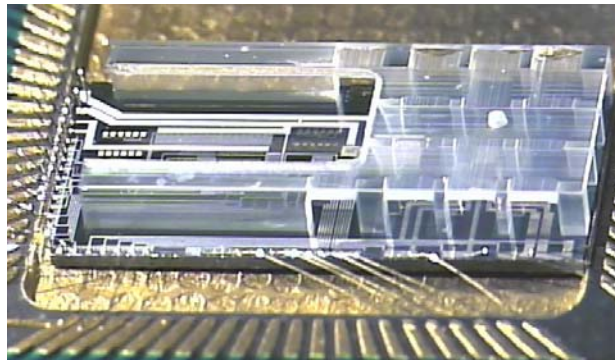




Universitat Autònoma de Barcelona

Escola de Doctorat i de Formació Continuada

Desarrollo de microestructuras de vidrio/silicio para la fabricación de sensores de gases con circuitería CMOS asociada



Memoria presentada por
María Jesús López Bosque
para optar al grado de Doctor
en Ingeniería Electrónica
Bellaterra, Diciembre 2003

Universitat Autònoma de Barcelona

ETSE

Departament d'Electrònica

Desarrollo de microestructuras de vidrio/silicio para la fabricación de sensores de gases con circuitería CMOS asociada

Memoria presentada para optar al título de Doctora en Ingeniería Electrónica

Programa de Doctorado: Ingeniería Electrónica

Autora: María Jesús López Bosque

Directores: Carles Cané i Ballart
José Antonio Plaza Plaza

Tutor: Francesc Serra Mestres

Los Doctores Carles Cané Ballart y José Antonio Plaza Plaza, Investigador Científico y Científico Titular en el Centro Nacional de Microelectrónica del CSIC respectivamente,

Certifican:

Que la memoria “Desarrollo de microestructuras de vidrio/silicio para la fabricación de sensores de gases con circuitería CMOS asociada” que presenta la Sra. María Jesús López Bosque para optar al grado de Doctora en Ingeniería se ha llevado a cabo bajo su dirección.

Bellaterra, 1 de Diciembre del 2003

Carles Cané Ballart

José Antonio Plaza Plaza

INDICE

1. Introducción	1
1.1 Sensores de gases	1
1.2 Sensores de gases de tipo semiconductor	2
1.3 Integración monolítica de sensores de gases y la circuitería CMOS asociada	4
1.4 Soldadura anódica	5
1.5 Descripción de la estructura de vidrio/silicio para la integración de una matriz de sensores de gases	6
1.6 Descripción de la estructura de vidrio/silicio para la integración conjunta de una matriz de sensores de gases y la circuitería CMOS asociada	7
1.7 Proyecto en el que se enmarca el trabajo	8
1.8 Objetivos del trabajo	9
1.9 Organización de la memoria	10
2. Diseño y simulación de las estructuras de vidrio/silicio micromecanizadas	11
2.1 Simulación mediante el método de los elementos finitos	11
2.1.1 Hipótesis y restricciones en las simulaciones	12
2.1.2 Generación del modelo en ANSYS	13
2.2 Optimización del aislamiento térmico de las estructuras de vidrio/silicio mediante simulación	17
2.2.1 Optimización del aislamiento térmico en función de las dimensiones del vidrio	18
2.2.2 Optimización del aislamiento térmico en función de las dimensiones del silicio	21
2.2.3 Efectos de las capas dieléctricas de la membrana en el aislamiento térmico	25
2.2.4 Dimensiones finales de la estructura de vidrio/silicio para un mayor aislamiento térmico	26
2.2.5 Comparación de los resultados del modelo simplificado con un modelo más complejo para la matriz de sensores de gases sin circuitería CMOS	28
2.3 Diseño de las máscaras para la fabricación de la matriz de sensores de gases	31

