



Universitat Autònoma de Barcelona

Escola de Doctorat i de Formació Continuada

Resonadores micromecanizados para su aplicación en la detección de gases

Memoria presentada por:

Marta Morata Cariñena

para optar al grado de
Doctor en Ingeniería Electrónica

Bellaterra, Marzo de 2004

Universitat Autònoma de Barcelona
ETSE
Departament d'Electrònica

**Resonadores micromecanizados para su aplicación en la detección
de gases**

Memoria presentada para optar al título de Doctora en Ingeniería
Electrónica

Programa de Doctorado: Ingeniería Electrónica

Autora: Marta Morata Cariñena

Directores: Carles Cané Ballart

Eduard Figueras Costa

Tutor: Francesc Serra Mestres

Los directores Carles Cané Ballart y Eduard Figueras Costa, Investigador Científico y Científico Titular en el Centro Nacional de Microelectrónica Del CSIC respectivamente,

Certifican:

Que la memoria "**Resonadores micromecanizados para su aplicación en la detección de gases**" que presenta la Sra. Marta Morata Cariñena para optar al grado de Doctora en Ingeniería Electrónica, se ha llevado a cabo bajo su dirección.

Bellaterra, Marzo 2004

Carles Cané Ballart

Eduard Figueras Costa

Agradecimientos

Se me ocurre realizar un cierto paralelismo entre escribir una tesis doctoral y tener un hijo. En primer lugar, ninguna de las dos cosas se puede llevar a cabo como individuo y, en segundo lugar, los 9 meses y período de lactancia, no son nada comparado con lo que depara el futuro más inmediato. Por tanto, el hecho de tener un hijo durante el período de realización de tesis, ha resultado una experiencia gratificante y enriquecedora en la mayoría de las situaciones y, en momentos puntuales, desesperante. Intentar compaginar vida profesional y familiar resulta complicado pero no imposible, eso si requiere una actitud positiva y de sacrificio continuo recompensado por una mirada cómplice de tu pareja o por una sonrisa y abrazo espontáneo de tu niña.

Son en estos momentos de la vida cuando uno toma consciencia de la necesidad de permanecer en equilibrio para que las metas que uno se propone lleguen a buen puerto. Durante el proceso de la realización de esta tesis, he tenido a mi lado personas, sin las cuáles, este equilibrio no hubiera sido posible.

Gracias especialmente a mi niña, María. Gracias por esas tardes que hemos pasado juntas, gracias por saber y poder disfrutarte. Gracias por esa sonrisa incondicional que a diario me ha ayudado a saber valorar y a compaginar vida personal y profesional. Gracias por ayudarme a no caer en círculos viciosos, a saber desconectar a diario del trabajo y aprender a optimizar al máximo mi trabajo y rendimiento.

Gracias a Carles y Eduard, mis directores de tesis. Gracias por su ayuda profesional y entendimiento personalizado. Gracias por su continua preocupación por la satisfacción de un trabajo bien hecho. Gracias por el empuje y la dedicación final.

Gracias especiales a Manolo Lozano. Gracias porque es el principal impulsor preocupado por la gente de Zaragoza. Sin esta continua preocupación no hubiese tenido la posibilidad de desarrollar mi trabajo en este centro.

Gracias a Jaume Esteve, me ha ayudado en muchos momentos de bajón con una sólo pregunta: "¿cómo estás?". Gracias por preocuparte en todo momento de mi situación personal, de nuestra adaptación al cambio de ciudad y preocupación por el futuro, con todos los posibles cambios que pueda conllevar.

Gracias a mis compañeras de despacho, Neus y M^a Jesús. Gracias por crear un buen ambiente de trabajo durante estos años. Gracias por el mutuo entendimiento.

En la última fase de escritura de esta tesis, mis compañeras iniciales de despacho se han visto ampliadas a Celeste, Marta Duch, Marta Gerboles, M^aJosé, Luis y Rafa. Gracias por facilitar mi adaptación al nuevo despacho en un momento crítico.

Gracias especiales a Marta Duch y Ana. Gracias por las continuas y expertas conversaciones sobre niños. Gracias por vuestra preocupación por nuestro futuro. Gracias por los ánimos que me habéis dado en la última fase del trabajo.

Gracias especiales a Lourdes. Creo que nunca había conocido una persona en la que no existiera en su diccionario un "no" de respuesta. Gracias por

estar siempre de buen humor y porque lo sabes transmitir. Mil gracias por tu interés y preocupación en mis asuntos personales.

Gracias a Angels y Elisenda por los buenos ratos que hemos compartido de sobremesa. Es una de las situaciones que más echo en falta tras mi independencia y me habéis aportado mucha felicidad.

Gracias a todo el personal de Sala Blanca, de servicios de encapsulado e informática y en general, gracias a todo el personal del centro que directamente o no me han ayudado a que el trabajo se haya realizado con profesionalidad y se hayan obtenido buenos resultados.

Gracias a mi amigo Justo, como el primer "sufridor" de esta tesis. Gracias por los ánimos que me has dado y gracias por tus consejos.

Todo esto no tiene sentido sin el apoyo incondicional de Jorge, mi marido. Gracias por estar siempre a mi lado, por ser el motor para seguir adelante y ser ejemplo de profesionalidad y dedicación al trabajo. Gracias por el equilibrio y complicidad en estos años que tanto estamos compartiendo.

Marta
Marzo, 2004

Índice

Capítulo 1. – Introducción	1
1.1. Objetivo del trabajo	5
1.1.1. – Proyectos que enmarcan los objetivos del trabajo	7
1.2. El estado del arte de los sensores	8
1.2.1. - Sensores de gas tipo semiconductor	10
1.2.2. - Sensores de gas de efecto de campo	11
1.2.3. - Pelistores o sensores catalíticos	11
1.2.4. - Células electroquímicas	12
1.2.5. - Sensores de gas de tipo orgánico	12
1.2.6. - Quarz Crystal Microbalance o QCM	12
1.2.7. - Surface Acoustic Waves o SAW	13
1.3. – Sensores de gas tipo resonante	15
1.4. Tecnologías de fabricación de resonadores mecánicos	16
1.4.1. - Materiales utilizados como substratos	17
1.4.2. - Descripción del proceso básico de la tecnología de micromecanizado en superficie	19
1.4.3. - Descripción del proceso básico de la tecnología de micromecanizado en volumen	22
1.5. Principios de excitación y de detección para estructuras mecánicas resonantes	27
1.6. Capa sensible	30
1.6.1. - Polímeros para la detección de volátiles	31
1.6.2. - Características de los polímeros	33
1.6.3. - Técnicas de depósito de polímeros	35
1.7. Estructura del trabajo	36
1.8. Conclusiones	38

Capítulo 2. - Estructuras fabricadas en tecnología superficial	41
2.1. - Tecnología de micromecanizado en superficie: versión 1	42
2.2. - Mejoras tecnológicas introducidas en el proceso de micromecanizado en superficie	47
2.3. - Estructuras propuestas	51
2.3.1. - Estructura doble puerta o DP	53
2.3.2. - Estructura puerta extendida o PEXT	55
2.4. - Consideraciones tecnológicas en el transistor NMOS. Ajuste de la tensión umbral	57
2.5. - Proceso de fabricación de las estructuras propuestas en tecnología de micromecanizado en superficie: versión 2	62
2.6. - Caracterización de las estructuras a bajas frecuencias	70
2.6.1. - Caracterización cuasi-estática de estructuras puerta extendida (PEXT)	72
2.6.2. - Caracterización cuasi-estática de estructuras doble puerta (DP)	74
2.7. - Conclusiones	76
Capítulo 3. - Diseño y simulación de estructuras mecánicas resonantes en tecnología de micromecanizado en volumen	81
3.1. Introducción al principio de funcionamiento de los resonadores	82
3.1.1. - Efectos de la temperatura	88
3.1.2. - Efectos del estrés	91
3.2. Resonadores piezoresistivos	96
3.2.1. - Elemento sensor: Puente de Wheatstone	97
3.2.2. - Elemento actuador: Principio de funcionamiento	103
3.3. Diseño de estructuras mecánicas resonantes	109
3.3.1. - Geometría y dimensiones de la estructura tipo voladizo y tipo puente	115
3.3.2. - Frecuencias de resonancia teóricas	122
3.3.3. - Efectos de la capa sensible en la estructura resonante. Cálculos analíticos de cambios de frecuencia.	122

3.4. - Simulación de las estructuras resonantes mediante el método de los elementos finitos	125
3.4.1. - Generación del modelo, elección del tipo de elemento y propiedades de los materiales	126
3.4.2. - Definición de la geometría	128
3.5. - Simulaciones térmico - estructurales estáticas	130
3.6. - Simulaciones modales	137
3.7. - Simulaciones con polímeros para estimación del grosor de polímero depositado	141
3.8. Conclusiones	146
Capítulo 4. - Fabricación y encapsulado de resonadores	149
4.1. - Tecnología en volumen: substratos BESOI	150
4.2. - Consideraciones tecnológicas para la definición de las piezoresistencias	153
4.3. - Descripción del proceso de fabricación de resonadores en substratos tipo SOI	155
4.4. - Serrado estándar de estructuras micromecanizadas	162
4.4.1. - Pruebas de serrado en estructuras micromecanizadas tipo resonador	164
4.5. - Incidencias del proceso de fabricación	166
4.6. - Encapsulado de las estructuras fabricadas	168
4.6.1. - Encapsulado de las estructuras resonantes en bases metálicas	169
4.6.2. - Encapsulado de las estructuras resonantes en placa de circuito impreso PCB (Printed Board Circuit)	170
4.7. - Conclusiones	173

Capítulo 5. - Caracterización mecánica y eléctrica de estructuras.	175
5.1. - Caracterización estática	176
5.1.1. - Caracterización de resistencias y offset	176
5.1.2. - Medida experimental de la temperatura mediante cámara de infrarrojos	184
5.1.3. - Medida experimental de los desplazamientos con el microscopio confocal	186
5.2. - Caracterización dinámica	193
5.2.1. - Caracterización óptica de los resonadores por interferometría	193
5.2.1.1. - Caracterización de las estructuras pegadas en sustrato piezoeléctrico	196
5.2.1.2. - Caracterización de las estructuras encapsuladas en base metálica	199
5.2.1.3. - Medida experimental para el cálculo del módulo de Young equivalente del silicio	203
5.2.2. - Medida eléctrica preliminar de la frecuencia de resonancia y factor de calidad.	206
5.2.2.1. - Medida eléctrica de la resonancia en estructuras encapsuladas en base metálica	207
5.2.2.2. - Análisis de la respuesta en frecuencia	213
5.2.2.3. - Medida eléctrica de la resonancia mediante circuito preamplificador	214
5.2.2.4. - Optimización de la señal	216
5.2.2.5. - Medida eléctrica de la resonancia mediante circuito resonante	219
5.2.3. - Depósito de la capa sensible.	223
5.2.3.1. - Modificación de la respuesta eléctrica	223
5.2.3.2. - Depósito de la capa sensible en estructuras móviles fabricadas en tecnología en volumen	226
5.2.3.2.1. - Comparación de los resultados obtenidos para el depósito de la capa sensible en estructuras fabricadas en tecnología en superficie y en volumen	233
5.2.3.3. - Caracterización de los sustratos fabricados en tecnología en volumen con gases	234
5.3. - Estudio comparativo entre las estructuras fabricadas en tecnología en superficie y en volumen	237

5.4. – Conclusiones	240
Capítulo 6. Conclusiones finales y perspectivas de futuro	245
Apéndices	
A.- Descripción de los juegos de máscaras para la fabricación de estructuras resonantes	251
A.1. – Descripción del juego de máscaras CNM136	251
A.2. – Descripción del juego de máscaras CNM148	254
A.2.1. – Estructuras de test	256
B. – Descripción de las dimensiones del encapsulado	259
B.1. – Encapsulado en substrato piezoeléctrico	259
B.1.1. – Ficha técnica de los substratos cerámicos piezoeléctricos	259
B.1.2. – Ventajas	259
B.1.3. – Esquema dimensionado	260
B.1.4. – Curva de respuesta	260
B.1.5. Montaje experimental para la caracterización en substrato piezoeléctrico	261
B.2. – Encapsulado en base metálica	262
B.2.1. – Especificaciones	263
B.3. – Encapsulado en placa de circuito impreso	263
B.3.1. – Especificaciones técnicas	264
B.3.2. – Diseños para encapsulado en placa PCB	264
C. – Relación y descripción de archivos incluidos en el CD	267
Bibliografía	271

Capítulo 1:

Introducción

El olfato humano continúa siendo en la actualidad el principal instrumento utilizado para analizar los aromas u olores desprendidos por numerosos productos industriales. Por tanto, el estudio de los aromas en industrias de alimentos, cosméticos y de bebidas es importante y relevante para el control de la calidad de sus productos y para el control de sus procesos. La identificación de estos olores ayuda a la seguridad industrial ya que determinan la presencia de gases. Pero el proceso de identificación de gases es caro ya que requiere un conjunto de expertos entrenados que sólo pueden trabajar durante períodos de tiempo relativamente cortos, puesto que su exposición a determinados aromas durante tiempos prolongados reduce su sensibilidad olfativa. Otras técnicas convencionales de análisis, como la cromatografía de gases y espectrometría de masas, aunque

requieren operadores especializados, no permiten la obtención de resultados en tiempo real y en determinadas ocasiones los resultados obtenidos en la percepción del olor están por debajo de los umbrales de detección y además estos métodos no valoran los aromas en su conjunto. Por tanto existe la necesidad de desarrollar una instrumentación electrónica que pueda imitar el sistema olfativo humano, que sea de bajo coste, de fácil uso y que sea capaz de obtener resultados en tiempo real.

A la pregunta clásica de qué es un olor, se puede definir como la señal que vapores o gases induce en el cerebro por la vía de los estímulos del sistema olfativo. En la mayoría de los casos, estos olores provienen de una mezcla de sustancias químicas en proporciones establecidas. Para determinar la presencia de estas sustancias gaseosas se utilizan, en muchas aplicaciones, los sensores.

El campo de los sensores es amplísimo e incluye desde aquellos que reaccionan ante propiedades físicas como temperatura [1-4], presión [5-9] o radiación [10-12], los que detectan moléculas biológicas como los biosensores [13-16] y los que detectan la presencia de gases como los sensores químicos [17-28]. Un sensor de gas es un sensor químico, es decir, es un dispositivo que responde selectivamente a un componente de una muestra, transformando la información química en una señal eléctrica. Por tanto, la muestra u objeto percibido produce un cambio físico o químico del material sensible que da origen a una señal eléctrica que constituye la respuesta del sensor.

Muchos de los sensores químicos son inespecíficos, es decir, que proporcionan una misma respuesta ante gases de naturaleza química distinta. En consecuencia, un sensor químico individual no es selectivo ya que no es capaz de diferenciar ni mucho menos clasificar olores. Para conseguir ser selectivo ante la presencia de diferentes sustancias gaseosas, se utilizan un conjunto de sensores con distinta capacidad de

detección específica, es decir, sensores individuales que respondan ante diferentes gases y que analicen sus respuestas y clasifiquen identificando olores. Un instrumento de estas características es lo que se conoce como nariz electrónica.

Las prestaciones que presenta un sistema olfativo electrónico (nariz electrónica) quedan fundamentalmente condicionadas por las características de los sensores químicos que integran la agrupación. Desde su descubrimiento en 1964 [29], se han desarrollado diversos tipos de sensores de gases basados en diferentes materiales y en diferentes principios de funcionamiento [30-42]. Su característica común es la de poseer sensibilidades parcialmente solapadas de forma que cada sensor responde a un amplio espectro de gases o de vapores a los que también responde en mayor o menor medida el resto de sensores que forman la agrupación de la nariz electrónica. Este aspecto se refleja en la figura 1.1.

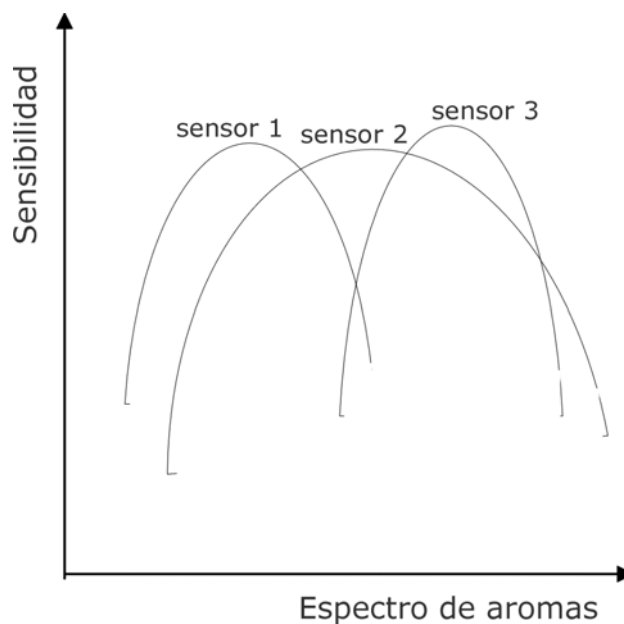


Figura 1.1: Sensibilidades solapadas de la agrupación de sensores que forman la nariz electrónica aunque cada sensor sea más sensible a un compuesto o aroma

Para la fabricación de los sensores químicos y en concreto, para la definición de la capa sensible, la mayoría de los esfuerzos han estado dedicados a la investigación de materiales inorgánicos de tipo semiconductor o metales catalíticos. Dichos materiales trabajan a temperaturas elevadas entre 100°C y 600°C produciendo la combustión de los vapores o aromas detectados en su superficie. La alteración que se produce en la concentración de oxígeno en la superficie del sensor causa una variación en su conductividad eléctrica. También se puede encontrar en la literatura como se han realizado estudios con materiales de tipo orgánico como los polímeros conductores [43-46]. Éstos materiales trabajan a temperatura ambiente, entre 20°C y 60°C, y poseen una buena sensibilidad. Su principio de funcionamiento está basado en la absorción reversible de las moléculas olorosas en la capa activa. En el caso de polímeros conductores depositados sobre electrodos, la absorción del gas produce un cambio en la conductividad eléctrica del material sensible [47]. Mientras que cuando el polímero se ha depositado sobre dispositivos piezoeléctricos como microbalanzas de cuarzo o SAW (Surface Acoustic Waves), el gas absorbido produce una variación en la frecuencia de oscilación [48-55]

En un sistema de nariz electrónica independientemente del tipo de sensores utilizados, el conjunto de señales que contiene la información o vector de señales se utiliza como entrada al subsistema de reconocimiento de patrones. Las técnicas de reconocimiento se estructuran en tres etapas: extracción de las características del aroma, clasificación e identificación. La figura 1.2 muestra el esquema de los elementos que forman un sistema de reconocimiento de patrones.

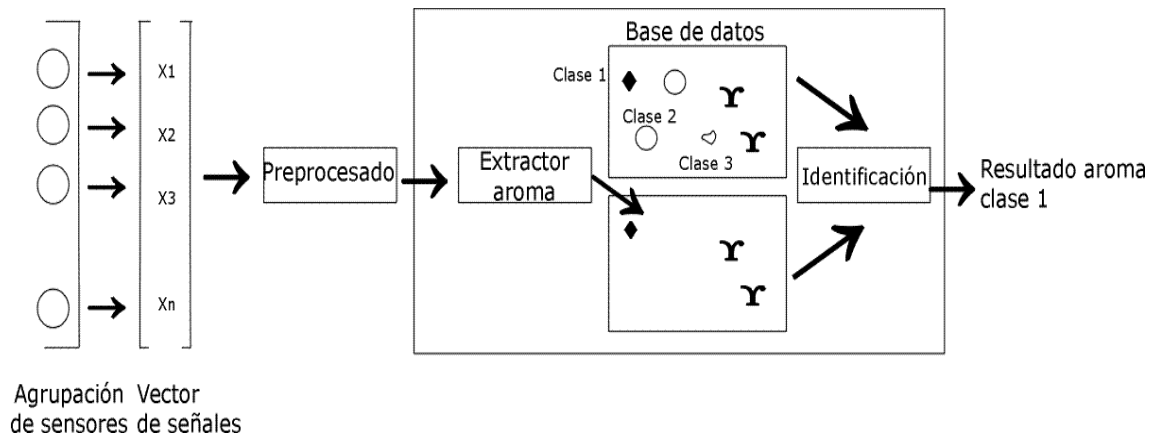


Figura 1.2: Esquema del funcionamiento de un sistema de reconocimiento de patrones

Uno de los aspectos que ha ralentizado la implantación de sistemas de olfato electrónico en aplicaciones industriales consiste en la problemática inherente asociada al uso de sensores químicos. La respuesta de los sensores químicos se ve influenciada por la temperatura y la humedad [56-60], además de sufrir derivas temporales debido al envejecimiento de los materiales activos [61], con lo que un sistema de olfato electrónico podría conducirnos al cabo de un tiempo a resultados erróneos. En el sistema olfativo humano los receptores se mantienen a humedad y temperatura constante y se substituyen cada 22 días de media [31]. Por tanto, en el caso de fabricar una nariz electrónica es de esperar que se puedan obtener progresos desarrollando mejores sensores químicos y perfeccionando la técnica de procesado.

1.1. – Objetivos del trabajo

El objetivo de este trabajo consiste en diseñar, fabricar y caracterizar nuevas estructuras mecánicas micromecanizadas. Estas estructuras se desarrollarán como substratos que, combinadas con las técnicas de depósito de materiales sensibles tipo polimérico, se utilizarán para la fabricación de sensores químicos. Estos sensores se aplicarán en la detección de gases

volátiles. Las estructuras se podrán implementar como componentes de un conjunto de sensores para fabricar una nariz electrónica. Para tal propósito, se estudiará la viabilidad de distintas tecnologías disponibles dentro de las tecnologías de micromecanización del silicio para la fabricación de las microestructuras y se utilizarán polímeros no conductores para la definición de la capa sensible del sensor.

