

Trabajo Práctico

de TAI 2

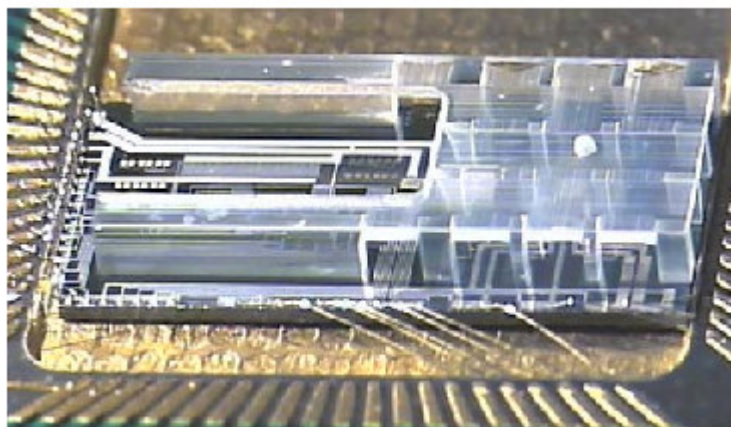
TEMA: Desarrollo de

Microestructura de vidrio/silicio

Para la fabricación de sensores

de gases con circuitería CMOS

Asociada



Diómedes J. Rivelli Zea

*****2005*****

INTRODUCCIÓN

El objetivo de esta nueva tecnología de fabricación es la construcción 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.. 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 realidad se va a fabricar un sistema sensor orientados 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.

Se expondrán las principales aplicaciones y tipos de sensores de gases, además de presentar la evolución de los sensores de gases semiconductores, el estado del arte de la integración monolítica de sensores de gases y circuitería y la descripción de las estructuras de vidrio/silicio

Esta investigación y ejecución del proyecto se esta llevado a cabo por GlassGas. Cabe destacar que una parte importante del proyecto que realiza dicha empresa es el continuo estudio de nuevas tecnología de fabricación para 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.

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 sgte. tabla

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 : Aplicaciones industriales más habituales de los sensores de gases

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.

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.

El material sensible de los sensores se deposita sobre un sustrato 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 sustrato. Pero aunque poseen una alta robustez mecánica, presentan un elevado consumo (en el rango de los vatios) .

En esta innovadora opción utilizaremos el silicio en sustitución de los sustratos 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 sustratos. 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 sustratos 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 (Si_3N_4) y el dióxido de silicio (SiO_2), materiales con baja conductividad térmica .

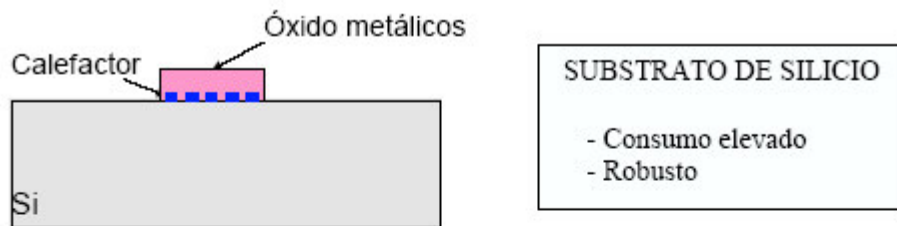


Figura 1.1: Esquema de un sensor de gases semiconductor sobre un sustrato de silicio

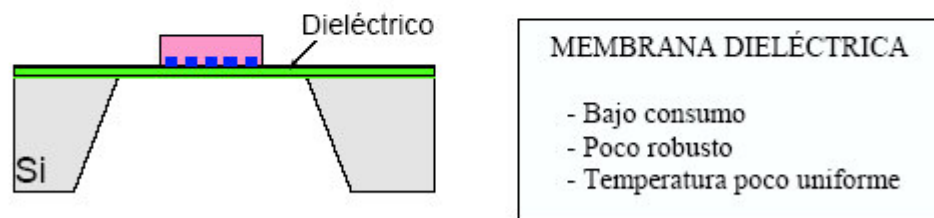


Figura 1.2: Esquema de un sensor de gases semiconductor sobre un sustrato de silicio micromecanizado con membrana dieléctrica

Para conseguir una temperatura homogénea en el área activa, algunos autores dan diferentes alternativas. Möller 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 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 . Así, la temperatura en el área activa presenta buenos resultados de homogeneidad.