2.3.1 Elección de los materiales de la matriz de sensores de gases	32
2.3.2 Diseño de la matriz de cuatro sensores de gases	36
2.3.3 Diseño de la matriz de dos sensores de gases	36
2.4 Diseño de las máscaras para la fabricación del chip que incluye una matriz de cuatro sensores de gases y la circuitería CMOS asociada	38
2.4.1 Sensor de gases	38
2.4.2 Circuitería CMOS	39
Conclusiones	41
3. Tecnología para la fabricación de las estructuras de vidrio/silicio	43
3.1 Técnicas para el micromecanizado de las obleas de vidrio	44
3.1.1 Realización de columnas en las obleas de vidrio mediante serrado mecánico	45
3.1.2 Alternativas al serrado mecánico para la definición de columnas en el vidrio	48
3.1.3 Definición de agujeros pasantes en el vidrio	51
3.1.4 Combinación de Sandblasting y serrado mecánico para la definición de columnas y agujeros pasantes en las obleas de vidrio	52
3.2 Test de soldadura anódica de obleas silicio y vidrio micromecanizadas	53
3.2.1 Soldadura anódica de obleas de silicio y vidrio con columnas micromecanizadas	53
3.2.2 Soldadura anódica de obleas de vidrio micromecanizadas con agujeros pasantes y columnas con obleas de silicio	57
3.3 Tecnología de sensores de gases	57
3.3.1 Estudio de diferentes técnicas para la fabricación de la membrana	58
3.3.2 Técnicas de dopaje de las obleas de silicio	59
3.3.3 Técnicas de reducción de esfuerzos mecánicos en membranas	63
3.3.4 Test de pistas de metal colgantes entre la membrana y el marco de silicio	65
3.3.5 Soldadura anódica de obleas de vidrio con obleas de silicio procesadas	69
3.3.6 Últimas etapas del proceso de fabricación de la matriz de sensores de gases: ataque anisotrópico y soldadura anódica	69
3.4 Estudios para la compatibilización de las tecnologías: CMOS y sensores de gases	70
3.4.1 Elección del tipo de oblea	71
3.4.2 Resistencias calefactoras	74
3.4.3 Efectos de la incorporación de la membrana dieléctrica del sensor en el bloque CMOS	75
3.4.4 Conexión CMOS/sensores de gases	76
3.4.5 Estudio del perfil de la pasivación CMOS	77

3.4.6	Compatibilidad de los materiales sensibles a gases	78
3.4.7	Análisis de la influencia de la soldadura anódica vidrio/silicio en los circuitos CMOS	80
3.4.8	Resumen de los principales puntos de compatibilización	81
	Conclusiones	82
	4. Fabricación de las estructuras de vidrio/silicio	85
4.1	Descripción de las máscaras para la fabricación de la matriz de sensores de gases	85
4.1.1	Motivos de alineamiento	86
4.2	Proceso de fabricación de la matriz de sensores de gases	89
4.2.1	Descripción de las principales etapas de fabricación	89
4.2.3	Serrado y encapsulado de los sensores	94
4.3	Principales características de la tecnología CMOS25	96
4.4	Descripción de las máscaras para la fabricación del chip mixto que incluye circuitería CMOS y sensores de gases	98
4.5	Proceso de fabricación de la matriz de sensores de gases incluyendo la circuitería CMOS	99
4.5.1	Incidencias y puntos críticos en el proceso de fabricación	112
	Conclusiones	116
	5. Caracterización de las estructuras de vidrio/silicio	119
5.1	Estructuras de test	119
5.1.1	Estructuras de test del proceso de fabricación de los dispositivos que incluyen una matriz de sensores de gases	119
5.1.2	Estructuras de test del proceso de fabricación de los dispositivos mixtos que incluyen una matriz de cuatro sensores de gases y la circuitería CMOS asociada	121
5.2	Caracterización eléctrica de los dispositivos	125
5.2.1	Estabilización de las resistencias de platino y polisilicio	126
5.2.2	Cálculo del TCR del platino y del polisilicio	128
5.2.3	Medidas eléctricas en oblea: resistencias calefactoras	130
5.2.4	Análisis del aislamiento térmico en los diferentes diseños	130
5.2.5	Consumo de los diferentes dispositivos	138
5.3	Análisis de la robustez mecánica de las estructuras de vidrio/silicio: Pruebas mecánicas y térmicas	139
5.3.1	Pruebas mecánicas	140

5.4 Caracterización química	141
Conclusiones	142
6. Conclusiones	145
7. Lista de referencias	149
8. Lista de publicaciones	161
8.1 Artículos en revistas	161
8.2 Contribuciones en congresos internacionales	161
8.3 Contribuciones en congresos nacionales	162
ANEXO A: Especificaciones de los gases a detectar	163
ANEXO B: Tecnología CMOS25	165

1 Introducción

El objetivo de este trabajo es la fabricación de un sistema sensor capaz de trabajar a alta temperatura con bajo consumo. La incorporación de la circuitería en el mismo chip permite reducir su tamaño y tener un encapsulado más compacto que en el caso híbrido.

En muchas aplicaciones los sensores de gases están sometidos a numerosas vibraciones y aceleración, motivo por el cual es necesario desarrollar sistemas sensores robustos con un alto grado de selectividad.