Dentro del campo de la tecnología de micromecanización como tecnología utilizada para la fabricación de sensores de gases se han utilizado dos concepciones bien distintas: la micromecanización en superficie y en volumen. Estas dos tecnologías son usadas para fabricar dispositivos resonantes que combinados con el uso de polímeros específicos permitirá detectar gases y componentes volátiles. En la figura 1.3 se muestra un esquema de la estructura resonante y el mecanismo básico utilizado para la detección.

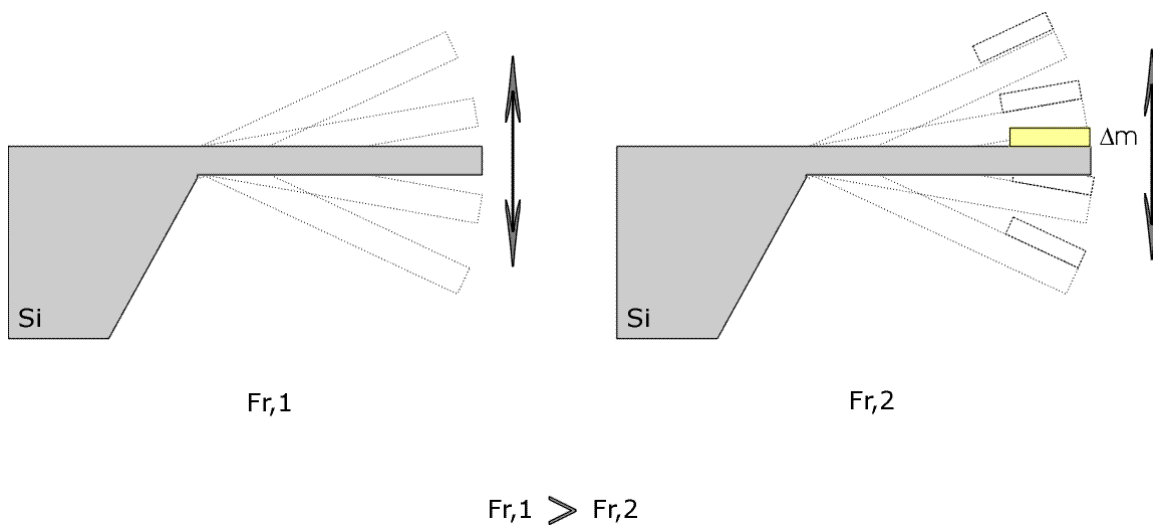


Figura 1.3: Esquema del principio de actuación del sensor resonante

Principalmente, el mecanismo de funcionamiento de los polímeros como capa sensible, consiste en que los polímeros ante la presencia de ciertos gases incrementan su masa en un delta de masa (Δm) y este incremento de

masa produce una variación en la frecuencia de resonancia de la estructura. La variación de la frecuencia permitirá determinar cuantitativamente la presencia de los compuestos o gases volátiles. Por tanto, el objetivo que se persigue es conseguir estructuras resonantes de dimensiones pequeñas para obtener frecuencias de resonancia elevadas y en consecuencia estructuras con mayor sensibilidad a gases.

1.1.1. – Proyectos que enmarcan los objetivos del trabajo

El trabajo durante estos últimos 4 años ha estado dirigido en esta línea de investigación, es decir, en desarrollar sistemas inteligentes capaces de detectar componentes volátiles. El desarrollo de este tipo de sistemas tiene que cumplir una serie de especificaciones. Estas especificaciones vienen determinadas en función del tipo de aplicación para las que están pensadas. Concretamente, este trabajo se ha podido realizar dentro de los proyectos nacionales "Jamotrón" y "Migra" enmarcados dentro de la temática de fabricación de microsensores micromecanizados.

Dentro del trabajo y de los objetivos que se persiguen en los proyectos, el trabajo del CNM consistió en diseñar, fabricar y caracterizar un dispositivo resonante micromecanizado que, combinado con el uso de polímeros específicos permitiera la detección de gases y de sustancias volátiles mediante una señal en frecuencia. Las tecnologías desarrolladas para la fabricación de las estructuras resonantes son las tecnologías de micromecanizado en superficie y en volumen. Estas estructuras micromecanizadas van a detectar compuestos volátiles (VOCs) en muy bajas concentraciones. Para ello se han puesto en común las experiencias y tecnologías de los grupos que participan en el proyecto como son: IFA, UPC y CNM. Se utilizan los desarrollos tecnológicos que permitan la obtención de estructuras mecánicas resonantes con geometría tipo voladizo y tipo puente. El logro para este tipo de sensores es que cuentan con la ventaja de su reducido tamaño, su alta sensibilidad estimada en rangos de ppm -

ppb, rápida respuesta, operación a temperatura ambiente y escaso consumo energético. Estos sensores propuestos con la electrónica adicional suponen una alternativa seria en la evocación de los sentidos humanos, como el sentido del olfato, con un amplio ámbito de aplicaciones fundamentalmente en las referidas a la calidad de vida como son alimentación, ambiente y salud.

A continuación se hace un balance general del estado actual de los sensores de gases. Se realiza una breve descripción de las características y principio de detección de los sensores como sistemas de control y de detección de gases que resultan de nuestro interés para el desarrollo de este trabajo de investigación.

1.2. - El estado del arte de los sensores de gases

Detectar gases cuando existen cientos de gases diferentes y que además se encuentran en distintas proporciones, es tarea difícil y complicada, ya que cada aplicación ha de tener unos requerimientos únicos. Por ejemplo, unas aplicaciones avisan la detección de un gas específico sin tener en cuenta las lecturas de otros gases de fondo, mientras que, otras situaciones pueden notificar las concentraciones de un gas concreto dentro de un área determinada.

Lo que sí es cierto es que, la mayor parte de los sensores no son específicos para un determinado gas sino que son sensibles a un grupo o familia de gases. Para seleccionar un sensor químico o un sistema de detección de gases y conseguir resultados, se deben conocer los sensores disponibles y sus características de respuesta ante la presencia de varios gases. En los últimos años la evolución tecnológica ha creado una creciente demanda para todo tipo de sensores y actuadores que permiten la interacción automática de las máquinas con su entorno o con la existencia humana. Siguiendo estas directrices de la demanda producida por el mercado, nos

conduce hacia una miniaturización de los diseños y a una relación entre producción y bajo coste que nos lleva a un tipo de fabricación en modo batería, y en concreto nos introducimos dentro del campo de la tecnología de micromecanización para fabricación de MEMS (Micro Electro Mechanical System).

En el año 2000, el mercado mundial de MEMS estuvo estimado en un total de 14,2 billones de dólares y se espera que esta cifra se doble para el año 2004. Mientras que para los sensores de presión y los acelerómetros se encuentran productos en el mercado completamente verificados, el desarrollo de los sensores de gases basados en las tecnologías de micromecanización se encuentra todavía en una fase temprana para su comercialización. La tabla 1.1 muestra una comparación de la evolución de los diferentes tipos de sensores micromecanizados [23]. También se muestra el tiempo medio entre el descubrimiento inicial de un diseño y su completa comercialización está por encima de los 25 años.

Producto	Descubrimiento	Evolución	Reducción de coste	Comercialización
Sensores de presión	1954-1960	1960-1975	1975-1990	1990
Acelerómetro	1974-1985	1985-1990	1990-1998	1998
Sensores Bio/químicos	1980-1994	1994-2000	2000-2004	2004
Sensores de gases	1986-1994	1994-1998	1998-2005	2005

Tabla 1.1: Evolución temporal de los distintos tipos de sensores micromecanizados

En los esfuerzos hacia la miniaturización relacionada con los MEMS, hay dos aspectos principales en la investigación y desarrollo de los actuales sensores de gases que se mencionan como los principales aspectos a impulsar como son:

- a) Buscar materiales sensibles con alta selectividad (bio)química
- b) Definir y desarrollar una colección de diferentes sensores parcialmente selectivos asociados a un patrón de reconocimiento y análisis de multicomponentes (nariz electrónica)

A continuación se pasará a describir los MEMS disponibles para la fabricación de sensores de gases dentro del campo de la micromecanización centrándonos especialmente en las estructuras mecánicas resonantes.

1.2.1. - Sensores de gas tipo semiconductor

Los sensores de gases de tipo semiconductor están basados en el cambio de conductividad en la superficie del material sensor. La medida de detección de gases se realiza por un cambio de la resistividad en un material semiconductor debido a la concentración de cargas móviles en el proceso de absorción del gas a medir.

Para tener un cambio de conductividad que resulte apreciable en el valor de resistencia, estos dispositivos han de trabajar a una temperatura elevada, generalmente dentro del rango entre 100°C y 600°C en función del gas a detectar y del tipo de material sensible que se utilice. Estos materiales que se utilizan como materiales sensibles en los sensores de gases tipo semiconductor, son preferentemente óxidos metálicos como SnO₂, WO₃, Cr₃Ti, TiO₂, TiO y ZnO [62-67]. Una de las posibilidades que presentan este tipo de sensor es el hecho de introducir especies dopantes en la capa sensible como Pt, Pd, Ti, Au,... [68-71] que albergan la probabilidad de mejorar e incrementar la sensibilidad, selectividad y rapidez en la detección de una cierta concentración de gases.

1.2.2. - Sensores de gas de efecto de campo

La estructura básica para este tipo de sensores es un MOSFET cuya puerta está fabricada de un material que sea sensible a gases. Si se fabrica un sensor de este tipo con una puerta fabricada en Pd, el paladio es un metal capaz de absorber hidrógeno [72]. Si en lugar de utilizar el paladio como material para la definición de la puerta del transistor se utilizan materiales como el platino o el indio, se pueden obtener respuestas con sensibilidades a diferentes gases como el NH_3 , H_2S , y el etanol [73-75].

1.2.3. - Pelistores o sensores catalíticos

Un pelistor es un calorímetro miniaturizado utilizado para medir el calor producido por una reacción química en la superficie de un material catalítico.

Un sensor de gases combustibles de tipo catalítico utiliza, normalmente, una bobina de hilo de platino recubierto de un óxido de metal con tratamiento catalítico. Una mezcla de gases combustibles no comienza a arder hasta que no alcanzan una cierta temperatura de ignición. Sin embargo, ante la presencia de gases combustibles, los materiales catalíticos tienen la propiedad que hacen arder a dichos gases a unas temperaturas más bajas que su temperatura de combustión y además, las moléculas arden en la superficie del sensor. El cambio resultante de temperatura en el hilo de platino, cambia su resistencia eléctrica que mediante la conexión a un circuito proporcionará una señal que es proporcional a la concentración de gas [76-77].

Estos dispositivos también pueden fabricarse utilizando la tecnología de silicio. Estos dispositivos usan una membrana de nitruro de silicio como sustrato sobre la que se deposita una capa de un material tipo catalítico [78-79].

1.2.4. - Células electroquímicas

Un sensor electroquímico está definido por un electrodo metálico sensor o cátodo y un electrodo de referencia contador o ánodo separados por una delgada capa de electrolito. El mecanismo de detección consiste en que el gas que se pone en contacto con el sensor reacciona en la superficie del electrodo sensor y provoca un mecanismo de oxidación-reducción. Los materiales del electrodo específicamente diseñados catalizan la reacción redox y generan una corriente eléctrica que es proporcional a la concentración del gas [80-82].

1.2.5. - Sensores de gases de tipo orgánico

Este tipo de sensor está basado en un principio de funcionamiento semejante al sensor de tipo semiconductor, sólo que en este caso se utilizan como material sensible cristales orgánicos o polímeros.

Dentro de los materiales poliméricos como materiales sensibles utilizados en la detección de gases se clasifican en polímeros conductores y no conductores. El principio de funcionamiento para aquellos sensores que utilizan materiales poliméricos conductores está basado en un cambio en sus propiedades físicas como constante dieléctrica o resistividad [43-46], [83], tras la absorción del gas. Mientras que, el uso de materiales poliméricos no conductores tiene un principio de funcionamiento basado en un cambio de masa cuando se expone a la presencia de un gas concreto [84-101].

1.2.6. - Quarz Crystal Microbalance o QCM

Generalmente un sensor tipo QCM consiste en un disco delgado de cuarzo entre dos electrodos. Dadas las propiedades piezoeléctricas y orientación cristalográfica del cuarzo, mediante la aplicación de un voltaje entre los

electrodos se produce una deformación del cristal. El cristal puede ser excitado hasta la resonancia cuando la frecuencia sea tal que el grosor del cristal es un número entero N de veces media longitud de onda. La frecuencia de resonancia del cristal depende de la masa total resonante, cuando se deposita una capa delgada y rígida. La variación de la frecuencia es proporcional a la cantidad de masa añadida y el sensor tipo QCM opera como una balanza sensible.

Normalmente, los QCM tienen incorporados un circuito oscilador donde la frecuencia de oscilación va disminuyendo conforme se va acumulando masa sobre la superficie del diseño [48-49]. Estas microbalanzas tienen la capacidad de dar soluciones a un cierto número de medidas como monitorización del depósito del material sensible [102], detección de especies [103], degradación de mezclas complejas [104], detección cromatográfica de líquidos, y análisis electroquímicos [105-106]. También ha sido demostrado como los QCM pueden operar en contacto con líquidos [104].

Kanazawa y Gordon han mostrado que los QCM pueden ser sensibles a la viscosidad y densidad de la solución en contacto [107]. Sin embargo, la medida de la frecuencia de resonancia en si misma no pueden distinguir cambios másicos de los cambios en las propiedades de la disolución. Cuando la admitancia se mide en un rango de frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia, los QCMs bien caracterizados pueden diferenciar entre estos mecanismos de carga.

1.2.7. - Surface Acoustic Waves o SAW

Los sensores SAW basan su principio de operación en la modificación de la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh en la superficie de un piezoeléctrico debido a la presencia de una cantidad de masa depositada sobre la misma. Los dispositivos SAW son estructuras interdigitadas que se

realizan sobre substratos piezoeléctricos para que las ondas acústicas superficiales puedan ser generadas mediante una excitación eléctrica. Se pueden utilizar como substratos o medio de soporte el Si y éste no es un material piezoeléctrico, por lo que se requiere una capa adicional piezoeléctrica sobre el silicio para desarrollar los sensores SAW. Para ello pueden utilizarse diferentes materiales piezoeléctricos, tales como, CdS [108], AlN [109] y en particular el ZnO [110]. Por otra parte el AlN presenta las ventajas de que sus constantes piezoeléctricas tienen muy baja dependencia con la temperatura (como el cuarzo) y una velocidad de propagación de las ondas acústicas de hasta tres veces superior al cuarzo por lo que se incrementaría la sensibilidad de estos dispositivos.

Son sensores que operan en frecuencias altas, barren el rango entre 100 y 500 MHz y aunque pueden llegar, incluso, hasta pocos GHz tales frecuencias requieren un sofisticado diseño del circuito oscilador. Los transductores interdigitados (IDTs) son los que se usan para excitar y detectar una onda acústica superficial sobre un substrato piezoeléctrico. Aplicando una tensión sobre los IDTs depositados sobre el piezoeléctrico con la orientación apropiada a los ejes del cristal, se origina una deformación superficial mecánica oscilante, la cuál genera una onda acústica que se propaga a lo largo de la superficie y es convertida en una señal eléctrica por deformación de la superficie en la región del transductor. La velocidad y características de amortiguamiento de la onda acústica (Rayleigh) son extremadamente sensibles a los cambios en la superficie del transductor, tal y como, los provocados por el incremento de masa que son reflejados como cambios en la frecuencia de oscilación fraccional. Queda pues de manifiesto, que una medida de frecuencia nos proporciona una medida de concentración de gas con muy alta sensibilidad.

1.3. - Sensores de gas tipo resonante

Las cualidades intrínsecas de los sensores mecánicos de silicio los hacen ideales para su comportamiento como estructuras resonantes. Altos factores de calidad han sido observados para mecanismos vibrantes de silicio o polisilicio [111-127]. Dos de las principales razones para el desarrollo de sensores mecánicos resonantes son:

- a) La frecuencia de resonancia depende sólo de las características y estabilidad de los materiales y no de su comportamiento eléctrico.
- b) La salida de los dispositivos resonantes es en frecuencia y esto permite tener una alta sensibilidad en la medida.

Los sensores resonantes son estructuras mecánicas que vibran en alguno de sus modos naturales. Generalmente, consisten en vigas sujetas por un extremo (voladizos) [119] o por los dos (puentes) [127] aunque también existen geometrías más complejas como los resonadores tipo peine [115-117], [128] o masas suspendidas [129]. Son dispositivos con un elemento vibrante que cambian su frecuencia de resonancia mecánica al ver alterado alguno de los parámetros que la determinan como la masa, la tensión mecánica o el estrés.

El sensor resonante debe tener una frecuencia de resonancia que sea sensible al parámetro a determinar así como un factor de calidad suficientemente alto para poder medir la variación de frecuencia correspondiente [123]. La mayoría de los cambios de frecuencia medidos cuantitativamente están basados en cambios de fuerzas internas, estreses o cambio de masa del resonador que hacen cambiar la frecuencia de resonancia [39]. Estas vibraciones mecánicas de las microestructuras pueden ser excitadas de diversas formas, incluyendo las piezoeléctricas [130], expansión térmica [118], fuerzas electrostáticas [112-113] y fuerzas

magnetostáticas [131]. La detección de las vibraciones puede ser medida de modo piezoeléctrico [118], [31], óptico [119] o capacitivo [132]. Hay que estar seguros de que el método de excitación y detección elegidos no introduce ninguna modificación ni deterioro en el factor de calidad en términos de estreses residuales o de amortiguamiento.

La utilización de los sensores mecánicos resonantes como aplicación a sensores químicos para la detección de gases o aromas es una de las posibles aplicaciones para este tipo de dispositivos [17-28]. En concreto se va a desarrollar un dispositivo que podrá ser utilizado para la determinación de aromas en el control de calidad de productos alimentarios. Este dispositivo es un sensor químico resonante basado en un cambio de frecuencia producido por un cambio de masa en un material polimérico sensible [43-46], [83-101], [133].

A continuación se pasa a describir brevemente las tecnologías de micromecanizado en silicio para la fabricación de resonadores.

1.4. – Tecnologías de fabricación de resonadores mecánicos

Los procesos de micromecanización son utilizados para la fabricación de diseños con dimensiones dentro del rango de las micras hasta los milímetros y pueden ser aplicados en un solo diseño o en miles de diseños. Por este motivo, se utiliza la fabricación de los diseños en paralelo (modo "batch"). Este modo de fabricación reduce considerablemente el coste y permite la fabricación de diseños con mínimas tolerancias.

Los pasos estándar de procesado son originarios de la tecnología de semiconductores y pueden ser utilizados en combinación con procesos de micromecanizado para fabricar estructuras mecánicas tridimensionales. Las ventajas de usar este tipo de fabricación al incluir diseños de pequeñas dimensiones consisten en que incluyen la posibilidad de cointegrar la

electrónica adicional de medida y finalmente, permite una repetitividad de las características del sensor debido a la precisión de la geometría y al control exhaustivo de los pasos durante el proceso de fabricación. Incluso las técnicas de microfabricación se pueden utilizar para mejorar las características del sensor o para desarrollar diseños con una nueva funcionalidad y que no sea posible fabricar con tecnologías convencionales. El éxito de los microsensores consiste en que mediante las técnicas de microfabricación se pueden fabricar sensores con una variedad de diferentes tipos de aplicaciones como la industria de la automoción, industria alimentaria, cosméticos y perfumes.

1.4.1. - Materiales utilizados como substratos

Dentro del desarrollo de las técnicas de microfabricación son distintos los materiales que se pueden utilizar como substratos. Se puede hablar del silicio, vidrio, de materiales cerámicos e incluso de polímeros.

El vidrio tiene unas propiedades dieléctricas y ópticas muy atractivas. Las técnicas que se pueden utilizar para la estructuración del vidrio son el grabado húmedo isotrópico y el grabado seco anisotrópico. Tiene especial relevancia en aquellas aplicaciones cuyo principio de detección es óptico dado que el vidrio es transparente para la luz visible. El cuarzo es un material piezoeléctrico y puede ser utilizado como substrato en diseños SAW (Surface Acoustic Waves) [134].

Los materiales cerámicos se utilizan como substratos en diseños microelectrónicos híbridos y también son utilizados normalmente como encapsulado. El material cerámico estándar es la alúmina (Al_2O_3) aunque también se utilizan materiales como BeO y AlN. Dado que los materiales cerámicos son químicamente inertes, son biocompatibles y mecánicamente estables, se consideran unos materiales muy interesantes para el campo de

la microelectrónica. La mayoría de las técnicas de microfabricación para materiales cerámicos están adaptadas para los procesos de encapsulado.

En los últimos años, los polímeros se están introduciendo dentro de la tecnología de microfabricación como materiales baratos y versátiles. Existen diversas técnicas para la estructuración de los polímeros, incluso dentro del rango de los micrometros.

Finalmente, el silicio se utiliza como substrato (más común) en esta tecnología, por sus propiedades tanto eléctricas como mecánicas [135]. El silicio ha sido decisivo en el desarrollo de circuitos integrados y ha resultado fundamental para el desarrollo de sensores y actuadores. Algunas de sus propiedades físicas, como la rigidez mecánica, la conductividad térmica, la fotoconductividad o la piezoresistividad se han aplicado en sensores. Entre los distintos tipos de sensores basados en la tecnología del silicio, los sensores mecánicos han experimentado un rápido desarrollo debido a la multitud de aplicaciones industriales. Este hecho es el causante de que actualmente se dediquen grandes esfuerzos para la mejora de las prestaciones de estos sensores mediante la obtención de nuevos diseños y nuevas tecnologías. En este sentido los progresos han sido considerables, especialmente si se tiene en cuenta el avance que ha supuesto el desarrollo de técnicas de micromecanización del silicio para la realización de estructuras que han facilitado la fabricación de dispositivos capaces de detectar magnitudes mecánicas y térmicas con elevada precisión y fiabilidad.

