

## **2 Diseño y simulación de las estructuras de vidrio/silicio micromecanizadas**

El aislamiento térmico de la zona activa depende de la geometría de la estructura, tanto del vidrio como del silicio. Para tener un bajo consumo, es necesario tener una zona activa con un alto grado de aislamiento térmico. Desde este punto de vista es necesario llevar a cabo un estudio térmico de estos dispositivos para minimizar las pérdidas de calor de la zona activa (alta temperatura).

Dada la complejidad de estas estructuras el cálculo es complicado, motivo por el cual el análisis se ha realizado con ayuda de simulaciones mediante el método de los elementos finitos. Se ha generado un modelo para las simulaciones que permite analizar la influencia de cada parámetro geométrico de forma independiente. En el apartado 2.1 se describen sus principales características.

Los resultados de dichos estudios al evaluar cada parámetro, se presentan en el apartado 2.2. Finalmente, se dan las dimensiones óptimas obtenidas mediante la simulación para minimizar el consumo de las estructuras de vidrio/silicio, dentro de las limitaciones tecnológicas existentes.

Tras el paso previo de simulación se han diseñado las máscaras para la fabricación de la matriz de sensores de gases (apartado 2.3) y el chip mixto que también incluye los circuitos CMOS asociados (apartados 2.4).

### **2.1 Simulación mediante el método de los elementos finitos**

La simulación de las dos estructuras de vidrio/silicio es un paso importante en el diseño para tener información sobre su comportamiento térmico y en especial sobre el aislamiento térmico que posee la plataforma central de silicio donde se va a implementar la matriz de sensores de gases.

El objetivo principal de las simulaciones es la optimización de las dimensiones para obtener el mayor aislamiento de la plataforma, consiguiendo un bajo consumo [43]. No se pretende realizar un estudio térmico exacto de las estructuras, por lo que se va a simplificar el modelo lo máximo posible, para limitar la CPU y el tiempo de las simulaciones.

Las simulaciones se han llevado a cabo mediante un programa de elementos finitos comercial llamado ANSYS [44]. Este programa es una herramienta muy versátil para la simulación de estructuras, permite numerosos análisis: térmicos y mecánicos, dinámicos y estáticos, etc. El análisis de un problema en ANSYS se realiza en tres fases, preproceso, solución y postproceso. En la fase de preproceso se genera el modelo. En la parte de solución, se aplican las cargas, las condiciones de contorno del modelo y se genera la solución. Por último, la fase de postproceso permite la revisión de resultados mediante listados y representaciones gráficas.

### 2.1.1 Hipótesis y restricciones en las simulaciones

Antes de la construcción del modelo se han realizado algunas hipótesis y restricciones para simplificarlo y disminuir su complejidad.

#### Modo estacionario

Los sensores que se van a colocar sobre la plataforma de silicio van a trabajar a temperatura constante, por lo que únicamente se han realizado las simulaciones en modo estacionario.

#### Transferencia de calor

La potencia necesaria para obtener una temperatura alta en la plataforma central de silicio es generada por la resistencia calefactora. El calor generado se transmite por radiación, convección y conducción, como se muestra esquemáticamente en la figura 2.1.

La distribución de temperatura en el chip, cuando se calienta, está ampliamente relacionada con los materiales empleados y la geometría del dispositivo. Las pérdidas de calor debidas a la convección libre son difíciles de determinar dada la complejidad del cálculo del número de Rayleigh y la imposibilidad de obtenerlo de la literatura. No obstante, los efectos de la convección son pequeños debido a las pequeñas dimensiones del dispositivo [45]. Las pérdidas por radiación dependen de la temperatura elevada a la cuarta potencia, sólo son importantes a altas temperaturas, por lo que a las temperaturas de trabajo de los sensores, unos 200-400°C, los efectos debidos a la radiación son relativamente bajos y tampoco se consideraran en las simulaciones. Por tanto, inicialmente sólo se han tenido en cuenta las pérdidas por conducción tanto en el aire como en el sólido, posteriormente pueden incluirse radiación y convección si fuera necesario, una vez extraídos los parámetros para estas simulaciones de los dispositivos ya fabricados.

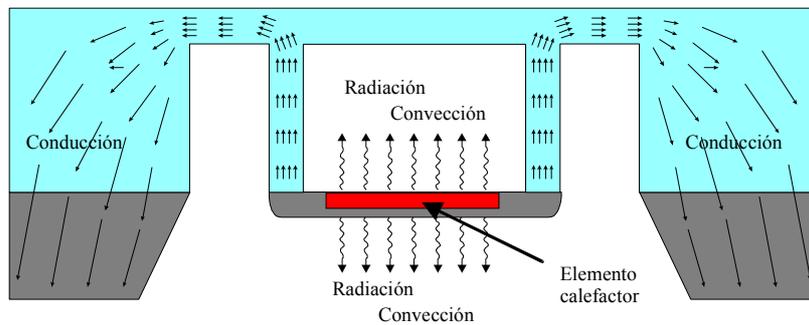


Figura 2.2: Mecanismos de transferencia de calor para el sensor semiconductor

#### Componentes de la estructura

En las simulaciones sólo se van a considerar los materiales principales (aire, vidrio y silicio) cuya geometría afecta enormemente en las pérdidas de calor de la plataforma y

por tanto en su aislamiento térmico. No se han incluido los materiales que forman parte de la matriz de sensores (materiales sensibles y electrodos de platino) cuya influencia en el aislamiento térmico es prácticamente constante. También se contempla en el modelo, la incorporación de la membrana dieléctrica de forma opcional.

### 2.1.2 Generación del modelo en ANSYS

La construcción del modelo en ANSYS se realiza en la primera fase (preproceso), etapa en la que se define la geometría, las propiedades de los materiales que estarán presentes en el modelo, los tipos de elementos que se emplearan en el modelo y el tipo de análisis que se va a realizar. El último paso de esta fase es el mallado del modelo generado.

#### Elección del tipo de elemento

Existe una gran variedad de elementos para la construcción de los modelos en ANSYS. La elección del tipo de elemento depende de las características del propio modelo, así como del tipo de análisis que vaya a realizarse.

Dado que el tipo de análisis que se va a realizar en estas simulaciones es un análisis térmico, se ha seleccionado para estas simulaciones el tipo de elemento Thermal-3D (SOLID70) que permite la generación de modelos tridimensionales y análisis térmicos.

#### Elección de materiales

Los materiales utilizados en estas simulaciones para generar el modelo en ANSYS son el silicio como sustrato, SiO<sub>2</sub> y Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> para las capas dieléctricas de la membrana, platino para la resistencia calefactora y como vidrio se ha elegido Pyrex #7740 (en el caso de elegir otro vidrio, las simulaciones no van a variar debido a que las propiedades de estos tipos de vidrio son prácticamente iguales [46,47]). También se ha simulado el aire que rodea a la estructura, por lo que habrá que incluirlo en la lista de materiales.