En este trabajo se va a fabricar un sistema sensor para el control de la calidad del aire cabinas de coches y aviones. La estructura de vidrio/silicio propuesta para la integración de una matriz de sensores de gases semiconductores con la circuitería CMOS asociada posee todos los requisitos citados anteriormente: alta robustez, bajo consumo, integración monolítica y un alto grado de selectividad gracias a la combinación de varios materiales sensibles en un mismo chip.

En este capítulo se exponen las principales aplicaciones y tipos de sensores de gases (apartado 1.1). A continuación, se presenta la evolución de los sensores de gases semiconductores, el estado del arte de la integración monolítica de sensores de gases y circuitería (apartado 1.3) y la descripción de las estructuras de vidrio/silicio desarrolladas en esta tesis.

Este trabajo se ha llevado a cabo gracias al soporte económico del proyecto europeo GlassGas. En el apartado 1.7 se proporciona información sobre las principales líneas de investigación de este proyecto, así como la lista de los grupos participantes.

Finalmente, se definen los objetivos de este trabajo y la organización de la memoria.

1.1 Sensores de gases

Los sensores de gases son dispositivos que transforman una señal química en una eléctrica. El crecimiento de estos sensores en los últimos años ha sido enorme debido a la cantidad de aplicaciones que poseen. Los principales campos industriales en los que ya se han implantado pueden verse en la tabla 1.1.

Existen numerosos tipos de sensores de gases que pueden clasificarse en función de los diferentes mecanismos que utilizan en la detección.

- Sensores de gases sensibles a cambios de masa: estos sensores poseen un material sensible sobre un elemento vibrante, de tal forma que un cambio en la masa ese traduce en una variación de la frecuencia de resonancia
- Sensores de gas de efecto de campo (GASFET): detectan cambios en el voltaje de puerta de un MOSFET cuya puerta es un metal sensible a gases
- Pellistores o sensores catalíticos: el principio de detección está basado en el cambio producido en el valor de la resistencia un hilo de platino con la temperatura

- Sensores ópticos: este tipo de sensor utiliza como principio de detección la medida de diferentes propiedades ópticas como la absorción, la transmisión o la fluorescencia.
- Células electroquímicas: el sensor consta de un electrodo metálico en contacto con el gas a detectar y un segundo electrodo de referencia en contacto con una concentración de referencia de dicho gas. El principio de medida se basa en el potencial electroquímico generado, cuyo valor depende de la concentración de gas.
- Sensores de gases de tipo semiconductor: estos sensores se basan en el cambio del valor de la resistencia en un óxido metálico en presencia de un gas debido a la absorción del gas a medir.

Campo	Aplicación
Automóvil	Control de calidad del aire en coches, emisiones, etc.
Aeroespacial	Control de calidad del aire en cabinas, emisiones, etc.
Agricultura	Control de pesticidas y fertilizantes
Seguridad	Detección de incendios, de humo, etc.
Medioambiental	Detección de la polución en el aire
Alimentación	Olores y sabores en comidas y bebidas, etc.
Control industrial	Control de procesos: petroquímicos, calidad del agua, etc.

Tabla 1.1: Aplicaciones industriales más habituales de los sensores de gases

Dadas las ventajas que presenta la miniaturización, todos los sensores de gases descritos anteriormente salvo la célula electroquímica ya se han miniaturizado. La principal mejora de los microsensores frente a los sensores convencionales es su reducido tamaño. Se tienen dispositivos con menor consumo y rápida respuesta, gracias a las pequeñas dimensiones de sus componentes, lo que implica un corto tiempo de medida en los sensores, a la vez que presentan una alta fiabilidad. Otra ventaja importante es la mayor portabilidad gracias al bajo consumo y pequeño tamaño del dispositivo.

En este trabajo se ha optado por el uso del sensor de gases de tipo semiconductor debido al gran desarrollo existente de este tipo de dispositivo en los últimos años, especialmente en la búsqueda de materiales con una alta selectividad. Otro punto importante para esta elección es el alto grado de compatibilidad con la tecnología microelectrónica que permite la integración monolítica del sensor de gases y la circuitería.

1.2 Sensores de gas tipo semiconductor

Dado que en esta estructura se va a implementar una matriz de sensores de gases de tipo semiconductor, en este apartado se va a describir la evolución de este tipo de dispositivos desde su nacimiento hasta la actualidad.