Con las técnicas o pasos básicos de microfabricación bien combinados se pueden fabricar microestructuras estáticas o móviles tridimensionales como voladizos, puentes y membranas. Especialmente, estas estructuras han sido utilizadas como diseños aplicados en el campo de los sensores químicos. A continuación se revisan las tecnologías fundamentales de micromecanizado del silicio. Dentro del campo de la micromecanización como tecnología

utilizada en la fabricación de sensores, destacan principalmente dos concepciones muy distintas, como son la micromecanización en superficie ("surface micromachining") y la micromecanización en volumen ("bulk micromachining"), que se pasan a describir a continuación.

1.4.2- Descripción del proceso básico de la tecnología de micromecanizado en superficie

En el caso de la tecnología de micromecanización en superficie, la fabricación de estructuras en tres dimensiones se realiza mediante el depósito de distintas capas sobre el substrato de silicio. Una de estas capas se utiliza como capa de sacrificio, de modo que, tras la eliminación selectiva de esta capa quedan perfectamente definidas las estructuras.

Básicamente, la tecnología de micromecanización en superficie consiste en el depósito de una capa estructural (polisilicio) sobre una capa de sacrificio (óxido de silicio), de tal forma que, mediante métodos fotolitográficos se definen los dispositivos de la capa estructural y se ataca la capa de sacrificio liberando así las estructuras. Esta idea básica de la micromecanización superficial se ilustra de forma esquemática en la figura 1.4.

La ventaja de la utilización de la micromecanización superficial radica en el hecho de tener un mayor grado de libertad en el diseño de las micropartes por un lado, y por otro, conseguir estructuras de tamaños reducidos. La desventaja asociada a esta tecnología consiste en la aparición de esfuerzos en las capas. Estos esfuerzos dependen de la geometría de los dispositivos. Por tanto, los dispositivos fabricados en esta tecnología tienen sus dimensiones limitadas en anchura y longitud, en espesores y en gaps.

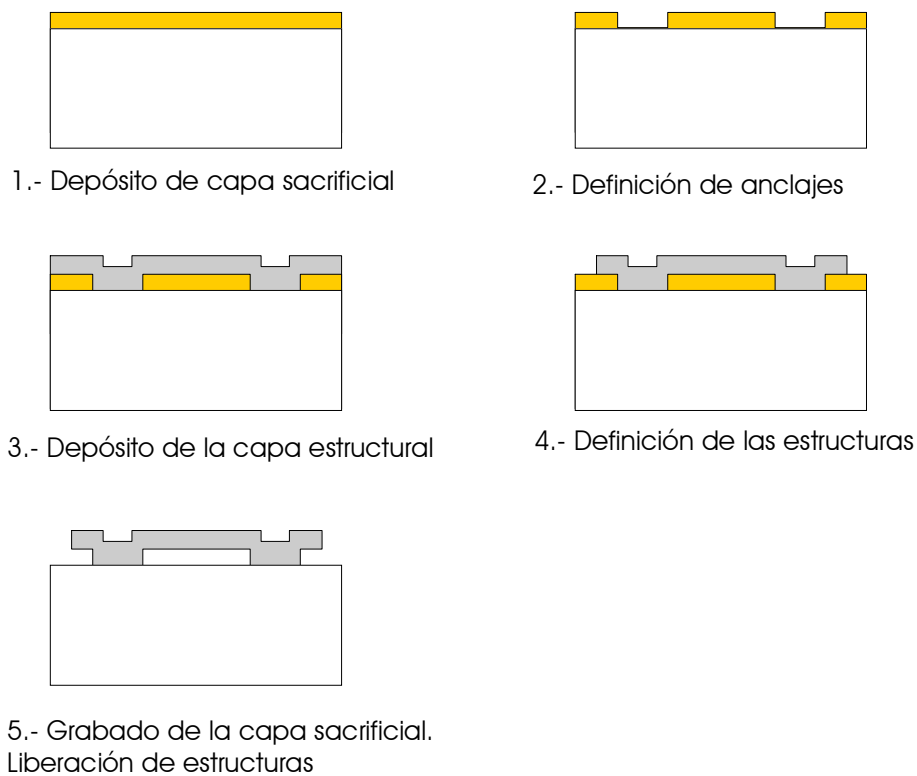


Figura 1.4: Detalle esquemático del proceso de la tecnología de la micromecanización superficial

Un ejemplo del uso de esta tecnología superficial de forma industrial es la *Foundry Service* de Robert Bosch [136]. El proceso tecnológico de BOSCH utiliza espesores típicos de la capa de polisilicio de $2\ \mu\text{m}$. Las estructuras liberadas como puentes, voladizos o estructuras resonantes están formadas por el polisilicio anclado sobre una superficie de silicio (sustrato) después del grabado del óxido sacrificial.

Con este proceso se han fabricado diferentes tipos de sensores como sensores inerciales de aceleración, sensores de flujo, microespejos, filtros micromecánicos y resonadores [136-137].

Una de las principales limitaciones de la tecnología superficial consiste en que no se pueden conseguir capas estructurales de grandes espesores [136]. Para aumentar el espesor de la capa estructural, la alternativa del proceso de BOSCH es utilizar un polisilicio de 11 μm de micras que se consigue creciendo una capa epitaxiada adicional denominada epipoly. Mediante la técnica de RIE (Reactive Ion Etching) se permite la formación de capas con paredes verticales durante el proceso del grabado de la capa gruesa. Queda añadir que por debajo de esta capa de polisilicio hay un segundo polisilicio que sirve como interconexión, capa protectora o electrodo. El segundo polisilicio está aislado del epipoly por la capa sacrificial y del sustrato por una capa de óxido. En la figura 1.5 se muestra un esquema.

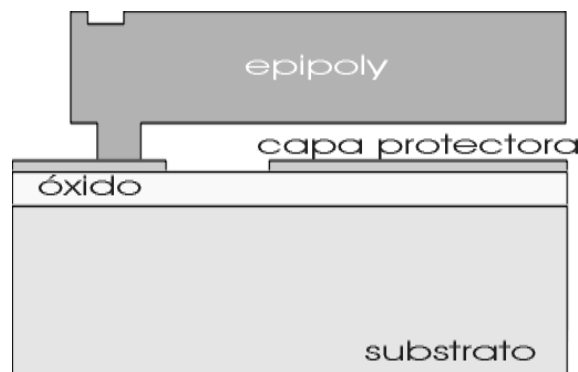


Figura 1.5: Esquema para estructuras con polisilicio epitaxiado de la tecnología de Robert Bosch

Como alternativa, pueden utilizarse obleas tipo BESOI ("Bond Etching-back Silicon On Insulator") del espesor deseado. La micromecanización superficial en obleas BESOI permite compensaciones entre resolución y miniaturización. En el mercado se puede encontrar productos industriales fabricados en sustratos tipo BESOI. Sin embargo, el incremento del uso de este tipo de sustratos prevé un desarrollo futuro en detectores resonantes o sísmicos con altos factores de calidad.

LETI y TRONICS desarrollan una tecnología con substratos BESOI [138-139]. Han comercializado la tecnología [140] y han fabricado acelerómetros capacitivos, sensores de presión capacitivos, sensores de presión piezoresistivos y resonadores mecánicos. Para ello utilizan capas estructurales mediante substratos BESOI de 15 μm y un óxido enterrado bajo la estructura de 1 μm de grosor.

Finalmente, dentro del campo de la micromecanización superficial existe la posibilidad de desarrollar una tecnología con más de un polisilicio como son los MCNC (Micromachining Centre North Carolina) [141].

1.4.3. - Descripción del proceso básico de la tecnología de micromecanizado en volumen

Sin embargo, en el caso de la tecnología en volumen, la definición de estructuras se realiza mediante el grabado parcial del grosor de material que hace de sustrato. Con frecuencia los sensores micromecanizados en volumen utilizan el procesado de doble cara, estas estructuras suelen ser diseños muy robustos.

La principal técnica que se usa en la micromecanización en volumen consiste en el grabado anisotrópico con el fin de estructurar la oblea de silicio. El grabado anisotrópico muestra diferentes velocidades para las diferentes orientaciones cristalográficas del silicio ya que es más fácil romper los enlaces en unos planos cristalográficos que en otros. El silicio tiene una estructura cristalina semejante al diamante siendo los principales planos cristalográficos (100), (110) y (111).

Algunos de los grabadores anisotrópicos más comunes son el EDP, hidracina, KOH y TMAH. Las velocidades de grabado dependen estrechamente de las concentraciones y temperaturas, por lo que cada laboratorio tiene sus propias condiciones de grabado. Los materiales que se

utilizan como protección de capas que no se desean grabar son el óxido de silicio y nitruro de silicio. Mientras que técnicas de paro electroquímico o control de tiempos se utilizan como método de detención de los ataques. La figura 1.6 muestra la idea básica de micromecanización en volumen.

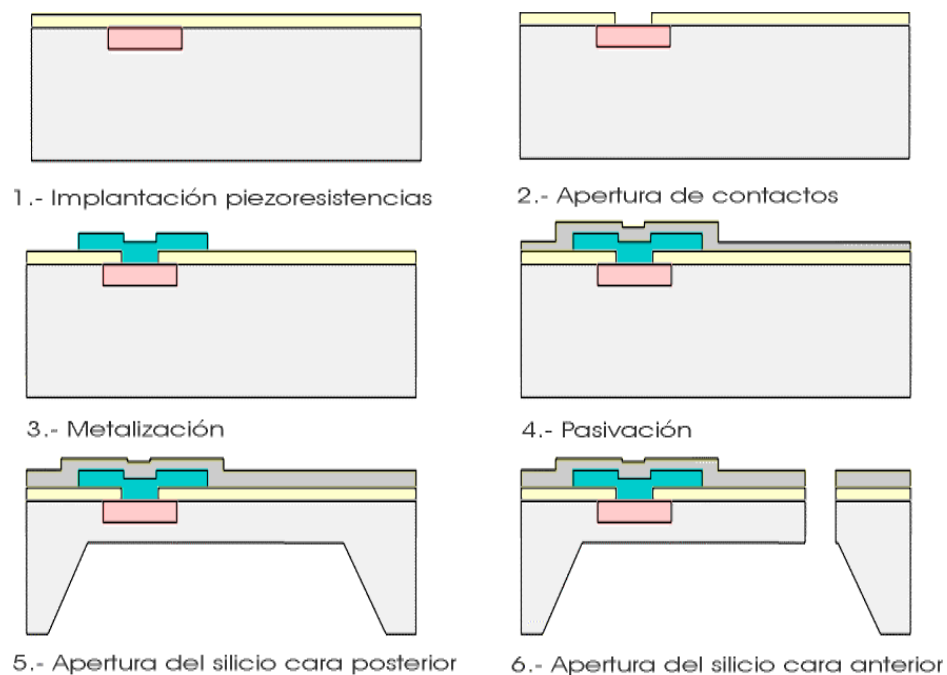


Figura 1.6: Detalle esquemático del proceso de la tecnología de micromecanizado en volumen

Un ejemplo de este tipo de sensores químicos resonantes en tecnología en volumen es el que muestra la figura 1.7 [88]. Una capa activa depositada en la superficie del silicio absorbe el gas para ser detectado. La masa de la capa sensible cambia y es proporcional a la concentración de gas en el ambiente. Este cambio de masa se detecta como un cambio en la frecuencia de resonancia del voladizo.

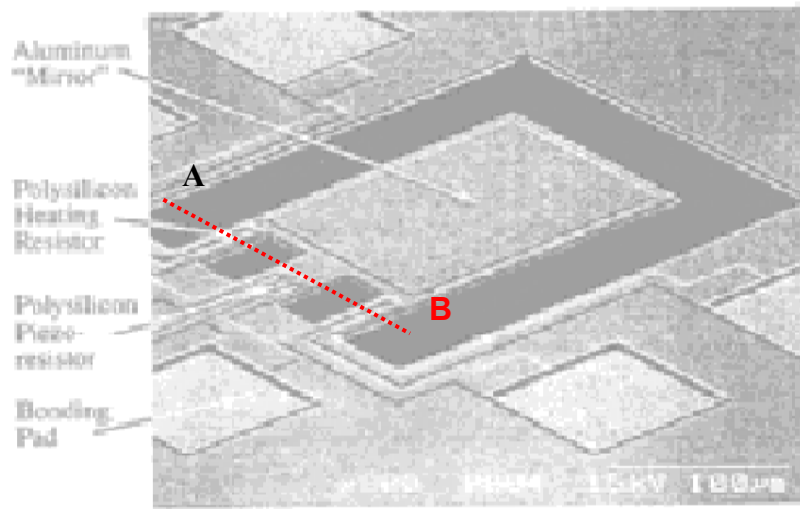


Figura 1.7: Voladizo resonante en tecnología Bulk con excitación electro térmica y detección piezoresistiva de las vibraciones transversales [88]

En la figura 1.8 se muestra un esquema del corte transversal A-B de la figura anterior.

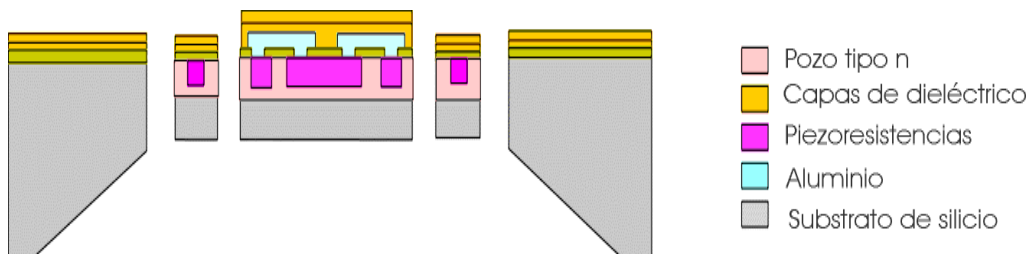


Figura 1.8: Corte transversal para un voladizo en tecnología en volumen

En esta tecnología se han fabricado sensores químicos utilizando tecnología CMOS en combinación con postprocesados para la micromecanización (por ejemplo, el grabado por detrás de la oblea para la liberación de voladizos y membranas) y el depósito de capas delgadas. Los microsistemas son procesados en una foundry de tecnología CMOS estándar Austria Mikro Systeme (AMS). Después de completar todos los pasos de postprocesado,

se deposita una capa de polímero que actúa como capa química activa. La técnica de depósito es por spray, mediante un aerógrafo a través de una máscara [89]. Una prudente selección de materiales poliméricos, cubre un estrecho rango de selectividad parciales y propiedades de absorción. Para este estudio y esta tecnología concreta se utiliza como material polimérico PEUT. Este tipo de material forma capas uniformes después de ser curado.

Los voladizos micromecanizados son un tipo de sensor químico que comparado con los QCM (Quarz Crystal Microbalance), tienen la ventaja de reducir sus dimensiones y ofrecen la posibilidad de cointegrar un circuito de lectura en el mismo chip. El principio de actuación como sensor de gas es el mismo, la masa de la capa sensible de polímero cambia por la absorción de moléculas de gas. Este tipo de sensor se excita mediante actuación electrotérmica y se detectan las vibraciones transversales mediante piezoresistencias en forma de puente de Wheatstone [88]. En la figura 1.9 se muestra un esquema para este tipo de sensor. Las resistencias para la excitación están localizadas en los dos puentes de los extremos cerca del borde del voladizo. Las piezoresistencias dispuestas en forma de puente de Wheatstone están localizadas en el puente central del voladizo el cuál está aislado térmicamente de las resistencias o calefactores por dos ventanas. Las dimensiones laterales del voladizo están optimizadas con respecto al factor de calidad de la frecuencia fundamental de vibración. Un sensor de estos típico es capaz de detectar hasta 1pgr de masa [26-27].

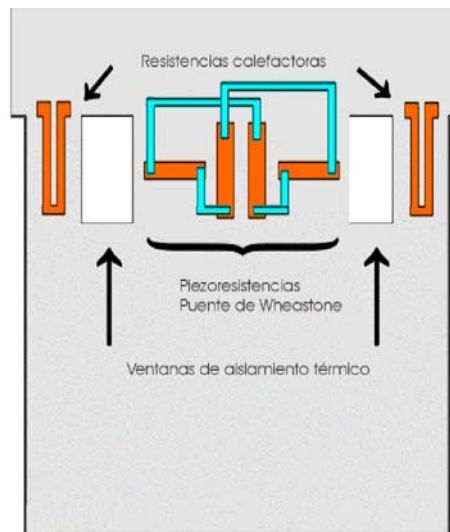


Figura 1.9: Esquema de un voladizo resonante fabricado en tecnología CMOS con excitación térmica y detección piezoresistiva.

Con el uso de las técnicas de paro electroquímico o de control de tiempos es difícil conseguir espesores deseados de forma repetitiva para las estructuras. Una alternativa es el uso de obleas comerciales BESOI (Bond and Etch-back Silicon On Insulator) [142-144]. Los substratos BESOI consisten en una oblea de silicio sobre la cual hay una capa aislante de óxido y sobre ésta una capa de silicio. Son obleas creadas por el fabricante soldando a alta temperatura dos obleas de silicio con una capa de óxido y puliendo por la cara posterior una de las dos obleas hasta el grosor deseado. Con este tipo de substratos el ataque anisotrópico finaliza una vez se llega a la capa aislante con lo cual, el grosor de la estructura queda perfectamente definido por el grosor de la capa estructural que hay encima. En la figura 1.10 se muestra un ejemplo de forma esquemática.

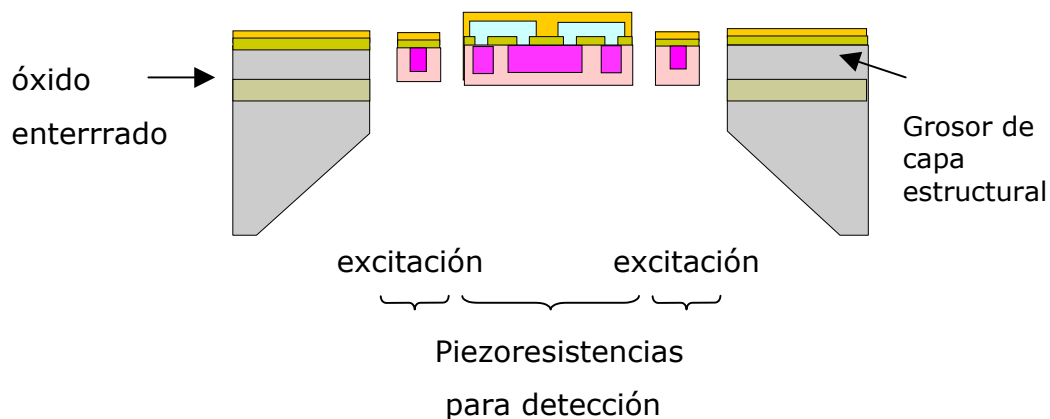


Figura 1.10: Esquema de un corte transversal para un dispositivo tipo voladizo en oblea BESOI

1.5. - Principios de excitación y de detección para estructuras micromecanizadas resonantes

Los sensores de gas que se proponen, están formados por una estructura mecánica resonante que forma parte del sensor químico y que dispone de una serie de componentes para excitar y detectar las vibraciones mecánicas.

En los últimos años, se han desarrollado diferentes mecanismos de excitación y de detección para los microresonadores basados en la tecnología del silicio [145-146]. Principios de actuación que sean accesibles son excitación de tipo electrostática, piezoeléctrica, electromagnética optoeléctrica y electrotérmica. En principio, dentro de los mecanismos de excitación que se proponen para este tipo de estructuras se puede distinguir entre aquellos mecanismos que son reversibles, como excitación electrostática, piezoeléctrica y magnética, de los que son irreversibles como la excitación electro y optotérmica. Los procesos reversibles de excitación pueden ser utilizados a la vez para la detección de las vibraciones. Los diferentes principios de excitación y de detección que se encuentran en la

literatura para los sensores resonantes micromecanizados se resumen en la tabla 1.2.

Principios de excitación	Principios de detección	Referencias
Electrostático	Capacitivo	[166-170]
Piezoeléctrica	Piezoeléctrico	[157-162]
Electromagnética	Inductivo	[153]
Electro y optotérmico	Óptico	[163-165]-
	Piezoresistivo	[148-153]
	Corriente	[155-156]
	Transistor	[154]

Tabla 1.2: Mecanismos de excitación y detección utilizados en resonadores micromecanizados

Con la variedad de posibilidades que existen la cuestión es decidir cuál es el principio de actuación y de detección más óptimo en función del tipo de aplicación. A la hora de tomar una decisión, hay que evaluar distintos aspectos como sensibilidad en la detección en función del tipo de excitación, pero incluso, no se deben olvidar otro tipo de consideraciones de tipo económico como el coste de producción del sistema total, su fiabilidad o su compatibilidad con otro tipo de tecnologías. Sin embargo, la temperatura de operación y el entorno del sistema juegan uno de los principales papeles a la hora de tomar una decisión.

Haciendo uso del principio de excitación electrostático y detección capacitiva mediante la definición de un gap de aire se puede utilizar en dispositivos resonantes verticales y laterales. La figura 1.11 muestra un esquema de estos dispositivos.

La mayoría de los dispositivos resonantes verticales están basados en dos obleas que han sido pegadas mediante soldadura anódica de modo que el gap que se obtenga sea lo suficientemente pequeño como para que los voltajes que se apliquen sean razonables y los cambios puedan ser

detectados. Este tipo de dispositivos también sería posible fabricar en una oblea con la ayuda de técnicas de grabado de materiales sacrificiales. Uno de los principales problemas en utilizar ese principio de actuación consiste en la necesidad de aplicar voltajes del orden de la decena de voltios.

