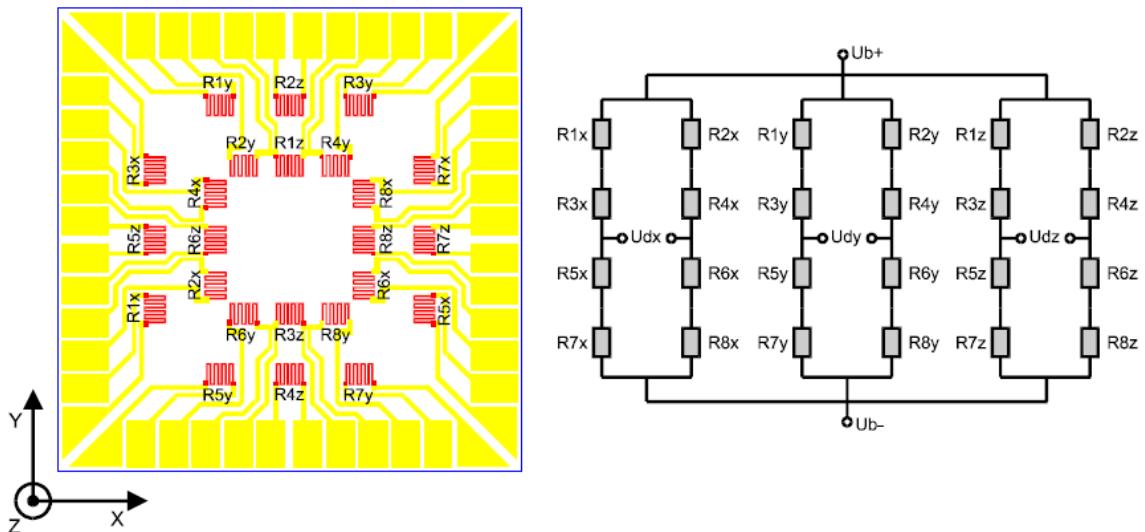


Ilustración 2.20: Sensor de tres ejes con 24 piezoresistores [Büt 01].

La principal desventaja de este diseño es que la circuitería compleja no puede ser desarrollada en un solo chip, por lo tanto muchos pads son necesarios para contactar las resistencias, lo que incrementa el tamaño final del sensor.

Otro diseño se presenta para resolver esta desventaja; se puede observar en la Ilustración 2.21.

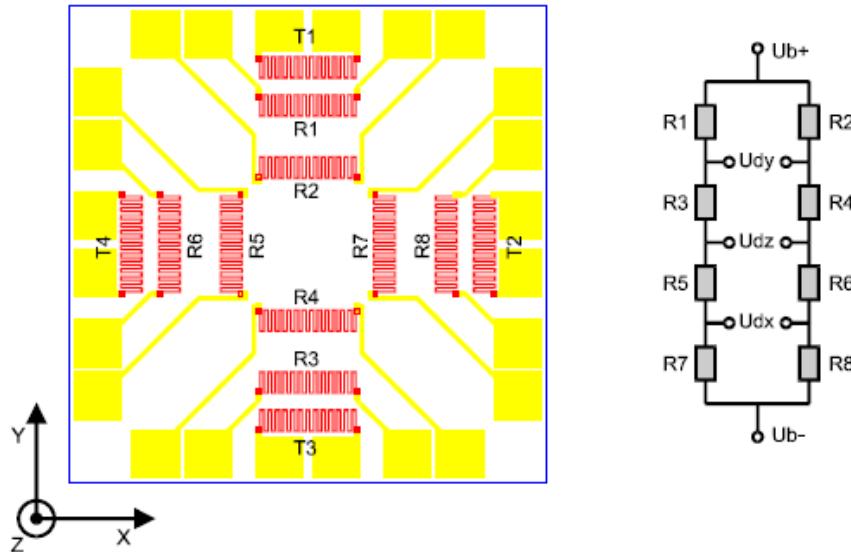


Ilustración 2.21: Mejora del sensor anterior con menos piezoresistores [Büt 01].

2.4.2 Membrana desarrollada con un polímero

- Sensor de micro fuerza con membrana de silicio y polímero con eje central

En la tesis [Kra 10] se explica un sensor de micro fuerza con eje central en la membrana fabricado en silicio y PerMX 3020 (dos diseños diferentes).

El sensor desarrollado en silicio tiene su circuitería compuesta por piezoresistores, el sensor desarrollado en polímero posee galgas extensiométricas de aluminio.

La Tabla 2.6 y la Tabla 2.7 muestran los parámetros más importantes de estos dos diseños: sensibilidad y dureza.

Tabla 2.6: Comparación entre las sensibilidades de una membrana de silicio y una membrana con PerMX 3020 (se usaron 5 voltios como alimentación) [Kra 10].

Sensibilidades	Membrana de silicio con piezoresistores	Membrana con PerMX 3020 y galgas extensiometrías
S_z [mV/V/ μm]	58.76	Sin datos
$S_{x,y}$ [mV/V/ μm]	$S_x = 23.58$ $S_y = 20.42$	5.45

Tabla 2.7: Comparación entre la dureza de una membrana de silicio y de PerMX 3020 (en los tres ejes principales) [Kra 10].

Dureza	Membrana de silicio con piezoresistores	Membrana con PerMX 3020 y galgas extensiometrías
k_z [mN/ μm]	12.39	2.74
$k_{x,y}$ [mN/ μm]	0.40	0.016
$k_z : k_{x,y}$	31:1	171:1

Viendo la Tabla 2.7, la dureza es decrementada en ambos ejes, por lo que la membrana se deforma más con la fuerza aplicada en ella. Es muy importante este hecho debido a que la membrana de silicio es muy frágil y sólo soporta una pequeña deformación antes de romperse.

Es importante además notar que los valores del sensor de silicio difieren mucho comparados con [Pha 09]. Esto es debido a que el método de medida usado en [Kra 10] es completamente diferente del método que [Pha 09] y el presente proyecto usan. Por este hecho, los resultados del presente proyecto son comparados exclusivamente con la tesis [Pha 09].

- Sensor táctil de tres ejes fabricado con polímero

De acuerdo a la referencia [Wen 07], un sensor de micro fuerza con adiciones de trazas de cobre será presentado en este apartado. Tres diferentes membranas de polímero con ratios diferentes de polímero (PDMS) y cobre (Co) se utilizan. Los módulos elásticos medidos de estas membranas son: 1.32MPa (no Co), 52.13MPa (PDMS/Co = 20/1) y 479.25MPa (PDMS/Co = 10/1).

Para demostrar esta simulación, el artículo [Wen 07] muestra un experimento usando un proceso de fabricación para construir este sensor con polímero utilizando cinco máscaras diferentes (similar al proceso de fabricación usado en este proyecto).

En la Ilustración 2.22 las diferentes sensibilidades dependiendo de la cantidad de cobre que se haya en la membrana se muestran. Sin embargo, este efecto no es el mismo para todos los diseños posibles de un sensor de micro fuerza; de acuerdo a los tests de [Kra 10] usar silicio con un módulo de Young de 130 – 188 GPa da como resultado una dureza mejor que usar PerMX 3020 con un módulo de Young de 3.2 GPa.

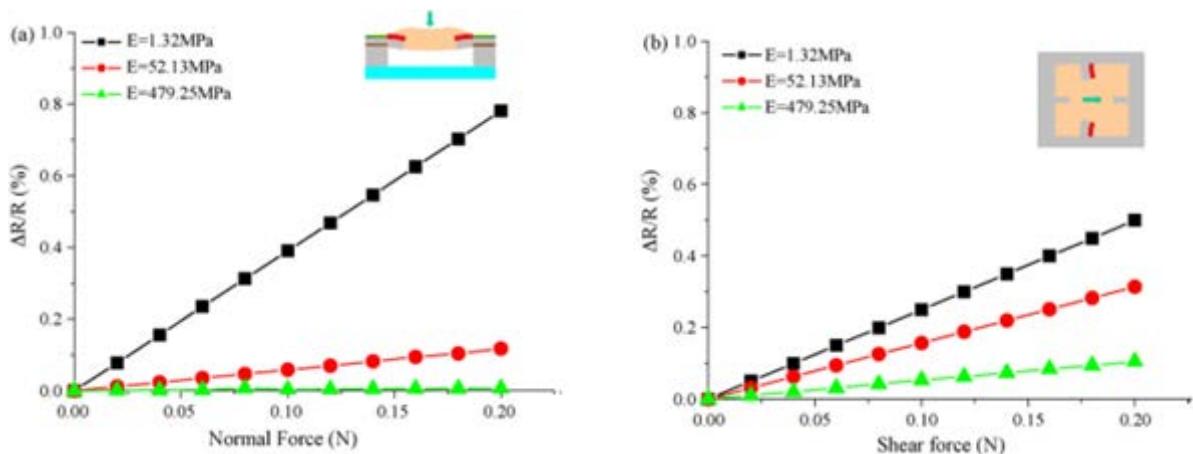


Ilustración 2.22: Sensibilidades dependiendo del módulo de Young del material (E) [Wen 07].

3. Fabricación de un sensor de micro fuerza con membrana polimérica

3.1 Introducción

Los pasos para añadir el polímero como membrana a un sensor de micro fuerza son explicados en este capítulo. El diseño para probar el polímero, como muestra la Ilustración 3.1, tiene un diseño similar al desarrollado por [Pha 09] (capítulo 2.4.1). La única diferencia es que el sensor de este proyecto no posee un eje central, lo que únicamente cambia un poco las propiedades mecánicas.

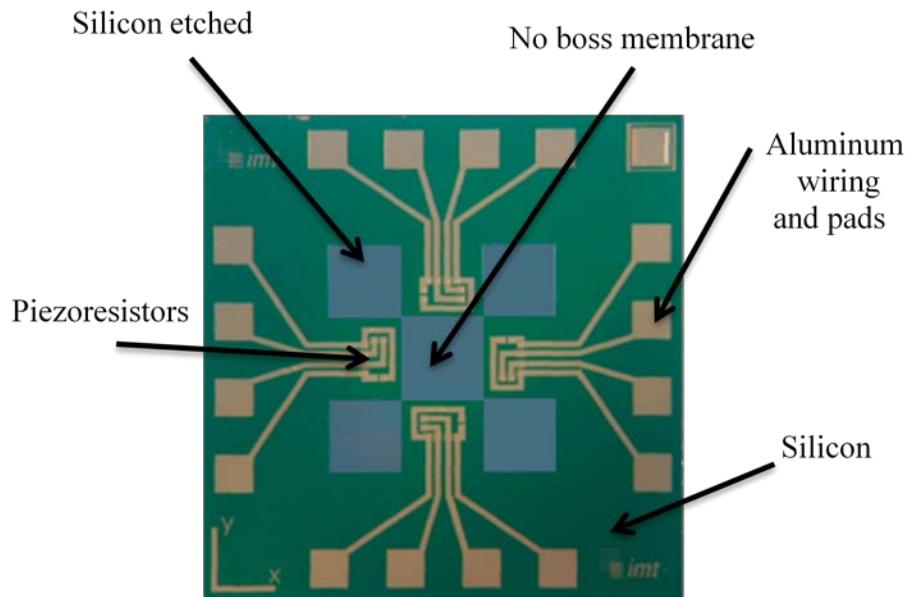


Ilustración 3.1: Sensor desarrollado sin eje central usando similares pasos que el sensor que posee un eje central (“boss“ en la ilustración) [Tib 08].

Un esquema del sensor de micro fuerza desarrollado con membrana polimérica se encuentra en la Ilustración 3.2. Todas las medidas y la localización de los cuatro puentes de Wheatstone (A, B, C y D) se encuentran detalladas.

El sensor será desarrollado utilizando dos polímeros diferentes como membrana (poliamida y PerMX 3050), en los capítulos 3.3.1 y 3.3.2 las especificaciones de cada uno son explicadas.

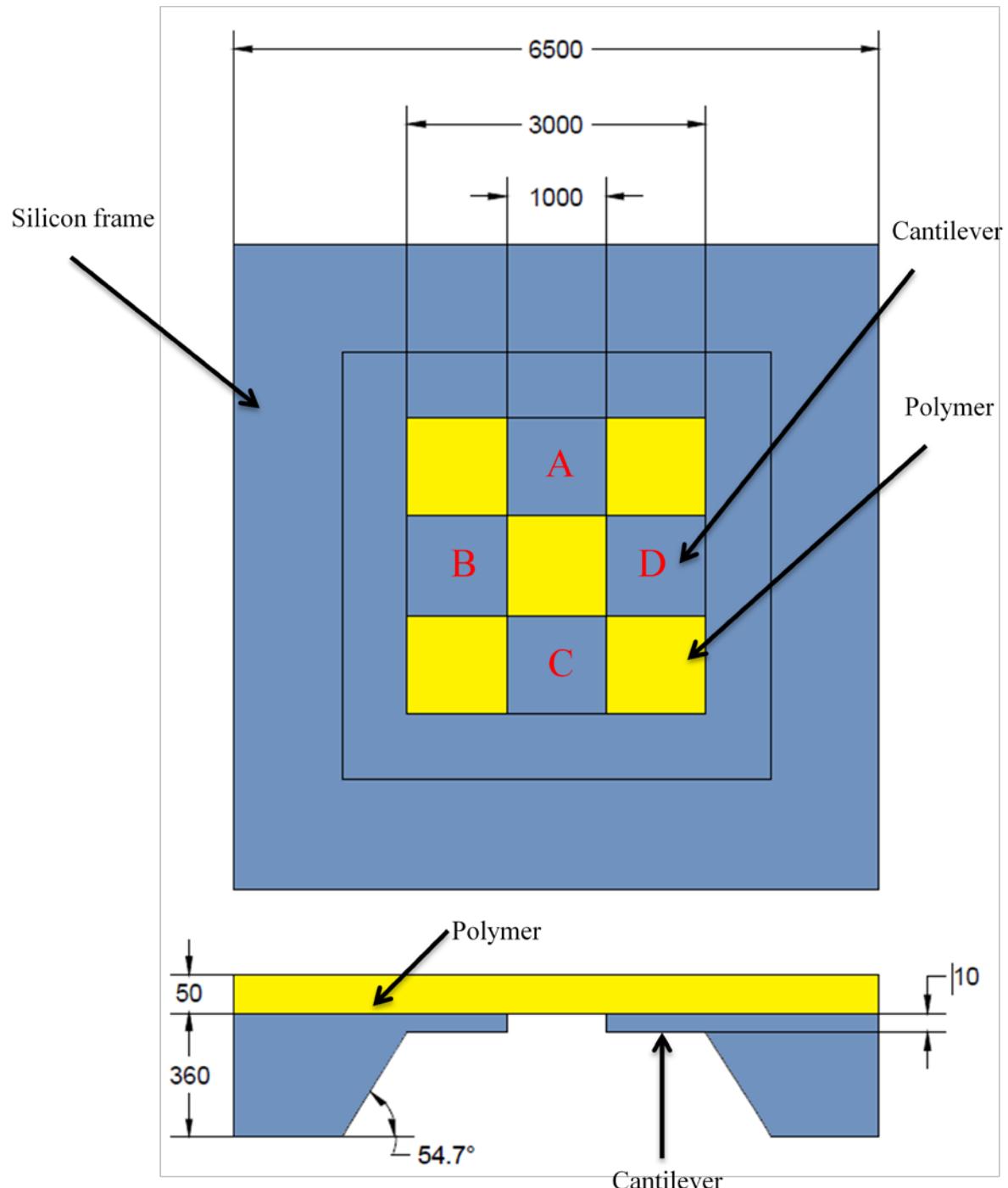


Ilustración 3.2: Esquema del sensor de micro fuerza desarrollado con membrana polimérica.