En 1953 Brattain y Bardeen [1] descubrieron que la absorción de un gas en la superficie del germanio producía un cambio en el valor de la conductividad de dicho material. Los sensores de gases semiconductores están basados en esta propiedad. Para realizar la detección miden el cambio producido en la resistencia del material sensible en presencia

de ciertos gases. La primera propuesta para la realización de un sensor de gases basado en este método fue hecha por Seiyama et al a principios de los 60 [2]. Poco después apareció el primer sensor semiconductor comercial de SnO₂ Taguchi, a principios de los 70 manufacturado por Figaro Engineering Inc. (Japan) [3]. Desde entonces el desarrollo de estos dispositivos ha sido enorme tanto desde del punto de vista de los materiales sensibles como de substratos.

La investigación realizada en el campo de óxidos metálicos sensibles a gases está orientada a la mejora de las características de éstos (sensibilidad y selectividad) así como en el desarrollo y optimización de las diferentes técnicas de depósito [4, 5].

Para que el cambio producido en el valor de la resistencia sea apreciable, o lo que es lo mismo, para tener una buena sensibilidad y selectividad, estos dispositivos deben trabajar a una temperatura elevada, generalmente entre 200 y 400°C [6, 7], dependiendo del gas a detectar y del material sensible. Así, una vez definidas las especificaciones del dispositivo sensor en función de su aplicación y por tanto de los gases a detectar, debe ponerse especial atención en la elección del óxido metálico y su temperatura de trabajo [8-11]. Para poder discernir mejor entre los diferentes gases existe la posibilidad de añadir especies dopantes (Al, Pt, Pd, Ti, Au, etc.) al material sensible [12-15]. De ese modo, se tiene un sistema con una alta sensibilidad, selectividad y rapidez en la detección de una cierta concentración de gases.

El material sensible de los sensores se deposita sobre un substrato que actuará como soporte mecánico del dispositivo. Para este tipo de sensores de gases son necesarios soportes mecánicos robustos con la zona activa aislada térmicamente para no tener un elevado consumo al calentar los materiales sensibles a la temperatura de trabajo.

Hasta la fecha, los sensores semiconductores utilizan fundamentalmente a la alúmina como substrato. Pero aunque poseen una alta robustez mecánica, presentan un elevado consumo (en el rango de los vatios) [16].

Otra opción es el uso del silicio en sustitución de los substratos cerámicos. Este material presenta muy buenas propiedades eléctricas y mecánicas. El gran desarrollo existente de la tecnología microelectrónica del silicio ha favorecido el crecimiento de estos microsensores sobre estos nuevos substratos. El uso del silicio permite abaratar el coste de los dispositivos sensores gracias a la fabricación en modo *batch* (utilizada en circuitos integrados). De ese modo, los dispositivos no se fabrican uno a uno, sino que se fabrican muchos dispositivos simultáneamente sobre una misma oblea de silicio y posteriormente se sierran individualmente. Otra ventaja que se desprende de este tipo de fabricación es la obtención de dispositivos prácticamente iguales con una geometría muy bien definida y por tanto una alta reproducibilidad en las medidas. No obstante, el uso del silicio como soporte mecánico para sensores de gases presenta un consumo elevado debido a la alta conductividad térmica de este material (figura 1.1).

Para minimizar el consumo se construyen substratos de silicio micromecanizados con membranas dieléctricas, estructuras más aisladas térmicamente (figura 1.2). Los materiales más utilizados en este tipo de membranas son el nitruro de silicio (Si₃N₄) y el dióxido de silicio (SiO₂), materiales con baja conductividad térmica [17, 18].

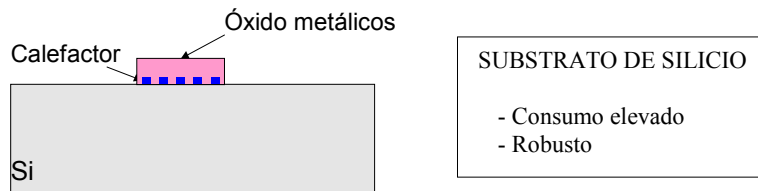


Figura 1.1: Esquema de un sensor de gases semiconductor sobre un sustrato de silicio

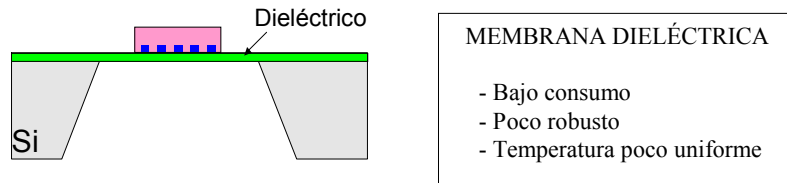


Figura 1.2: Esquema de un sensor de gases semiconductor sobre un sustrato de silicio micromecanizado con membrana dieléctrica

Para conseguir una temperatura homogénea en el área activa, algunos autores dan diferentes alternativas. Möller et al [19] propone colocar en el área activa una capa delgada de un material con una alta conductividad térmica como el diamante o el SiC. Algo similar propone Cavicchi et al. [20] utilizando aluminio para reducir los gradientes térmicos en el área activa. La técnica desarrollada en el CNM consiste en poner una placa de silicio bajo la membrana (ver figura 1.3), más fácil de implementar [21]. Así, la temperatura en el área activa presenta buenos resultados de homogeneidad.