Para la realización de las simulaciones térmicas, debe conocerse la conductividad térmica (Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) de cada material utilizado. En la tabla 2.1 se muestran los valores de conductividad térmica a temperatura ambiente encontrados en la literatura y los valores introducidos en las simulaciones.

Material	K (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) usado en las simulaciones	K(Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) encontrado en la literatura	Referencias
Silicio	150	150	[17], [18], [49], [50]
SiO <sub>2</sub>	1.4	1.2-1.4	[17], [18], [49], [50]
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	28	17-28	[17], [18], [49], [51]
Pyrex#7740	1.1286	1.1286	[46]
Platino	72	70-72	[48], [49]
Aire	0.0264	0.0264	[48]

Tabla 2.1: Valores de la conductividad térmica usados en la simulación y encontrados en la literatura.

### **Definición de la geometría**

El aislamiento térmico de las dos estructuras de vidrio-silicio descritas anteriormente depende fundamentalmente de las dimensiones del vidrio, de la plataforma central y de la separación entre ésta y el marco de silicio.

El aire que rodea a los dispositivos también ha sido modelado ya que, al contrario que en el mundo macroscópico, las pérdidas por conducción a través de él son importantes. Incluir este aire presenta inicialmente un problema, ya que posee un tamaño infinito y esto no es posible modelarlo en las simulaciones. En su lugar, se va a introducir una cantidad finita de aire equivalente. Para calcular este volumen equivalente, se van a realizar varias simulaciones aumentando el espesor de aire progresivamente hasta el momento en que al incrementarlo no varíe el resultado de la simulación. El espesor obtenido es aproximadamente 1mm.

### **Modelo de la estructura de vidrio/silicio para la integración de la matriz de sensores de gases**

En la figura 2.2, puede verse el modelo generado para esta estructura. Para una mejor visión sólo se ha representado el silicio (zona de color verde) y el vidrio (en morado). Dada la simetría del dispositivo en los ejes X e Y (ver figura 2.2), sólo es necesario la simulación de una cuarta parte del dispositivo, lo que disminuye el grado de complejidad del sistema y el tiempo de simulación así como la CPU necesaria para la realización de estas simulaciones. Una vez simplificado el modelo a un cuarto de la estructura, se aplican las condiciones de contorno y las cargas. A continuación se malla el modelo y se genera la solución.

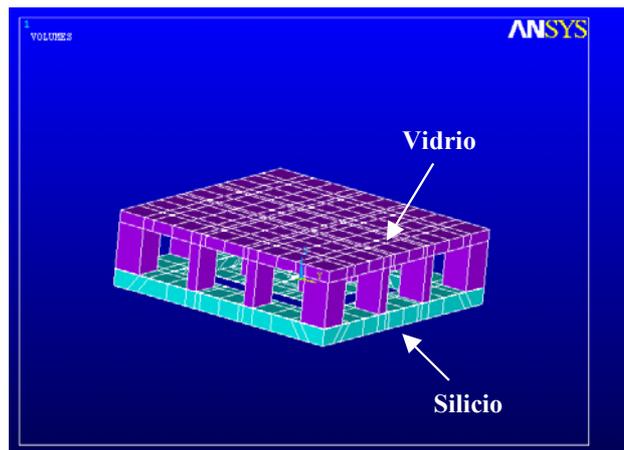


Figura 2.2: Modelo para la estructura de vidrio/silicio para la integración de la matriz de sensores de gases

La figura 2.3 muestra a modo de ejemplo la distribución de temperatura obtenida con ANSYS, para un cuarto del chip. En ANSYS la potencia se implementa como calor por unidad de volumen en las zonas donde se encuentra la resistencia calefactora. La temperatura máxima en la plataforma central de silicio, es de unos 300°C mientras el

marco de silicio se mantiene a temperatura ambiente. Se observa un gradiente muy alto de temperatura en las columnas de vidrio, debido a que el vidrio es un material con una baja conductividad térmica.

Para el buen funcionamiento de los sensores, la temperatura de trabajo debe ser, además de alta, lo más homogénea posible en la zona activa. ANSYS ofrece la posibilidad de visualizar la distribución de temperatura en todo el dispositivo o en una zona determinada. Por tanto, es posible ver la distribución de temperatura obtenida mediante simulación en la plataforma de silicio, zona activa del sensor, figura 2.4, analizando la homogeneidad de temperatura. En esta simulación puede verse que tan sólo existe una diferencia máxima de  $\pm 4^{\circ}\text{C}$ , lo que muestra la buena homogeneidad de temperatura.

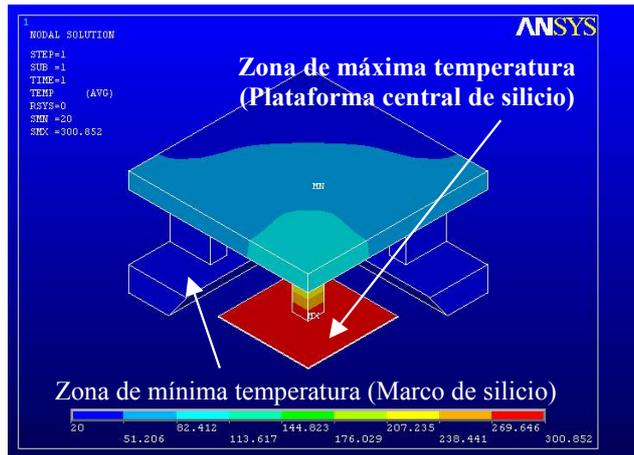


Figura 2.3: Distribución de temperatura en el chip para un cuarto de la estructura de vidrio/silicio al que se ha aplicado una potencia de 280 mW.

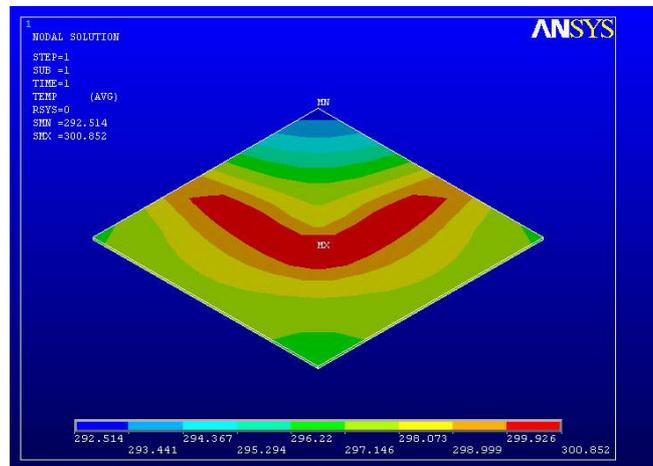


Figura 2.4: Distribución de temperatura en la plataforma central para un chip genérico (1 cuarto de la estructura) al que se ha aplicado una potencia de 280 mW.