La descripción de los pasos para añadir ese polímero en este capítulo se explicará de forma general, para entender el proceso y no detenerse en especificaciones técnicas. La descripción completa de la fabricación de los dos polímeros se encuentra en los anexos correspondientes.

3.2 Pasos para replazar la membrana de silicio por una polimérica

- Punto de partida

El punto de partida del proceso será, tal y como la Ilustración 3.3 muestra, el paso de después de construir los piezoresistores y las conexiones. La leyenda para entender los colores de cada esquema de muestra debajo de este párrafo.

	Silicon		Aluminum
	Oxide (SiO_2)		Mask
	Nitride (Si_3N_4)		Photolack
	Piezoresistor		PerMX 3050
	p+ contacts	+++	UV Light

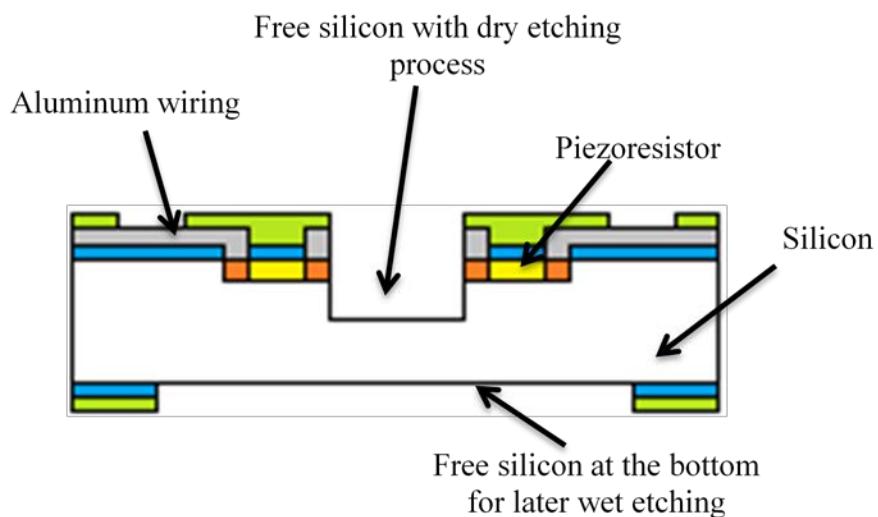


Ilustración 3.3: Paso antes de comenzar la adición del polímero.

Para alcanzar este paso, bastantes pasos han debido ser realizados anteriormente, todos ellos pueden ser consultados en el anexo correspondiente.

- Laminación

El primer paso para construir la membrana polimérica es la laminación. Usando el laminador (máquina con dos filas de rodillos en movimiento entre los cuales existe un pequeño hueco para laminar), la oblea es introducida con el polímero en su parte superior (y pegamento entre ellos si el polímero no es adherente al silicio por sí mismo). Despues de ajustar la temperatura

y velocidad de los rodillos, la oblea es introducida y el polímero será laminado mediante presión y temperatura en su parte superior. El resultado es tal como muestra la Ilustración 3.4.

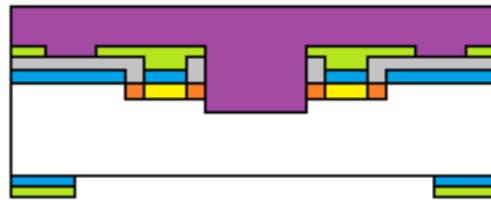


Ilustración 3.4: Polímero laminado en la superior de la oblea.

- **Hornada**

Después de la laminación es importante conocer las características del polímero utilizado debido a que puede necesitar un proceso de calentamiento en el horno. Este proceso consiste en calentar la oblea a una temperatura razonable para no destruir el polímero (entre 100°C y 200°C dependiendo del polímero) para adherirlo correctamente a la oblea.

- **Estructuración del polímero**

El siguiente paso depende de si el polímero es un material fotosensitivo o no. Si el polímero es fotosensitivo (PerMX 3050), el proceso consiste en un proceso litográfico exclusivamente (ver anexo correspondiente). Si no es un polímero fotosensitivo (poliamida en su forma no fotosensible, la utilizada en este proyecto), el proceso consiste en un proceso litográfico con un material adicional como mascara (se utilizó aluminio) seguido de una estructuración. Los resultados se muestran a modo de esquema en la Ilustración 3.5; notesé que el polímero es solo estructurado y eliminado en los pads para las conexiones exteriores, todo el polímero restante permanece intacto.

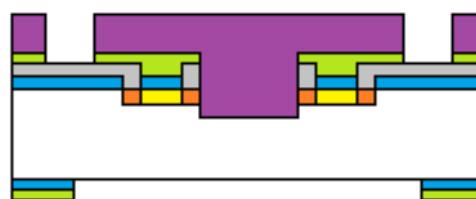


Ilustración 3.5: Polímero estructurado sobre la oblea, donde los pads han sido abiertos.

- **Proceso de esctructuración húmedo en KOH**

Después de todos los pasos anteriores, la estructuración de la propia oblea comienza para darle la forma correcta de un sensor de micro fuerza. Para estructurar la oblea son necesarios dos pasos: uno con KOH (que debe estructurar la oblea hasta dejar 20 – 30 µm sin estructurar) y otro en seco con ICP para esos últimos micrómetros.

La estructuración debe realizarse con una disolución del 40% de KOH en agua a 80°C. Es importante controlar durante este proceso que el polímero sigue intacto y la adhesión entre este y la oblea permanece. Además al ser un proceso manual, sin ningún control automático, debe controlarse el tiempo mediante la velocidad de estructuración para que queden unos 20 micrómetros sin eliminar. La razón de dejar estos pocos micrómetros es debida a que si hicieramos la estructuración completa sólo con KOH, este destruiría la adhesión al ser un proceso en húmedo, no en seco.

Cabe destacar además que este proceso realiza la eliminación de silicio con un ángulo de 54,7° respecto a la horizontal, mientras que el proceso en seco estructura completamente perpendicular con la horizontal.

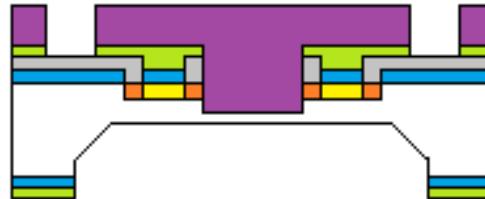


Ilustración 3.6: Estructuración de la parte trasera de la oblea hasta que quedan unos 20 micrómetros sin estructurar.

- **Estructuración en seco con ICP**

Como se ha comentado, seguido al proceso de estructuración en húmedo debemos acabar de eliminar el sobrante silicio con un proceso en seco para no dañar la adhesión entre el polímero y la oblea una vez acabado de eliminar el silicio. Este proceso utiliza una combinación de gas SF₆ para eliminar silicio combinado con C₄F₈ como gas de pasivación para evitar que la oblea se dañe en exceso

Es importante controlar el tiempo de estructuración manualmente, observando el proceso mediante una cámara, para visualizar cuando se ha eliminado el silicio completamente.

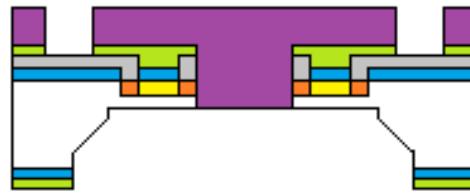


Ilustración 3.7: Estructuración con ICP de los últimos micrómetros hasta disponer de únicamente polímero ejerciendo la función de membrana.

- **Cortado**

El último paso de todos es el proceso de cortado, debido a que la oblea posee muchos sensores juntos en ella (110 en total), estos deben ser separados utilizando un proceso de cortado especial. El resultado final puede ver fotografiado en la Ilustración 3.8.

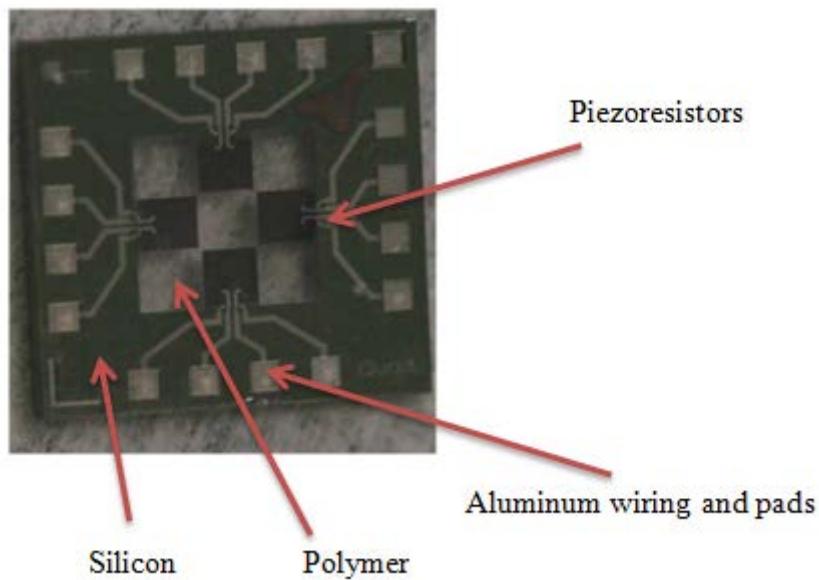


Ilustración 3.8: Sensor de micro fuerza correctamente desarrollado y cortado individualmente.

Este último paso es crítico, la adhesión entre el polímero y la oblea sufre mucho durante el cortado pudiendo romperse. En la Ilustración 3.9 puede observarse un sensor separado que tuvo su adhesión destruida. La oblea desarrollada con PerMX 3050 presentó sobre un 10% de sensores con este problema. La oblea con poliamida tuvo su adhesión completamente destruida, el 100% de los sensores fueron defectuosos.

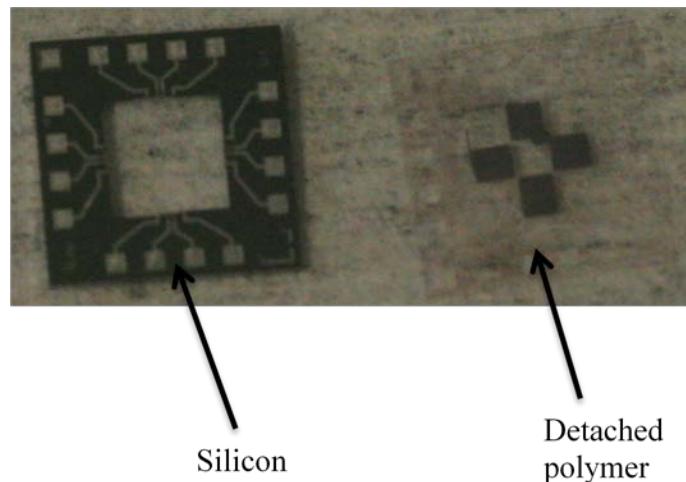


Ilustración 3.9: Sensor defectuoso con la adhesión rota. A la izquierda, el silicio del sensor restante después de las estructuraciones pertinentes, a la derecha, el polímero fuera del silicio.

3.3 Polímeros utilizados

En este capítulo 3.3 se explican los dos polímeros utilizados en este proyecto para servir como membrana y un polímero que se utilizó como adhesivo entre la poliamida y el silicio de la oblea (SU-8 5). El objetivo principal de este proyecto era desarrollar la oblea exclusivamente con poliamida y un adhesivo adicional (SU-8 5), dado que es más asequible y posee mejores propiedades mecánicas que el PerMX 3050, pero fué imposible lograr una adhesión correcta entre la poliamida y el silicio. Por lo tanto se utilizó otro polímero con propiedades adherentes al silicio y que tenía muchas posibilidades de éxito, como resultado fué perfectamente viable para ser usado como membrana.

3.3.1 Poliamida

El primer intento de crear una membrana polimérica fué realizado con poliamida como membrana y SU-8 5 como adhesivo.

La poliamida es un polímero que contiene enlaces de tipo amida [Web 04]; la Ilustración 3.10 muestra la estructura química de la poliamida. La poliamida que se ha utilizado en este proyecto es la DuPont™ Kapton® polyimide film de 50 μm de grosor.

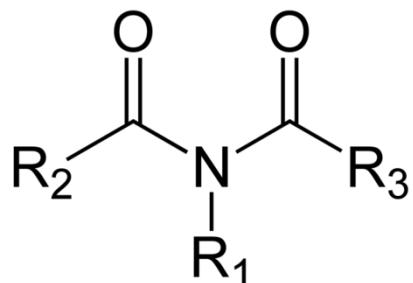


Ilustración 3.10: Estructura de la poliamida [Web 04].

La poliamida fue seleccionada debido a su gran estabilidad térmica y buena resistencia química. Estas características son muy importantes para su utilización en el laboratorio porque después de laminar el polímero sobre la oblea, esta debe ser estructurada en ambas caras con procesos químicos y ser sometido a procesos de altas temperaturas (ver capítulo 3.1) para conseguir la correcta forma del sensor.

En la Tabla 3.1 se muestran las propiedades físicas de la poliamida, debe prestarse especial atención al módulo de Young (parámetro que permite obtener mayor flexibilidad en la membrana cuanto menor es) y la temperatura de transición vítrea. El módulo de Young de la

poliamida usada es de 2.5 GPa a 23°C y el del silicio se encuentra entre 130 y 180 GPa. La temperatura de transición vítrea determina cuál es la máxima temperatura que la poliamida puede alcanzar durante el proceso de fabricación del sensor antes de alcanzar un estado de otras propiedades físicas no deseadas [Pol da].

Otra propiedad importante es la tensión de rotura, la cual determina cuánto esfuerzo mecánico puede soportar el material antes de romperse.

Tabla 3.1: Propiedades más importantes de la poliamida utilizada.