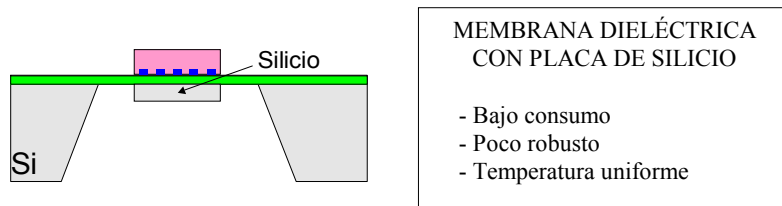


Figura 1.3: Esquema de un sensor de gases semiconductor sobre un sustrato de silicio micromecanizado con membrana dieléctrica y placa homogeneizadora de silicio.

Los sustratos de silicio micromecanizados con membranas dieléctricas y una placa homogeneizadora de la temperatura son una buena opción para conseguir una temperatura elevada y homogénea en el área activa del sensor con un bajo consumo, pero su mayor inconveniente es la fragilidad que presentan especialmente cuando para minimizar al máximo el consumo de estas estructuras las membranas se hacen muy delgadas. Para mejorar las prestaciones de estos dispositivos se incorporan una matriz con varias capas sensibles en la misma zona activa teniendo un sistema compacto con mayor selectividad [22, 23]. Esto supone un aumento en las dimensiones de las plataformas y con ello un incremento en la fragilidad de las membranas.

1.3 Integración monolítica de sensores de gases y la circuitería CMOS asociada

Los sensores de tipo semiconductor se integran en sustratos de silicio micromecanizados por lo que son buenos candidatos para la integración conjunta con circuitos CMOS. La fabricación de los sensores de gases y los circuitos CMOS están basados en dos procesos tecnológicos diferentes y la integración conjunta requiere un esfuerzo en la compatibilización de ambas tecnologías.

El primer paso para la integración de un sensor de gases con circuitería es la búsqueda de sensores compatibles con tecnologías CMOS. Con esta idea aparecieron las primeras publicaciones que demuestran que un sensor de gases puede fabricarse a partir de un proceso CMOS estándar. En estos primeros dispositivos fabricados con una *foudry* comercial, la resistencia calefactora es de polisilicio [24-26]. Los pasos extras para la fabricación del sensor de gases completo (depósito de las capas delgadas sensibles a gases y el grabado del silicio para la formación de estructuras aisladas térmicamente) se añaden posteriormente como un bloque adicional fuera del proceso CMOS.

El interés en desarrollar nuevas tecnologías para la integración monolítica de sensores y CMOS está aumentando en los últimos años. Esta integración conjunta se ve favorecida por los amplios avances en la compatibilización de los procesos de fabricación microelectrónicos con las técnicas de micromecanizado de silicio y depósito de capas delgadas (metales y óxidos metálicos) [27-29].

Laconte et al. [30] propone el uso de resistencias calefactoras de polisilicio (compatibles CMOS) y membranas dieléctricas aprovechando el óxido enterrado de las obleas SOI. Este tipo de sustrato es compatible con el micromecanizado de silicio para la formación de la membrana y el depósito de capas delgadas para la definición de los electrodos del sensor (Au) y los materiales sensibles a gases (WO_3 y SnO_2). Estos pasos se realizaron al final del proceso de fabricación fuera del bloque estándar.

Udrea y Gardner [31, 32] presentan en el 2002 un estudio sobre el estado de los sensores de gases compatibles CMOS con especial énfasis en el uso de sustratos SOI para definir las membranas dieléctricas y de MOSFETs como resistencias calefactoras.