En este ejemplo se han demostrado las buenas cualidades que presenta esta estructura para su utilización en sensores de gases semiconductores. Alcanza una temperatura alta y homogénea en la plataforma central de silicio (zona donde se colocará la parte activa del sensor), manteniendo a temperatura ambiente el marco de silicio. Hecho que confirma que efectivamente el buen aislamiento térmico entre las zonas fría y caliente de la estructura.

**Modelo de la estructura de vidrio/silicio para la integración de la matriz de sensores de gases y la circuitería CMOS**

En la figura 2.5, se presenta el modelo construido para esta segunda estructura. Este modelo ha perdido la simetría en el eje X, de tal forma que para simplificar el modelo sólo es posible reducirlo a la mitad en lugar de un cuarto como en el caso anterior.

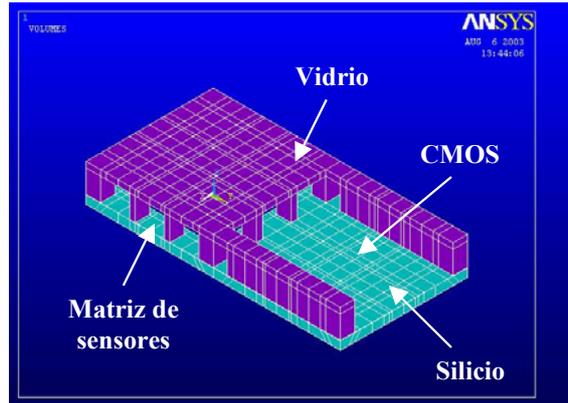


Figura 2.5: Modelo de la estructura para la integración de la matriz de sensores y la circuitería CMOS

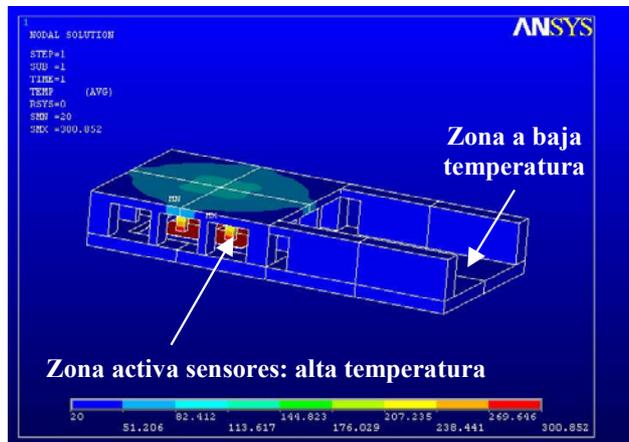


Figura 2.6: Distribución de temperatura para un chip al que se ha aplicado una potencia de 280 mW.

El tamaño del marco no va a influir en el aislamiento de la zona activa del sensor debido a que es una zona a temperatura ambiente y por tanto, desde el punto de vista del aislamiento térmico, estas dos estructuras son prácticamente iguales.

Para comparar ambos modelos, se ha aplicado la misma potencia en esta simulación que el ejemplo anterior (280 mW). Efectivamente se comprueba que no existen más pérdidas de calor por tener una marco de silicio mayor, ya que la temperatura máxima alcanzada en la plataforma es la misma que para el caso anterior, ver figuras 2.3 y 2.6 De ese modo queda confirmada la similitud de ambas estructuras.

## 2.2 Optimización del aislamiento térmico de las estructuras de vidrio/silicio mediante simulación

Una vez visto que es posible conseguir el aislamiento térmico que se buscaba en este tipo de estructuras, se van a realizar diferentes simulaciones analizando los cambios producidos al variar las dimensiones para buscar el máximo aislamiento posible. Dada la equivalencia desde el punto de vista térmico de ambas estructuras, dichas simulaciones se van a llevar a cabo para el modelo más simple (modelo para un cuarto de la estructura sin circuitería CMOS).

Se ha construido un modelo paramétrico donde las dimensiones (distancias, espesores...) pueden cambiarse independientemente con facilidad. Existe una gran cantidad de parámetros geométricos en la estructura. En la figura 2.7 puede verse una vista esquemática del modelo paramétrico utilizado, así como los principales parámetros analizados mediante las simulaciones.

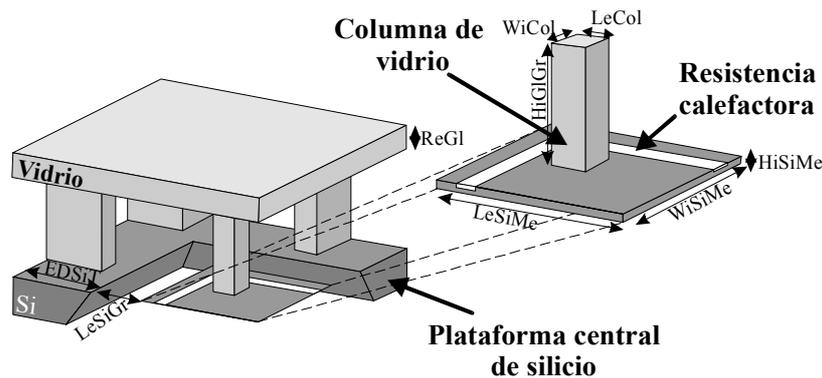


Figura 2.7: Vista esquemática del modelo simplificado que se construirá en ANSYS.

En el estudio de cada parámetro el resto permanecerá fijo, para analizar cómo afecta al aislamiento de la estructura cada uno por separado sin olvidar que muchos de ellos quedan limitados por la tecnología. Todas estas simulaciones se han realizado con una potencia suministrada de 100 mW. Además de la optimización de la geometría para

obtener un aislamiento óptimo, se han simulado las pérdidas producidas por las capas dieléctricas de la membrana.

### 2.2.1 Optimización del aislamiento térmico en función de las dimensiones del vidrio

Las dimensiones de las columnas del vidrio son físicamente definidas por el proceso de micromecanizado mediante el serrado mecánico. Las principales dimensiones a estudiar en el vidrio son:

- Anchura de las columnas
- Altura de las columnas
- Espesor de la plataforma superior de vidrio

#### Anchura de las columnas

En este estudio se trata de analizar las pérdidas que se producen a través de las columnas de vidrio en función de su anchura. La sección de las columnas es un factor importante en el consumo del dispositivo, cuanto mayor sea ésta, mayor área de contacto habrá entre el vidrio y el silicio y por tanto mayores pérdidas se producirán. Para analizar únicamente cómo influye la anchura de las columnas en el aislamiento térmico de la estructura, se ha fijado el espesor de la oblea de vidrio a 1 mm y la altura de las columnas a 800  $\mu\text{m}$ . El rango estudiado en las simulaciones para la anchura de las columnas es de 100 a 350  $\mu\text{m}$ .