Propiedades	DuPont™ Kapton® Polymide 2ml 50μm
Módulo de Young a 23°C	2.5 GPa
Tensión de rotura a 23°C	231 MPa
Elongación máxima a 23°C	82 %
Temperatura de transición vítrea	400 °C
Temperatura de descomposición	620 °C
Densidad	1.42 g/cc

La última propiedad de la poliamida utilizada que no se refleja en la tabla es que en oposición a su forma líquida comercializada, la poliamida en forma de film no es un polímero fotosensible, por lo tanto debe ser estructurada por un proceso de estructuración por plasma. De acuerdo a la referencia [Chr 09], la poliamida puede ser estructurada utilizando un proceso de estructuración en seco utilizando una combinación de los gases CHF₃/O₂ en un plasma. Los parámetros utilizados en este proceso se muestran en la Tabla 3.2. La velocidad de eliminación de la poliamida se sitúa en unos 0.4 μm/min.

El proceso de estructuración se encuentra descrito en [Chr 09]: primero, una máscara de aluminio debe ser situada encima de la poliamida y fotolitográficamente tratada. Para tratarla mediante litografía, se debe utilizar una máscara que únicamente deje libres los pads de la oblea (para eliminar exclusivamente esa poliamida). Una vez expuesta a luz ultravioleta, el aluminio de los pads se remueve (el otro se mantendrá intacto debido al material fotosensible en su parte superior) y una vez removido, se estructura en el plasma la poliamida. En la Ilustración 3.11 se muestran los resultados de una estructuración de poliamida.

Tabla 3.2: Estructuración en plasma seco de poliamida PI-2611 [Chr 09]

CHF₃ [sccm]	O₂ [sccm]	Potencia [W]	Presión [mTorr]	Tiempo [min]	Mat. eliminado [μm]
5	20	150	100	15	7
5	20	150	100	30	11.5
5	20	150	100	45	18

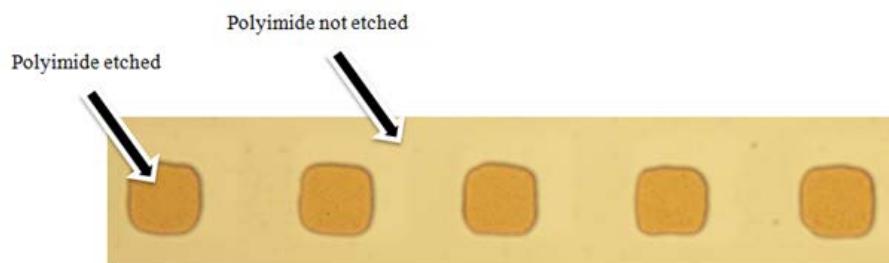


Ilustración 3.11: Aberturas de poliamida usando el proceso de eliminación descrito [Chr 09].

La estructuración de poliamida puede ser realizada también con plasma de O₂-CF₄ y O₂-SF₆. La velocidad de eliminación de la poliamida depende de la concentración de ambos gases. De acuerdo a la Ilustración 3.12 hay un máximo de velocidad de eliminación para cada combinación de gases. La adición de un 1-5% de nitrógeno a la mezcla de O₂-CF₄ puede causar un incremento del doble o triple de la velocidad de eliminación original.

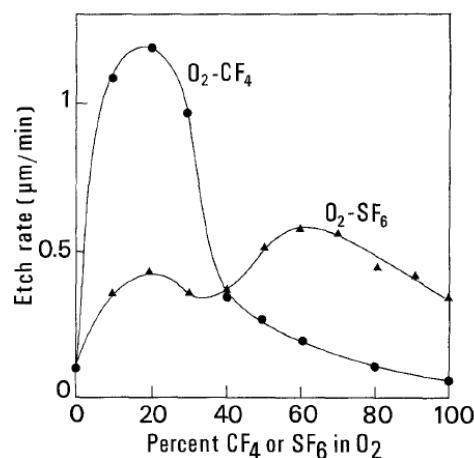


Ilustración 3.12: Velocidades de eliminación para una presión de 0.2 Torr [Tur 83].

3.3.2 SU-8 5

Debido a que la poliamida en forma de film DuPont™ Kapton® no es un polímero adhesivo al silicio, un polímero o adhesivo adicional para crear una adhesión entre la poliamida y el silicio es necesario. El polímero adhesivo usado es el SU-8 5. Este polímero es una resina epoxi fotosensible diseñada para la microfabricación y otras aplicaciones microelectrónicas en las que se requiere un polímero muy delgado y térmicamente y químicamente estable [SU8 da].

Para desarrollar correctamente una capa uniforme de SU-8 sobre la oblea, de acuerdo a [SU8 da], requiere un proceso que consiste en: centrifugado, hornada suave, “post exposebake” (PEB) y desarrollo [SU8 da]. Pero, en este proceso de fabricación, solo será necesario un centrifugado para la creación de la capa uniforme de SU8-5 y nada más creada, laminar la poliamida en su superficie.

Después de crearse esta capa de adhesivo, el SU-8 5 posee buenas propiedades mecánicas y adhesivas sin necesidad de una hornada fuerte (con temperaturas entre 150-200°C). Por lo tanto en este proyecto se evitarán tan altas temperaturas por la aparición de burbujas en la adhesión (a mayor temperatura aparecen mayor cantidad de burbujas).

El número que acompaña a “SU-8”, el “5” en este caso, se refiere al tipo de polímero. El SU-8 posee cuatro diferentes versiones cuyas propiedades importantes se observan en la Tabla 3.3 para una velocidad de centrifugado de 1000 rpm, 2000 rpm y 3000 rpm.

El SU-8 5 fue seleccionado como adhesivo debido a su poco grosor y su disponibilidad en el IMT.

Tabla 3.3: Propiedades de los diferentes tipo de SU-8 dependiendo de la velocidad de centrifugado [SU8 da].

Propiedades	SU-8 2	SU-8 5	SU-8 10	SU-8 25
Grosor [μm] a 1000 rpm	5	15	30	40
Grosor [μm] a 2000 rpm	2	7	15	25
Grosor [μm] a 3000 rpm	1.5	10	15	-
Viscosidad [cSt]	45	290	1050	2500

3.3.3 PerMX 3050

Después de demostrar que la fabricación de una membrana con poliamida utilizando SU-8 5 como adhesivo no es viable, el polímero PerMX 3050 fue utilizado para construir esa membrana. En el anexo de la fabricación con poliamida se puede leer todo lo relacionado con esa inviabilidad de fabricación. El PerMX 3050 fue correctamente adherido a la oblea y resistió todos los pasos de fabricación, convirtiéndolo en una elección correcta para utilizarse como polímero en vez de silicio para la membrana.

El PerMX es una resina epoxi multipropósito desarrollado por DupontTM (misma compañía que desarrolla la poliamida utilizada en este proyecto). Este polímero se presenta en láminas cubiertas en ambas caras por dos polímeros para proteger el PerMX (Ilustración 3.13). Este polímero es fotosensible, por lo tanto no precisa de un proceso de estructurado, solo debe exponerse con la máscara correcta (únicamente con los pads cubiertos) a luz ultravioleta, teniendo en cuenta que este polímero es fotosensible negativamente. Después de ser expuesto deberá ser desarrollado con la sustancia correspondiente (para eliminar el polímero sobrante) y ser curado en una hornada [Per da].

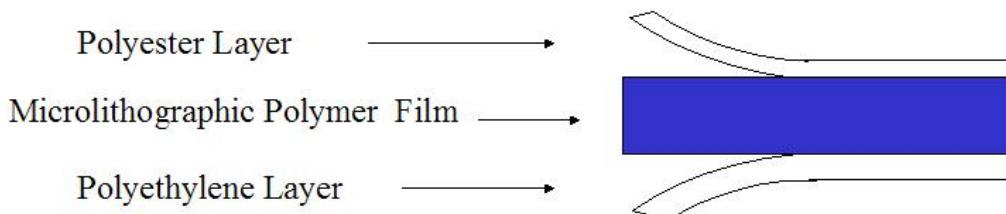


Ilustración 3.13: PerMX 3050 (azul) con dos polímeros de protección [Per da].

En adición a ser fotosensible, el PerMX 3050 es además adhesivo a materiales como el silicio, por lo tanto no es necesario utilizar un adhesivo adicional. El número 50 de su nombre hace referencia a su grosor ($50 \mu\text{m}$).

Para concluir, el módulo de Young de este polímero es de 3.2 GPa , muy similar al módulo de Young de la poliamida probada, por lo tanto la rigidez de la membrana será muy similar en ambos casos. Esto es muy importante dado que el cambio de material entre la poliamida y PerMX 3050 debe de realizarse prestando atención a que las características entre ambos sean lo más similares posibles.

4. Conclusión

Este proyecto ha conseguido desarrollar satisfactoriamente un sensor de micro fuerza con una membrana polimérica en vez de una de silicio. Ha sido demostrado que los polímeros con propiedades adhesivas al silicio y fotosensibles pueden ser añadidos a los sensores de micro fuerza mediante la adición de unos pocos pasos a los procesos de fabricación originales.

Dos polímeros han sido probados para remplazar esta membrana de silicio: poliamida en láminas y PerMX 3050 en láminas. La fabricación con la poliamida en láminas del sensor fue inviable debido a su carencia de propiedades adhesivas a pesar de la utilización de un adhesivo adicional (SU-8 5) para su unión con el silicio. Esa adhesión creada no fue lo suficientemente fuerte para resistir el completo proceso de fabricación. Por el contrario, la fabricación con PerMX 3050 fue viable y con resultados exitosos.

Las propiedades finales del sensor dependen básicamente de dos factores: el polímero utilizado como membrana y la geometría del sensor. El sensor desarrollado con PerMX 3050 posee vigas voladizas donde se localizan los piezoresistores, este diseño mejora el rango de medida comparándolo con un sensor con eje central y membrana completa. Este dato es muy útil para la utilización del sensor en aplicaciones industriales que requieran mayor rango de mediciones.

En conclusión, todos los objetivos presentados en la presente memoria han sido conseguidos, con la mala noticia de no haberlos podido realizar con poliamida en forma de láminas, lo cuál era la primera idea que se tenía para realizar este proyecto.

Para acabar, este proyecto puede ser el punto de partida para futuros trabajos sobre reemplazar la membrana de silicio por otro polímero más asequible que el PerMX 3050 o con mejores propiedades mecánicas.

5. Anexos

A. Fabricación con poliamida

A.1 Laminación y estructuración

Los siguientes puntos que vendrán a continuación muestran como implementar la poliamida en la oblea de silicio que contiene los sensores de micro fuerza. Para una visión global del proceso y esquemas de los pasos, consultar el anexo E.

1. Punto de partida

El punto de partida es el mismo que el descrito en el capítulo 3.1 de la memoria (ver Ilustración 3.3).

2. Adhesión con SU-8 5

Después de cortar una lámina de poliamida en forma circular para encajarla en la parte superior de la oblea, debemos crear una capa uniforme de adhesivo SU-8 5 en la cara superior para poder adherirla correctamente. Los pasos para crear una correcta capa uniforme de adhesivo son:

- Centrifugar 4 ml de SU-8 5 en la cara superior utilizando los siguientes parámetros:
 - Tiempo de centrifugado: 15 segundos.
 - Velocidad de centrifugado: 2500 rpm.
 - Paso opcional: Dejar la oblea en reposo 30 minutos en una superficie plana.

Es importante realizar el siguiente paso nada más a continuación de centrifugar el SU-8 5, para mantener las propiedades adhesivas de este al máximo.

3. Laminación y hornada

Después de crear esa capa uniforme de SU-8 5, la poliamida debe ser laminada sobre el adhesivo utilizando el laminador (dos filas de tres rodillos con velocidad y temperatura ajustables). Los parámetros para laminar y posteriormente calentar la oblea en un proceso de hornada son:

- Laminación a velocidad baja (un tercio de la máxima) y 75°C de temperatura.

- Hornada caliente justo después de laminar la poliamida, una hora a 75°C para curar el adhesivo y fortalecer la adhesión.

Los resultados se observan en la Ilustración 5.1, estos resultados observables son correctos debido a que no aparecen burbujas de aire en la adhesión y la poliamida se encuentra correctamente adherida al silicio.

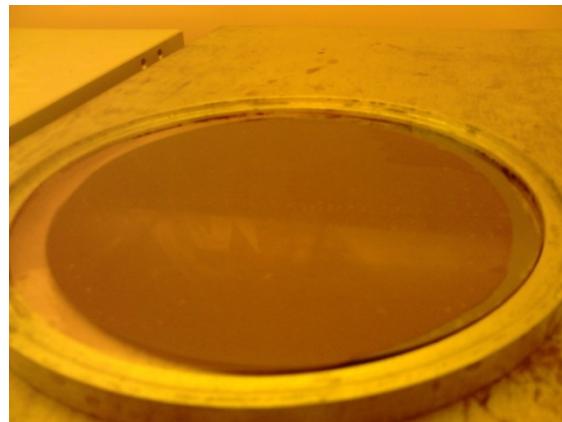


Ilustración 5.1: Oblea laminada con poliamida y SU-8 5 como adhesivo.

4. Crear una máscara de aluminio para estructurar la poliamida

Como se ha explicado en la memoria, la poliamida en forma de láminas no es fotosensible, por lo tanto debe ser estructurada utilizando una combinación de gases en un proceso de estructuración seca con plasma. En primer lugar debemos crear una capa en la parte superior de un material que resista ese proceso de estructuración con plasma, el elegido es el aluminio:

- Crear una capa de aluminio de unos 500 nm de grosor sobre la poliamida.

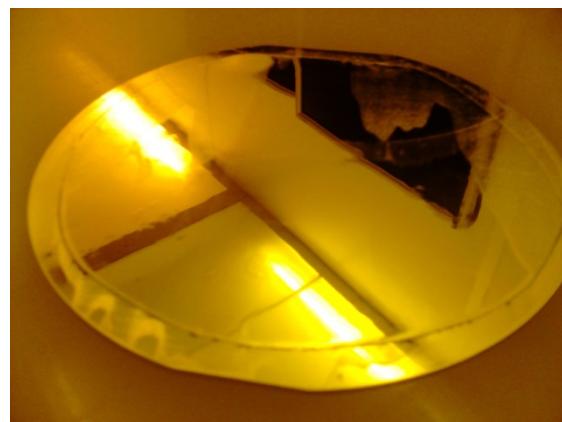


Ilustración 5.2: Oblea con una capa de aluminio sobre la poliamida.

Después de crear esa capa de aluminio, se debe eliminar el aluminio en los pads para que únicamente la poliamida en ellos sea eliminada en el paso 5. Para ello seguiremos los siguientes pasos:

- Centrifugar un líquido fotosensible (maP 1215) sobre el aluminio para crear una capa uniforme del mismo.
- Utilizar una máscara únicamente con los pads abiertos para eliminar por luz UV el maP1215 sobre ellos.
- Utilizar una disolución eliminadora de aluminio sumergiendo la oblea en ella unos 3 minutos a unos 40°C para eliminar el aluminio en donde no haya maP1215 (en los pads).
- Eliminar, una vez removido el aluminio de los pads, el líquido fotosensible restante con acetona y etanol.