Ninguna de las publicaciones mencionadas anteriormente reportan la implementación de la electrónica en el mismo chip. Sólo en el año 2002, aparecen dos publicaciones de Barrentino et al. y Afridi et al. [33, 34] que presentan los primeros sensores semiconductores de gases integrados monolíticamente con electrónica fabricados dentro de un proceso CMOS. En ambos casos la resistencia calefactora es de polisilicio y el depósito de los óxidos metálicos sensibles a gases se define en un post-proceso CMOS. Los materiales sensibles a gases deben trabajar a una temperatura de 300-350°C. En este tipo de dispositivos es importante desarrollar estructuras con resistencias calefactoras que proporcionen una temperatura alta y uniforme en la zona activa donde se integraran los óxidos metálicos para tener una buena sensibilidad y selectividad.

En este trabajo se desarrolla una estructura de vidrio/silicio que presenta un buen aislamiento térmico y una elevada robustez mecánica permitiendo la integración de una

En este trabajo se desarrolla una estructura de vidrio/silicio que presenta un buen aislamiento térmico y una elevada robustez mecánica permitiendo la integración de una matriz de sensores de gases. Aprovechando el aislamiento térmico, también se ha diseñado una estructura de vidrio/silicio similar que permite incorporar la circuitería CMOS para el control y procesado de las señales de la matriz de sensores de gases en la zona a baja temperatura. En la primera parte de este capítulo se describen ambas estructuras.

1.4 Soldadura anódica

La soldadura anódica entre obleas es una técnica muy utilizada para la fabricación de MEMS (*Micro Electro Mechanical System*) junto con las técnicas microelectrónicas y de micromecanizado del silicio. La patente de la soldadura anódica entre metales y vidrios es del año 1968 [35]. Los principales parámetros para este tipo de soldadura (temperatura y voltaje) dependen fundamentalmente de los materiales que se quieran pegar y quedaron perfectamente definidos un año más tarde [36].

Esta técnica permite fabricar una gran cantidad de microsistemas en los que es necesario realizar soldaduras herméticas entre silicio y vidrio. Otra ventaja de la soldadura anódica entre vidrio y silicio es su capacidad para reducir los esfuerzos mecánicos que se producen en los dispositivos durante su encapsulado. Los acelerómetros, los sensores de presión y los μ TAS (*Micro Total Analysis Systems*) son ejemplos típicos en los que la soldadura anódica forma parte del dispositivo [37-42].

En el microsistema que se desarrolla en este trabajo se va a utilizar la soldadura anódica como un pre-encapsulado a nivel de oblea que proporciona a la estructura mayor robustez.

1.5 Descripción de la estructura de vidrio/silicio para la integración de una matriz de sensores de gases

La estructura de vidrio/silicio que se presenta en este trabajo (ver figura 1.4), es una alternativa a los substratos mencionados anteriormente, está basada en las obleas de silicio micromecanizadas con capas dieléctricas. La principal novedad que presenta este dispositivo es la introducción de un nuevo material, vidrio, que proporciona a la estructura una alta robustez mecánica de las membranas manteniendo el aislamiento térmico y por tanto un bajo consumo.

Esta estructura mecánica donde se integrarán los sensores de gases está compuesta por una plataforma central y un marco de silicio en la parte exterior de la estructura. Ambas zonas están conectadas entre sí por vidrio, material que posee una baja conductividad térmica por lo que la plataforma central queda aislada térmicamente.

Para optimizar aún más este aislamiento térmico y tener un menor consumo se reduce la mayor parte del vidrio dejando únicamente unas columnas. Así, la plataforma de silicio queda sujeta por las columnas de vidrio a las que se encuentra soldada anódicamente. Existen dos zonas bien diferenciadas térmicamente, por un lado la plataforma central de silicio (zona caliente), y por otro lado el marco de silicio (zona fría).

La zona activa del sensor (zona caliente) se integrará sobre la plataforma central de silicio y se calentará hasta alcanzar una temperatura elevada de trabajo (300-400 °C) mediante una resistencia calefactora de platino o polisilicio. En dicha zona, también se implementará el resto de los componentes de la matriz de sensores de gases semiconductores (electrodos y materiales sensibles).

En esta estructura existe la posibilidad de integrar varios sensores diferentes juntos sobre la misma plataforma, lo que proporciona al dispositivo una mayor selectividad y sensibilidad, si se combinan las señales de los distintos dispositivos. Para tener sensores diferentes basta depositar distintos materiales sensibles o usar diferentes especies dopantes o bien variar la geometría en cada caso.