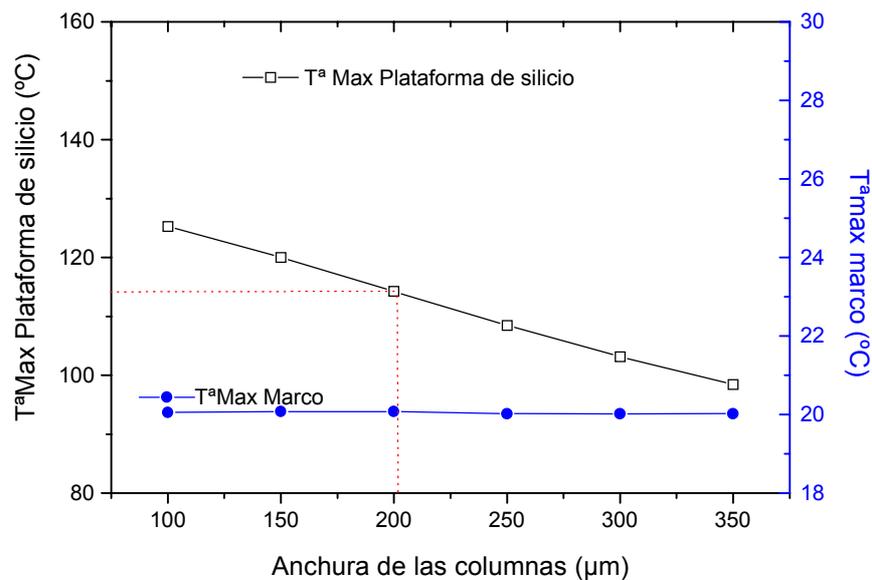


Figura 2.8: Temperatura máxima alcanzada en la plataforma de silicio y en el marco de silicio para diferentes secciones de las columnas.

Los resultados de la simulación (figura 2.8) muestran, como era de esperar, que cuanto mayor es el área de contacto más pérdidas de calor se tienen. Existe una dependencia prácticamente lineal de la anchura de las columnas con la temperatura máxima alcanzada en la plataforma de silicio.

La opción más adecuada para mejorar el aislamiento térmico es disminuir al máximo el área de las columnas, pero el límite inferior lo marca la fragilidad de las columnas. Es necesario llegar a un compromiso entre el aislamiento térmico y las limitaciones tecnológicas existentes. El hecho de tener áreas muy pequeñas supone una disminución de la robustez mecánica de la estructura y de la calidad de la soldadura anódica de las columnas de vidrio al silicio. Finalmente se ha elegido  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$  de sección, para estas dimensiones se obtienen una buena calidad en la soldadura anódica y un alto rendimiento en la micromecanización con la sierra (ver tests tecnológicos en capítulo 3).

### **Altura de las columnas de vidrio**

La altura de las columnas depende de la profundidad del corte realizado con la sierra y del espesor de las obleas de vidrio utilizadas. En esta primera simulación se va a mantener fijo en  $200 \mu\text{m}$  la parte sin serrar de las obleas, cambiando únicamente el espesor de la oblea de vidrio. La altura de las columnas será la resta del espesor total de la oblea de vidrio menos los  $200 \mu\text{m}$  de vidrio correspondientes a la zona sin serrar. De ese modo, cuanto mayor espesor tenga la oblea de vidrio más altas serán las columnas.

El rango estudiado en las simulaciones es de 0.5 a 3 mm, valores standard de los espesores de las obleas comerciales de vidrio. Para estudiar únicamente este efecto se ha fijado también la sección transversal de las columnas a  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ , valor seleccionado en el apartado anterior.

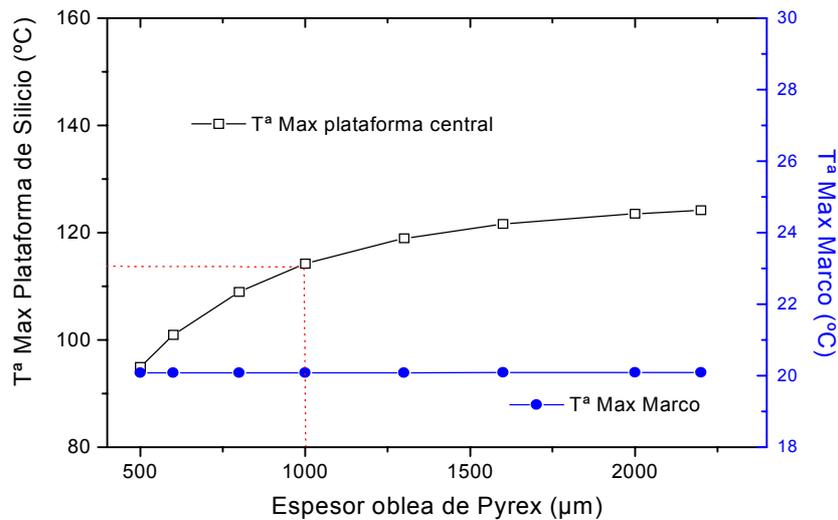


Figura 2.9: Temperatura máxima alcanzada en la plataforma de silicio y en el marco de silicio para diferentes espesores de la oblea de vidrio

En la gráfica siguiente (figura 2.9) puede verse la dependencia de la temperatura máxima alcanzada en la membrana de silicio con el espesor de las obleas de vidrio. El dispositivo presenta mayores pérdidas cuanto menor sea la altura de las columnas. Este fenómeno es más acusado para espesores menores de 1 mm, sin embargo para valores de espesor de la oblea de vidrio superiores a 1 mm la temperatura máxima alcanzada es prácticamente constante.

En la figura 2.10 se muestran las distribuciones de temperatura obtenidas, para una oblea de vidrio de 2 mm (figura 2.10 superior) y de 0.5 mm (figura 2.10 inferior).