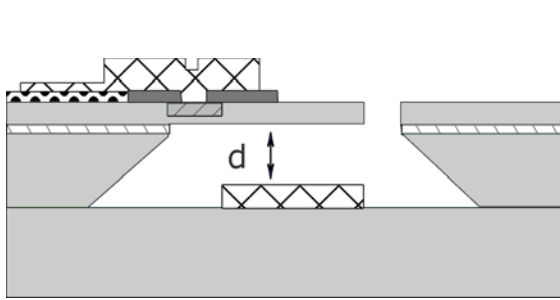


figura 1.11 (a)

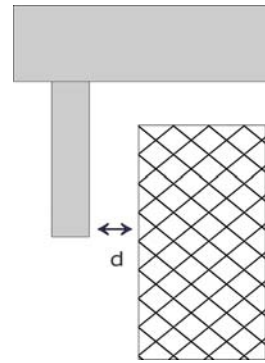


figura 1.11 (b)

Figura 1.11 (a): Dibujo esquemático de una estructura resonante vertical **(b):** Dibujo esquemático de una estructura resonante lateral

Para estructuras con principio de actuación y detección piezoeléctrico es necesario depositar una capa delgada piezoeléctrica sobre la estructura resonante. Esta capa de material piezoeléctrico puede ser de ZnO, PZT, o AlN. El cuarzo también es un material con propiedades piezoeléctricas y es utilizado preferentemente en sensores resonantes de microbalanza o QCM. Estos materiales piezoeléctricos plantean un problema y que consiste en su compatibilidad con las técnicas de depósito de los materiales sensibles.

Otro tipo de excitación, como la magnética, combina una excitación de bajos voltajes aplicados, sin embargo requiere de altas corrientes. Estos materiales magnéticos, como el Ni - Fe, se han de depositar a temperatura ambiente sobre la superficie de la estructura resonante. También podría utilizarse materiales poliméricos con alto poder magnético. Estos polímeros podrían ser depositados mediante las técnicas de screen-printing o spin coating.

Para la excitación y detección óptica es necesario una fuente de luz láser externa. Este tipo de detección se utiliza principalmente en aplicaciones de alta resolución o en aplicaciones de elevadas temperaturas ($T > 200^{\circ}\text{C}$). Uno de los ejemplos consiste en la medida de la deflexión de la punta de un voladizo en un AFM (Atomic Force Microscope).

Desde el punto de vista tecnológico, la excitación electrotérmica y detección piezoresistiva, está considerado como uno de los principios de funcionamiento del resonador más prometedor. Las resistencias que forman la parte de actuación y de detección dependen de la geometría del resonador y se pueden definir bien por implantación de una impureza (boro o fósforo) en la estructura cristalina del silicio o bien de polisilicio. La ventaja asociada a la definición de las resistencias mediante la implantación de una impureza en el silicio consiste en que los coeficientes piezoresistivos son mayores que en las resistencias definidas en polisilicio. Sin embargo, los coeficientes piezoresistivos tienen una fuerte dependencia con la concentración de dopantes y con la temperatura como se estudiará con detenimiento más adelante en el capítulo 3. Esta dependencia de los coeficientes piezoresistivos con la temperatura puede estar relacionado con la eficiencia del mecanismo de excitación debido al calor que se genera. Los esfuerzos de este trabajo van dirigidos en este sentido, es decir, en conseguir la detección de las vibraciones del resonador aplicando la mínima potencia a las resistencias actuadoras.

1.6. - Capa sensible

El desarrollo de diseños específicos para la identificación y cuantificación de sustancias químicas y bioquímicas para el control de procesos y monitorización de la presencia de gases es una necesidad creciente en la actualidad. Para la identificación de sustancias químicas o gaseosas es necesario el uso de ciertos materiales que sean sensibles a dichas sustancias.

En la literatura se pueden encontrar la utilización de materiales de naturaleza inorgánica, como son los óxidos metálicos, como el óxido de zinc o el óxido de titanio, utilizados como materiales que sirven para la definición de la capa sensible en los sensores de gases [171]. Sin embargo, una de las principales desventajas asociadas al uso de óxidos metálicos, como capa sensible, consiste en que normalmente son materiales que operan a una alta temperatura. Por este motivo, son materiales que queda limitado su uso para algunas aplicaciones específicas. En consecuencia, se plantea como una alternativa el uso de materiales de naturaleza orgánica como material sensible para la detección de gases. La mayoría de estas sustancias poseen una sensibilidad y selectividad elevada ante la presencia de un gas o familia de gases. Además una de las principales ventajas que presentan estos materiales orgánicos consiste en que su sensibilidad y selectividad puede adaptarse a una aplicación concreta mediante la modificación de su estructura química. Por ejemplo unos materiales que presentan esta ventaja dada la versatilidad de sus aplicaciones son los polímeros.

1.6.1. - Polímeros para la detección de volátiles

Los polímeros aparte de su versatilidad presentan como propiedades básicas, una alta sensibilidad y selectividad ante la presencia de gases. De modo que, los polímeros son capaces de distinguir no sólo la presencia de un determinado gas, sino incluso, familias de gases distintas y de volátiles. Los volátiles normalmente son gases compuestos de líquidos orgánicos con un punto de ebullición por debajo de 250°C (a excepción del metano). Estos líquidos orgánicos incluyen la presencia de alcoholes, compuestos aromáticos y compuestos halogenados. En la industria, existe una gran demanda de sensores que detecten la presencia de gases volátiles en concentraciones de ppm, puesto que los gases volátiles en función de su concentración, pueden ser inflamables, como el dimetil-1-éter, cancerígenos

como el benceno o perjudiciales para la capa de ozono, como lo son los compuestos halogenados.

Por tanto, se puede deducir que varias son las motivaciones las que nos conducen a utilizar materiales de tipo polimérico como material sensible en un sensor químico y que se pueden resumir en los siguientes tres puntos:

1. - Son materiales que se encuentran disponibles de forma comercial. Es decir, que existe un estrecho rango de polímeros que pueden ser comprados "ya hechos". Estos polímeros pueden ser utilizados en aplicaciones para la detección de gases ya que las propiedades mecánicas son conocidas y también es conocida su estabilidad en el tiempo.
2. - Son materiales de muy bajo coste y fácilmente pueden ser depositados mediante técnicas de spray o por depósito de microgotas. Incluso, son materiales que se pueden estructurar mediante el uso de máscaras.
3. - El hecho de que la absorción y la expulsión del gas por parte del polímero sea reversible y que sean materiales que operan a temperatura ambiente, los polímeros resultan materiales atractivos para la aplicación que se pretende.

Los mecanismos que intervienen en la detección selectiva de componentes en la mezcla de gases son, en primer lugar, el principio de respuesta del polímero que reacciona ante una propiedad específica del compuesto, como puede ser su masa y, en segundo lugar, que la selectividad del polímero al compuesto es inherente al tipo concreto y su interacción con el compuesto a analizar. Es decir, que esta selectividad está determinada por el tipo de interacción que se produce entre el polímero y el gas a examinar. Estas

interacciones pueden ser de tipo direccional basadas en moléculas polares o por tipo de enlace de hidrógeno.

1.6.2. - Características de los polímeros

La principal característica de los materiales poliméricos consiste en que son materiales formados por unas unidades básicas o monómeros a los que se van añadiendo largas cadenas de estructura molecular. Estas largas cadenas se forman por la polimerización con un disolvente. En la polimerización centenares o miles de monómeros se unen con unidades repetitivas para formar macromoléculas. El tamaño y forma de las unidades que forman el polímero o monómeros y la forma en que los radicales son unidos y ordenados en la estructura sólida son los que determinan las propiedades mecánicas y las características de procesamiento del plástico. Estas propiedades mecánicas que dependen del tipo de radical y de cómo forme el enlace dentro de la estructura sólida del polímero, tienen una dependencia importante con la temperatura [172]. El efecto de la temperatura en la rigidez de los polímeros es probablemente uno de los parámetros más importantes para el diseño y la tolerancia de las cargas en las aplicaciones de ingeniería. Por tanto, el comportamiento de las estructuras poliméricas depende de la disposición de sus cadenas moleculares, en particular, dependen de que los polímeros dispongan de una estructura ordenada y cristalina o que la estructura sea de tipo aleatoria o amorfa.

En general, debido a la naturaleza orgánica de los materiales poliméricos y a como están formados sus enlaces, son materiales que poseen, en general, una baja densidad, baja conductividad y un alto coeficiente de expansión térmica. La formación de enlaces débiles entre sus moléculas justifica el hecho de que sean materiales con un bajo módulo de Young y baja resistencia. En la siguiente tabla 1.3 se muestran los rangos de valores encontrados para las distintas propiedades de los polímeros [173].

Propiedades polímeros	Rangos
Densidad (ρ)	800 – 1500 (Kg/m ³)
Conductividad térmica (K)	0,1 (W/m ² K)
Coefficiente de expansión térmica (ALPHX)	(50 – 200) * 10 ⁻⁶ (K-1)
Módulo de Young (E)	0,1 – 3 GPa
Resistencia (F)	100 MPa

Tabla 1.3: Valores más usuales de las propiedades de los polímeros [173]

Los polímeros tienen la ventaja de ser unos materiales que cubren todo tipo de estado y de comportamiento, desde un estado viscoso a elástico en función de la temperatura y de la frecuencia. De modo que, a altas temperaturas y baja frecuencia se comporta como un material viscoso mientras que un comportamiento de tipo elástico domina a bajas temperaturas y altas frecuencias. Un cambio rápido de sus propiedades puede ocurrir cuando la temperatura de operación del sistema se encuentra cercana a la temperatura de transición Tg del polímero. Esta temperatura de transición Tg es la que define el estado físico del polímero.

En concreto los polímeros utilizados para este trabajo son el PEUT (polyeteruretano) y el PDMS (polidimetilsiloxano). Las propiedades de estos polímeros son densidad de 1020 Kg/m³ y módulo de Young de 200e+6 Pa para el caso del PEUT y 976 g/m³ y 19000 Pa en el caso del PDMS. Las propiedades mecánicas para los polímeros que se utilizarán como capa sensible entran dentro de los rangos establecidos en la tabla 1.3. En ambos casos, la temperatura de transición está por debajo de 0°C. Esto significa que como las estructuras están pensadas para operar en unos rangos de temperatura entre 23°C y 50°C, no se va a tener problemas de cambio de estado físico en el polímero como consecuencia de la temperatura máxima alcanzada en las estructuras.

1.6.3. - Técnicas de depósito de polímeros

En la literatura se pueden encontrar distintas técnicas o tecnologías de depósito de materiales poliméricos como la impresión molecular, estereografía [174], spin coating, screen printing o por spray. Cada una de estas técnicas de depósito está asociada a un tipo de aplicación y en cada caso se obtiene un aspecto final de polímero ajustado a la aplicación para la que están pensados.

La técnica de impresión molecular tiene como objetivo la creación de polímeros capaces de reconocer de manera específica una molécula. Se han propuesto y ensayado diferentes tipos de polímeros inorgánicos y orgánicos aunque la preferencia se inclina hacia los polímeros acrílicos. Estos materiales poseen la capacidad de reconocimiento molecular selectivo, gran estabilidad térmica y química y un coste productivo bajo.

En la preparación de los polímeros molecularmente impresos la propia molécula (molécula huésped) que se desea detectar induce la creación de sitios de reconocimiento específico durante la formación del polímero en su proceso de polimerización en proporciones adecuadas. Una vez extraída la molécula huésped se dispone de una fase sensora que ha de integrarse mediante un transductor electroquímico, piezoeléctrico o de otro tipo con el fin de construir un sensor químico.

Las técnicas de "spin coating" y "screen printing" son utilizadas preferentemente con materiales poliméricos fotocurables para depósito de capas delgadas. El problema asociado a este tipo de depósito del polímero consiste en que ha de realizarse a nivel de oblea y puede plantear problemas en el corte de los chips para su encapsulado y caracterización.

Por este motivo, la técnica de depósito de polímero que se propone como más óptima es el método de spray. De este modo se puede hacer el

depósito de la capa sensible para cada dispositivo individual controlando los parámetros que influyen en la cantidad de polímero depositado sobre la estructura como son la distancia, el tiempo y la concentración.

1.7. – Estructura del trabajo

Este trabajo está dividido en seis capítulos y tres anexos, correspondiendo este primer capítulo a la introducción y descripción de objetivos.

Dado que el trabajo está orientado hacia el estudio de la viabilidad de las distintas tecnologías existentes dentro del campo de la micromecanización del silicio como tecnología más óptima para su desarrollo, en el capítulo 2, se realiza una breve descripción de la tecnología de micromecanización en superficie para el diseño, fabricación y caracterización de dispositivos resonantes en dicha tecnología. Se presentan los resultados que se obtuvieron al final del trabajo de investigación de tercer ciclo con título "Diseño y fabricación de estructuras móviles con detección mediante transistores MOS de puerta flotante".

En el capítulo 3 se pasa a describir las estructuras mecánicas resonantes que se van a desarrollar en tecnología de micromecanización en volumen analizando los distintos efectos en función del principio de actuación. Dado que el principio de detección que se plantea es piezoresistivo se analiza el elemento sensor y actuador definidos mediante resistencias implantadas así como la influencia de las distintas capas que se pueden depositar. Se describen las geometrías y dimensiones de las estructuras a fabricar. Estas geometrías están elegidas basándose en un estudio que se ha realizado previamente por simulación mediante ANSYS. Se finaliza, por tanto el capítulo presentando las simulaciones de las geometrías que se presentan analizando la influencia de los distintos parámetros en los resultados.

Una vez diseñadas las estructuras se procede a su fabricación según se ha descrito en el capítulo 4. Se inicia el capítulo realizando un breve análisis sobre la utilización de substratos tipo SOI para la fabricación de las estructuras micromecanizadas en volumen. Se realiza una comprobación de la profundidad de la difusión de boro en la estructura cristalina del silicio para corroborar el buen funcionamiento de los dispositivos basado en el efecto piezoresistivo del silicio. A continuación, se realiza una breve descripción de los pasos tecnológicos del proceso de fabricación. Una vez fabricadas las estructuras, se procede al encapsulado de las mismas para su posterior caracterización. Este encapsulado se ve precedido por un estudio sobre la realización del serrado de los chips individuales. Se concluye el capítulo proponiendo dos tipos de encapsulado. Un encapsulado estándar como son las bases metálicas y en placa de circuito impreso PCB (Printed Circuit Board) que presenta un tipo de encapsulado más versátil.

Una vez las estructuras mecánicas han sido encapsuladas bien en bases metálicas o en placas de circuito impreso PCB, se procede a su caracterización, véase capítulo 5. Dentro de este capítulo se diferencian entre las medidas que se han realizado de forma estática y dinámica. En el caso de la caracterización estática de las estructuras mecánicas estas medidas se utilizan para caracterizar valores de resistencias y offset del puente de Wheatstone como parte sensora de las estructuras. También se han comprobado las medidas de temperatura máxima que alcanzan las estructuras así como de los desplazamientos de las mismas al aplicar distintas potencias. Para la medida en dinámico, se caracteriza la resonancia midiendo frecuencia de oscilación, amplitud y factor de calidad de las distintas geometrías. Las medidas se realizan de forma óptica mediante el uso de un microscopio en modo de interferometría y eléctrico con la medida del voltaje a la salida del puente de Wheatstone. Una vez se ha comprobado el buen funcionamiento de las estructuras mecánicas resonantes se procede al depósito de la capa sensible de tipo polimérico. Se

concluye el capítulo con las medias de los resultados experimentales obtenidos para los sensores de gas en tecnología en volumen.

En el capítulo sexto se presentan las conclusiones finales del trabajo y las perspectivas de futuro.

En el primero de los anexos se realiza una descripción de las máscaras que han sido necesarias diseñar para la fabricación de las estructuras en tecnología en superficie y en volumen así como se realiza una breve descripción de las estructuras de tests que se incluyen.

En el anexo B se realiza una descripción del montaje que se ha utilizado para la caracterización por interferometría así como de las geometrías y dimensiones de los distintos tipos de encapsulado que han sido usados.

Finalmente, en el tercer anexo, se relacionan los archivos que se incluyen en el CD al final de este trabajo y que corresponden a las caracterizaciones cuasi- estáticas de las estructuras fabricadas en tecnología en superficie y a las caracterizaciones por interferometría para las estructuras fabricadas en tecnología en volumen.

1.8. - Conclusiones

Los objetivos que se plantean consisten en el estudio de la viabilidad de las tecnologías de micromecanizado del silicio para la fabricación de sensores de gases.

Estos sensores podrán utilizarse en un futuro como componentes de una colección de sensores que formarán una nariz electrónica.

De la bibliografía se deduce que, es posible fabricar estos sensores tanto en tecnología de micromecanizado en superficie como en volumen.

La tecnología de micromecanizado en superficie ha propuesto la fabricación de estructuras con dimensiones muy pequeñas. Las dimensiones de estas estructuras dan capacidades de detección del orden de los femtofaradios. Se desarrolla, como alternativa, el uso de un transistor de puerta flotante como principio de detección. Es un planteamiento innovador y es fruto de la evolución de un trabajo anterior realizado en el CNM.

Otros autores, han propuesto unas estructuras fabricadas en tecnología CMOS totalmente integradas. Fabricar estructuras integradas con su circuitería de control tiene la ventaja de reducir capacidades parásitas así como las dimensiones del sistema total. Sin embargo, en muchos casos resulta complicado y económicamente costoso dado el menor rendimiento que se consigue en su fase de fabricación. Por este motivo, en este trabajo se propone la alternativa de la fabricación de estructuras en tecnología en volumen que se integrarían en un encapsulado híbrido en el caso de que se fabricara una circuitería adecuada.

El gap definido por las estructuras fabricadas en volumen, es muy grande para facilitar la detección de tipo capacitivo. Por tanto, la tecnología de micromecanizado en volumen plantea una detección basada en el efecto piezoresistivo del silicio, como principio de detección más óptimo.

Para ambas tecnologías, superficie y volumen, los sensores componentes de la nariz electrónica, son estructuras mecánicas resonantes que combinadas con el depósito de materiales tipo poliméricos definirán el sensor de gas.

El principio de funcionamiento del sensor estará basado en un cambio de frecuencia de resonancia consecuencia del cambio de masa por parte de la capa sensible cuando el sensor está en presencia del gas a medir.

En los dos casos, se estudiará la problemática asociada al depósito de la capa sensible tipo polimérica como uno de los puntos críticos para la decisión de la tecnología más adecuada.

Capítulo 2:

Estructuras fabricadas en tecnología superficial

Como ya se ha visto en el capítulo de introducción, la tecnología de micromecanizado en superficie tiene un gran potencial para la fabricación de distintos dispositivos aplicados en diferentes campos. El CNM ha desarrollado una tecnología propia para poder ampliar el rango de tipos y formas de estructuras mecánicas a fabricar.

El objetivo principal para esta tecnología consiste en fabricar unas estructuras que servirán de sustratos para la detección y medida de sustancias volátiles. En este trabajo, se desarrolla un dispositivo resonante micromecanizado en superficie que combinado con el uso de polímeros específicos permitirá la detección de estas sustancias. También se evaluará la viabilidad de esta tecnología para la aplicación que se pretende.

A continuación, se realiza una descripción de los pasos tecnológicos de la tecnología específica que está perfectamente desarrollada en el CNM.

2.1. - Tecnología de micromecanizado en superficie: versión 1

La tecnología que se ha tomado como base para este trabajo está definida para la fabricación de sensores con alta sensibilidad y fue desarrollada previamente en el CNM con la que se diseñaron y fabricaron estructuras como puentes, voladizos, acelerómetros y micromotores [5-6], [175-180]. En la figura 2.1 se muestran los principales pasos de dicha tecnología.

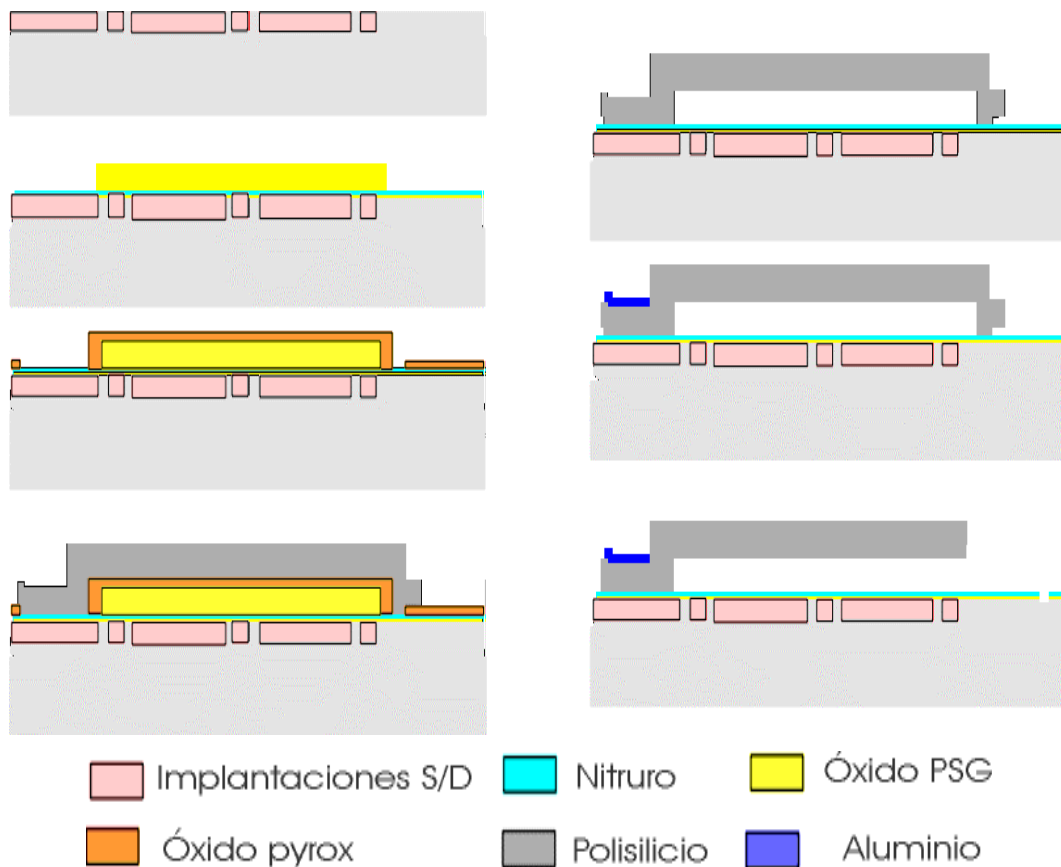


Figura 2.1: Proceso de fabricación de dispositivos FET en tecnología superficial del CNM

El proceso comienza con el crecimiento de un óxido térmico de 300Å. Se define mediante fotolitografía la zona de implantación de campo que se realiza mediante una implantación de boro de 5.5×10^{11} at cm^2 a 150 KeV. A continuación se define mediante una nueva fotolitografía la zona de ajuste de la tensión umbral del transistor que se implanta con fósforo a 1.0, 1.5, o 2.0×10^{11} at cm^2 y 25 KeV. Mediante la tercera fotolitografía se define la fuente y drenador del transistor NMOS mediante una dosis de fósforo de 4×10^{11} at cm^2 a 100KeV (figura 2.1 a). Seguidamente tras eliminar el primer óxido de 300Å se crece el óxido de puerta mediante una oxidación térmica de 780Å y se fotolitografía (4º nivel) el óxido para realizar la apertura de contactos. Se deposita una capa de nitruro de 1800Å y se hace la apertura de la capa de nitruro utilizando el 5º nivel. Se hace notar que la apertura de contactos se realiza en dos pasos para que de esta forma el óxido de 780Å quede protegido por la capa de nitruro.