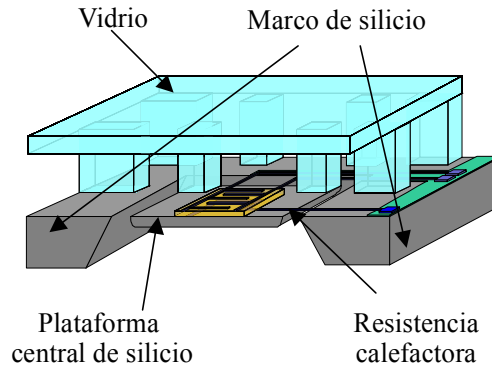


Figura 2.1: Dibujo esquemático del microsistema propuesto.

1.6 Descripción de la estructura de vidrio/silicio para la integración conjunta de una matriz de sensores de gases y circuitería CMOS asociada

El alto aislamiento térmico que presenta el dispositivo descrito anteriormente hace posible integrar una parte CMOS en el mismo chip, en el marco de silicio (zona a baja temperatura en comparación con la de trabajo de los sensores de gases). Para ello basta ampliar el tamaño del marco de silicio. En la figura 1.5, se muestra un dibujo esquemático de un chip mixto que combina una parte correspondiente a los sensores de gases y una parte CMOS.

Esta incorporación supone una gran ventaja ya que en un mismo chip se incluirán una matriz de sensores de gases semiconductores y la circuitería necesaria para su control. De ese modo, se obtiene un sensor con mayor funcionalidad y mejores especificaciones.

La complejidad de este dispositivo frente a los reportados por otros autores (apartado 1.2) queda perfectamente justificada por la incorporación del vidrio que aporta una gran robustez mecánica sin un sensible aumento del consumo.

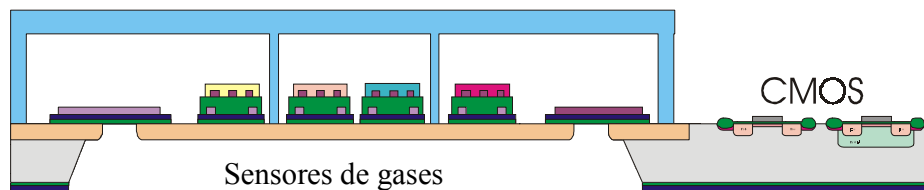


Figura 1.5: Estructura de vidrio/silicio para la integración conjunta de un sensor de gases y la circuitería CMOS asociada para el control de la temperatura y procesado de las señales de los sensores.

1.7 Proyecto en el que se enmarca el trabajo

Este trabajo se ha podido llevar a cabo gracias al soporte económico del proyecto europeo: *Silicon/Glass microstructures for innovative gas sensing systems (GlassGas-II)* financiado por la Comisión Europea (IST-99-19003), cuyo principal objetivo es el desarrollo de nuevos materiales, dispositivos y tecnologías para la fabricación de un sensor de gases de tipo semiconductor robusto de bajo consumo.

Las principales líneas de investigación desarrolladas en el proyecto pueden agruparse en los siguientes puntos:

- Desarrollo de nuevos materiales sensibles a gases (capa delgada y gruesa) y técnicas de depósito que permitan controlar los materiales para mejorar su sensibilidad.
- Desarrollo de estructuras micromecanizadas en silicio, robustas y aisladas térmicamente, que permitan la integración de sensores de gases
- Desarrollo de nuevos métodos para la caracterización química de los dispositivos (medidas de gases)
- Desarrollo de subsistemas de análisis de una serie de sensores trabajando en serie o en paralelo
- Integración electrónica: compatibilidad tecnológica entre sensores de gases y procesos CMOS

Dada la amplitud de materias que se estudian en el proyecto participan diferentes grupos de investigación con experiencia en estos campos. La lista de participantes con sus principales funciones puede verse en la tabla 1.2.

Una parte importante del proyecto es el estudio de la compatibilización de la tecnología de sensores de gases con procesos CMOS para obtener un *smart sensor* (sensor con electrónica de control y procesado en el mismo chip) para su aplicación a la detección de gases. La incorporación de la circuitería CMOS en el mismo chip permite mejorar las señales de los sensores en términos de robustez y disminución de ruido. Por otro lado, la electrónica dota al sistema sensor completo de un gran valor añadido desde el punto de vista de su funcionalidad y hace posible tener un encapsulado más eficiente.

Esta estructura tiene numerosas aplicaciones en diferentes campos como el control industrial, medioambiental, del automóvil, aerospacial, doméstico y biomédico, pero inicialmente se restringe su uso al control de la calidad del aire y la detección de fuego

en cabinas de coche y aviones. Así, al principio del proyecto se definieron los gases que interesaba detectar para estas aplicaciones. En el anexo A se presentan los gases a detectar, así como el rango de interés y la sensibilidad a cada gas.