El resultado se puede observar en la Ilustración 5.3, donde únicamente el aluminio sobre los pads ha sido removido.

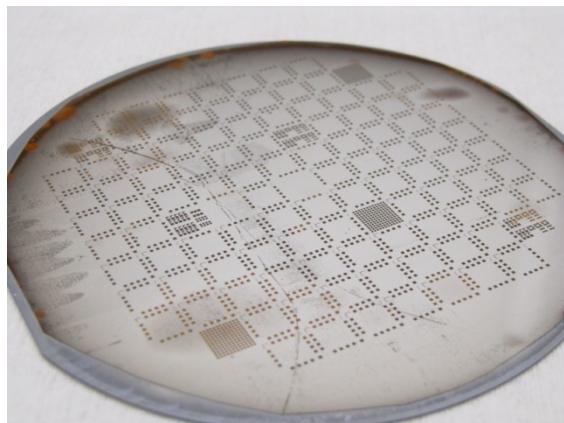


Ilustración 5.3: Oblea con aluminio como máscara, preparado para estructurar la poliamida.

5. Estructuración de la poliamida

De acuerdo a la información del capítulo 3.3.1 de la memoria y de los tests realizados en el capítulo A.2 de este anexo, la poliamida se estructura en mediante una combinación de 15Sccm de CF_4 y 135 Sccm de O_2 en un plasma seco.

6. Estructuración de la parte inferior de la oblea con KOH e ICP

Tal y como se plantea en el capítulo 3.2 de la memoria, la parte inferior de la oblea debe ser estructurada con sendos procesos húmedo y seco para conseguir la forma apropiada del sensor. Los parámetros de ambas estructuraciones no dependen del polímero usado.

Este paso fue fallido fabricando el sensor con poliamida y un eje central. La adhesión creada entre el SU-8 5 y el polímero no resistió en un 80% de los sensores.

7. Cortado

El proceso de cortado únicamente consiste en la separación de los sensores individualmente mediante una fresa de precisión. **Este paso también fue infructuoso** y los sensores que permanecieron intactos del paso número 6 (un 20%) rompieron su adhesión durante el corte.

A.2 Tests con poliamida y SU8-5

En este capítulo, todos los tests que se realizaron para encontrar los parámetros correctos para la laminación, curado de la adhesión y estructuración de la poliamida son descritos. A pesar de que el proceso global de fabricación con poliamida fue inviable, es importante conocer estos datos para futuros trabajos con poliamida o con SU8-5.

• Test para la laminación y la hornada

Los tests para la laminación se llevaron a cabo para determinar la dependencia de la capacidad adhesiva del SU-8 5 con la temperatura y la velocidad de laminación. Los primeros intentos de laminar correctamente fueron llevados a cabo con elevadas temperaturas (unos 90°C).

En la Ilustración 5.4 se pueden observar diferentes resultados para la laminación y proceso de hornada con diferentes temperaturas, el principal problema de usar una alta temperatura es que aparecen burbujas de aire en la adhesión, lo cual es inadmisible. El riesgo de utilizar bajas temperaturas es que la adhesión puede resultar menos fuerte.

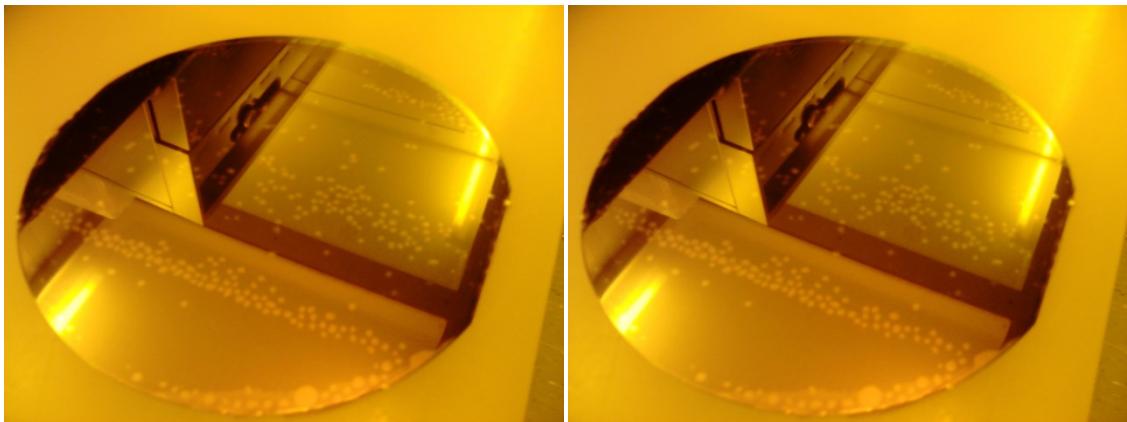


Ilustración 5.4: La oblea de la izquierda fue laminada a 80°C y calentada 45 minutos a 90°C.

La oblea de la derecha fue laminada a 85°C y curada 45 minutos a 100°C.

Viendo los resultados, las temperaturas de tanto la laminación como del curado fueron bajadas a 75°C, temperatura máxima a la cual se evitaba la aparición de burbujas.

- **Tests para la estructuración de la poliamida**

En este apartado se explican los tests realizados para determinar la mejor combinación de gases para estructurar la poliamida. Los tests fueron realizados en dos máquinas diferentes disponibles en el laboratorio, el “barrel etcher” y la “ICP” (Inductively Coupled Plasma), explicaremos una y otra señalando las ventajas y desventajas de una respecto a la otra.

- **Tests en el “barrel etcher”**

Usar esta máquina para estructurar poliamida en lugar del ICP tiene las siguientes ventajas:

- El barrel etcher permite procesar más de una oblea al mismo tiempo, mientras que el ICP procesa solo uno a la vez.
- Utiliza menos potencia que el ICP.
- El barrel etcher no necesita de un gas externo para enfriar la máquina durante su uso y evitar su sobrecalentamiento. El ICP por el contrario, necesita de ese gas externo, incrementando el coste de su operación.
- El barrel etcher puede utilizar una combinación de gases únicamente formada por CF₄ y O₂.

De acuerdo a esta última diferencia entre ambas máquinas, esos dos gases fueron utilizados con una potencia de 150 W y con una presión de 200 mTorr. La presión es un factor importante para la estructuración de la poliamida, de acuerdo a la referencia [Tur 83] la presión recomendada es de 200 mTorr. La potencia a su vez también es un factor importante, cuanto mayor sea, mayor será la velocidad de estructuración, con el inconveniente de que la oblea puede resultar dañada si se utiliza una elevada potencia. Además, una elevada potencia puede eliminar el aluminio de zonas más sensibles como el borde de la oblea, véase en la Ilustración 5.5 que con 200 W de potencia el aluminio del borde comenzaba a eliminarse y como consecuencia la poliamida que se encontraba debajo de él.

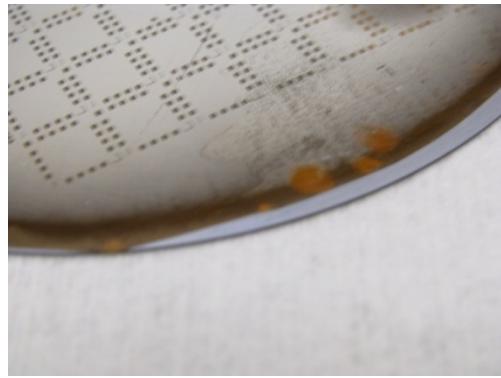


Ilustración 5.5: Detalle de una oblea estructurada a 200 W en el barrel etcher.

La velocidad de eliminación de la poliamida, función de la concentración de CF_4 , se muestra en la Ilustración 5.6. Para las tres combinaciones totales de gases empleadas (50, 100 y 150 Sccm) la concentración de CF_4 se varió desde 0 a 40 Sccm para determinar en qué punto la velocidad de eliminación era máxima.

Para 50 Sccm en total, la velocidad máxima de eliminación ($0.35 \mu\text{m}/\text{min}$) fue alcanzada con 5 Sccm de CF_4 y 45 Sccm de O_2 . Para 100 Sccm en total, la máxima velocidad de eliminación ($0.4 \mu\text{m}/\text{min}$) fue conseguida con 5 Sccm de CF_4 y 95 Sccm de O_2 . Para 150 Sccm en total la máxima velocidad de eliminación ($0.53 \mu\text{m}/\text{min}$) fue alcanzada con 15 Sccm de CF_4 y 135 Sccm de O_2 .

En conclusión, cuanta mayor concentración de gases sea utilizada, mayor velocidad de eliminación es obtenida. Sin embargo, la concentración máxima de gases disponible para utilizar en el barrel etcher es de 150 Sccm.

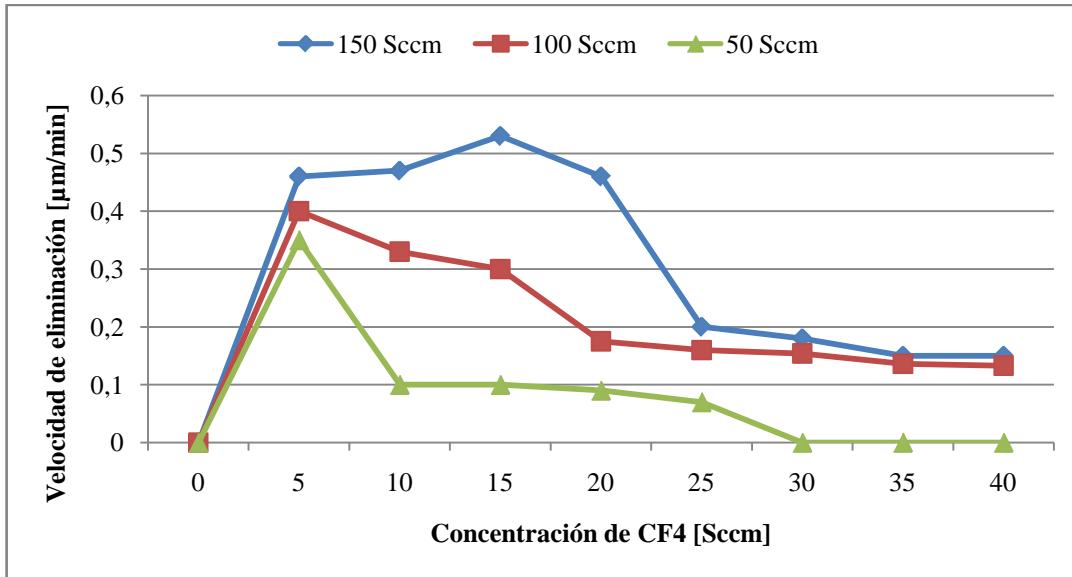


Ilustración 5.6: Velocidades de eliminación de poliamida con diferentes concentraciones totales de gases y variando la concentración de CF₄ en la mezcla con O₂.

- **Tests con el ICP**

La máquina ICP comparada con el barrel etcher posee las siguientes ventajas:

- Puede utilizar otras combinaciones de gases además de la utilizada en el barrel etcher. De acuerdo a la referencia [Tur 83], se probaron las combinaciones de gases de SF₆ con O₂ y la mezcla de SF₆, O₂ y CF₄.
- La máquina ICP puede utilizar mayor potencia para el proceso de estructuración que el barrel etcher. La potencia utilizada fue de 600 W. La razón para utilizar esta alta potencia es que se cicla, junto con la combinación de gases para la estructuración, un gas de pasivación cada período de tiempo programable.
- De acuerdo a [Tur 83], esta máquina también permite usar N₂ para incrementar la velocidad de eliminación.

Los tests comenzaron con SF₆ y O₂ (Ilustración 5.7), posteriormente se utilizaron conjuntamente SF₆, N₂ y O₂ (Ilustración 5.8) y finalmente una combinación de SF₆, CF₄ y O₂ (Ilustración 5.9). La total concentración de gases fue de 100 Sccm (la máxima permitida por el ICP) y la potencia, como se ha dicho anteriormente, 600 W.

Para el primer test (Ilustración 5.7), las velocidades de eliminación alcanzadas fueron demasiado bajas. Por lo tanto la combinación de SF₆ con O₂ sin utilizar gases añadidos es

inefectiva. El segundo test con SF₆, N₂ y O₂ (Ilustración 5.8) muestra mayores velocidades de eliminación que la primera combinación, pero su velocidad máxima (0.29 µm/min) es baja en comparación con la alcanzada en el barrel etcher. El último test (Ilustración 5.9) con SF₆, O₂ y CF₄ alcanzó una velocidad máxima (0.43 µm/min) menor también que la máxima alcanzada en el barrel etcher.

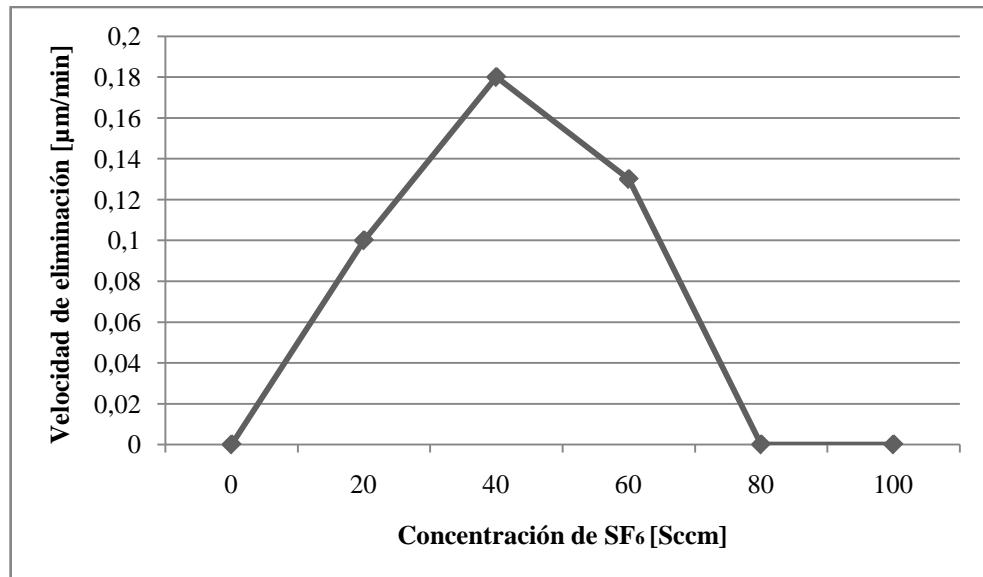


Ilustración 5.7: Test con la máquina ICP usando SF₆ y O₂ como combinación de gases.