A continuación se deposita un óxido PSG (Phosphoro Silicon Glass) de 8000Å que se graba mediante un proceso fotolitográfico el 6º nivel (figura 2.1 b). Se deposita otra capa de óxido sin dopar (óxido pyrox) de 2600Å y se graba usando la máscara correspondiente al 7º nivel (figura 2.1 c). A continuación se deposita una capa de polisilicio que formará la capa estructural. El depósito se realiza en dos fases de espesor de 1 μm e implantación de fósforo de 2×10^{15} at cm^2 . Seguidamente se realiza el recocido de esta capa de polisilicio en N_2 a 950°C durante 4h. Se definen los agujeros de ataque de la capa sacrificial mediante fotolitografía del nivel 8ª (figura 2.1 d) y se procede al grabado húmedo de dicha capa mediante ácido sulfhídrico HF (figura 2.1 e).

La razón de utilizar una capa sacrificial formada por esta multicapa consiste en poder realizar un ataque lateral de hasta 115 μm en poco tiempo gracias a la presencia del óxido PSG y mantener las propiedades del polisilicio al constituir el óxido pyrox una barrera para la difusión de dopantes del óxido PSG durante el proceso de depósito y recocido.

Seguidamente se metaliza con 1 μm de aluminio. Esta capa tiene una doble utilidad: por un lado se utilizará para realizar las conexiones y por otro se utiliza como método de sellado en vacío para el caso de fabricar estructuras tipo membrana para sensores de presión capacitivos. Este método consiste en sellar los agujeros por los que se ha realizado el grabado húmedo de la capa sacrificial. El material utilizado es la propia capa de aluminio. En la figura 2.2 se muestra un esquema de la secuencia de pasos del proceso tecnológico.

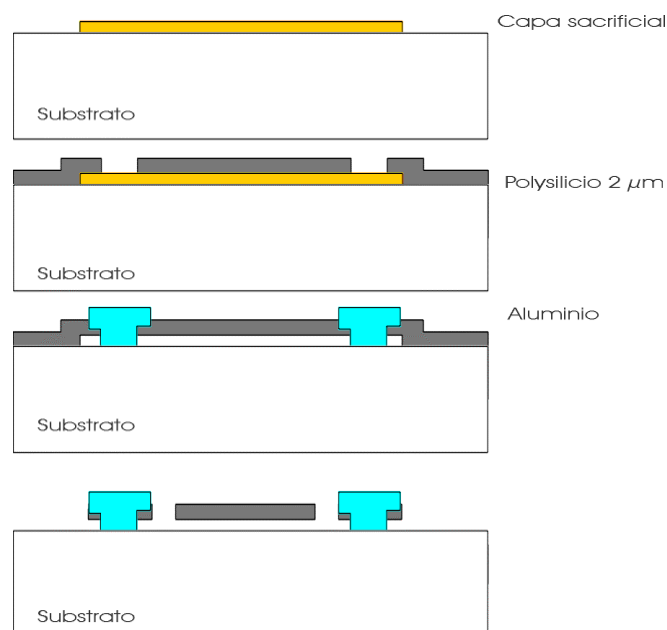


Figura 2.2: Proceso esquemático del método de sellado.

Tras la metalización, usando el 9º nivel se definen las pistas de conexión y los sellados de los agujeros anteriormente descritos.

Como último paso tecnológico se abre (10º nivel) el polisilicio de la cavidad y se define en las membranas las estructuras deseadas. Estas estructuras quedan suspendidas en el aire y no se produce la adhesión al sustrato debido a que el proceso se realiza mediante grabado seco.

Con esta tecnología desarrollada inicialmente en el CNM, había sido posible fabricar sensores de presión capacitivos, sensores de presión FET [6], acelerómetros FET sensibles al eje z [176] y estructuras de test mecánicas FET [177]. De todas estas estructuras, las de test mecánicas son las más interesantes para el desarrollo de nuestro caso particular. Estas estructuras consisten en puentes y voladizos fabricados sobre varios transistores tipo FET. En la figura 2.3 se muestra un esquema. La figura 2.4 muestra el voladizo una vez fabricado.

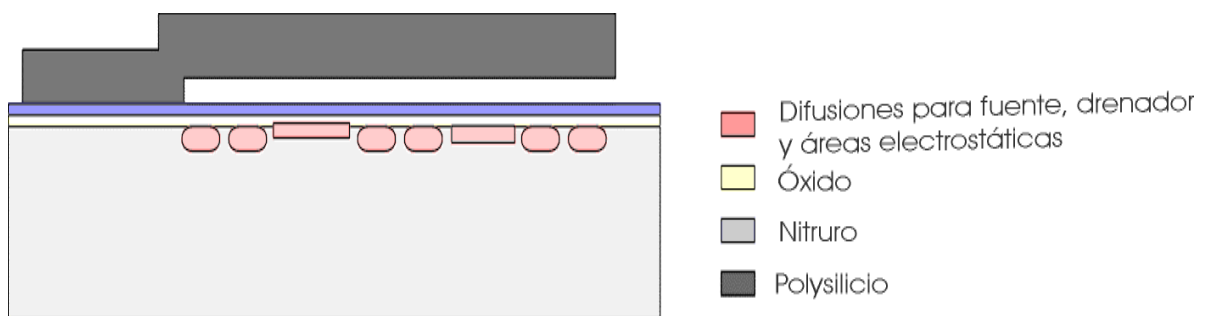


Figura 2.3: Esquema de la estructura tipo voladizo fabricado con la tecnología de micromecanizado en superficie del CNM sobre varios transistores tipo FET

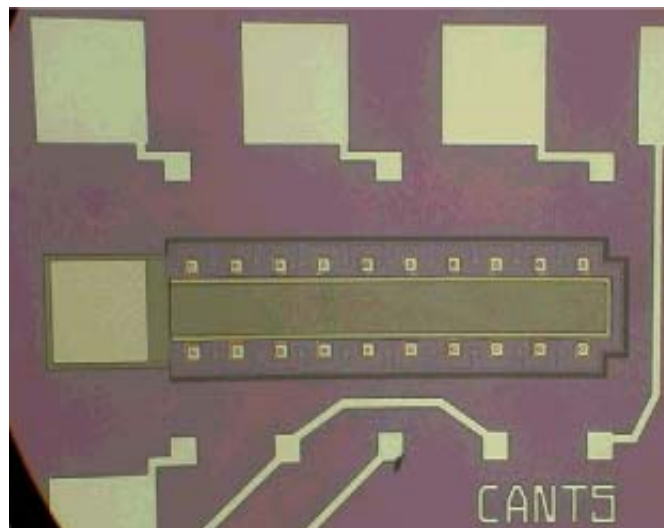


Figura 2.4: Voladizo de $500 \times 50 \mu\text{m}^2$ fabricado con tecnología superficial

En estas estructuras es el propio voladizo o puente el que actúa de puerta de transistor con el "gap" de aire y las capas de nitruro y óxido como dieléctrico de puerta, En la figura 2.5 se muestra un esquema del transistor con puerta flotante con 1 μm de aire.

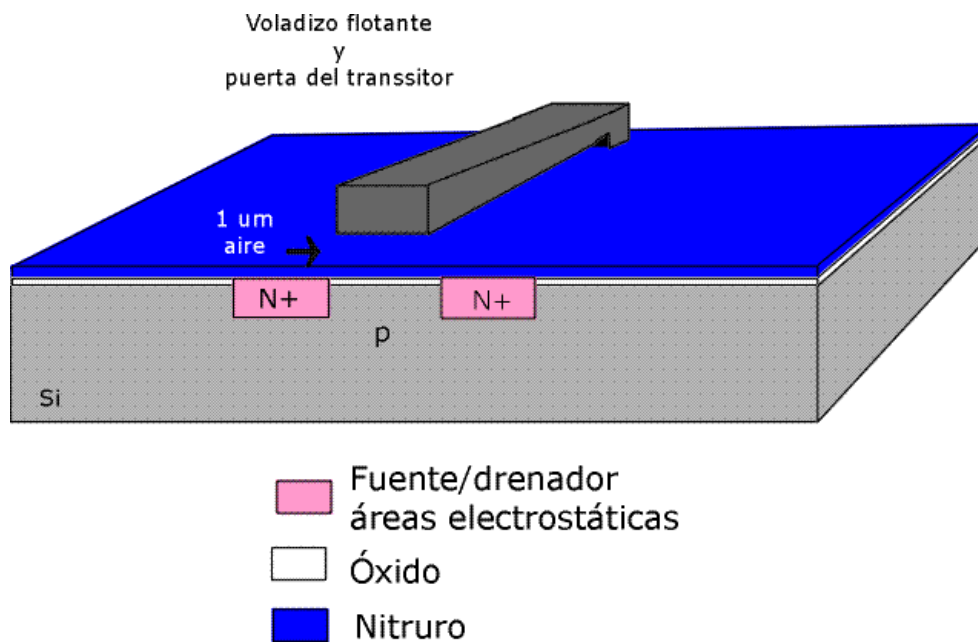


Figura 2.5: Corte transversal esquemático del transistor en estructuras previas

En la figura 2.5 el voladizo flotante hace de puerta de transistor. El dieléctrico de puerta está formado por el gap de aire, la capa de nitruro y el óxido de puerta. De esta forma la tensión umbral del transistor depende de la distancia o gap de aire. Debido a la aplicación de un voltaje se produce el movimiento mecánico de la estructura modificándose el gap de aire y por tanto, el espesor del dieléctrico de puerta y en consecuencia, se modifica el valor de la capacidad y por tanto, de la tensión umbral.

Al caracterizar estas estructuras se tuvieron problemas ya que aparecieron cargas móviles en la interfase entre la capa de nitruro de silicio de puerta y el gap de aire, dando lugar a estructuras con tensiones umbrales poco repetitivas e inestables. Por este motivo, en este trabajo se introdujeron

una serie de mejoras tecnológicas en el proceso de fabricación con objeto de mejorar las prestaciones de los dispositivos. Se diseñan estructuras con una tensión umbral fija y se pasan a describir a continuación.

2.2. - Mejoras tecnológicas introducidas en el proceso de micromecanizado en superficie

Tal y como se ha descrito en el apartado anterior y debido a la problemática en la caracterización asociada a los dispositivos fabricados, se han intercalado unos procesos tecnológicos con objeto de mejorar los dispositivos finales fabricados. Cuatro han sido las actuaciones:

a) Inclusión de un óxido de campo LOCOS (LOCAl Oxidation of Silicon)

Introducir este óxido permite reducir la capacidad parásita de las conexiones al mismo tiempo que mejora al aislamiento entre dispositivos y difusiones al aumentar la tensión umbral de la zona de campo.

b) Depósito de una capa de polisilicio sobre el óxido de puerta para formar la puerta del transistor y los electrodos de excitación.

Este paso se realiza antes del depósito de la capa de nitruro para formar una interfase entre el óxido y la capa de polisilicio de gran calidad. Este polisilicio sirve para fabricar transistores con tensiones umbrales fijas.

c) Apertura de la capa de nitruro sobre el polisilicio.

El nitruro de silicio es un material que tiene tendencia a atrapar cargas en su estructura. Por este motivo y para estudiar su influencia se diseñan y fabrican estructuras con y sin apertura de nitruro sobre la capa de polisilicio de puerta.

- d) Precortado de las obleas antes del proceso de grabado final
Se realiza un precorte dejando parte de la oblea sin cortar de forma que sea lo suficientemente rígida para que la oblea no se rompa y a su vez para que facilite el corte de los chips tras el grabado final.

A continuación se describen estas mejoras tecnológicas que se han introducido.

a). - Inclusión de un óxido de campo.

En el proceso original, la zona de campo que aísla los distintos dispositivos en un chip, estaba formada por el óxido de puerta de 780Å y la capa de nitruro de 1800Å y las conexiones se realizaban mediante pistas de metal sobre dicha zona de campo. Para mejorar las prestaciones del dispositivo se incluye un óxido de campo tipo LOCOS que permite reducir la capacidad parásita de dichas conexiones al mismo tiempo que mejora al aislamiento entre dispositivos y difusiones al aumentar la tensión umbral de la zona de campo. Las capacidades parásitas quedan reducidas en un factor 6, al aumentar el grosor del óxido de campo. En la figura 2.6 se muestra un esquema.

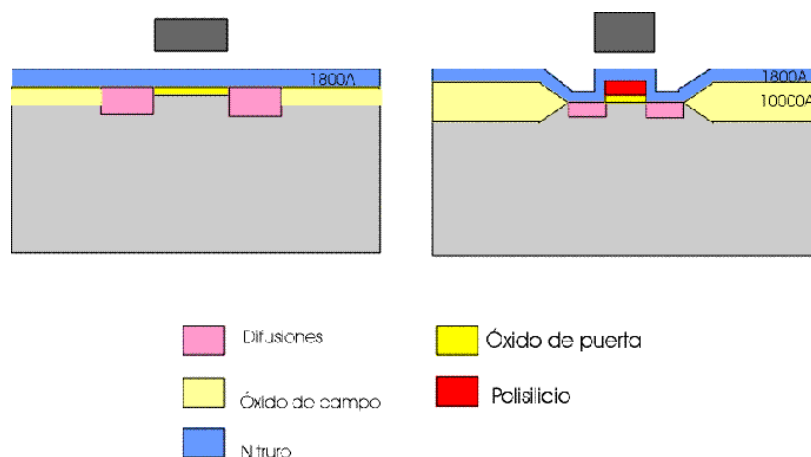


Figura 2.6: Corte esquemático transversal del dispositivo fabricado con la tecnología versión 1 **(b)** Corte esquemático transversal del dispositivo fabricado con la tecnología versión 2

(b). - Depósito de una capa estándar de 4800Å de polisilicio

Con la tecnología desarrollada con anterioridad se obtuvieron estructuras con tensiones umbrales poco repetitivas e inestables probablemente debido al efecto de cargas móviles en la interfase entre la capa superior de nitruro de silicio de puerta y el aire del "gap". La creación de cargas móviles puede ser debido al proceso de grabado por plasma de iones reactivos (RIE "Reactive Ion Etching") del polisilicio de puerta. Este grabado también puede producir un ataque de parte del nitruro con lo que cambiaría el espesor del dieléctrico total de la estructura.

Como alternativa, en este trabajo se propone realizar el depósito de una capa de polisilicio, que actúa como una puerta flotante, sobre el óxido de puerta. Este paso se realiza antes del depósito de la capa de nitruro para formar una interfase entre el óxido y dicho polisilicio de gran calidad, como en el caso de los transistores MOS de una tecnología estándar. De este modo se fabrican transistores bajo la capa de nitruro con tensiones umbrales fijas. Esta mejora no previene, sin embargo de los fenómenos asociados a la interfase nitruro-aire, que continua siendo igual que antes. Por ello, en este nuevo proceso se ha realizado un paso adicional que se comenta en el siguiente apartado.

Por facilidad tecnológica, la capa de polisilicio usada es la típica de 4800Å de las tecnologías CMOS estándar del CNM.

(c). - Eliminación de la capa de nitruro sobre el polisilicio de la puerta flotante.

Como se ha comentado, para estudiar la influencia de las posibles cargas móviles asociadas a la capa de nitruro sobre el polisilicio flotante, se han diseñado estructuras con y sin apertura de esta capa. En la figura 2.7 se muestra un esquema para un transistor MOS con y sin apertura de nitruro.

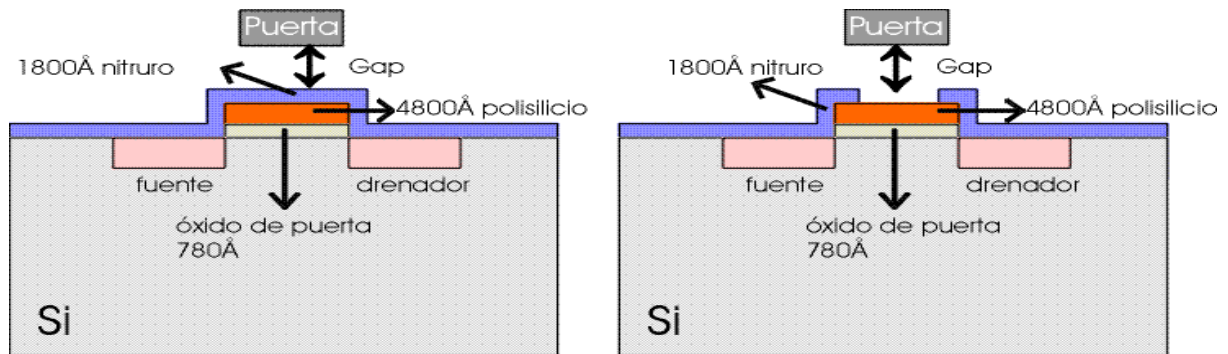


Figura 2.7: Transistor MOS con nitruro **(b)** Transistor MOS con apertura de nitruro

(d). - Pruebas de precortado de las obleas

Previamente al grabado final, se introduce una etapa especial para realizar el precorte de las obleas. Se ha realizado un estudio previo con el que se pretenden conseguir dos objetivos; primero que la oblea de silicio sea lo suficientemente rígida tras el corte y en segundo lugar, obtener dispositivos que fácilmente puedan ser cortados al final del proceso para su posterior encapsulado.

Las obleas que se han utilizado en la fabricación son de 500 μm de grosor. Se han realizado pruebas en las que se dejaban $z=100 \mu\text{m}$, $z=200 \mu\text{m}$ y $z=350 \mu\text{m}$ de oblea de silicio sin cortar. Con 100 μm de grosor de oblea sin cortar, ésta queda demasiado frágil y se rompe sola. Con 350 μm sin cortar la oblea es demasiado rígida ya que al intentar romper por las pistas de corte, ésta se fracciona. Con lo cual, lo más óptimo consiste en precortar las obleas dejando 200 μm de silicio sin cortar, de este modo, se consiguen las dos finalidades. En la figura 2.8a se muestra un esquema de la oblea de silicio completa y sobre la que se van dibujando las pistas de corte midiendo la profundidad del corte con la sierra. En la figura 2.8b se muestra un esquema de un corte transversal de la oblea dejando "z" micras sin cortar.

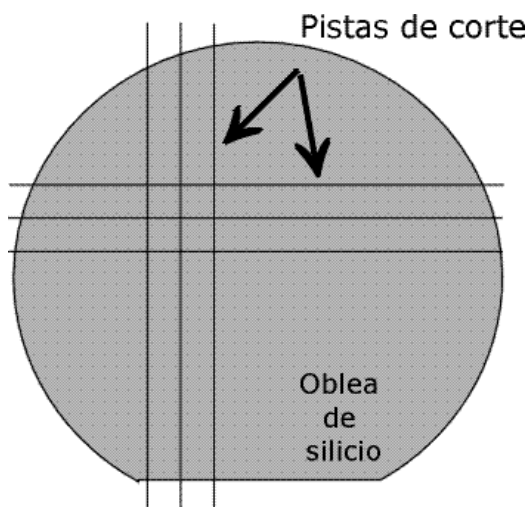


Figura 2.8a

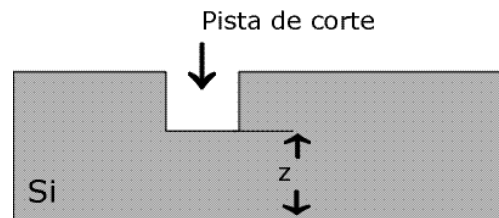


Figura 2.8b

Figura 2.8a: Dibujo esquemático de las pruebas de precorte realizadas para la oblea completa **(b)** Dibujo esquemático del corte transversal a estudio en función de la profundidad del corte

Esta etapa se ha introducido antes de ser liberadas las estructuras móviles, de esta forma la individualización de los módulos se puede realizar de forma manual.

2.3. – Estructuras propuestas

El principio de actuación que se propone para las estructuras mecánicas fabricadas en esta tecnología superficial, se basa en excitación mediante la aplicación de un voltaje. Esto implica que debajo de la estructura resonante se debe definir un electrodo "E" que permita aplicar la tensión de polarización, tal como se muestra en la figura 2.9

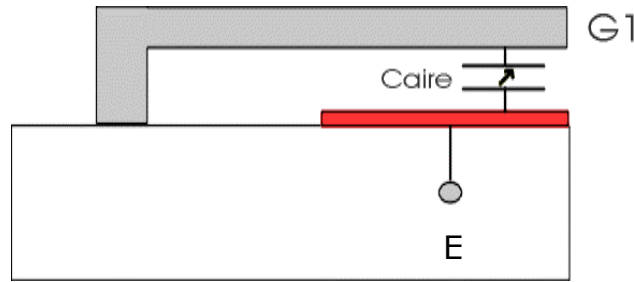


Figura 2.9: Esquema del principio de excitación electrostática con el electrodo G2.