Nombre del participante	País	Principales funciones en el proyecto
CNM: Centro Nacional de Microelectrónica (CSIC)	España	- Tecnología para sustratos micromecanizados de silicio - Compatibilidad sensor/CMOS - Integración electrónica
IPM: FhG-Institut for Physical Measurements	Alemania	- Desarrollo de materiales - Compatibilidad Sensor/CMOS - Caracterización química de sensores
EADS: European Aeronautic Defence and Space Company.	Alemania	- Desarrollo de materiales y sustratos - Sistemas de análisis de gases
CS: Capteur Sensors	Reino Unido	- Desarrollo de materiales - Sistemas de análisis de gases
UCL: Chemistry Department. University College London	Reino Unido	- Desarrollo de materiales - Sistemas de análisis - Caracterización química de sensores

Tabla 1.2: Listado de los grupos de investigación del proyecto Glassgas y sus principales funciones.

1.8 Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo el diseño y fabricación de una nueva estructura termo-mecánica de vidrio/silicio que se pueda combinar con capas semiconductoras sensibles a gases, capaz de trabajar a una alta temperatura manteniendo un bajo consumo. Además debe presentar una alta robustez mecánica, portabilidad, altas prestaciones y fiabilidad.

Estos nuevos sustratos de vidrio/silicio compatibles con los procesos CMOS permite la integración monolítica de una matriz de sensores de gases con la electrónica asociada. Dada la complejidad de esta estructura y la utilización de varias tecnologías en su fabricación es necesario llevar a cabo numerosos estudios que proporcionen resultados parciales cuya unión permita finalmente la fabricación de esta estructura completa. Con estas ideas los principales objetivos de este trabajo son:

- Análisis térmico mediante simulaciones FEM para optimizar las dimensiones del vidrio y del silicio que proporcionen el máximo aislamiento térmico de la zona activa del sensor para tener el menor consumo
- Estudio de diferentes técnicas para realizar el micromecanizado del vidrio con la geometría adecuada para el tipo de dispositivo a fabricar. En este caso es necesario buscar una técnica que proporcione buenos resultados para la definición de columnas y de agujeros pasantes en el vidrio
- Las obleas de vidrio micromecanizadas y las de silicio procesadas van a soldarse anódicamente, por lo que será necesario analizar la compatibilidad del micromecanizado del vidrio con el procesado del silicio y la soldadura anódica.

- Desarrollo de plataformas de silicio aisladas térmicamente con una alta robustez mecánica compatibles con el depósito de materiales sensibles a gases
- Estudios de compatibilización para la integración de sensores de gases y circuitería CMOS en el mismo chip
- Definición de una nueva tecnología mixta para la fabricación monolítica de sensores de gases y la circuitería CMOS asociada
- Diseño de las máscaras para la fabricación de una matriz de sensores de gases (con y sin circuitería CMOS) con un bajo consumo a partir de los resultados de las simulaciones y los estudios tecnológicos
- Fabricación de los dispositivos que incluyen una matriz de sensores de gases
- Fabricación de los dispositivos mixtos que incluyen una matriz de sensores de gases con la circuitería CMOS asociada

1.9 Organización de la memoria

Con la descripción de la memoria se pretende dar una visión global del trabajo y de cómo está organizado.

En este primer capítulo se realiza una breve introducción sobre los sensores de gases semiconductores con sus principales características, se describen las dos estructuras de vidrio/silicio que servirán de soporte mecánico para la integración de un sistema para la detección de gases. Se presentan los objetivos del trabajo, el proyecto en el que se enmarca este trabajo y la organización de la memoria.

En el segundo capítulo se describe el estudio térmico realizado mediante simulación para optimizar al máximo posible su aislamiento térmico y disminuir el consumo, sin olvidar las limitaciones dadas por la tecnología.

Los principales estudios tecnológicos llevados a cabo para la fabricación de la matriz de sensores de gases se describen en el capítulo 3. También se detallan los principales puntos estudiados para la compatibilidad de las tecnologías CMOS y de sensores de gases. Finalmente se da la secuencia para la fabricación de estos dispositivos mixtos.

El capítulo 4 proporciona la información de las máscaras utilizadas para el procesado del silicio y las etapas de los dos procesos de fabricación completos de las estructuras de vidrio/silicio incluyendo su encapsulado. Una vez fabricado el dispositivo se procede a su caracterización. Los datos experimentales se muestran en el capítulo 5.

Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta memoria y las posibles líneas de investigación que se han abierto a partir de este trabajo.