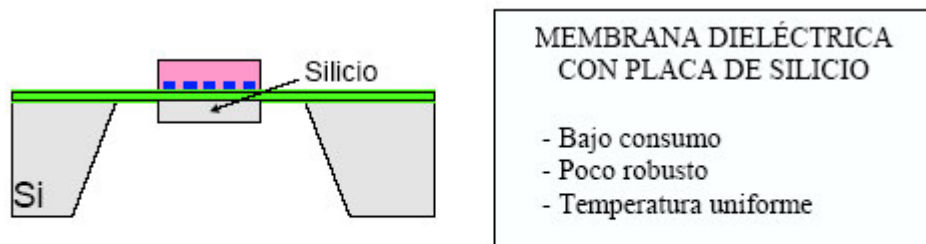


Figura 1.3: Esquema de un sensor de gases semiconductor sobre un sustrato de silicio micromecanizado con membrana dieléctrica y placa homogeneizadora de silicio.

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 . Esto supone un aumento en las dimensiones de las plataformas y con ello un incremento en la fragilidad de las membranas.

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 calefactores que proporcionen una temperatura alta y uniforme en la zona activa donde se integraran los óxidos metálicos para tener una buena sensibilidad y selectividad. Es por este motivo que se optó por el desarrollo de 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.

LISTADO DE LOS GRUPOS DE INVESTIGACIÓN/EJECUCIÓN DEL PROYECTO GLASSGAS Y SUS PRINCIPALES FUNCIONES.

NOMBRE DEL PARTICIPANTE	PAÍS	PRINCIPALES FUNCIONES EN EL PROYECTO
CNM: Centro Nacional de Microelectrónica (CSIC)	España	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnología para substratos micromecanizados de silicio - Compatibilidad sensor/CMOS - Integración electrónica
IPM: FhG-Institut for Physical Measurements	Alemania	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollo de materiales - Compatibilidad Sensor/CMOS - Caracterización química de sensores
EADS: European Aeronautic Defence and Space Company	Alemania	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollo de materiales y substratos - Sistemas de análisis de gases
CS: Capteur Sensors	Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollo de materiales - Sistemas de análisis de gases
UCL: Chemistry Department. University College London	Reino Unido	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollo de materiales - Sistemas de análisis -Caracterización química de sensores

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.

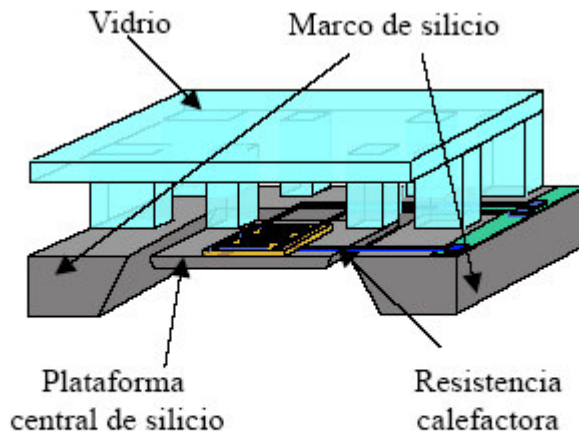


Figura 2.1: Dibujo esquemático del microsistema propuesto.

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 queda perfectamente justificada por la incorporación del vidrio que aporta una gran robustez mecánica sin un sensible aumento del consumo.