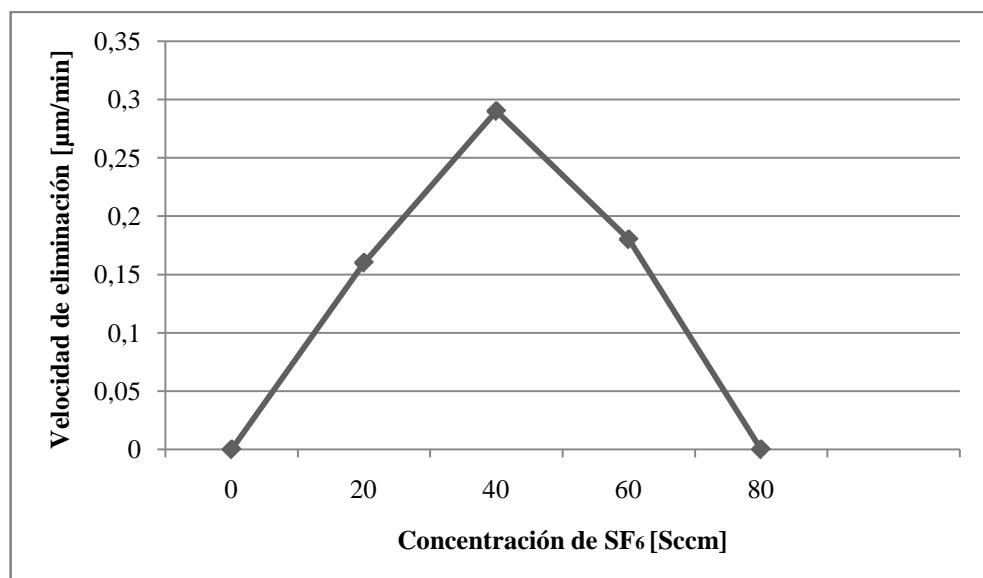


Ilustración 5.8: Test con la máquina ICP usando SF₆, O₂ y N₂.

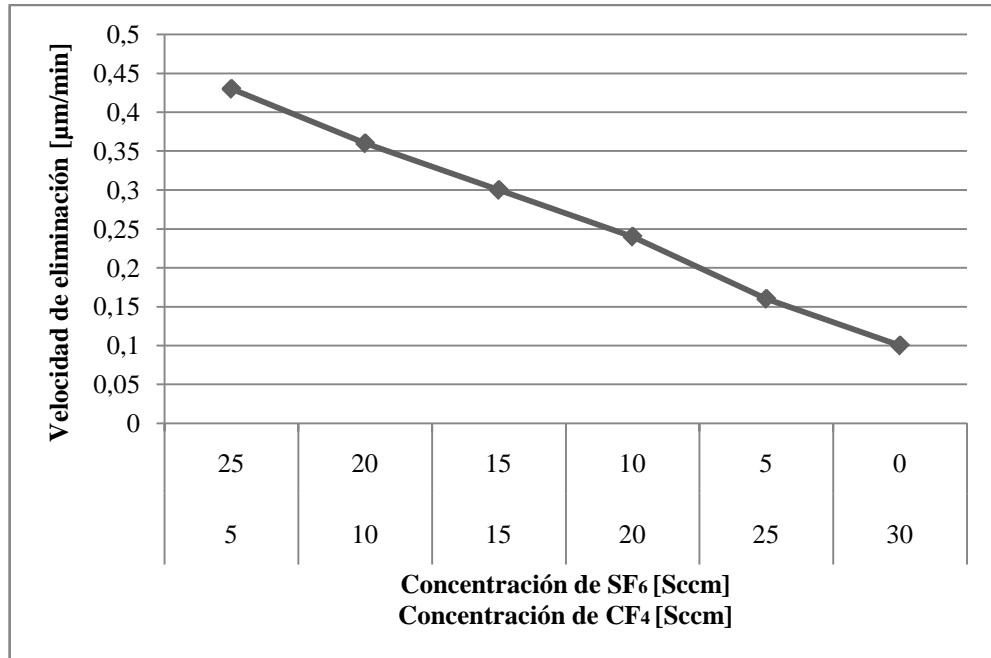


Ilustración 5.9: Test con la máquina ICP usando SF₆, O₂ y CF₄.

En conclusión, a pesar del incremento de potencia (de 150 a 600 W) y las mayores combinaciones de gases probadas, la máquina ICP no alcanza la velocidad de eliminación alcanzable con el barrel etcher. Sin embargo, aunque hubiera una combinación de gases mejor en esta máquina que no ha sido probado y que mejora esa máxima velocidad de eliminación alcanzada por el barrel etcher, tanto la complicación de la máquina, su caro uso y que únicamente puede operar con una oblea al mismo tiempo, esta máquina seguiría siendo una mala elección en comparación con el barrel etcher para estructurar poliamida.

Hay un último test realizado que representa la dependencia de la velocidad de eliminación de la poliamida respecto al tiempo. Este test se representa en la Ilustración 5.10 y la combinación de gases utilizada fue (en el barrel etcher) de O₂ = 135 Sccm y de CF₄ = 15 Sccm. Se observa que la máxima velocidad de eliminación se consigue a partir de los 15 minutos de introducir la oblea en el proceso y que esta se mantiene constante respecto al tiempo.

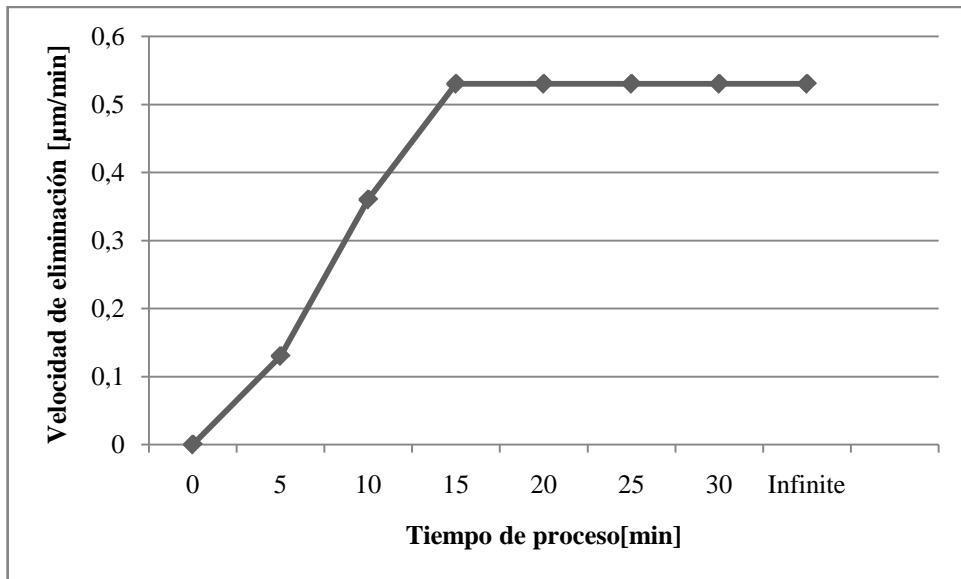


Ilustración 5.10: Velocidad de eliminación respecto al tiempo del proceso.

Para finalizar este capítulo, en la Ilustración 5.11 se puede observar un agujero estándar en la poliamida creado con el barrel etcher. Se aprecia que la eliminación de la poliamida se produjo de forma correcta debido a que la forma cuadrada del pad se mantiene perfectamente y la poliamida que lo rodea se encuentra intacta en su grosor.

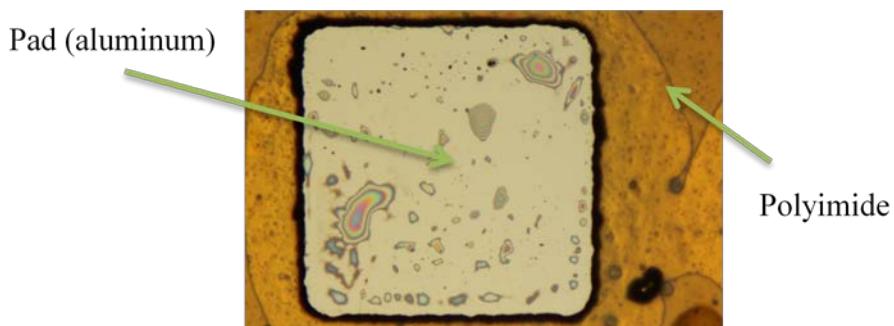


Ilustración 5.11: Visión microscópica de un pad estructurado.

A.3 Análisis de los resultados y sugerencias para futuros trabajos

En este capítulo, un análisis de los problemas presentados durante el anexo A1 es presentado así como dos opciones para intentar subsanarlos en futuras investigaciones.

- **Análisis y problemas presentados**

La poliamida, en teoría, es una buena elección para utilizarse como membrana debido a sus buenas características y propiedades, pero los resultados prácticos obtenidos muestran que la poliamida en láminas (no en forma líquida) usando un adhesivo como el SU-8 5 para adherirlo al silicio son insatisfactorios. Los problemas comienzan con los procesos de estructuración de la cara inferior de la oblea, en estos procesos la adhesión sufre mucho y se rompe en la mayoría de los casos. El último paso, el corte individual, termina por destruir la adhesión de la totalidad de los sensores de una oblea.

Los resultados se observan en la Ilustración 5.12. En esta figura se observa la cara inferior de una oblea cuya estructuración ha sido realizada (cada sensor posee un eje central) y se observa como prácticamente la totalidad de ejes centrales se desprenden de la poliamida.

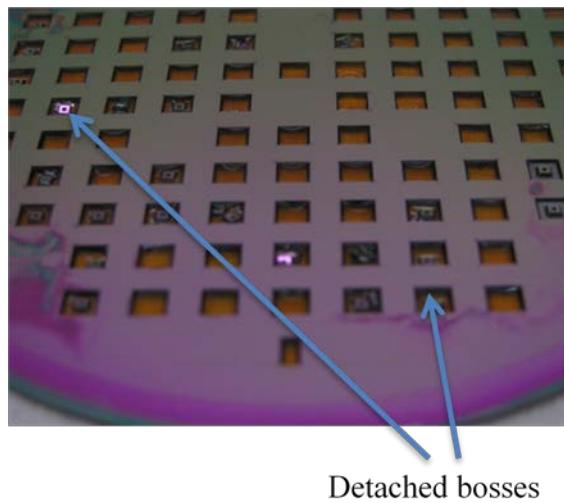


Ilustración 5.12: Fotografía de la cara inferior de una oblea con prácticamente la totalidad de sus ejes centrales despegados de la poliamida.

Otro problema puede observarse en la Ilustración 5.13. Aquí se muestra una fotografía detallada de una oblea con la poliamida estructurada en su cara superior. La poliamida no se encuentra en una condición correcta (la adhesión se encuentra algo dañada) debido a la larga

exposición de la oblea a la estructuración en plasma seco (100 minutos). A pesar de la mala condición, el grosor se mantuvo intacto (50 µm).

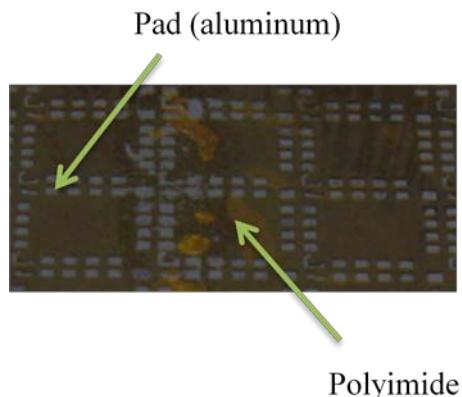


Ilustración 5.13: Zoom en la zona estructurada de una oblea.

- **Sugerencias para posteriores investigaciones y trabajos**

Para solventar estos problemas acontecidos en el trabajo con la poliamida, dos soluciones son presentadas a continuación para fomentar futuras investigaciones con este polímero.

- **Usar otro polímero como adhesivo**

El problema de la destrucción de la adhesión es causado por las reacciones químicas (procesos de estructuración) y fuerzas mecánicas (corte final). Este problema quizás puede solventarse utilizando un adhesivo más fuerte.

De acuerdo a los adhesivos mencionados en [Sem da], unos termoplásticos con mejores propiedades que el SU-8 5 son los termoplásticos STAYSTIK®. Estos termoplásticos necesitan mayor temperatura para su curado (entre 300 y 375°C) y además necesitan presión mecánica para fortalecer la adhesión. La alta temperatura no es un problema para la poliamida, que resiste hasta 400°C antes de alcanzar la temperatura de transición vítrea. Obsérvese la Tabla 5.1 para ver las propiedades más importantes de estos termoplásticos, cuyo diferente modelo se indica con un número (501, 611, 415 y 811).

Sin embargo, el problema de la utilización de estos termoplásticos es su elevado precio. El precio ofrecido por la industria por una lámina de 15 x 15 cm es de unos 25 dólares americanos.

Tabla 5.1: Propiedades de los termoplásticos STAYSTIK® desarrollados por Cookson Electronics [Sem da].

Propiedades	501	611	415	811
Material de relleno	Plata	Ninguno	Ningun	Alumina
Temperatura de adhesion	300°C – 375°C	300°C – 375°C	300°C – 375°C	300°C – 375°C
Maxima temp. admisible	+ 400°C	+ 400°C	+ 400°C	+ 400°C
Módulo elástico [psi]	> 360,000	> 360,000	> 360,000	> 360,000

- **Usar poliamida en su forma líquida**

La poliamida se encuentra también disponible en forma líquida para su tratamiento como un polímero líquido (con su proceso de centrifugado y hornada). Comparando las propiedades de este polímero en forma líquida con su forma en láminas (Tabla 5.2), se observa que el módulo de Young de ambos es igual pero que, consultando otras propiedades mecánicas, su tensión de rotura y elongación máxima son inferiores que su homónimo en forma laminar. Esto no es de suma importancia debido a que la circuitería del sensor de micro fuerza se rompe antes que el polímero presente una deformación o tensión crítica en los tests realizados (anexo C) [Pol da2].

Tabla 5.2: Propiedades de la poliamida líquida comparadas con la poliamida en láminas.

Propiedades	VTEC™ PI-1388 poliamida líquida	DuPont™ Kapton® Polyimide 2mll 50µm
Módulo de Young a 23°C	2.52 GPa	2.5 GPa
Tensión de rotura a 23°C	137 MPa	231 MPa
Elongación máxima a 23°C	15 %	82 %
Temperatura de transición vítreas	320 °C	400 °C

B. Fabricación con PerMX 3050

Para probar la viabilidad del PerMX 3050 como membrana en un sensor de micro fuerza, varias obleas de prueba fueron desarrolladas para encontrar los mejores parámetros para su fabricación antes de desarrollar un sensor completo.

Los pasos para la fabricación de un sensor con PerMX 3050 se encuentran en el anexo D.