Cuando se somete al dispositivo a una tensión entre las placas, se produce en él un desplazamiento que produce cambios en el valor de la capacidad Caire. Si utilizamos este principio de funcionamiento se observa un problema. El objetivo que se busca impone estructuras de dimensiones reducidas para que tengan frecuencias de resonancia elevadas. Esto implica que las capacidades asociadas serán pequeñas, del orden de magnitud de pocos femtofaradios ($\approx 10^{-15}$). Los órdenes de magnitud de las variaciones de capacidad resultan todavía inferiores incluso a las propias capacidades parásitas, lo que complica la detección de la señal a la salida. Por ejemplo, para un dispositivo de 500 μm de longitud y 50 μm de anchura se espera una capacidad de 160 femtofaradios. Se concluye que, el tratamiento de la señal es complicado y sería necesario integrar una circuitería en el sensor o poner un ASIC al lado para reducir las capacidades parásitas.

Dada toda esta problemática asociada al principio de detección capacitiva, se propone como alternativa la detección a través de un transistor MOS (Metal Oxide Semiconductor) con puerta flotante que se polarizará a través de la capacidad variable formada por la estructura resonante. En la figura 2.10 se muestra un esquema del transistor con una segunda puerta flotante a diferencia de las estructuras que se habían fabricado con la tecnología en su primera versión (ver figura 2.5).

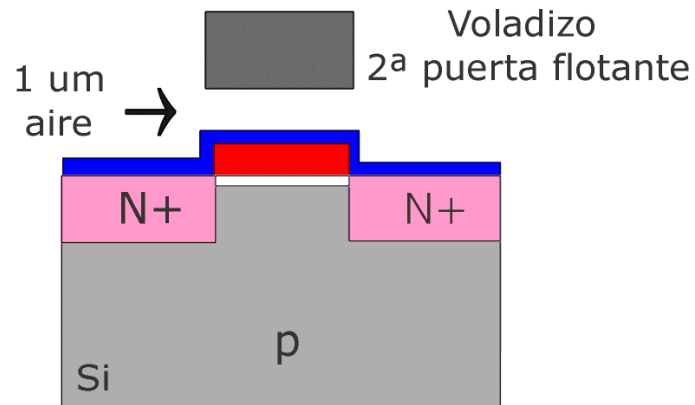


Figura 2.10: Dibujo esquemático de un corte transversal de las estructuras mecánicas propuestas con una segunda puerta flotante

En la figura 2.10, el dieléctrico de puerta está formado por el óxido de puerta de 780 Å. Mientras que la capa de nitruro está encima de la puerta de polisilicio del transistor y entre esta capa y el voladizo o segunda puerta flotante se encuentra un gap de 1 µm de aire. El espesor de 1 µm de aire se irá modificando debido al movimiento de la puerta flotante cuando ésta se polarice.

La tecnología superficial que se presenta permite fabricar pequeños dispositivos con frecuencias de resonancia altas [181]. Las estructuras fabricadas son de polisilicio de 2 µm de grosor sobre una capa sacrificial de óxido de 1 µm. Se han fabricado estructuras tipo puente de 500x50 µm² en dos versiones: doble puerta o DP y puerta extendida o PEXT y que se pasan a describir a continuación [182-183].

2.3.1. – Estructura doble puerta o DP

DP es una de las versiones propuestas para la detección en los dispositivos diseñados. La figura 2.11 representa el esquema en tres dimensiones de la estructura denominada 'Doble Puerta'.

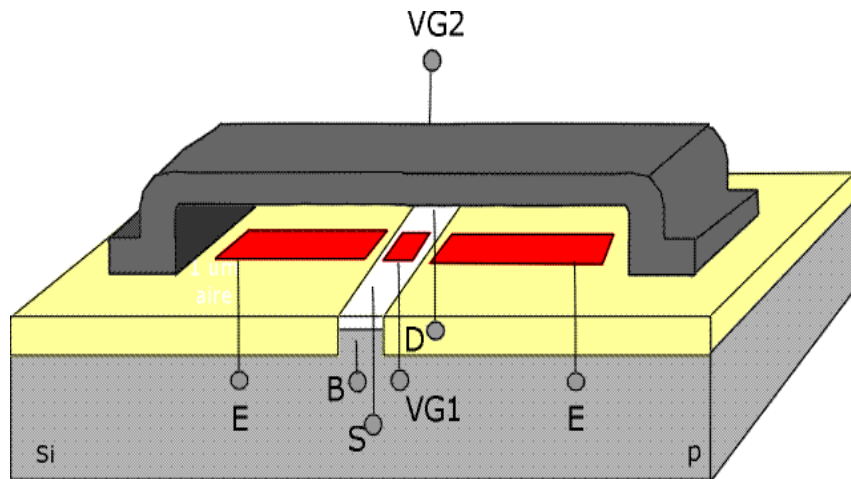


Figura 2.11: Vista esquemática en perspectiva de un puente DP

Estas estructuras, reciben este nombre ya que por un lado se tiene la puerta G2 de polisilicio que no es más que la viga o voladizo de la propia microestructura y la puerta G1 del transistor NMOS. La puerta G2 es en realidad un electrodo que se podrá polarizar mientras que la puerta del transistor G1, a la que no hay acceso, tendrá un voltaje que dependerá del movimiento mecánico de la puerta G2 según se acerque más o menos a la puerta G1 del transistor NMOS. Este voltaje de puerta G1 viene expresado por la expresión [2.1]: [184]

$$VG1 = \left(VG2 - \frac{Vds}{2} \right) * \left[\frac{1}{1 + \frac{\epsilon_{ox} * A_{ox} * d_{aire}(t)}{\epsilon_0 * A_{aire} * d_{ox}}} \right] + \frac{Vds}{2}$$

[2.1]

En la configuración de doble puerta (ver figura 2.12), si el electrodo "G2" lo polarizamos a tensión constante y aplicamos un voltaje alterno a "E" la puerta "G1" del transistor tendrá una tensión variable inducida exclusivamente por el movimiento del electrodo "G1". La puerta de

polisilicio del voladizo que es la puerta móvil, será excitada mediante un electrodo adicional E denominado electrodo de atracción electrostática. A continuación se muestra el esquema eléctrico según la figura 2.12.

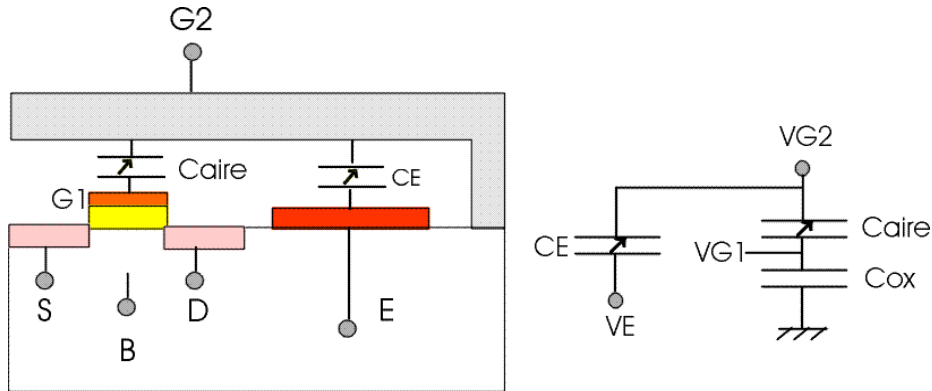


Figura 2.12: Esquema eléctrico de la mitad del dispositivo tipo puente DP

Todas las estructuras DP se han diseñado con el mismo tamaño de puerta de transistor NMOS. La relación que existe entre la anchura y longitud de la puerta es de 10/15. Para un tamaño de transistor de estas dimensiones, se espera obtener unos niveles de corriente en torno a las decenas de microamperios.

2.3.2. – Estructura puerta extendida o PEXT

En el caso de la versión PEXT o Puerta Extendida' el polisilicio del voladizo está conectado a la puerta G1 de transistor NMOS. Esta disposición permite situar al transistor desplazado de la estructura resonante. La puerta de microsistema G2 es lo que en la versión DP era el electrodo de atracción electrostática. En esta versión el voltaje de la puerta G1 cambia debido a dos efectos. Por un lado, debido a su propio movimiento mecánico y por otro, debido a la aplicación de un voltaje al electrodo de puerta de microsistema G2. En la figura 2.13 se muestra una vista en 3-D para esta clase de estructuras.

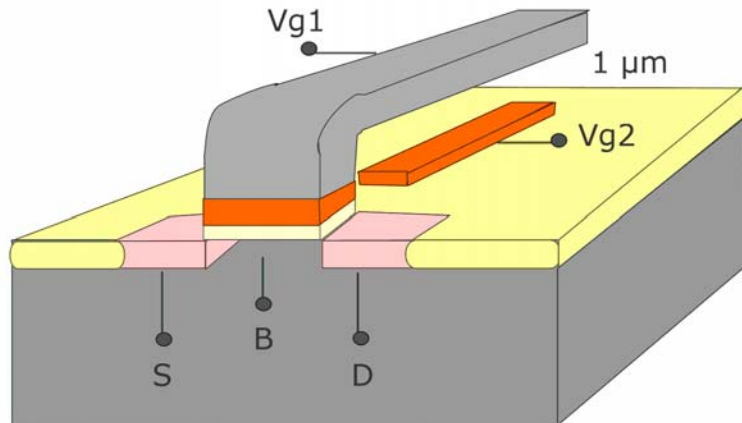


Figura 2.13: Dibujo esquemático en-3-D de la mitad de un dispositivo PEXT tipo puente

La figura 2.14 muestra el esquema eléctrico correspondiente.

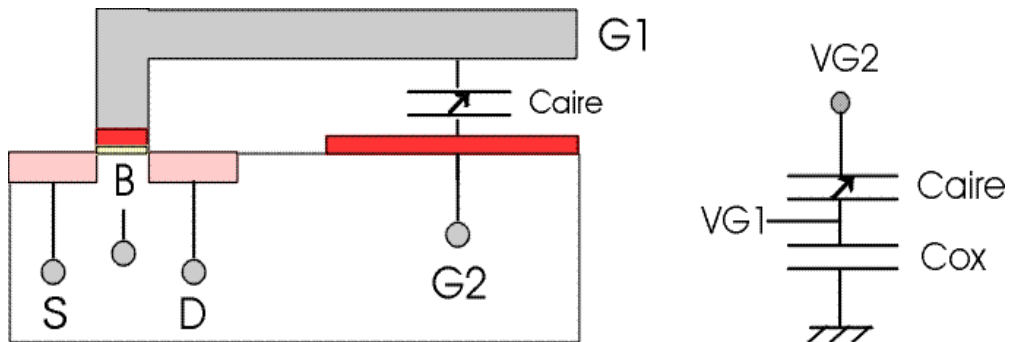


Figura 2.14: Esquema eléctrico de la mitad del dispositivo tipo puente PEXT

Todas las estructuras PEXT se han diseñado con el mismo tamaño de puerta de transistor NMOS. La relación que existe entre la anchura y longitud de la puerta es de 140/5. A estas dimensiones le corresponden unos niveles de corriente en torno a los centenares de microamperios.

2.4. - Consideraciones tecnológicas en el transistor NMOS. Ajuste de la tensión umbral

Se ha explicado al comienzo del capítulo que los dispositivos fabricados en tecnología superficial tienen un principio de actuación electrostática y se ha propuesto como principio de detección el uso de un transistor MOS con puerta flotante. Según este principio de actuación el resonador induce una variación de voltaje y por tanto una variación de corriente en el canal del transistor. De este modo y con este método de detección, se evita la problemática existente con las capacidades parásitas asociadas. En la figura 2.15 se muestra el esquema del transistor NMOS de puerta flotante.

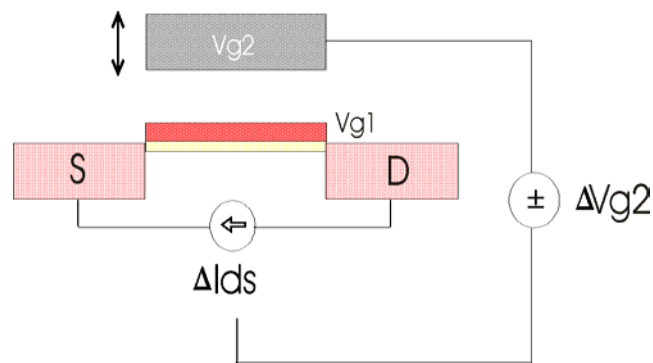


Figura 2.15: Esquema de actuación para el transistor MOS de puerta flotante

El principio de funcionamiento se basa en que cuando se aplica una tensión V_{g2} al resonador éste se mueve. Este movimiento produce un acercamiento o alejamiento del resonador a la puerta del transistor NMOS. Según se acerque o aleje la parte móvil resonante, induce una tensión en la puerta del transistor mayor o menor y se verá reflejado en el nivel de corriente que será mayor cuando se acerca y menor cuando se aleja.

Se recuerdan las expresiones del voltaje de puerta del transistor y su dependencia con el voltaje aplicado al resonador [2.2] así como la expresión de la corriente de drenador en un transistor NMOS en régimen lineal [2.3].

$$V_{gate1} = \left(V_{gate2} - \frac{V_{ds}}{2} \right) * \left[\frac{1}{1 + \frac{C_{ox}}{C_{aire}}} \right] + \frac{V_{ds}}{2}$$

[2.2]

$$I_{ds} = \mu C'_{ox} \frac{W}{L} (V_{g1} - V_t) V_{ds}$$

[2.3]

A partir de las expresiones anteriores y para la fabricación del transistor NMOS se estudian los parámetros que se pueden optimizar: El grosor de óxido de puerta y el ajuste de la tensión umbral son parámetros tecnológicos. El tamaño de la puerta de transistor es un parámetro de diseño. Todos ellos, grosor de óxido, tensión umbral y tamaño de transistor, fijan los niveles de corriente. Se considera un tamaño del transistor con la siguiente relación anchura /longitud de $W/L = 10/15$ para el caso de las estructuras DP y con una relación $W/L = 140/5$. en el caso de PEXT. De este modo, se tendrán diferentes niveles de corriente para cada uno de los casos.

Como se ha explicado con anterioridad, en estos dispositivos el dieléctrico de puerta del transistor está formado por una capa de óxido. Por tanto, para determinar el grosor del óxido, se dispone en el CNM, de dos grosores de óxido de puerta de 780\AA o de 360\AA para las tecnologías estándar de fabricación. Para aumentar la robustez eléctrica del transistor se decide fabricar transistores con un grosor de óxido de puerta de 780\AA .

Las principales diferencias que existen con el transistor a fabricar y un transistor estándar, consisten en la dosis y energía, para el dopaje en el ajuste de la tensión umbral. Para que el sistema de detección propuesto no produzca un colapso en la estructura, es conveniente trabajar con tensiones bajas entre los electrodos del sistema. Como que la tensión inducida en la

puerta del transistor es aún menor, conviene que el dispositivo ya conduzca alrededor de una tensión de puerta cercana a los 0V y de este modo, evitar la zona de corte del transistor. Por ello es necesario que los transistores tengan tensiones umbrales negativas que es una situación distinta a la que nos encontramos con un transistor NMOS de una tecnología estándar CMOS, tal como se muestra en la figura 2.16. En este trabajo, se proponen valores de tensión umbral negativas. Con estos valores de tensión umbral se asegura que el transistor siempre conduce para pequeñas tensiones aplicadas a la puerta, los niveles de corriente son detectables y se evita el colapso por atracción electrostática.

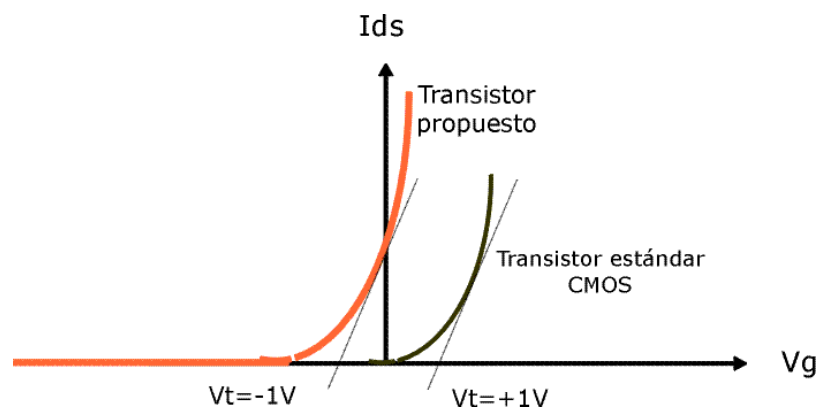


Figura 2.16: Esquema de la característica I_{ds} - V_g de un transistor estándar CMOS y del transistor a diseñar que se propone

En la figura 2.16 se muestra un dibujo esquemático de la característica I_{ds} - V_g para un transistor estándar y el transistor que se propone. Con un transistor con tensión umbral negativa se asegura que el transistor siempre conduzca para tensiones de puerta V_g cercanas a cero.

Ajuste de la tensión umbral

La tensión umbral es un parámetro tecnológico importante para el diseño de estas estructuras. La tensión umbral tiene que estar, por lo tanto, calculada

y optimizada en función de la zona en la que esté trabajando el transistor. Para realizar el ajuste a la tensión umbral, se realizaron unas simulaciones que buscan las dosis y energías adecuadas para fabricar un transistor que conduzca para $V_g = 0V$.

Se considera obleas de silicio como substrato tipo p $<100>$ de 10^{15} cm^{-3} . Para las simulaciones tecnológicas, se usa el programa de simulación ATLAS, del paquete de software SILVACO. Con este programa se puede simular todos los procesos térmicos, oxidaciones, implantaciones, depósito de polisilicio y se pueden definir los contactos, fuente, drenador y puerta de forma bidimensional. Los parámetros de interés han sido la tensión umbral y las corrientes de fuga en el canal del transistor NMOS. Mediante la implantación es posible el ajuste preciso y localizado del dopaje bajo el óxido de puerta para el ajuste uniforme de la tensión umbral. En la figura 2.17 se muestra un corte transversal para un transistor simulado mediante ATLAS.

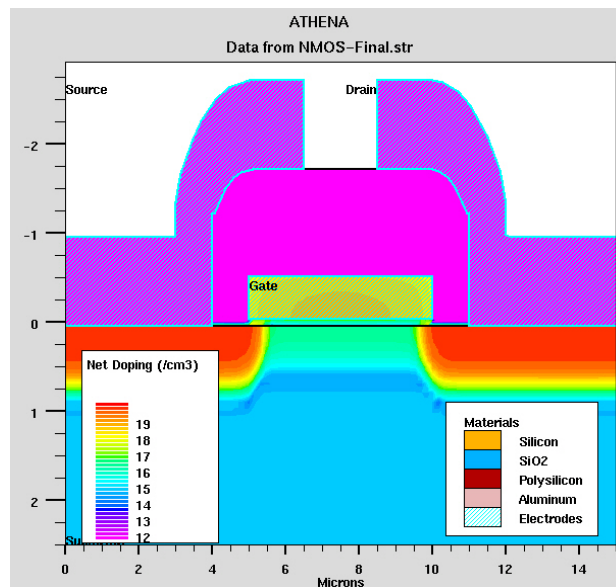


Figura 2.17: Corte transversal del transistor NMOS simulado

La figura 2.18 representa la característica Id-V para el transistor MOS con las implantaciones y energías elegidas para un tamaño de puerta de transistor de anchura y longitud de 15 micras ($W=L=15 \mu\text{m}$) para obtener valores de tensiones negativas de -1V , -3V y -5V .

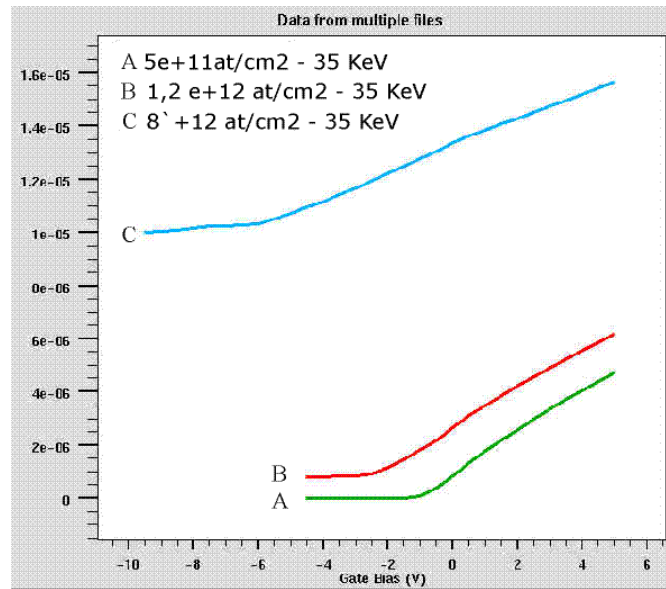


Figura 2.18: Característica Id-V para las implantaciones elegidas

En la tabla 2.1 se muestran las dosis, energías, valores de las corrientes de fuga y tensión umbral obtenidas por simulación.

DOSIS DE FÓSFORO (at/cm^2)	ENERGÍA (KeV)	Vt (V)	I fuga ($\mu\text{A}/\mu\text{m}$)
5 e11	35	- 1,5	1e-11
1,2 e12	35	- 3,5	1e-6
8 e12	35	- 5,5	1e-5

Tabla 2.1: Valores esperados en la tensión umbral para las implantaciones elegidas

De las simulaciones se deduce que la curva se desplaza hacia la izquierda cuando aumenta la dosis y se mantiene constante la energía de la implantación de fósforo. Pensando que se quiere obtener valores de la

tensión umbral de $-1V$, $-3V$ y $-5V$. para asegurar que la tensión umbral sea negativa y el transistor siempre conduzca.