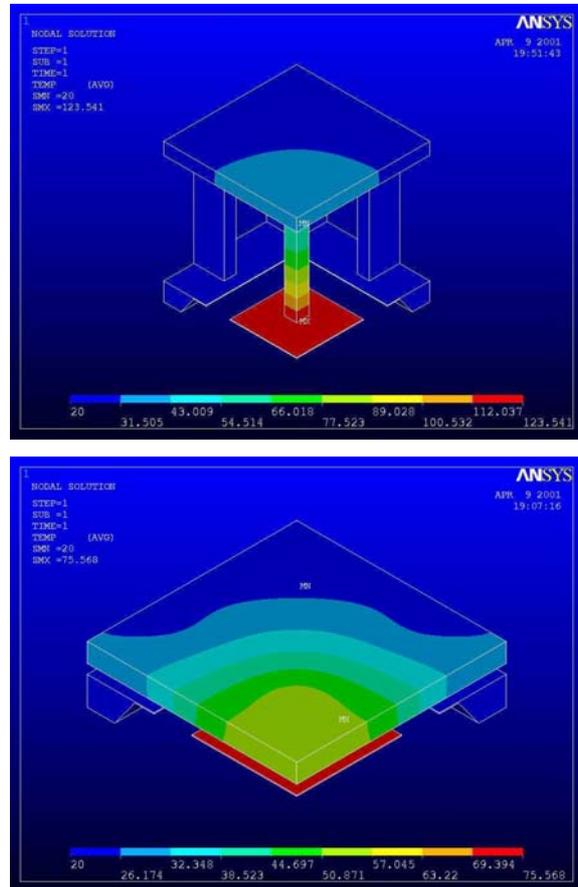


Figura 2.10: Distribución de temperatura para dos chips con una altura de las columnas de 1800  $\mu\text{m}$  (arriba) y de 300  $\mu\text{m}$  (abajo)

Columnas muy altas de vidrio presentan una mayor dificultad en su micromecanización debido a su fragilidad. Finalmente, se ha elegido obleas comerciales de Pyrex #7740 de 1 mm que presentan una robustez del sistema mucho más elevada frente a las de 2 mm con tan sólo una diferencia de 10° C entre dichos espesores.

**Espesor de la plataforma superior de vidrio.**

El espesor de la plataforma superior de vidrio, se corresponde con la parte de la oblea de vidrio no serrada y viene dado por la profundidad del corte realizado con la sierra. Cuanto mayor sea la profundidad del corte, menor será el espesor de esta plataforma

El rango estudiado para el espesor de la plataforma de vidrio es de 50 a 300  $\mu\text{m}$ . En este estudio se han fijado el espesor de la oblea de vidrio a 1 mm y la anchura de las columnas a 200  $\mu\text{m}$ , valores elegidos en las simulaciones anteriores.

La dependencia del espesor de la plataforma superior con la temperatura máxima alcanzada en la plataforma central de silicio es lineal (figura 2.11). Cuanta menor cantidad de vidrio quede sin serrar menores pérdidas de temperatura se producen. Para optimizar el aislamiento térmico es mejor reducir lo más posible su espesor, pero al igual que en el caso anterior, si se reduce mucho este parámetro se pierde robustez mecánica en el dispositivo, pudiendo romperse con facilidad. El test de serrado mecánico realizado da buen resultado para espesores de 200  $\mu\text{m}$ , valor elegido para este parámetro.

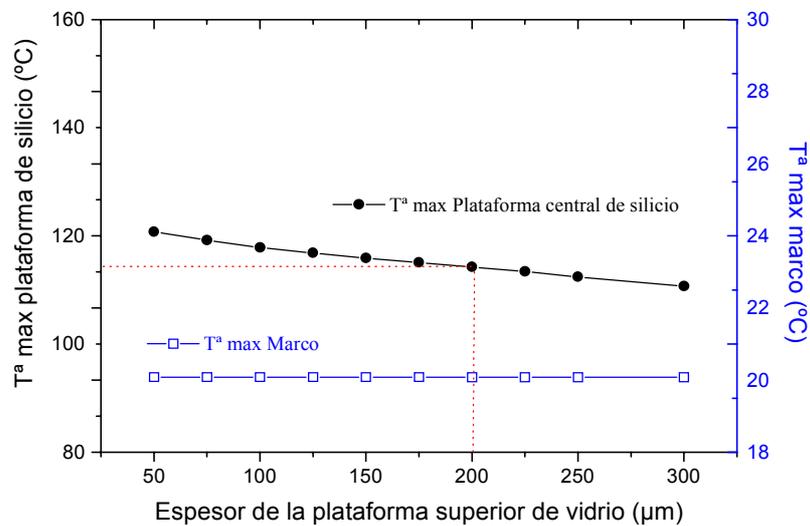


Figura 2.11: Temperatura máxima alcanzada en la plataforma de silicio y en el marco de silicio para diferentes espesores de la plataforma superior de vidrio.

**2.2.2 Optimización del aislamiento térmico en función de las dimensiones del silicio**

Una vez optimizadas las dimensiones del vidrio, en función de las simulaciones y las limitaciones tecnológicas del micromecanizado del vidrio y de la estabilidad mecánica de la estructura, se van a fijar las dimensiones del vidrio para las futuras simulaciones:

- Espesor de la oblea de vidrio: 1 mm
- Anchura de las columnas: 200  $\mu\text{m}$
- Altura de las columnas: 800  $\mu\text{m}$

La parte de la estructura asociada al silicio presenta algunas limitaciones, por un lado dimensionales (tienen que caber los sensores de gases y las columnas de vidrio) y por otro lado mecánicas, debido a que la fragilidad aumenta al disminuir el espesor de la plataforma. En este apartado se van a analizar las diferentes posibilidades dimensionales en el diseño de las máscaras para la fabricación de la parte del silicio.

### **Separación entre el marco y la plataforma de silicio**

La separación entre el marco y la plataforma central de silicio es una dimensión a considerar en el aislamiento térmico de la estructura. En principio, cuanto mayor sea esa distancia, mejor será el aislamiento térmico que presenta, pero la robustez mecánica de la estructura se verá negativamente afectada. Por otro lado, aumentar el tamaño del chip tampoco resulta conveniente, teniendo en cuenta lo anterior, se ha fijado el tamaño del chip en  $4.4 \times 4.4 \text{ mm}^2$  (sin tener en cuenta el área para los contactos), tamaño adecuado para dispositivos de cuatro columnas con cuatro dispositivos sensores.

Existen dos posibilidades para cambiar la distancia entre el marco y la plataforma central de silicio. Se han realizado dos simulaciones diferentes. En la primera de ellas, un cambio en la distancia entre el marco y la plataforma de silicio se traduce en una variación del tamaño del marco de silicio (ver figura 2.12, D1), manteniendo fijas las dimensiones de la plataforma central. En la segunda simulación, se hace justo lo contrario, el tamaño del marco queda fijo y se cambian las dimensiones de la plataforma de silicio (ver figura 2.12, D2).

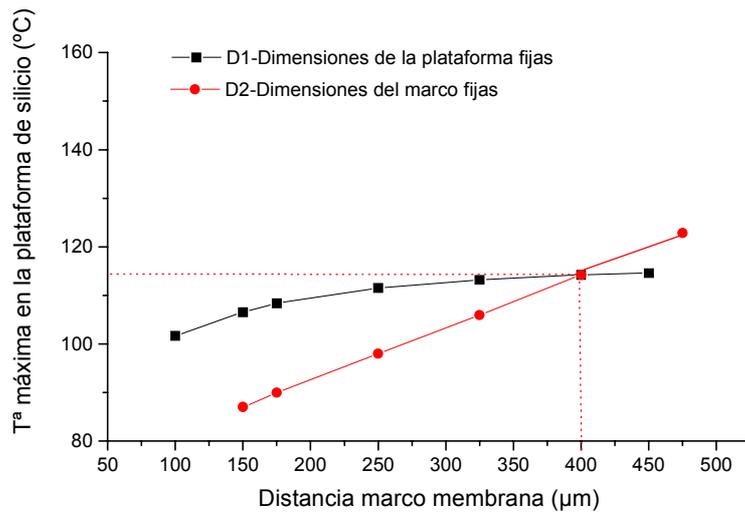


Figura 2.12: Temperatura máxima alcanzada en la plataforma de silicio para diferentes distancias marco plataforma de silicio.