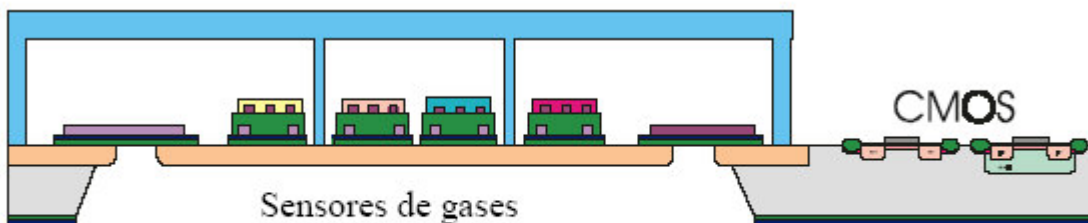


Figura 1.5: Estructura de vidrio/silicio para la integración conjunta de un sensor de gases y la circuitería CMOS asociada para el control de la temperatura y procesado de las señales de los sensores.

MATRIZ DE SENSORES DE GASES

La matriz de sensores de gases se ha diseñado teniendo en cuenta los mejores resultados en cuanto a aislamiento térmico y robustez mecánica descritos anteriormente. Se corresponde básicamente con el primer diseño descrito en el apartado anterior. Está formado por una plataforma de silicio (área activa del sensor) donde se han integrado una matriz de cuatro elementos sensibles, los electrodos y una resistencias calefactora en un nivel de metalización diferente de los electrodos.

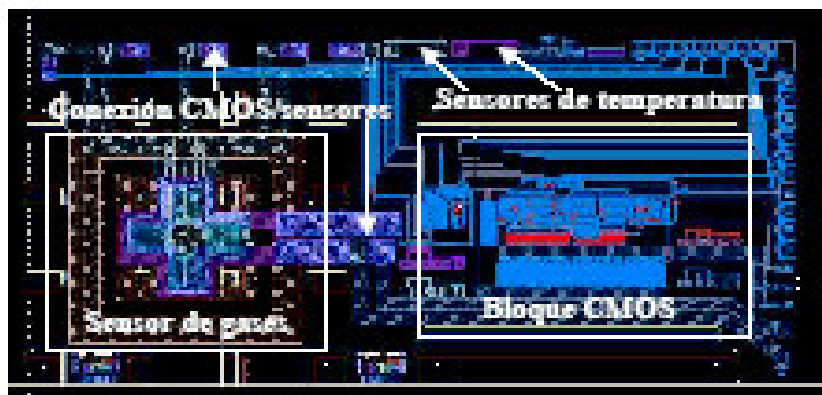


Figura 2.29 Diseño del chip mixto que incluye una matriz de cuatro sensores de gases y la circuitería CMOS asociada

En la integración conjunta de la circuitería y los sensores las mayores dificultades aparecen debido al hecho de que el sensor de gases debe alcanzar una temperatura de 300-350 °C y para ello necesita una potencia de unos 250 mW. La resistencia calefactora que se ha diseñado inicialmente para la matriz de sensores de gases tiene un valor de $300 \cdot \Omega$, de tal forma que es necesario alimentarla con 8-9 V para alcanzar la temperatura de trabajo. Este valor es demasiado elevado para el nivel de alimentación de 5V de los circuitos y por lo tanto ha sido necesario rediseñar esta resistencia haciéndola más ancha para disminuir su valor hasta $50 \cdot \Omega$.

SINTEISIS

Se ha diseñado y fabricado una estructura de vidrio/silicio para la implementación de un sistema para la detección de gases con un alto aislamiento térmico y una elevada robustez mecánica, grandes ventajas frente a los sensores de gases convencionales. El dispositivo está formado por una plataforma micromecanizada de silicio (donde se colocan los materiales sensibles) y un marco exterior. Ambas zonas están conectadas a través de unas columnas de vidrio.