- **Obleas de prueba**

La primera oblea de prueba desarrollada correspondía a una oblea completamente en blanco solo con PerMX 3050 laminado sobre ella. El objetivo de este test era encontrar los parámetros correctos de laminación y posterior desarrollo del polímero mediante su exposición a luz UV. Los parámetros correctos para la laminación fueron encontrados rápidamente consultando otros trabajos con PerMX 3050 y son:

- Quitar la primera cobertura del PerMX 3050.
- Laminar sobre la oblea a 75°C con velocidad de un tercio de la máxima alcanzable por el laminador.
- Después de la laminación, guardar la oblea a 0°C unos 30 minutos.
- 5 minutos de hornada a 80°C.
- Remover la segunda cobertura del PerMX 3050.

Después de estos pasos, el PerMX 3050 se encuentra correctamente pegado al silicio de la oblea. Despues de la laminación, la estructuración del PerMX 3050 fue probada. La estructuración fue llevada a cabo con una máscara para material fotosensible negativo (el PerMX 3050 es negativo) y usando un revelador especial (PGMEA). Antes de utilizar ese revelador especial la oblea debe ser pre-horneada para favorecer su revelado. Los primeros parámetros probados fueron:

- Máscara con los pads cubiertos (negativa) y utilizar 300 mJ/cm^2 de potencia de luz ultravioleta.
- Pre-horneada de 5 minutos a 130°C.
- Introducir la oblea 180 segundos en el revelador PGMEA y posteriormente limpiarlo con isopropanol.

En estos primeros parámetros probados, el primer fallo fue detectado. El PerMX 3050 presentaba muchas olas y efectos no deseados en su superficie y los pads no se encontraban correctamente desarrollados (Ilustración 5.14).



Ilustración 5.14: Olas y efectos no deseados en la primera oblea probada.

Los problemas aparecieron por utilizar 130°C para el proceso de pre-horneado. Cambiando la temperatura a 110°C solucionó el problema. Aquí se encuentra de nuevo la importancia de encontrar la correcta temperatura para los procesos que involucran el tratamiento del polímero. Los resultados de usar 110°C se observan en la Ilustración 5.15.

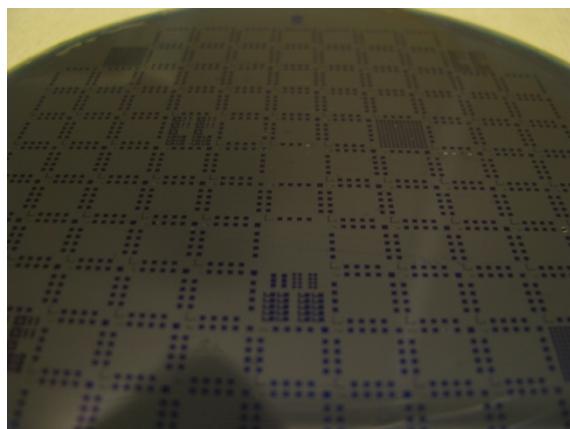


Ilustración 5.15. PerMX 3050 correctamente estructurado con los pads bien definidos y libres.

Después de encontrar esta correcta temperatura, el polímero debe ser curado para crear una fuerte adhesión entre él y el silicio. Las temperaturas probadas para este curado fueron:

- 30 minutos de hornada a 150°C.
- 60 minutos de hornada a 200°C.

Estas temperaturas se demostraron correctas para crear una fuerte adhesión en la oblea.

Después de los tests con obleas en blanco, obleas procesadas para ser estructuradas y cortadas posteriormente con la forma de un sensor de micro fuerza final fueron fabricadas. Se desarrollaron obleas con eje central y vigas voladizas. Todas tuvieron resultados positivos.

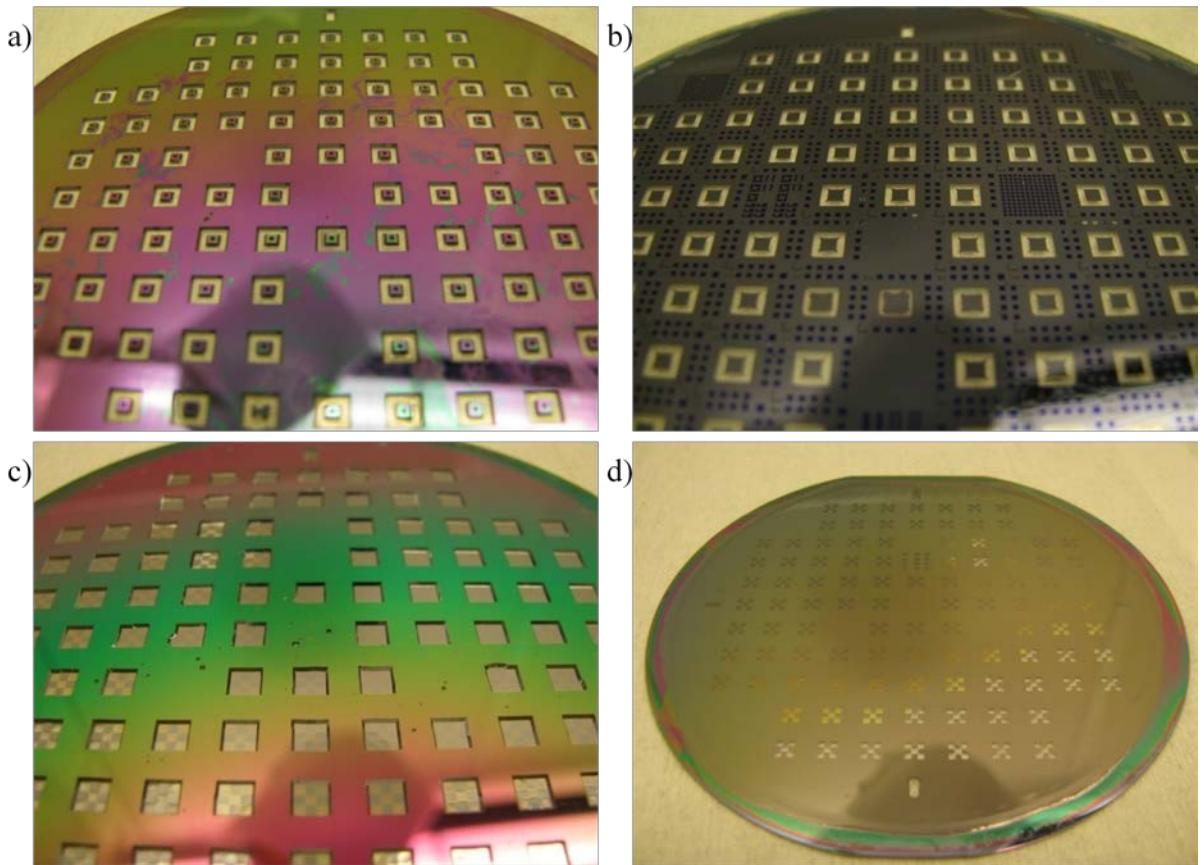


Ilustración 5.16: Obleas estructuradas con PerMX 3050 sobre ellas. Las fotografías a) y b) corresponden a una oblea con un eje central y las fotografías c) y d) corresponden a una oblea con vigas voladizas. Ambas obleas fueron correctamente desarrolladas.

Por lo tanto se demostró que la adhesión del PerMX 3050 resiste los procesos de estructurado de la cara inferior de la oblea. Además, se probó el proceso de cortado de los sensores para obtenerlos individuales. También los resultados obtenidos fueron positivos.

A pesar de que en el anexo D sólo se muestra cómo fabricar el sensor con vigas voladizas, estos tests demuestran que se podría fabricar perfectamente con otra forma geométrica como con un eje central, debido a que los ejes se mantienen pegados al PerMX 3050.

El análisis de los resultados con un sensor completo se muestran en el anexo C.

C. Resultados y conclusiones

C.1 Caracterización del comportamiento mecánico, resolución y sensibilidad de los ejes principales usando PerMX 3050 como membrana

En esta parte del anexo, la caracterización de las propiedades de la sensibilidad, rigidez y el punto de rotura en todos los ejes principales de medida son estudiados para el sensor de micro fuerza desarrollado con PerMX 3050 como membrana.

Valores y gráficas son presentadas para todas de estas características; los métodos para evaluarlas son presentados en el capítulo 2.3.3 de la memoria. La comparación de estos resultados con un sensor exclusivamente realizado en silicio son presentados en el anexo C.2.

C.1.1 Sensibilidad en los ejes principales

Todos los resultados presentados para este apartado corresponden a tres de los cuatro puentes de Wheatstone que posee el sensor. La razón para esto es que el contacto eléctrico para la medida del puente C fue insatisfactorio (pero el puente fue correctamente fabricado).

La sensibilidad es medida en las direcciones principales (horizontal y vertical) y en ambos sentidos de movimiento, empezando desde un desplazamiento de la membrana de 0 μm hasta alcanzar 90 μm y posteriormente realizando el movimiento opuesto, hasta no tener señal.

- **Sensibilidad en la dirección horizontal**

Debido a que la conexión con el puente C está dañada, los cálculos fueron realizados únicamente para el eje Y (debido a que para el eje X necesitaríamos los puentes A y C), lo cual no es un problema debido a que hay una simetría entre las medidas del eje X e Y [Pha 09]. Usando el método explicado en el capítulo 2.3, la ecuación necesaria es:

$$S_y \approx S_x = B - D \quad (8)$$

En conclusión, observando la Ilustración 5.17 y la Ilustración 5.18, los resultados son:

$$S_y (0 \mu\text{m} \text{ a } 90 \mu\text{m}) = 0.4716 + 0.2322 = 0.704 \text{ mV}/\mu\text{m}.$$

$$S_y (90 \mu\text{m} \text{ a } 0 \mu\text{m}) = 0.4780 + 0.2306 = 0.700 \text{ mV}/\mu\text{m}.$$

- La sensibilidad en la dirección lateral es $0.706 \pm 0.002 \text{ mV}/\mu\text{m}$.
- Dividida por 5 (voltaje de alimentación) para convertirla a $[\text{mV}/\text{V}/\mu\text{m}] = 0.1400 \pm 0.0004 \text{ mV}/\text{V}/\mu\text{m}$.

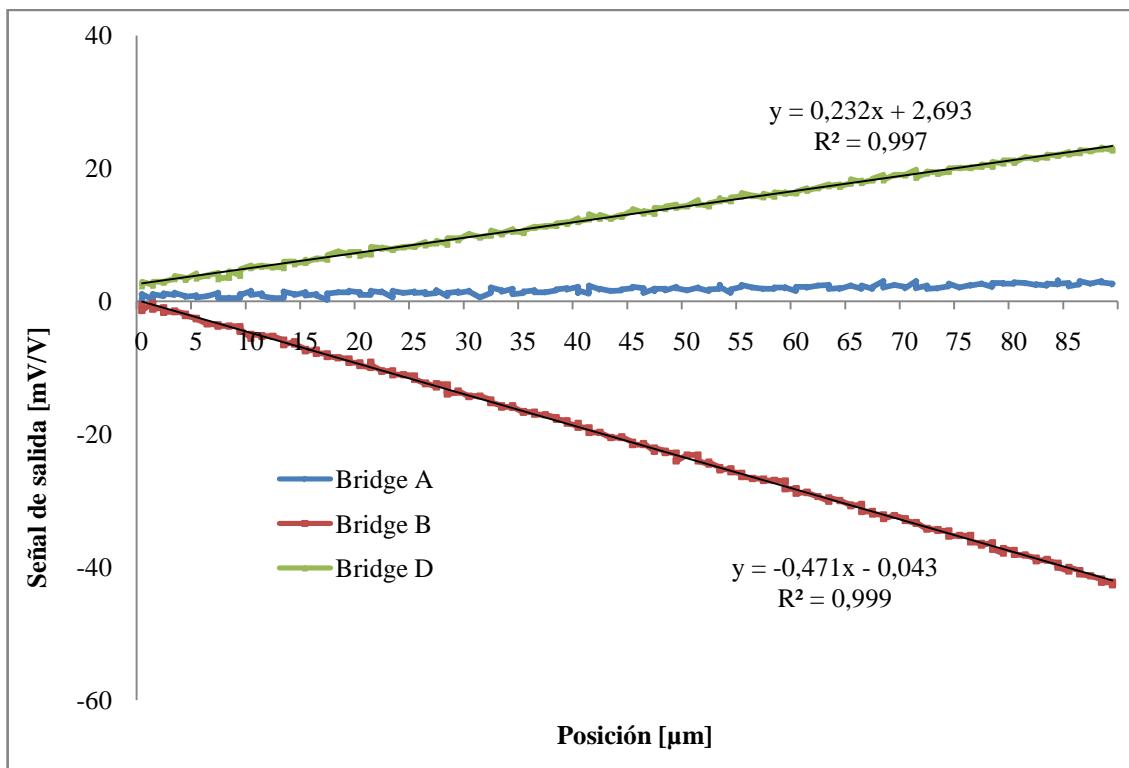


Ilustración 5.17: Señal de salida frente a la posición en el eje Y. Sentido de 0 μm a 90 μm.

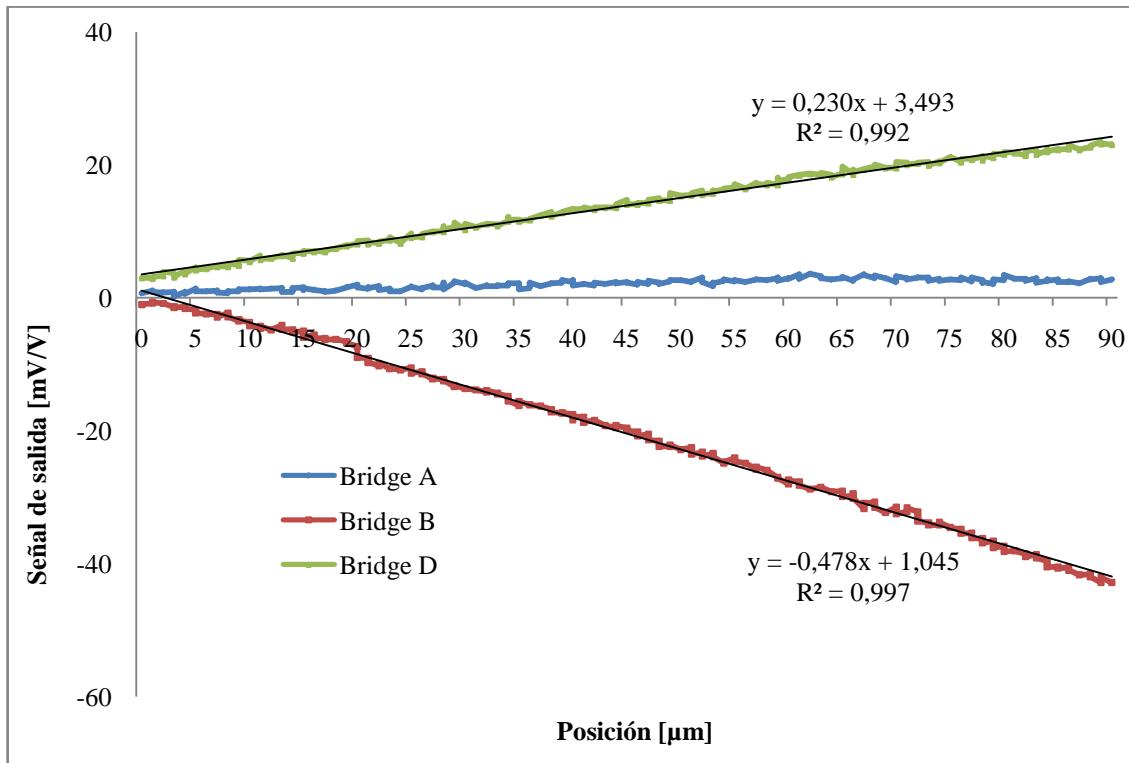


Ilustración 5.18: Señal de salida frente a la posición en el eje Y. Sentido de 90 μm a 0 μm.