El elemento calefactor se encuentra en la plataforma de silicio, zona caliente del dispositivo, de ese modo cuanto mayor sea el área de la plataforma mayor potencia se necesitará para calentarla debido a que existen mayores pérdidas. En la curva obtenida (ver figura 2.12, D2) puede verse que efectivamente esto es así, el tamaño de la membrana posee una dependencia lineal con la temperatura máxima que alcanza. Teniendo en cuenta lo anterior, para optimizar el aislamiento térmico hay que disminuir el tamaño de la plataforma de silicio lo máximo posible, sin olvidar que dentro deben colocarse los sensores de gases.

El otro parámetro analizado en esta simulación es el tamaño del marco. Este factor es menos importante cuando la zona fría y caliente se encuentran alejadas. Para distancias mayores a  $300\ \mu\text{m}$ , la zona caliente está bastante bien aislada y un cambio en el tamaño del marco no afecta apenas al consumo de la estructura (ver figura 2.12, D1). Un cambio en el tamaño del marco no afecta tanto como en el de la membrana, ya que el marco de silicio está a temperatura ambiente y un aumento de tamaño no necesita un aporte extra de potencia para calentarlo, salvo cuando el marco se encuentra muy próximo a la plataforma de silicio, momento en el cual se producen pérdidas de calor de la zona caliente a la fría a través del aire.

En las figuras 2.13 y 2.14 se observa la distribución de temperatura en el dispositivo para dos distancias entre el marco y la plataforma de silicio diferentes, cambiando únicamente el tamaño del marco de silicio. En la figura 2.13 la separación marco y plataforma de silicio es tan sólo de  $50\ \mu\text{m}$  y en la figura 2.14 de  $450\ \mu\text{m}$ .

En estas dos simulaciones, puede verse que a mayor separación entre el marco y la plataforma menores pérdidas se producen. Ambas curvas presentan comportamientos muy diferentes, para un mismo cambio en la distancia marco-membrana, al pasar de  $150$  a  $400\ \mu\text{m}$  la distancia entre el marco y la membrana, existe una diferencia de  $27\ ^\circ\text{C}$  en el primer caso y tan sólo de  $7\ ^\circ\text{C}$  en el segundo, por tanto la variación de temperatura es mucho mayor al cambiar el tamaño de la membrana que el del marco (ver figura 2.12).

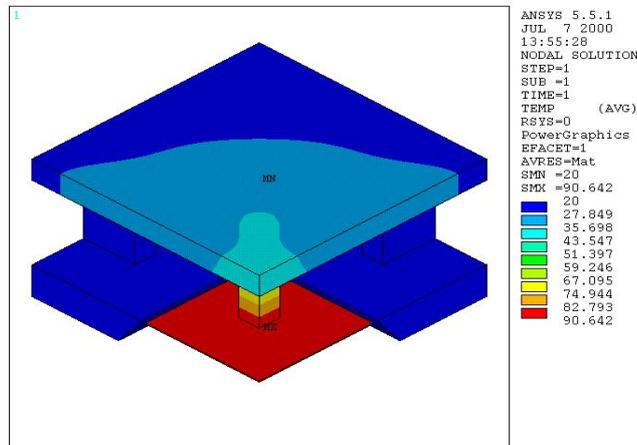


Figura 2.13: Distribución de temperatura en el chip para una distancia marco plataforma de  $50\ \mu\text{m}$ .

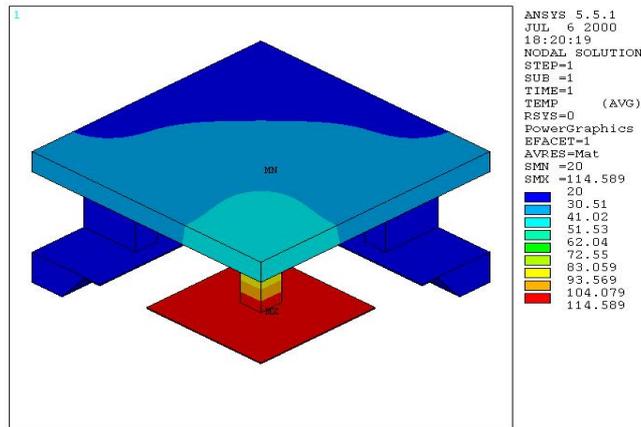


Figura 2.14: Distribución de temperatura en el chip para una distancia marco plataforma de 400  $\mu\text{m}$ .

### Espesor de la plataforma de silicio

El efecto del espesor de la plataforma central de silicio también ha sido estudiado. La figura 2.15 muestra las diferentes temperaturas alcanzadas en la plataforma central y en el marco de silicio para diferentes espesores.

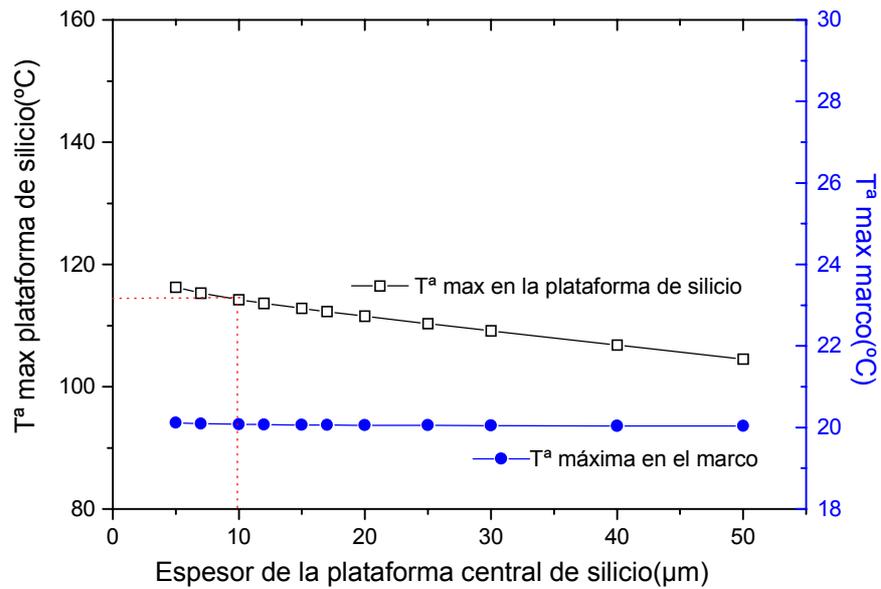


Figura 2.15: Máxima temperatura alcanzada en la plataforma y en el marco para diferentes espesores de la plataforma de silicio.