Se pueden diseñar cuatro opciones diferentes para la matriz de sensores de gases:

- Matriz de cuatro sensores con diferentes materiales sensibles integrados en una misma plataforma central de silicio calentada por una única resistencia calefactora. Los cuatro sensores trabajan a la misma temperatura.
- Matriz de dos sensores de gases implementados en dos plataformas de silicio independientes en una misma membrana de nitruro. Cada plataforma posee una resistencia calefactora de tal modo que los dos sensores pueden trabajar a diferente temperatura, gracias al aislamiento térmico entre ambas plataformas.
- El último diseño combina en un mismo chip una matriz de cuatro sensores de gases y los circuitos para el control de la temperatura de trabajo de la zona activa a través de la resistencia calefactora y la lectura de las señales de los sensores mediante las resistencias de los electrodos.

El micromecanizado de vidrio es una parte importante en el proceso de fabricación de este tipo de estructuras. El mejor método para la definición de columnas con una alta verticalidad es el serrado mecánico. Se pueden conseguir columnas de 800 μm de altura con secciones transversales hasta $150 \times 150 \mu\text{m}^2$. En las estructuras para la implementación de los chips mixtos también es necesario la definición de agujeros pasantes en las zonas CMOS además de las columnas. En este trabajo se ha demostrado que la combinación de sandblasting y serrado mecánico es un buen método para la definición de columnas y agujeros pasantes en el vidrio. La calidad de la superficie de las columnas es buena y permite la soldadura anódica con obleas de silicio.

Antes del procesado de las obleas de silicio para la fabricación de los dispositivos que incluyen una matriz de sensores de gases sin circuitería CMOS, se han realizado una serie de estudios tecnológicos con el objetivo de mejorar los procesos más complicados como el análisis de las diferentes técnicas para la fabricación de membranas con bajo estrés y la optimización de la secuencia de las etapas finales del proceso de fabricación (soldadura anódica y ataque anisotrópico).

Los sensores de gases y la electrónica están basados en dos procesos tecnológicos diferentes. Para la fabricación de un chip mixto que incluya una matriz de sensores de gases y circuitería CMOS se ha seleccionado el proceso de fabricación estándar de circuitos integrados del CNM y se han incluido los pasos extras necesarios para la incorporación de los elementos de la matriz de sensores de gases. Para evitar al máximo los cambios en el proceso CMOS, los pasos adicionales se van a incorporar antes y después del bloque CMOS siempre que sea posible.

Se han realizado una serie de test para analizar la compatibilidad y definir la secuencia de esta nueva tecnología mixta. Los resultados de estas pruebas confirman que es posible integrar monolíticamente sensores de gases semiconductores con su electrónica de control y procesado, aunque este proceso requiere materiales y etapas no estándares del CMOS.

Se puede diseñar dos tipos de dispositivos diferentes, uno de ellos incluye una matriz de sensores de gases y el otro además incorpora circuitería CMOS en el mismo chip. El proceso de fabricación de cada uno de ellos es diferente pero en ambos casos engloba varias partes:

- Procesado de las obleas de silicio basado en la tecnología microelectrónica de depósito y grabado mediante fotolitografía de capas delgadas sobre silicio
- Micromecanizado del vidrio
- Ataque anisotrópico del silicio por la cara dorso para la formación de la membrana y soldadura anódica
- Apertura de contactos en el vidrio, serrado de las obleas y encapsulado

Una vez finalizados los dos procesos de fabricación se han verificado mediante las estructuras de test. Los resultados confirman que no existen variaciones importantes en las características de los transistores MOS y por tanto las celdas básicas de la tecnología CMOS25 siguen siendo válidas para esta tecnología mixta que permite la fabricación de sensores de gases y circuitería en el mismo chip.

Los datos experimentales confirman en todos los diseños el alto aislamiento térmico entre la zona activa del sensor (plataforma central de silicio) y el marco exterior del chip. Así, es posible alcanzar los 300° C en la zona central manteniendo la temperatura en la zona fría por debajo de 35° C. Del mismo modo, se verifica el alto aislamiento entre las dos plataformas de silicio en los diseños de dos sensores de gases de tal forma que puedan trabajar a diferentes temperaturas.