En la tabla 2.1 se muestran los valores de corrientes de fuga para cada dosis y energía. Dado que el principio de detección está basado en el cambio de corriente inducido en el canal del transistor de señal en función de una variación de tensión aplicada al sistema, estas intensidades de fuga pueden resultar importantes en función del nivel de corriente que se tiene en zona de trabajo. Por tanto, se concluye que la implantación mas adecuada para trabajar es la que produce una tensión umbral de $-1V$ (5×10^{11} at/cm² a 35 KeV).

2.5. – Proceso de fabricación de las estructuras propuestas en tecnología de micromecanizado en superficie. Versión 2

Para la fabricación de estas estructuras mecánicas móviles ha sido necesario diseñar un juego de máscaras (con referencia CNM136) con nueve niveles cuya descripción se detalla en el anexo A.

A continuación se detalla el proceso genérico para la fabricación de las estructuras micromecanizadas en superficie en sus dos versiones: doble puerta "DP" y puerta extendida "PEXT". Los esquemas que se muestran para visualizar el estado del proceso, se corresponden a una estructura puente tipo doble puerta.

El proceso de fabricación consta de 76 etapas. Se utilizan obleas de 100 mm de diámetro y 525 μm de espesor, tipo P <100> con dosis de Boro de 10^{15} cm⁻³. Tras la limpieza inicial se procede a una oxidación seca de 500 Å a 950°C y al depósito por LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) de una capa de nitruro de 1175 Å. Mediante un proceso de fotolitografía y primera máscara o nivel, se definen las zonas activas y la zona de campo. Tras grabar el nitruro, se hace la implantación de campo con una dosis de

boro de $5,5 \times 10^{12}$ at cm^{-2} y energía de 150 KeV utilizando la resina y el nitruro de máscara.

Después del decapado de la resina se procede a la oxidación de campo tipo LOCOS. Se realiza una oxidación húmeda para la obtención de un óxido grueso de 10.000 \AA a 1100°C . En la figura 2.19a se muestra el esquema del perfil de la zona del transistor llegado a este punto.

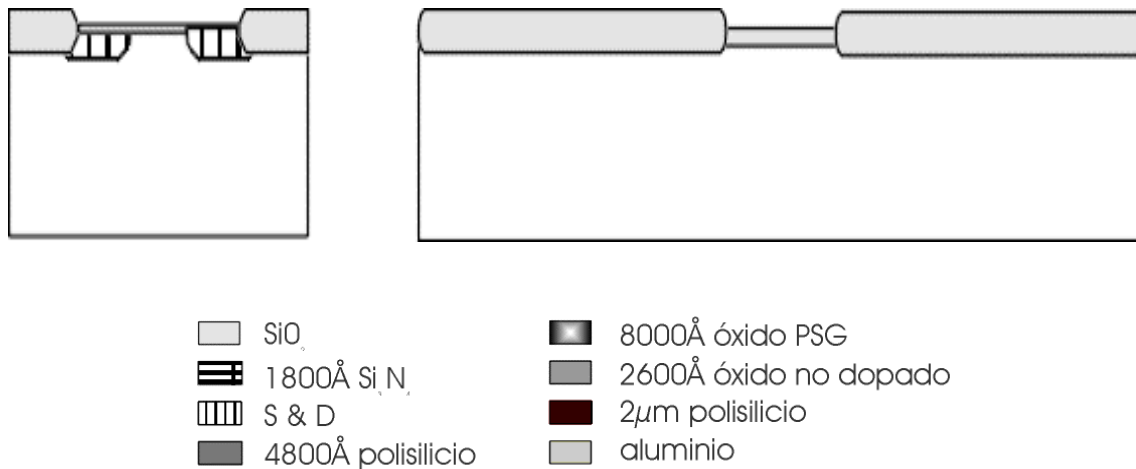


Figura 2.19a: Sección transversal del transistor después del proceso LOCOS en zona activa y en zona de campo

Se elimina toda la capa de nitruro y se procede al ajuste de tensión umbral del transistor mediante implantación de fósforo según las condiciones siguientes mostradas en la tabla 2.1. Se ha elegido una dosis de implantación de fósforo de 5×10^{11} at/ cm^2 y 35 keV de energía para obtener una tensión umbral de -1V .

A continuación se elimina el óxido de 500 \AA se realiza la oxidación de puerta de 780 \AA . Posteriormente, se depositan 4800 \AA de polisilicio y se dopa con POCL3. Este polisilicio es el que hace de puerta de transistor NMOS. Posteriormente se procede al decapado del PSG (Phosphoro silicon glass) que aparece en el polisilicio durante el proceso de dopaje. Mediante proceso fotolitográfico se graba el polisilicio con la segunda máscara y se procede a

la implantación de iones fósforo para formación de la fuente y del drenador. Hasta este punto, la fabricación del transistor se considera estándar salvo las implantaciones para ajuste de la tensión umbral. A partir de este momento, aparecen las etapas específicas correspondientes a la fabricación del microsistema.

Para la formación de contactos se utilizan dos máscaras. Con la primera se hace la apertura del óxido con la tercera máscara mediante grabado húmedo. A continuación se deposita una capa de nitruro de silicio con un espesor de 1800 Å. Hay que asegurarse de que al realizar el depósito de nitruro, éste entre en contacto con la superficie del silicio. De este modo se asegura que en el posterior grabado húmedo del óxido de sacrificio, no quedará alterado ni el óxido de puerta ni el óxido de campo. Mediante la cuarta máscara se abre la capa de nitruro en los contactos y descubre el polisilicio de la puerta flotante de los transistores en alguno de los dispositivos. En la figura 2.19b se muestra un esquema de las estructuras sin y con nitruro para zona de transistor y zona de área electrostática.

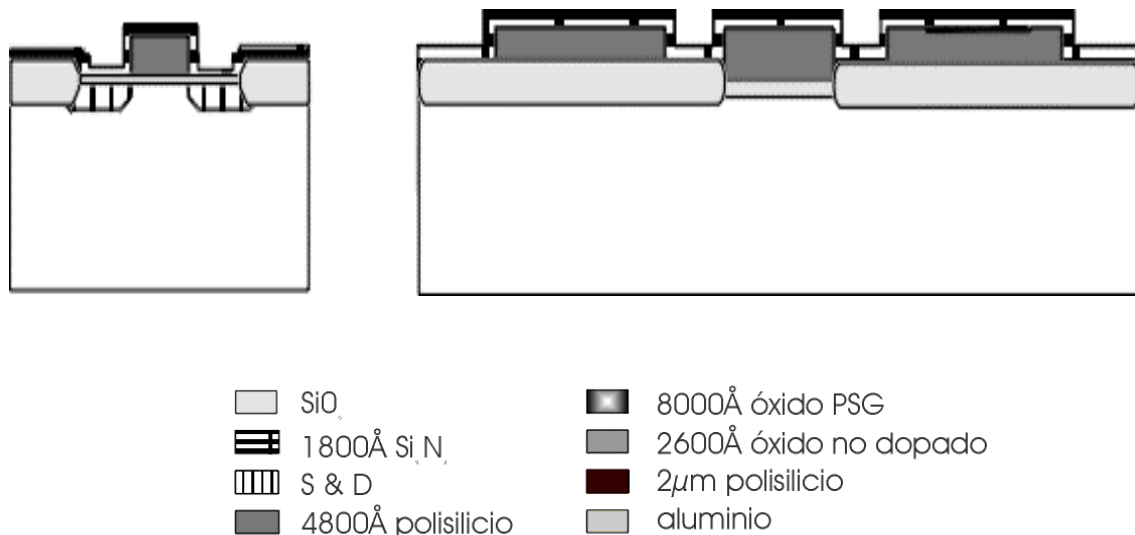


Figura 2.19b: Secuencia de un corte transversal para zona de transistor y área electrostática con nitruro

Llegado a este punto se tienen fabricados los transistores NMOS a falta de los contactos de metal.

A continuación se procede al depósito de la capa sacrificial que está compuesta por dos óxidos. Primero se deposita un óxido PSG de 8000 Å. Mediante quinto nivel se graba este PSG y define la zona de sacrificio. A continuación, se deposita una capa de 2600 Å de óxido no dopado. Mediante sexto nivel se graba este óxido que define la zona de anclaje de las estructuras. El "gap" de los dispositivos viene definido como la suma de los grosores de estos dos óxidos, con un grosor final de aproximadamente 1µm. En la figura 2.19c se muestra un esquema una vez definido la zona de sacrificio.

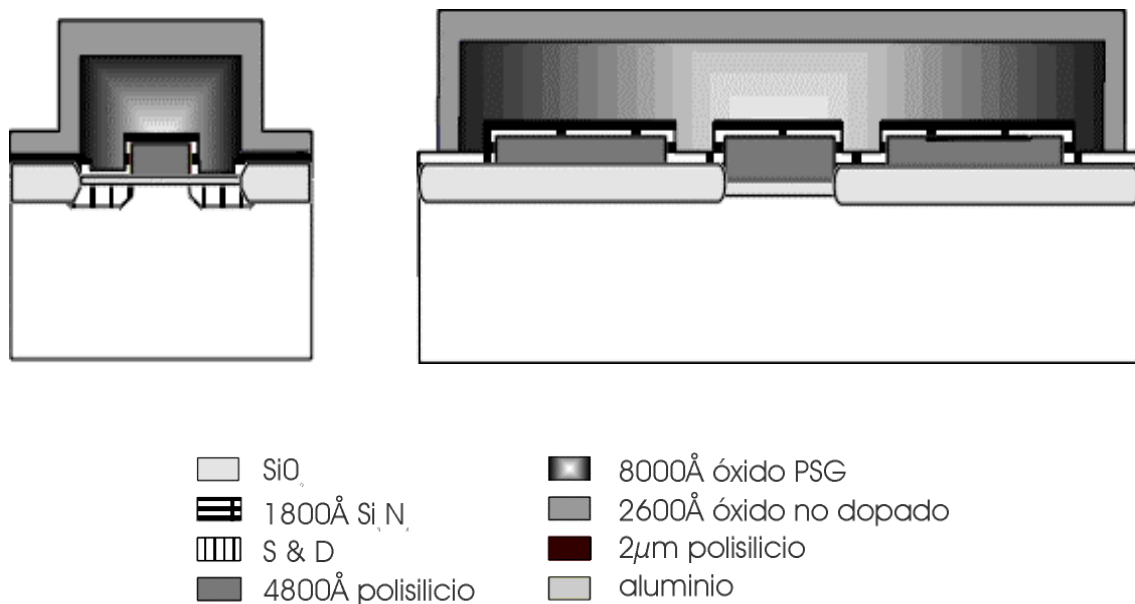


Figura 2.19c: Cortes del dispositivo una vez definida la capa de óxido de sacrificio

Una vez definida la capa sacrificial y la zona de anclaje se procede al depósito del polisilicio que forma la capa estructural. Este proceso se realiza en dos fases, para la optimización de estrés y su gradiente en la capa que deberá actuar como estructura móvil. Primero se deposita 1 µm de

polisilicio, se implanta con fósforo a una dosis de 2×10^{15} at/cm² y a una energía de 120 KeV. Seguidamente, se deposita otra capa de $1 \mu\text{m}$ de polisilicio y se implanta bajo las mismas condiciones. Se procede al recocido de las capas 950°C durante 4h en ambiente inerte, se define por fotolitografía y grabado seco el área MST con séptimo nivel. En la figura 2.19d se muestra un corte transversal definida la capa estructural.

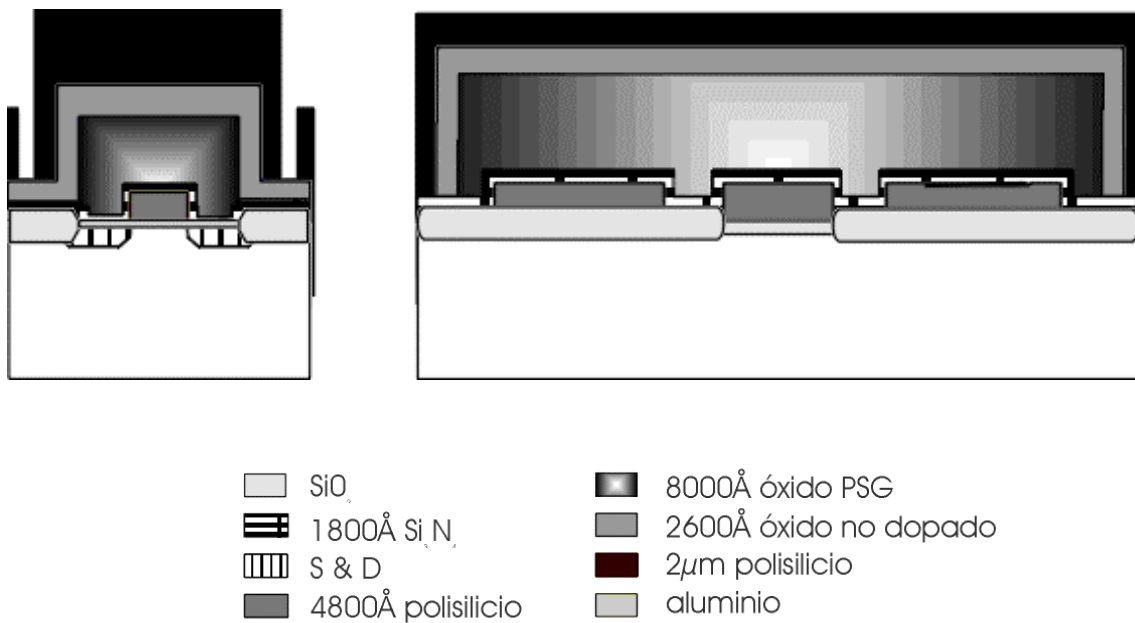


Figura 2.19d: Corte transversal una vez definida la capa estructural por polisilicio MST

A continuación se procede a la eliminación de la capa sacrificial mediante el grabado húmedo en HF al 49% durante 7 minutos. En este punto, interesa sobreatacar ya que la capa de sacrificio tiene que estar totalmente eliminada. En la figura 2.19e se muestra un esquema para la estructura tipo puente con apertura de nitruro llegado a este punto. Aunque el dibujo no está hecho a escala, se ha querido enfatizar que la superficie del puente de polisilicio sigue la topografía de las capas inferiores, produciéndose pequeños escalones del orden de 2000 a 5000 Å para un espesor de 2

micras. Sin embargo estos escalones no deberían afectar a la planaridad de la estructura

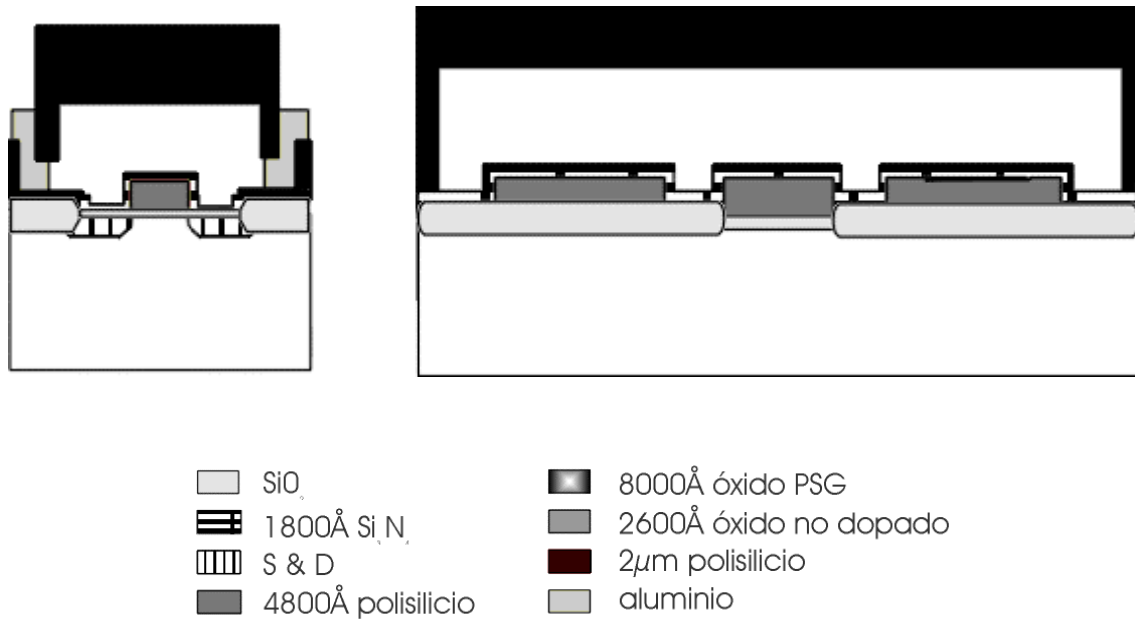


Figura 2.19e: Corte longitudinal de una estructura tipo puente después del grabado de la capa sacrificial en HF

Una vez grabada la capa sacrificial se procede al sellado de la cavidad tal y como ya se ha explicado en el proceso tecnológico versión 1 (ver figura 2.2) y a la definición de las pistas de aluminio y pads de soldadura mediante el depósito de 1 µm de aluminio y su posterior grabado por RIE con octava máscara. Se hace el recocido del aluminio y el proceso continua la definición de las estructuras de polisilicio de 2 µm por fotolitografía con el noveno nivel.

Previo al grabado del polisilicio tal y como ya se ha descrito en el apartado de mejoras tecnológicas (ver apartado 2.2.d), se incluye una etapa especial para realizar un precorte de las obleas antes del proceso final, de forma que una vez se tienen las estructuras liberadas, las obleas no deban pasar por otro proceso de corte que podría producir la ruptura o el pegado de las estructuras libres al sustrato. En la figura 2.19f se muestra la fotografía de

una oblea precortada en módulos de 9 chips con surcos de 325 μm . Se eligen módulos de 9 chips porque los chips individuales son de $2 \times 2 \text{ mm}^2$ y resultan muy pequeños en primer lugar para la realización del corte y en segundo lugar para su manipulación.

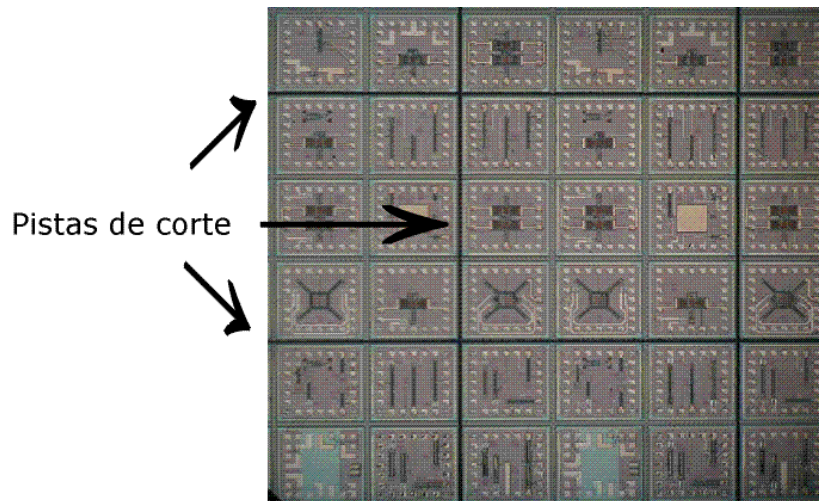


Figura 2.19f: Muestra de la oblea precortada en módulos formados por 9 chips.

En la etapa final se procede al grabado seco (RIE "Reactive Ion Etching") del polisilicio de 2 micras para la definición de las estructuras. Una vez asegurada la liberación de las estructuras, se procede a la eliminación de la capa de resina por plasma. Eliminada la resina, queda totalmente finalizado el proceso de fabricación y se puede pasar a la caracterización de las obleas. En la figura 2.19g se muestra un corte transversal para la zona de transistor una vez finalizado el proceso.

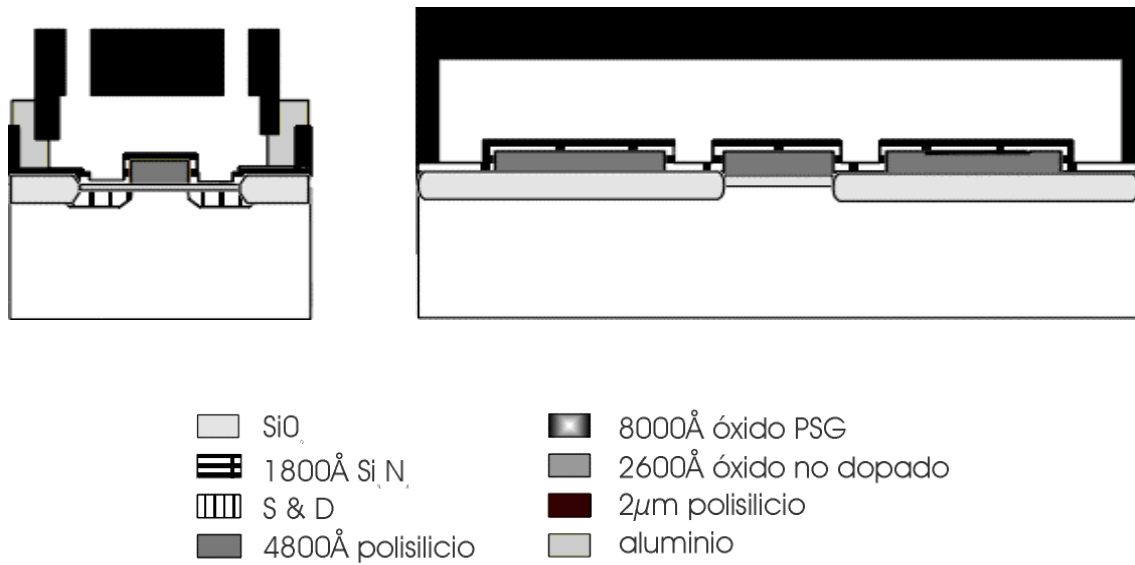


Figura 2.19g: Corte transversal de la zona de transistor.

En la figura 2.20 a y b se muestran las estructuras tipo puente PEXT y DP respectivamente, una vez fabricadas.