- **Sensibilidad en la dirección vertical**

De acuerdo a los resultados de la Ilustración 5.19 e Ilustración 5.20 además de las ecuaciones presentadas en el capítulo 2.3 de la memoria, la sensibilidad en dirección vertical se calcula:

$$S_z = A + B + C + D \quad (9)$$

Debido a que el puente C se encuentra dañado, la media de los valores de los otros tres puentes se utiliza para determinarlo, por lo tanto la ecuación usada es:

$$S_z = (A + B + D) + \left(\frac{A + B + D}{3} \right) \quad (10)$$

$$S_z (0 \mu\text{m} \text{ a } 90 \mu\text{m}) = (2.176 + 3.239 + 1.644) + \left(\frac{2.176 + 3.239 + 1.644}{3} \right) = 9.412 \text{ mV}/\mu\text{m}.$$

$$S_z (\text{from } 90 \mu\text{m} \text{ a } 0 \mu\text{m}) = (2.178 + 3.245 + 1.637) + \left(\frac{2.178 + 3.245 + 1.637}{3} \right) = 9.413 \text{ mV}/\mu\text{m}.$$

- La sensibilidad en la dirección vertical es $9.4125 \pm 0.0005 \text{ mV}/\mu\text{m}$.
- Dividida por 5 (voltaje de alimentación) para convertirla a $[\text{mV}/\text{V}/\mu\text{m}] = 1.8825 \pm 0.0001 \text{ mV}/\text{V}/\mu\text{m}$.

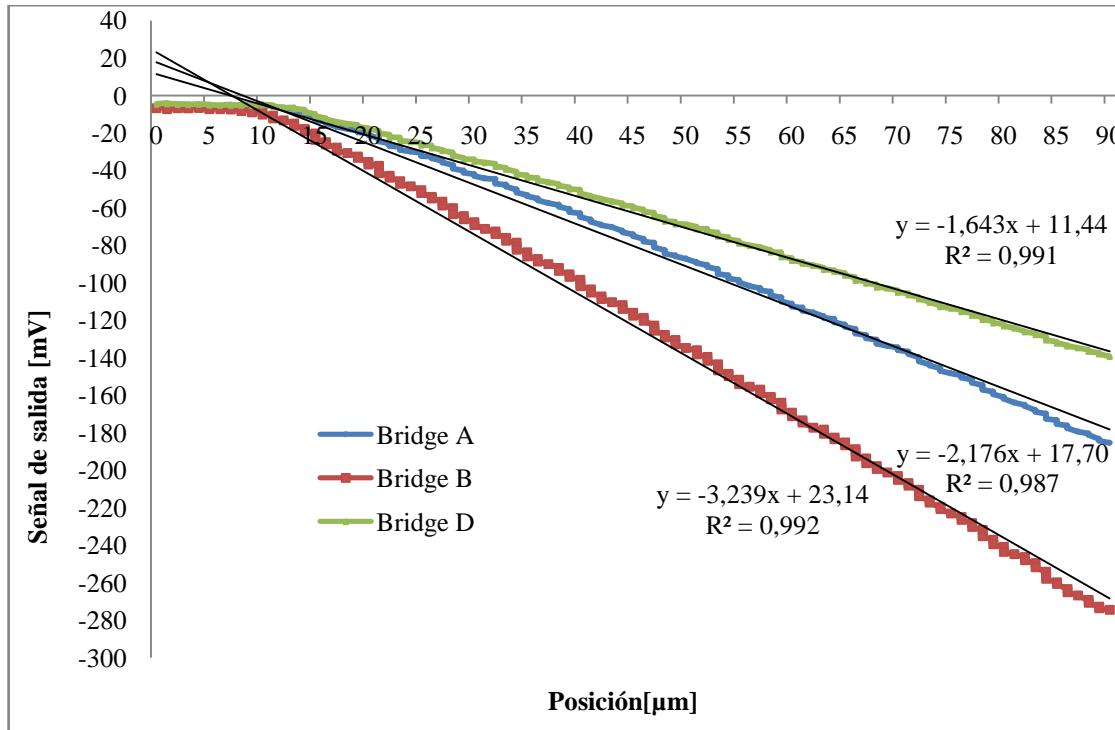


Ilustración 5.19: Señal de salida frente a la posición en el eje Z. Sentido de 0 μm a 90 μm.

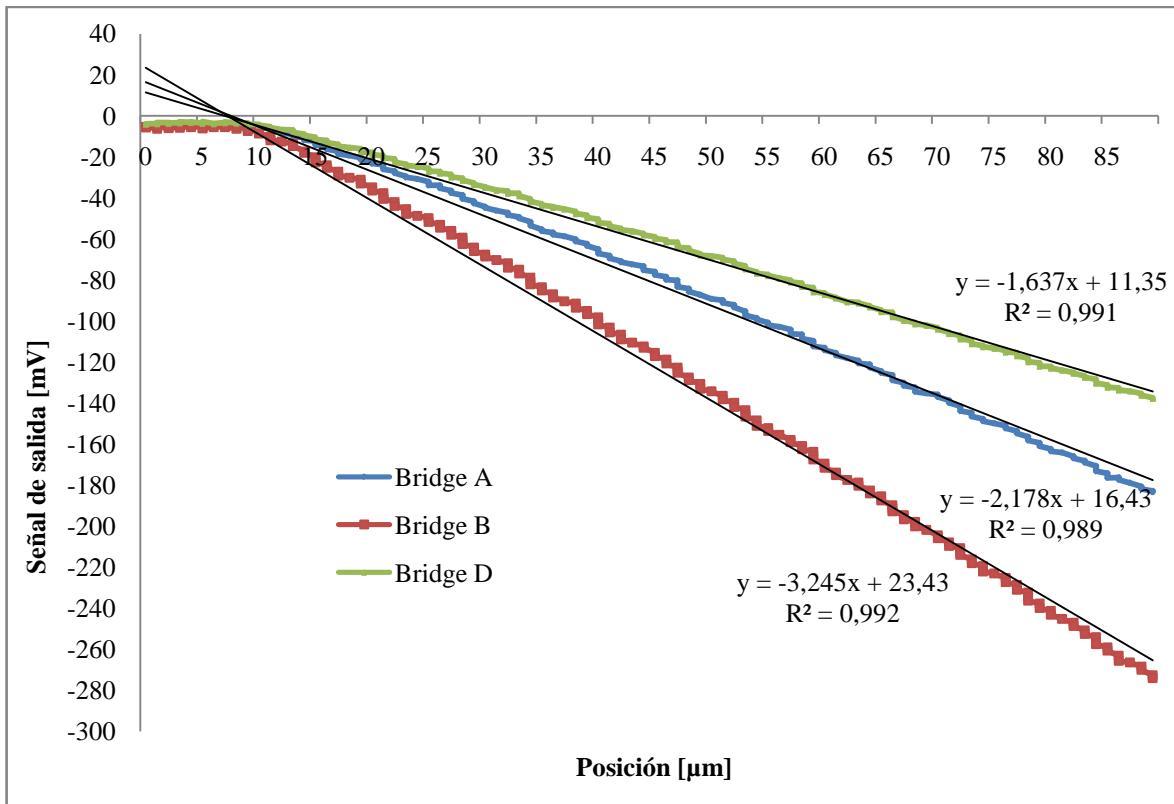


Ilustración 5.20: Señal de salida frente a la posición en el eje Z. Sentido de 90 μm a 0 μm.

C.1.2 Propiedades mecánicas

- **Rigidez en ambas direcciones principales**

De acuerdo a la Ilustración 5.21, la rigidez puede ser calculada utilizando la pendiente de las rectas que representan la fuerza contra la deformación en ambas direcciones principales (horizontal y vertical).

Los resultados son:

- Rigidez en la dirección horizontal: 0.4114 mN/μm.
- Rigidez en la dirección vertical: 11.124 mN/μm.

Para la rigidez y la deformación máxima los resultados no presentan tolerancia debido a que únicamente una medida fue realizada.

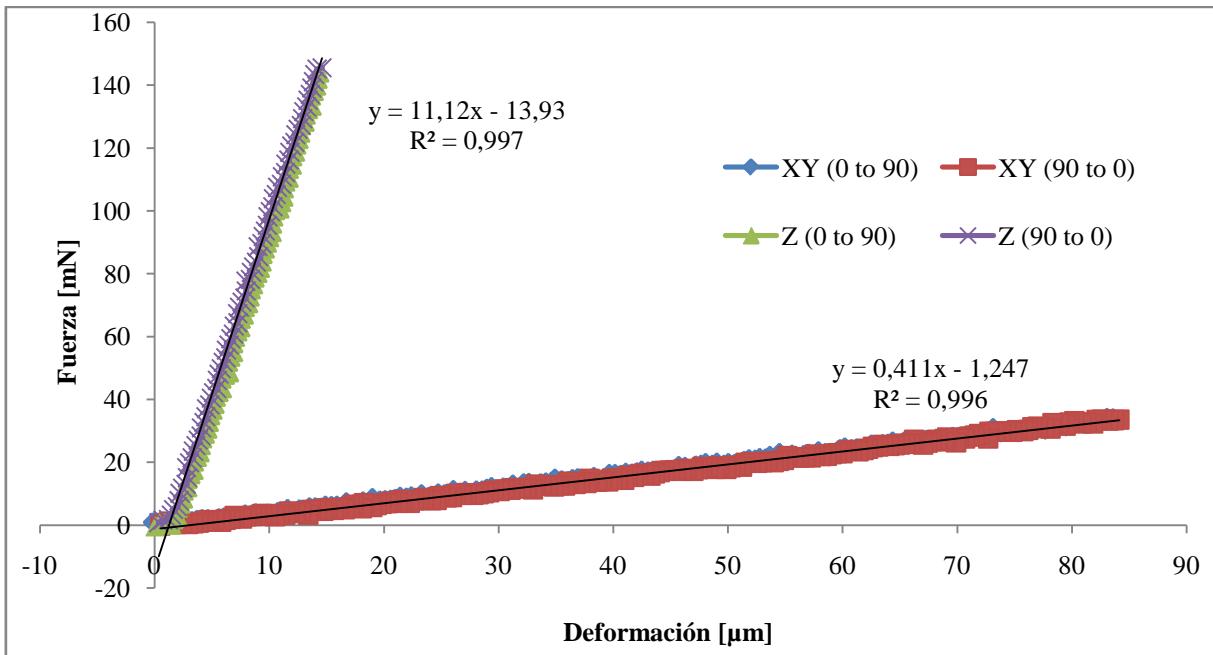


Ilustración 5.21: Fuerza contra deformación en ambas direcciones principales.

- **Máxima deformación en ambas direcciones principales**

La deformación máxima en ambas direcciones es medida con el mismo sistema que el usado para medir la rigidez. Sin embargo, el sensor comercial para medir estas magnitudes (ver capítulo 2.3.3) es remplazado por otro con menor resolución pero mayor rango de medida, para cubrir más campo de medición y detectar el punto de rotura del sensor en ambos ejes. Es importante entender que, cuando el sensor posee un polímero como membrana, el punto de rotura se alcanza antes de que el polímero ceda mecánicamente, sino que lo que ocurre es que la circuitería (piezoresistores y cableado) se rompen.

Los resultados para la deformación máxima en ambas direcciones son:

- Máxima deformación en la dirección horizontal = 280 μm.
- Máxima deformación en la dirección vertical = 83 μm.
- Máxima fuerza en la dirección horizontal = 115.19 mN.
- Máxima fuerza en la dirección vertical = 926.96 mN.

C.2 Análisis y comparación de los resultados

Analizando los resultados para conocer si el sensor ha sido mejorado con la nueva membrana polimérica, es necesario comparar todas las magnitudes medidas en el anexo C.1 con un sensor con membrana de silicio. Debido a que el sensor desarrollado con PerMX 3050 posee piezoresistores fabricados con difusión-P en una configuración transversal, sus características son comparadas con los resultados de un sensor con la misma fabricación y configuración realizado en silicio de la tesis [Pha 09]. La tabla 5.3 refleja esta comparación.

Tabla 5.3: Comparación de las características de un sensor de micro fuerza fabricado con PerMX 3050 con dos diferentes diseños de membrana de un sensor fabricado en silicio.

Características	Dirección	Sensor con PerMX 3050 (vigas voladizas)	Membrana completa [Pha 09]	Membrana en cruz [Pha 09]
Sensibilidad [mV/V/ μ m]	Horizontal	0.14	0.70±0.02	0.70±0.09
	Vertical	1.88	3.97±0.07	8.14±0.40
Rigidez [mN/ μ m]	Horizontal ($k_{x,y}$)	0.41	0.40	0.19
	Vertical (k_z)	11.12	12.39	6.51
	$k_z : k_{x,y}$	27:1	31:1	34:1
Deformación máxima [μ m]	Horizontal	280	140	141
	Vertical	83	30	30
Fuerza máxima [mN]	Horizontal	115	30	25
	Vertical	927	150	93

De acuerdo a la Tabla 5.3, la sensibilidad del sensor fabricado con polímero es afectada: la sensibilidad con una membrana de PerMX 3050 es un 80% inferior que con silicio. Además la rigidez es casi dos veces incrementada con el uso de PerMX 3050 en comparación con el uso de silicio en una membrana en forma de cruz.

La mayor ventaja de utilizar un polímero como membrana aparece observando los resultados de máxima fuerza y desplazamiento admisibles. En estos resultados, la membrana desarrollada con PerMX 3050 tiene mucho mejor comportamiento comparada con la de silicio. La máxima deformación en ambas direcciones principales conseguida con la membrana de PerMX 3050 es unas dos o tres veces mayor que la máxima deformación permitida con una membrana de silicio. La máxima fuerza admisible en ambas direcciones se encuentra muy incrementada.