En este caso, hay dos cosas a tener en cuenta, por un lado es importante tener un espesor pequeño para aumentar el aislamiento térmico y la respuesta dinámica de la estructura, pero por otro lado, un espesor mayor proporciona una temperatura más homogénea en la membrana. El proceso de fabricación limita el espesor máximo de la plataforma de silicio y la estabilidad mecánica del dispositivo el espesor mínimo siendo necesario llegar a un compromiso entre ambos. Finalmente se ha elegido un valor de 10  $\mu\text{m}$  de espesor de la plataforma, tras considerar todas las limitaciones comentadas anteriormente.

### 2.2.3 Efectos de las capas dieléctricas de la membrana en el aislamiento térmico

Además de las simulaciones anteriores que estudiaban fundamentalmente los efectos debidos a los parámetros geométricos en busca de la optimización del aislamiento térmico de la estructura, se han analizado los efectos de las capas dieléctricas de la membrana.

Los materiales utilizados como membranas en sensores de gases suelen ser capas dieléctricas ( $\text{SiO}_2$  y  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), dadas las características de baja conductividad térmica y elevada resistencia mecánica que presentan estos materiales.

Las pérdidas producidas por las capas dieléctricas dependen de las dimensiones y del material del que se trate. En estas simulaciones el área de la membrana está fija, por lo que las pérdidas únicamente dependerán del grosor de las capas y de los materiales elegidos.

Se han simulado las pérdidas producidas a través de diferentes membranas de óxido y nitruro con distintos espesores. Estas capas se utilizarán de forma combinada para minimizar el estrés en el nitruro y mejorar su adhesión al silicio. Los valores para los espesores de estas capas en las simulaciones se han elegido según los valores típicos utilizados en la fabricación de sensores de gases. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 2.2.

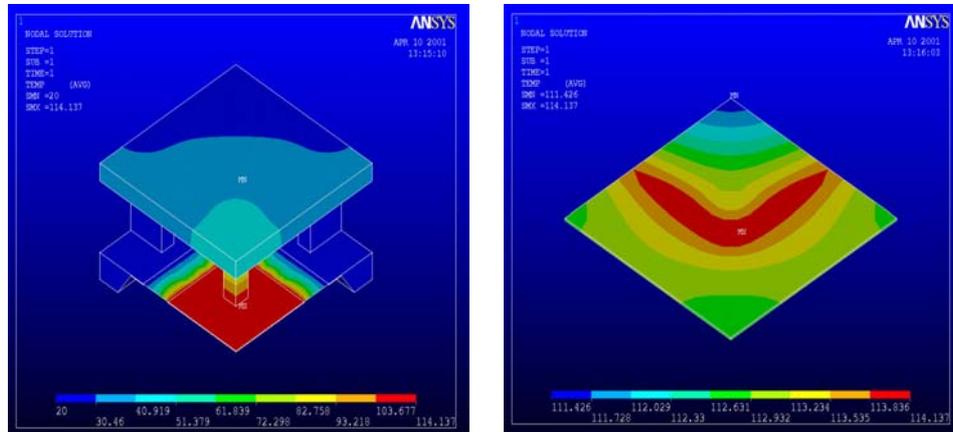


Figura 2.16: Distribución de temperatura en el chip (izquierda) y en la plataforma (derecha) para una membrana con 300 Å de oxido.

Como era de esperar, se producen mayores pérdidas de temperatura cuando las capas son más gruesas y el material utilizado es  $\text{Si}_3\text{N}_4$  cuya conductividad térmica ( $28 \text{ Wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$ ) es mayor que la del  $\text{SiO}_2$  ( $1.4 \text{ Wm}^{-1} \text{ k}^{-1}$ ). Las figuras 2.16 y 2.17 muestran la distribución de temperatura en el chip y en la plataforma para una capa de  $300\text{Å}$  de oxido (Figura 2.16) y para una de  $1800\text{Å}$  de nitruro (Figura 2.17), valores finalmente elegidos.

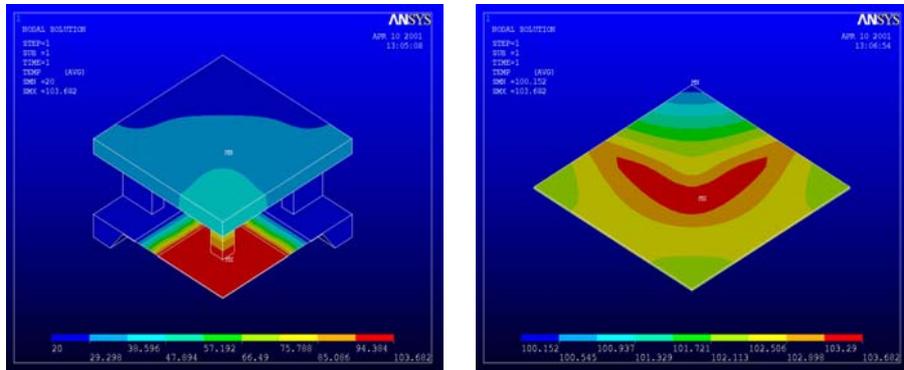


Figura 2.17: Distribución de temperatura en el chip (izquierda) y en la plataforma (derecha) para una membrana con  $1800 \text{ Å}$  de nitruro.

Capas dieléctricas	T <sup>a</sup> máxima en la plataforma (°C)	T <sup>a</sup> máxima en el marco (°C)	Pérdidas
Sin capas dieléctricas	114,246	20,077	Valor de referencia
Nitruro: $1800\text{Å}$	103,682	20,133	9,25%
Nitruro: $3000\text{Å}$	98,183	20,164	15,49%
Oxido: $300 \text{ Å}$	114,137	20,080	0,09%
Oxido: $1000\text{Å}$	113,886	20,080	0,31%

Tabla 2.2: Valores obtenidos en las simulaciones para diferentes capas dieléctricas en la membrana.

## 2.2.4 Dimensiones finales de la estructura de vidrio/silicio para un mayor aislamiento térmico

Las simulaciones FEM realizadas en ANSYS son una buena herramienta en el diseño de los dispositivos. Puede optimizarse el aislamiento térmico en cada diseño, gracias a la utilización de un modelo paramétrico que permite el análisis por separado de cada componente de la geometría del dispositivo (espesores, distancias, amaños, etc.). Además de estos parámetros puramente geométricos, se han analizado las pérdidas producidas por las capas dieléctricas de la membrana.