Los diseños con cuatro materiales sensibles presentan un consumo de 50-55 W/sensor, mientras que la potencia suministrada para alcanzar los 300° C en la matriz de dos sensores de gases es de 130-140 mW por sensor.

La robustez mecánica de las estructuras de vidrio/silicio ha sido testada mediante unas pruebas de vibración mecánica, sobrepresión y choques térmicos. Tras los experimentos no se han detectado daños en las muestras demostrando la buena estabilidad mecánica de estos tipos de estructuras de vidrio/silicio.

Para finalizar, se identifican posibles extensiones o trabajos futuros de esta tesis. Inicialmente se pensó en esta estructura para la fabricación de una matriz de sensores de gases para el control de calidad del aire en cabinas de coches y aviones, pero gracias a la versatilidad de este dispositivo puede extrapolarse en el futuro a otro tipo de aplicaciones (medioambientales, domésticas o industriales) que requieran el uso de un sistema de detección de gases robusto con un bajo consumo.

La elevada robustez de este tipo de sustratos permite la combinación de técnicas de depósito de capas delgadas y gruesas de óxidos metálicos sensibles sobre una misma zona activa. De ese modo, se consigue un aumento de la selectividad y sensibilidad de la matriz de sensores de gases para ciertas concentraciones.

Una vez demostrada que la integración CMOS es posible, el procesado de las obleas de silicio puede llevarse a cabo con una foundry comercial que permita optimizar la electrónica.

Para abaratar el coste de los chips pueden sustituirse las capas delgadas depositadas mediante sputtering por otros óxidos metálicos de capa gruesa que no necesiten máscara para su depósito. Otra opción para reducir el precio de los dispositivos es la elección de una foundry con un nivel de polisilicio que posea un valor de la resistencia por cuadro bajo, de tal forma que se pueda utilizar el polisilicio como resistencia calefactora simplificando el proceso. No obstante, en ese caso se produce mayor deriva térmica en el valor de la resistencia del calefactor que si se utiliza platino.

La combinación de vidrio y silicio para obtener microestructuras robustas con áreas aisladas térmicamente es muy interesante para otro tipo de microsistemas diferentes de los sensores de gases, como sensores de flujo, de humedad o termopilas. Del mismo modo, y gracias al desarrollo tecnológico que se ha llevado a cabo es posible la fabricación de un multisensor que contenga diferentes tipos de sensores y circuitería CMOS.

De los párrafos anteriores puede concluirse que las principales líneas de investigación que se desprenden de este trabajo pueden agruparse en los siguientes puntos:

- Búsqueda de otras aplicaciones diferentes para la matriz de sensores de gases**
- Optimización de la electrónica**
- Combinación de capas gruesas y delgadas para mejorar la selectividad**
- Reducción del coste de los dispositivos mediante el uso de resistencias calefactoras de polisilicio y capas gruesas que no requieran máscaras para su depósito**
- Aplicación de las tecnologías desarrolladas en este trabajo a otros Microsistemas**

Bibliografía

Web sites

<http://www.bullen-ultrasonics.com>
<http://www.jvs.de>
<http://www.mikroglass.com>
<http://www.planoptik.com>
<http://www.sensorprepservices.com>
<http://www.schott.com>
<http://www.LTF-GmbH.de>
<http://www.corning.com>

Artículos en revistas

J.A. Plaza, M.J.López, I.Gràcia, C.Cané, J. Wöllenstein, G. Kühner, G. Plescher, H. Böttner

A glass/silicon technology for low power robust gas sensors
Aceptado para su publicación en IEEE Sensors Journal

J.A. Plaza, M.J.López , A.Moreno, M. Duch, C.Cané
Definition of high aspect ratio glass columns
Sensors and Actuators A 105 (2003) pp. 305-310