De acuerdo a estos resultados, el uso de un polímero con propiedades similares o mejores que el PerMX 3050 en la membrana posee como principal ventaja el aumento del rango de medida para la utilización de este sensor en más aplicaciones industriales que requieran el uso de mayores medidas o mayores fuerzas en el sensor. Además se obtiene otra mejora no reflejada en los resultados anteriormente citados, consiste en que al colocar una membrana polimérica sobre la circuitería del sensor, esta queda completamente aislada, por lo que puede utilizarse el sensor para aplicaciones en las que el sensor se vea expuesto a fluidos y otros elementos que puedan dañar esta circuitería.

D. Proceso de fabricación de un sensor de micro fuerza con membrana polimérica realizada con PerMX 3050

Todos los pasos excepto los que envuelven la fabricación de la membrana de polímero están basados en la referencia [Pha 09].

Los pasos escritos en letra negrita y que se encuentran muy detallados son los nuevos pasos integrados en el proceso para crear la membrana polimérica.

La leyenda para comprensión de los colores utilizados se encuentra al final de la tabla.

Step	Description	Figure
1	Prepare a silicon wafer of 360 μm of thickness; measure its exact thickness	
2	PECVD - Create a coat of 600 nm of SiO_2	
3	Positive photolack and structuring with HF	
4	Boron diffusion for creating the piezoresistors	
5	PECVD - Create a coat of 600 nm of SiO_2	
6	Structure the oxide with positive photolack and structuring with HF	

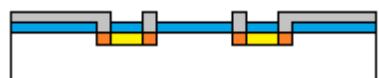
7 Boron diffusion of contacts



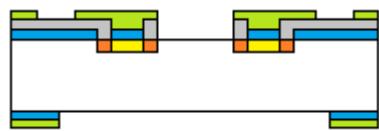
8 PECVD - Create a coat of 600 nm of SiO₂ for isolation



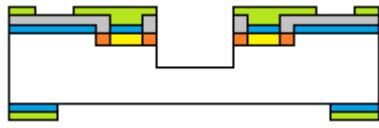
9 Aluminum sputtering for structuring the wiring and pads



10 PECVD – Si₃N₄ for creating a mask in the top and the bottom for the etching processes

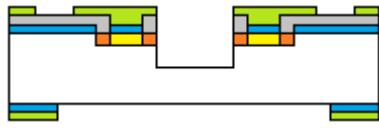


11 **ICP etching of the top part (10 µm) [ase 13_13]**
(13 seconds etching, 13 seconds passivation)



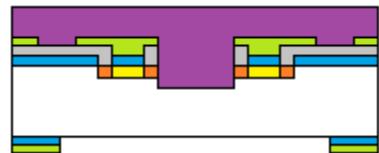
12 **Preparation to laminate the PerMX 3050:**

- Clean the wafer with acetone and ethanol.
- 10 minutes prebake at 120°C



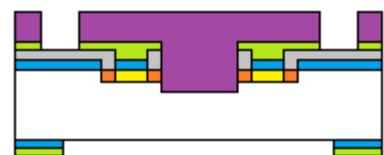
Laminate the PerMX 3050:

- Remove the first cover of the PerMX 3050
- Laminate it on the wafer at 75°C with speed 2 in the laminator
- Store the wafer 30 minutes in the fridge
- 5 minutes in hot plate at 80°C
- Remove the second cover of PerMX 3050

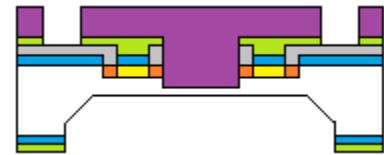


Structure the PerMX 3050 (pads free):

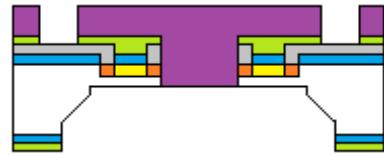
- Use Mask Ferreira-8 (Negative lack) to structure it with 300mJ of ultraviolet light
 - Hot bake with 110°C, 5 minutes
 - 180 seconds in PGMEA solution, after that, clean with PGMEA removal solution and isopropanol
- 14 - Control with the microscope the pads (if there is still polymer in the pads, put the wafer 30 seconds more on the PGMEA solution and repeat the control)
- Measure the piezoresistors, checking if they are ok
 - Hot bake with these temperatures:
 - 30 minutes of baking at 150°C
 - 60 minutes of baking at 200°C
-



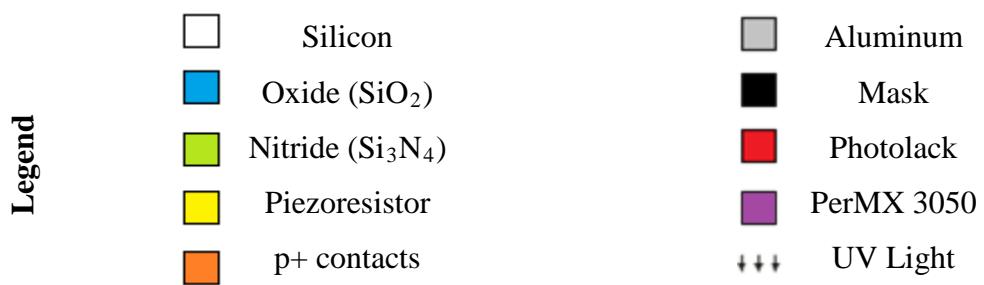
- 15 KOH etching in the bottom, until it rests 20 – 30 µm of silicon to etch. Approximately 7 hours (etching rate $\approx 0.75 \mu\text{m}/\text{min}$)
-



- 16 ICP etching for the last 20 – 30 µm (10 minutes)
-



- 17 Cut the micro force sensors to have individual ones
-

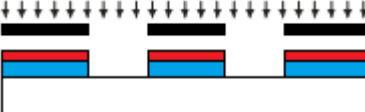
Legend	
 Silicon	 Aluminum
 Oxide (SiO_2)	 Mask
 Nitride (Si_3N_4)	 Photolack
 Piezoresistor	 PerMX 3050
 p+ contacts	 UV Light

E. Proceso de fabricación de un sensor de micro fuerza con membrana polimérica realizada con DuPont™ Kapton® polyimide film (50 µm)

Todos los pasos excepto los que envuelven la fabricación de la membrana de polímero están basados en la referencia [Pha 09].

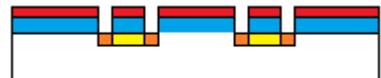
Los pasos escritos en letra negrita y que se encuentran muy detallados son los nuevos pasos integrados en el proceso para crear la membrana polimérica.

La leyenda para comprensión de los colores utilizados se encuentra al final de la tabla.

Step	Description	Figure
1	Prepare a silicon wafer of 360 µm of thickness; measure its exact thickness	
2	PECVD - Create a coat of 600 nm of SiO ₂	
3	Positive photolack and structuring with HF	
4	Boron diffusion for creating the piezoresistors	
5	PECVD - Create a coat of 600 nm of SiO ₂	
6	Structure the oxide with positive photolack and structuring with HF	

7

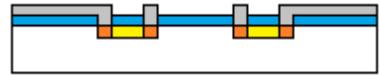
Boron diffusion of contacts

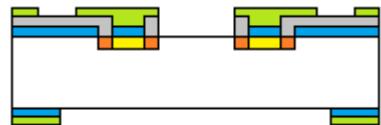


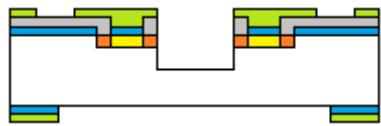
8PECVD - Create a coat of 600 nm of SiO₂ for isolation

9

Aluminum sputtering for structuring the wiring and pads



10PECVD – Si₃N₄ for creating a mask in the top and the bottom for the etching processes

11**ICP etching of the top part (10 μm) [ase 13_13]**
(13 seconds etching, 13 seconds passivation)**Preparation to laminate the polyimide and the adhesive:**

12

- Clean the wafer with acetone and ethanol
 - 10 minutes prebake at 120°C
- A cross-sectional diagram of the wafer after preparation. The blue, yellow, and orange layers are visible, along with the SiO₂, Al, and Si₃N₄ layers. The Al layer has a stepped profile from the etching process. The Si₃N₄ mask is still in place.
- Coating the adhesive:**
- 13
- Sputter 4 ml of SU-8 5 in the top
 - Use the spin coater, program number 5 with standard parameters. Laminate it on the wafer at 75°C with speed 2 in the laminator

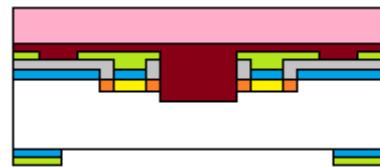
A cross-sectional diagram of the wafer after adhesive coating. The blue, yellow, and orange layers are visible, along with the SiO₂, Al, and Si₃N₄ layers. A dark red layer of SU-8 adhesive has been applied to the top surface, covering the etched Al area. The Si₃N₄ mask is still in place.

66

Laminating the polyimide:

14

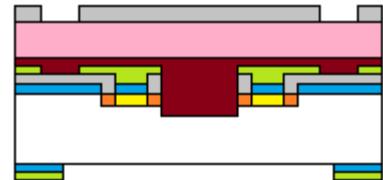
- Laminator: speed 2 (slow speed) and 75°C of temperature
- Hot baking after the lamination of 1 hour at 75°C



Creating a mask for structuring polyimide:

15

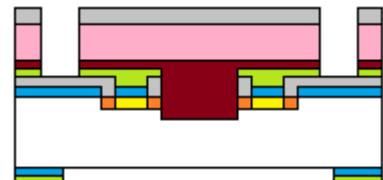
- Program alleiter in the sputtering machine for creating a 500nm coat of aluminum
- Spin 1 ml of P-1215 positive lack (3000 U/min, 30 sec, 1 min at 100°C)
- Use Mask Ferreira-8 (Positive lack) to structure it with 30mJ of ultraviolet light
- Developer maD-331 (30 - 40 seconds)
- 5 minutes at 110°C for baking
- Use a hot plate at 42°C with a solution for aluminum etching (2 - 4 minutes long, until appreciating that the aluminum in the pads is removed)
- Remove the photo lack with acetone and ethanol



Structuring the polyimide:

16

- Use the barrel etcher with:
- Power = 150 W
- Pressure = 200 mTorr
- Plasma with a concentration of O₂ of 135 Sccm and with a concentration of CF₄ of 15 Sccm



17 Cut the micro force sensors to have individual ones.

Legend

	Silicon		Aluminum
	Oxide (SiO_2)		Mask
	Nitride (Si_3N_4)		Photolack
	Piezoresistor		SU – 8 5
	p+ contacts		UV Light
	Polyimide		

6. Bibliografía

- [Büt 01] S. Bütefisch, S. Büttgenbach, T. Kleine-Besten, U. Brand. **Micromechanical three-axial tactile force sensor for micromaterial characterization.** 2001.
- [Chr 09] W. Christiaens. **Active and Passive Component Integration in Polyimide Interconnection Substrates.** 2009.
- [Dan 12] H.-U. Danzebrink, G. Dai, F. Pohlenz, T. Dziomba, S. Bütefisch, J. Flügge, H. Bosse. **Dimensional nanometrology at PTB.** 2012.
- [Fer 12] N. Ferreira, T. Kraha, K. Kniela, S. Büttgenbach, F. Härtiga. **Universal characterization method for 3D tactile probing systems.** 2012.
- [Jin 98] W.L. Jin, C.D. Mote. **A six-component silicon micro force sensor.** Sens. Actuators A 65. 1998.
- [Kra 10] Thomas Krah. **Mikrotasterarrays zur parallelisierten Messung von Mikrostrukturen.** 2010.
- [Mei 99] T. Mei, Y. Ge, Y. Chen, L. Ni, W.H. Liao, Y. Xu, W.J. Li. **Design and fabrication of an integrated three-dimensional tactile sensor for space robotic applications.** 1999.
- [Par 06] J. Park, K. Kwon, N. Cho. **Development of a coordinate measuring machine (CMM) touch probe using a multi-axis force sensor.** 2006.
- [Per da] DuPont™. **DuPont™ PerMX™ Series.** Technical datasheet.
- [Pha 08] A. Phataralaoha, A. Tibrewala, S. Büttgenbach. **Analysis of full and cross-shaped boss membranes with piezoresistors in transversal strain configuration.** 2008.
- [Pha 09] A. Phataralaoha. **Entwicklung piezoresistiver taktiler Sensoren für die Charakterisierung von Mikrokomponenten.** 2009.
- [Pol da] DuPont™ . **DuPont™ Kapton® HN polyimide film.** Technical datasheet.
- [Pol da2] VTEC™. **PI-1388 Polyimide Liquid.** Technical datasheet.
- [Sem da] Semiconductor products. **STAYSTIK Thermoplastics adhesive films.** Technical datasheet.

- [SU8 da] Micro Chem. **NANO™ SU8**. Technical datasheet.
- [Tan 01] T. H. Tan, D.W. McNeill1, P. Baine1, J.H. Montgomery, S.J.N Mitchell1. H. Wadsworth, S. Strahan, I. Bailie. **Investigation of piezoresistive effect in p-type silicon using four point bending method**. 2001.
- [Tib 08] A. Tibrewala, A. Phataralaoha, S. Büttgenbach. **Simulation, fabrication and characterization of a 3D piezoresistive force sensor**. 2008.
- [Tib 09] A. Tibrewala, N. Hofmann, A. Phataralaoha, G. Jäger, S. Büttgenbach. **Development of 3D Force Sensors for Nanopositioning and Nanomeasuring Machine**. 2009.
- [Tor 02] T. Toriyama, D.V. Dao, J.C. Wells, S. Sugiyama. **Six-degree of freedom micro force-moment sensor for application in geophysics**. 2002.
- [Tur 83] G. Turban, Michel Rapeaux. **Dry Etching of Polyimide in O-CF₄, and O-SF₆ Plasmas**. 1983.
- [Wan 00] L. Wang, D.J. Beebe. **A silicon-based shear force sensor: development and characterization, Sens. Actuators**. 2000.
- [Web 01] http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-693-principles-of-oceanographic-instrument-systems-sensors-and-measurements-13-998-spring-2004/readings/lec2_irish.pdf. March 2013.
- [Web 02] <http://www.lionprecision.com/tech-library/technotes/cap-0020-sensor-theory.html> March 2013.
- [Web 03] http://www.fargocontrols.com/sensors/inductive_op.html March 2013.
- [Web 04] <http://pslc.ws/macrog/imide.htm>. March 2013.
- [Web 05] <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/sensores/Tutorial/TECNO2.pdf>. March 2013.
- [Wen 07] C. Wen, W. Fang. **Tuning the sensing range and sensitivity of three axes tactile sensors using the polymer composite membrane**. 2007.