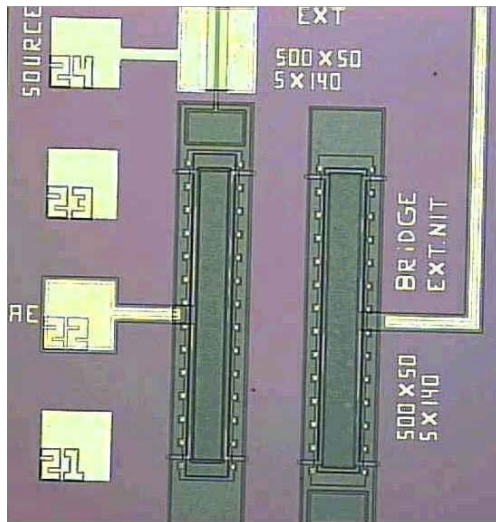


Figura 2.20 a

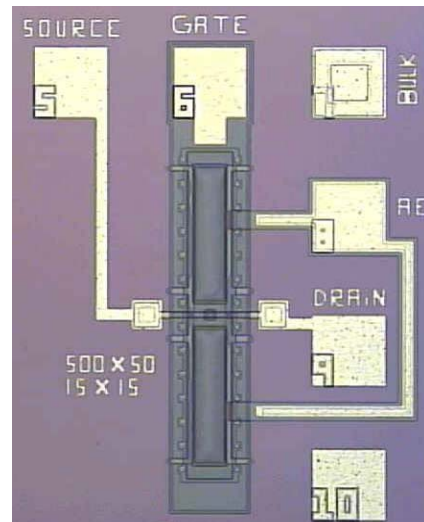


figura 2.20 b

Figura 2.20: (a) Fotografía de dos puentes PEXT con y sin apertura de la capa de nitruro de 500x50 μm² fabricado (b) Fotografía de un puente DP de 500x50 μm² fabricado

En la figura 2.21 se muestra una fotografía SEM de una estructura fabricada.

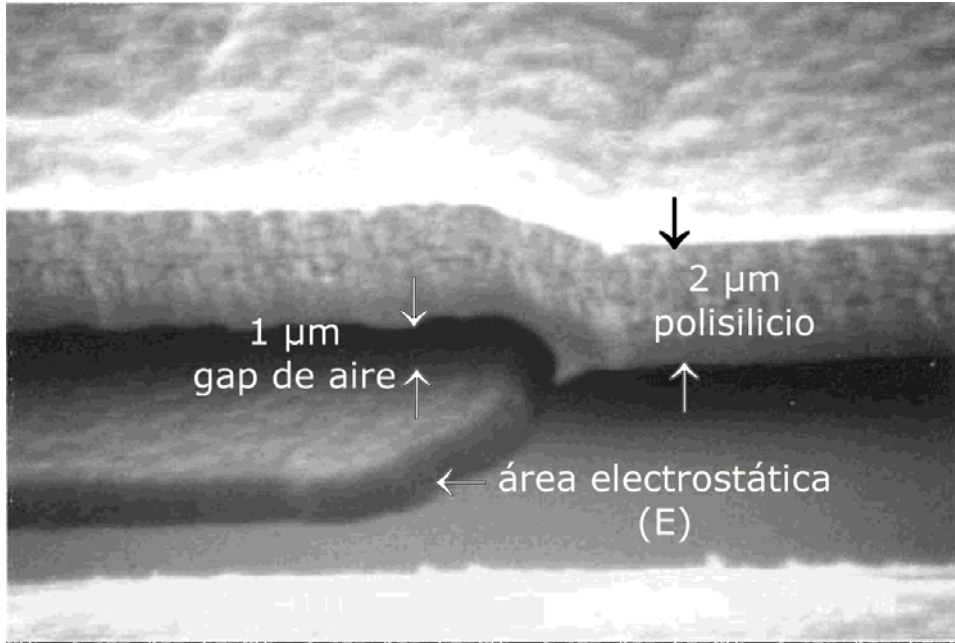


Figura 2.21: Fotografía SEM de la zona de área electrostática en estructura tipo puente DP

En la fotografía de la figura 2.21 se muestra la zona de área electrostática (E) definida de polisilicio estándar de 4800\AA sobre la que hay un gap de $1\ \mu\text{m}$ de aire y sobre la que hay depositados $2\ \mu\text{m}$ de polisilicio. Esta fotografía advierte de cómo el voltaje es considerado un parámetro crítico.

2.6. – Caracterización de las estructuras a bajas frecuencias

Se han fabricado estructuras tipo puente en tecnología en superficie de $500 \times 50\ \mu\text{m}^2$ de dimensiones y en sus dos versiones propuestas, es decir en doble puerta (DP) y puerta extendida (PEXT). Comprobar la resonancia de forma óptica para estas estructuras es complicado por tanto, se realiza una primera caracterización cuasi-estática de los dispositivos para comprobar en primer lugar que las estructuras funcionan y se mueven. Incluso se puede

comprobar los voltajes de colapso experimentales con los estimados por simulación que se han realizado en un trabajo anterior [183]. El cálculo del voltaje de colapso es una especificación muy importante en el diseño de las estructuras, ya que este valor va a limitar el voltaje máximo que se puede aplicar a las estructuras sin que éstas colapsen. Sencillamente, el fenómeno del colapso se produce cuando dos electrodos vecinos se encuentran a una distancia suficientemente pequeña de forma que, la atracción electrostática debido al voltaje aplicado (V) no puede ser compensada por la fuerza mecánica. Calcular el voltaje de colapso de forma analítica es muy complicado y por ello se resuelve el problema utilizando el método de los elementos finitos (FEM) ya que de este modo se puede realizar una simulación en 3-D del sistema completo. Suponiendo que la fuerza electrostática tiene una distribución uniforme sobre la superficie del puente, se han realizado las simulaciones en forma de presiones electrostáticas. Utilizando este tipo de aproximación, no es necesario el acoplamiento de los campos eléctrico y mecánico. Esta aproximación sólo es válida en aquellas estructuras que son más largas que anchas. Los voltajes de colapso obtenidos por simulación para distintas dimensiones del puente, se muestran en la tabla 2.2.

L x W ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	V_{pi} (V)
300 x 50	18
500 x 50	6
800 x 5	2,2

Tabla 2.2: Valores del voltaje de colapso simulados para diferentes dimensiones de puentes en tecnología superficial.

2.6.1. - Caracterización cuasi-estática de estructuras puerta extendida (PEXT)

Se consideran estructuras tipo puente PEXT de $500\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ con apertura de nitruro. El esquema eléctrico de cómo se ha realizado la caracterización eléctrica se muestra en la figura 2.22.

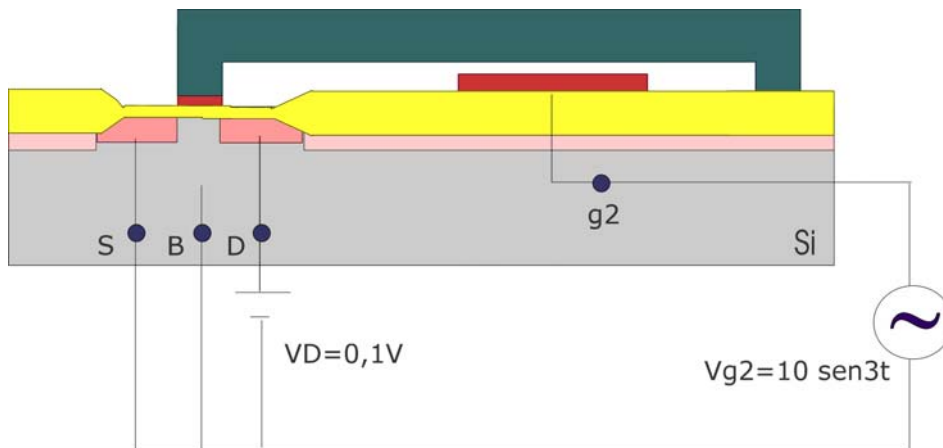


Figura 2.22: Esquema eléctrico del dispositivo puente PEXT

Con los resultados obtenidos después de la caracterización, por un lado se comprueba que efectivamente el dispositivo se mueve. El movimiento puede observarse de forma óptica a través de la luz que es reflejada. Por otro lado, se obtiene la característica $I_d - V_g$, tal y como muestra la figura 2.23. Con la característica se puede obtener experimentalmente el voltaje de colapso de la estructura.

En la figura 2.23 se observan dos gráficas superpuestas que corresponden a los barridos de $-6,5V$ a $+6,5V$ y $+6,5V$ a $-6,5V$. Se observa que la gráfica que se obtiene es simétrica y se pone de manifiesto una histéresis en el comportamiento de la estructura. Por otro lado, fundamentalmente se pueden observar tres zonas bastante diferenciadas. En primer lugar, las zonas que se encuentran a ambos extremos de la gráfica, donde la estructura colapsa. A continuación aparece una zona definida entre dos

saltos. Esta zona es la que corresponde al efecto de la fuerza de sticking (o de pegado) y que produce un retardo en el movimiento de la estructura. Finalmente, la zona central es una zona que corresponde a la zona óptima de trabajo donde la estructura se mueve de forma mecánica y no colapsa. En la figura 2.24 se muestra de forma más detallada esta zona central de la respuesta de la estructura sin colapsar

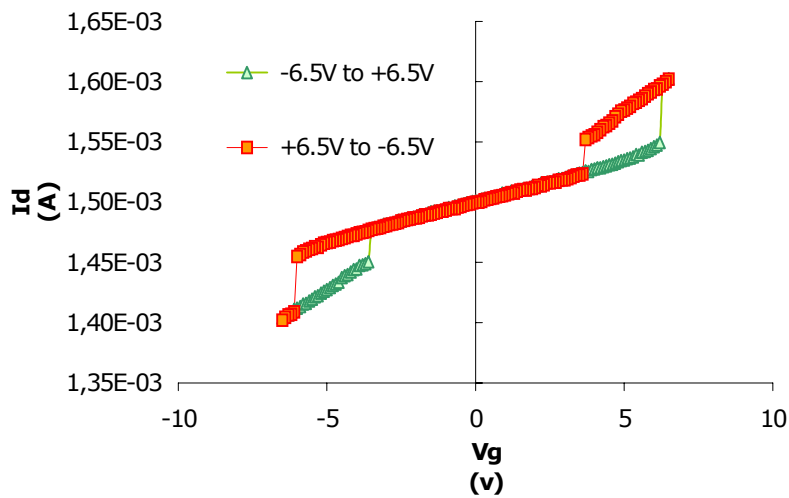


Figura 2.23: Característica Id - Vg para el puente PEXT de 500 µm x 50 µm

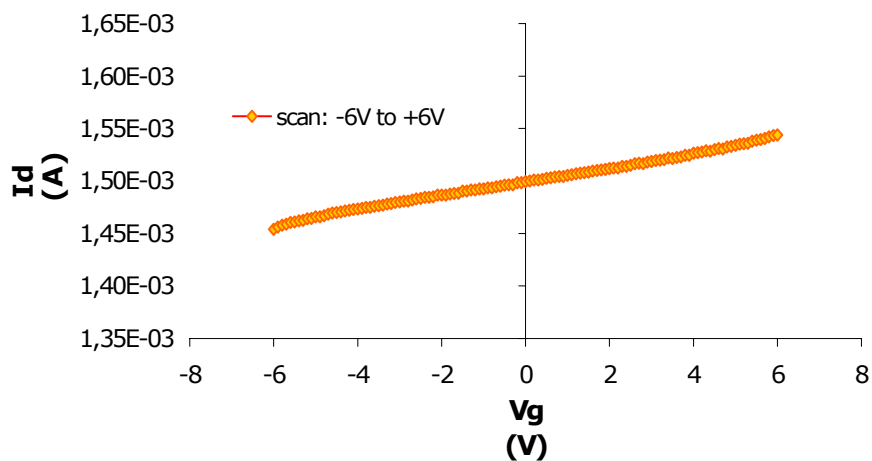


Figura 2.24: Característica Id-Vg para estructura puente PEXT en zona donde no hay colapso

Se puede observar que el barrido se realiza entre +6V y -6V. En la respuesta de la estructura se observa como han desaparecido los saltos del nivel de corriente con lo cual, de esta gráfica se concluye que el voltaje de colapso es de 6,1 V (de media) tal y como se había calculado por simulación.

2.6.2. - Caracterización cuasi - estática de las estructuras doble puerta (DP)

A continuación se consideran estructuras tipo puente DP de $500\ \mu\text{m} \times 50\ \mu\text{m}$ con apertura de nitruro. La figura 2.25 muestra el esquema eléctrico de cómo ha sido realizada la medida experimental.

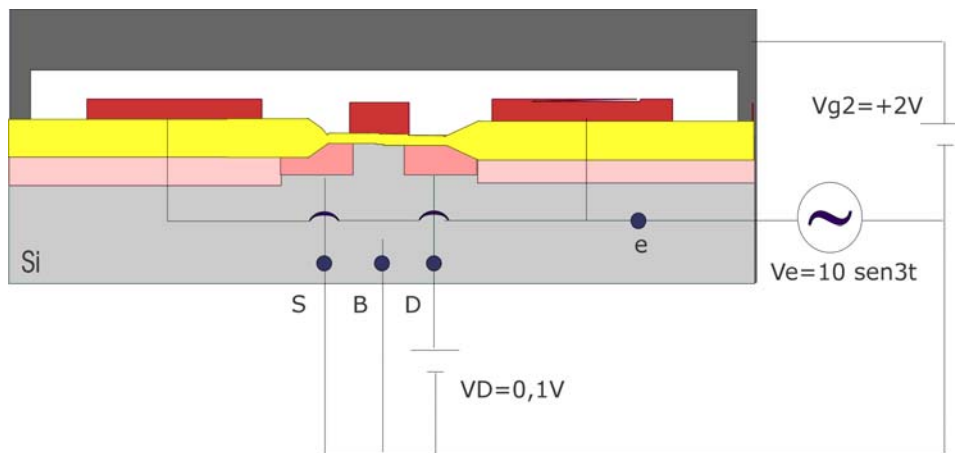


Figura 2.25: Esquema eléctrico del dispositivo DP

De forma análoga al dispositivo puerta extendida, se comprueba que efectivamente el dispositivo doble puerta se mueve. Observando el movimiento de la estructura por la luz que se refleja sobre la superficie del mismo. Por otro lado, se obtiene la característica $I_d - V_g$ tal y como muestra la figura 2.26.

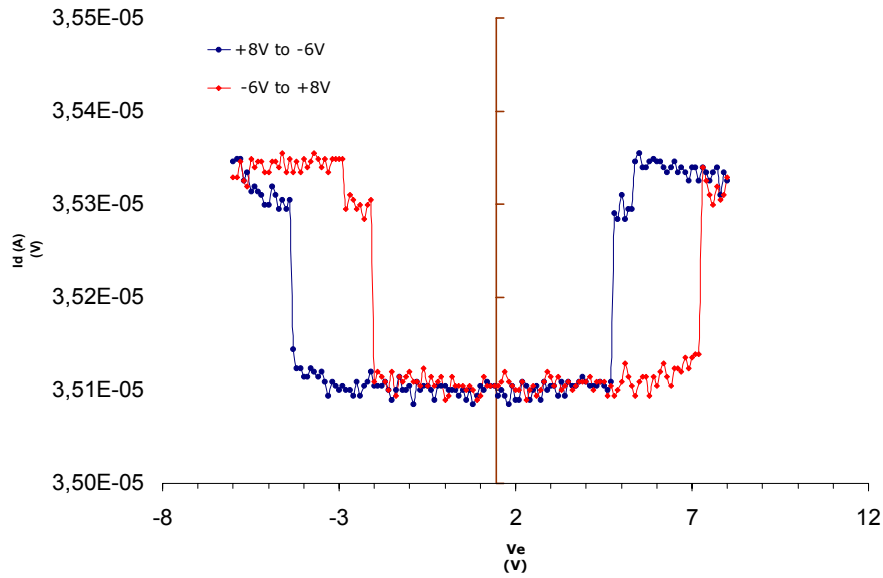


Figura 2.26: Característica $I_d - V_g$ para el puente DP de $500 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$

Se caracteriza una estructura de este tipo DP, cuando el voltaje de excitación varía de +8V a -6V y de -6V a +8V, mientras que al puente se le aplica una tensión de +2V. Se pone de manifiesto una histéresis en el comportamiento de la estructura. Este hecho explica que, en ambos casos, la estructura comienza en colapso y no comienza a moverse hasta que la fuerza elástica del puente se iguala con la fuerza de "sticking" y de atracción electrostática. El voltaje de colapso para este tipo de estructuras es de 5,8V (de media). Hay que resaltar que la curva no está centrada en +2V como era de esperar sino en +1,5V. Este desplazamiento puede ser debido a la aparición de cargas. Si el voltaje de excitación de las áreas electrostáticas varía entre -4,3V y 7,2V, no se observa colapso de las estructuras, ver figura 2.27.

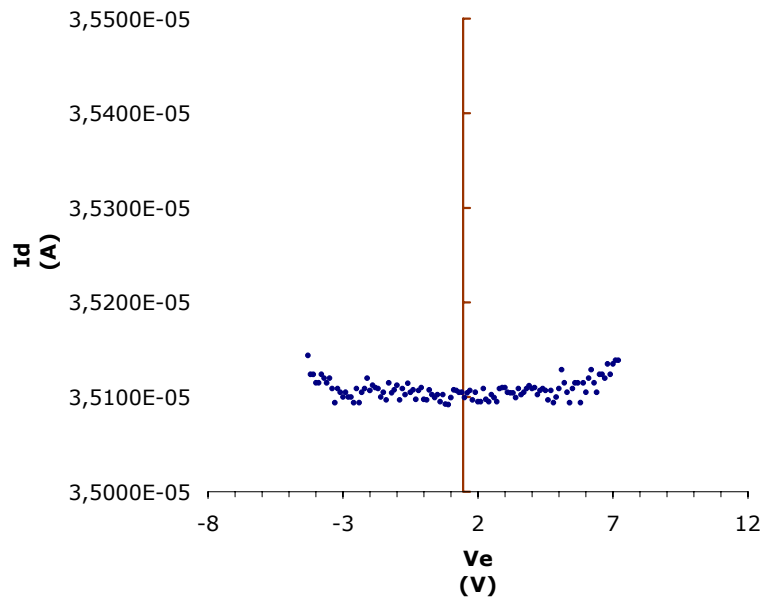


Figura 2.27: Respuesta de la estructura DP cuando V_e varía de $-4,3$ V a $7,2$ V y el puente está a $+2$ V.

2.7. – Conclusiones

Se han fabricado estructuras tipo puente con tecnología de micromecanizado en superficie. La tecnología que se presenta es una evolución de una tecnología que estaba desarrollada en el CNM. Esta tecnología dispone de una capa estructural de polisilicio de $2 \mu\text{m}$ de espesor sobre una capa sacrificial de $1 \mu\text{m}$ de óxido de silicio.

Se ha diseñado un conjunto de estructuras móviles verticales tipo puente con dimensiones entre $100 \mu\text{m}$ y $800 \mu\text{m}$ de longitud y entre $5 \mu\text{m}$ y $50 \mu\text{m}$ de anchura. Los dispositivos que se fabrican tienen un principio de actuación electrostático mediante un electrodo de polarización situado bajo el polisilicio de $2 \mu\text{m}$ de grosor.

Una de las principales aportaciones del trabajo ha sido el diseño de un sistema de detección del movimiento mediante la integración de dispositivos

activos tipo transistor en los que la tensión de puerta depende de la posición de la estructura de polisilicio flotante. Este método ya se había utilizado anteriormente pero en esta ocasión, se ha mejorado diseñando dos tipos de transistores MOS con puerta de polisilicio que se han denominado de "doble puerta o DP" y de "puerta extendida o PEXT", con el objetivo de conseguir unas características eléctricas estables para dichos transistores.

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

También se ha incidido en la simplificación del proceso de corte de los dados con las estructuras móviles mediante la introducción de una etapa de precorte de las obleas antes de liberar las estructuras. De esta forma la individualización de los dados se puede realizar de forma manual sin necesidad de utilizar una sierra, que provocaría el colapso de las estructuras al ponerlas en contacto con el agua de refrigeración de la cuchilla de corte. Este fenómeno llamado "sticking", que consiste en el pegado de las estructuras muy cercanas a la superficie por tensión superficial cuando están en contacto con líquidos, es uno de los principales problemas que debe ser solucionado durante el proceso de fabricación de las estructuras.

Se han simulado los transistores con el programa de simulación tecnológica para determinar las dosis y energías adecuadas para tener tensiones umbrales negativas (de $-1V$) para que los transistores puedan operar con tensiones de puerta en torno a los $0V$.

El proceso tecnológico desarrollado consta de 76 etapas e incluye 9 etapas fotolitográficas. Se ha observado que, uno de los pasos más críticos para conseguir estructuras móviles con mínimo gradiente de estrés, es la etapa de depósito y recocido de la capa de polisilicio estructural. El proceso de fabricación ha servido también para corroborar que las mejoras tecnológicas propuestas han sido efectivas y que el proceso de fabricación está suficientemente consolidado dando resultados uniformes.

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

Las estructuras tipo puente que han sido caracterizadas a bajas frecuencias demuestran que las tipo puerta extendida son más adecuadas como sensores que las doble puerta con las dimensiones fabricadas. Para ajustar la versión doble puerta como resonador, será necesario rediseñar el tamaño del transistor para conseguir corrientes de drenador mayores y por tanto, incrementos de corriente detectables.

Se concluye que, las estructuras fabricadas en tecnología de micromecanizado superficial son útiles para la integración de sensores de gases tipo resonante. Sin embargo, es necesario conseguir unos procesos de grabado que no afecten negativamente a las características eléctricas de

los transistores de medida. En este sentido, se puede pensar en diseñar nuevas estructuras con nuevas dimensiones y tamaños de transistor para obtener mayores sensibilidades.