Con las simulaciones térmicas se ha buscado la optimización al máximo del aislamiento térmico de la plataforma central de silicio con el objetivo de reducir el consumo de los dispositivos. Aunque no siempre los mejores resultados en cuanto al aislamiento térmico pueden fabricarse, existen restricciones debido a la robustez mecánica y las limitaciones tecnológicas del micromecanizado del vidrio y del silicio, en estos casos se

ha llegado a un compromiso entre los límites dados por la tecnología y la fragilidad de la estructura. Además de esto, el dispositivo no puede hacerse tan pequeño como se quiera, en la plataforma de silicio habrá que colocar los sensores de gases, lo que fijará el espesor de la sierra utilizada (distancia entre columnas).

En todas las simulaciones realizadas se obtienen distribuciones similares de temperatura, existe una zona a temperatura elevada y homogénea (plataforma central de silicio), manteniéndose el marco de silicio a baja temperatura, cercana a la temperatura ambiente. Estas simulaciones confirman el alto aislamiento térmico que presenta la estructura entre las zonas fría y caliente.

Las obleas de Pyrex comerciales elegidas para su micromecanización con la sierra son obleas de 1 mm de espesor. El micromecanizado del vidrio se realiza con una única sierra de 1000  $\mu\text{m}$  de espesor, lo que fija en este valor la distancia entre dos columnas consecutivas. El paso entre dos canales diferentes es de 200  $\mu\text{m}$  y la profundidad del corte es de 800  $\mu\text{m}$ . En el capítulo siguiente se da más información sobre este tipo de micromecanizado para el vidrio y la razón por la cual se ha elegido este método. Con estos parámetros fijados las dimensiones de las columnas de Pyrex son 800x200x200  $\mu\text{m}^3$ . La figura 2.18 muestra un dibujo esquemático con las principales dimensiones del vidrio. Teniendo en cuenta todo lo anterior las principales dimensiones elegidas para los diseños finales de la matriz de sensores de gases se muestran en la tabla 2.3.

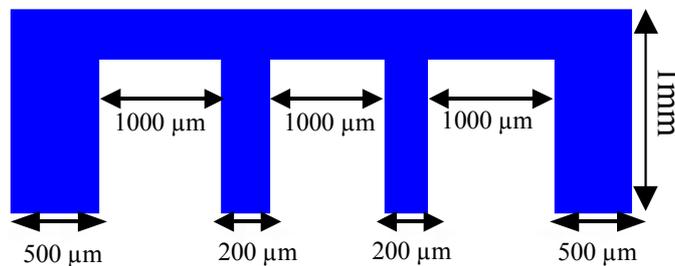


Figura 2.18: Dimensiones del vidrio.

Dimensiones elegidas para los diseños finales de cuatro columnas	Valor numérico
Espesor oblea vidrio	1 mm
Dimensiones de las columnas	200x200x800 $\mu\text{m}^3$
Espesor de la plataforma superior de vidrio	200 $\mu\text{m}$
Espesor de la sierra	1000 $\mu\text{m}$
Dimensiones de la plataforma central de silicio	1800x1800 $\mu\text{m}^2$
Separación entre el marco y la plataforma de silicio	400 $\mu\text{m}$
Espesor de la plataforma de silicio	10 $\mu\text{m}$
Tamaño del chip (incluyendo el espacio para los pads)	5.4x5.4 mm <sup>2</sup>

Tabla 2.3: Principales dimensiones elegidas para los diseños de cuatro columnas.

Estas mismas dimensiones se van a aplicar al chip que contiene la matriz de sensores y la circuitería CMOS debido a la similitud desde el punto de vista del aislamiento térmico comentada al principio del capítulo. La única diferencia que presenta este dispositivo frente la anterior es que el tamaño del marco es mayor para poder integrar los bloques CMOS, quedando un tamaño para el chip final de  $10.8 \times 5.4 \text{ mm}^2$ , incluyendo el espacio para los pads.

### 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

El modelo simplificado que se ha utilizado para la optimización del aislamiento térmico es un buen modelo para el análisis cualitativo de la estructura, pero en él sólo se ha tenido en cuenta las pérdidas de calor a través del vidrio y del aire. Sin embargo también se producen pérdidas a través de las pistas de la resistencia calefactora y los electrodos de platino.

Para tener un modelo más próximo a la realidad se ha generado en el IPM un modelo más complejo incluyendo todos los componentes de la matriz de sensores de gases (electrodos, materiales sensibles y óxido internivel) para la estructura sin circuitería, con las dimensiones optimizadas obtenidas de las simulaciones anteriores [52].

La complejidad de este modelo es muy superior a la del modelo simplificado, el número de volúmenes aumenta considerablemente pasando de los 250 necesarios para generar el modelo simplificado del cuarto de la estructura a los 15.400 del modelo complejo. Al considerar todos los elementos el modelo pierde la simetría, motivo por el que no puede reducirse.

En la figura 2.19 se presenta el modelo complejo, la parte inferior es el silicio y la superior el vidrio. En esta figura no se han seleccionado los elementos correspondientes al aire que rodea el dispositivo para una mejor visualización.

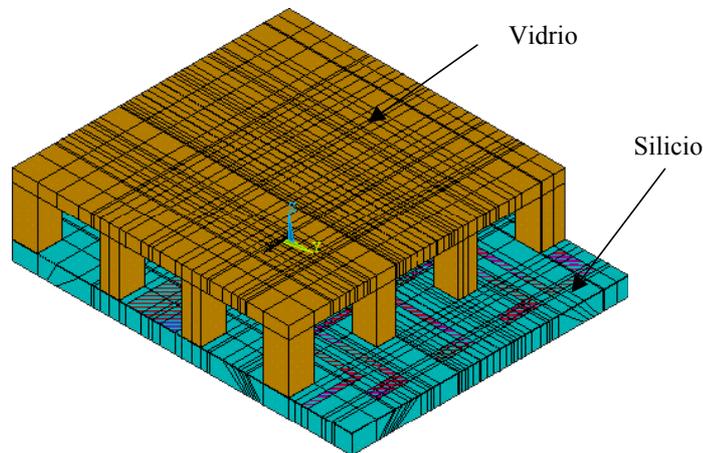


Figura 2.19: Modelo complejo, el aire que lo rodea se ha eliminado en este dibujo.

Para comparar la dispersión entre los dos modelos, se ha calculado la potencia necesaria para calentar el área activa a 350 °C, temperatura de trabajo de los sensores. Para el caso del modelo completo ha sido necesario aportar 340 mW frente a los 375 mW para el modelo simplificado. La figura 2.20 muestran la distribución de temperatura obtenida con el modelo más complejo (se ha eliminado el vidrio para una mejor visualización de la distribución de temperatura en el silicio) y la figura 2.21 con el modelo simplificado.

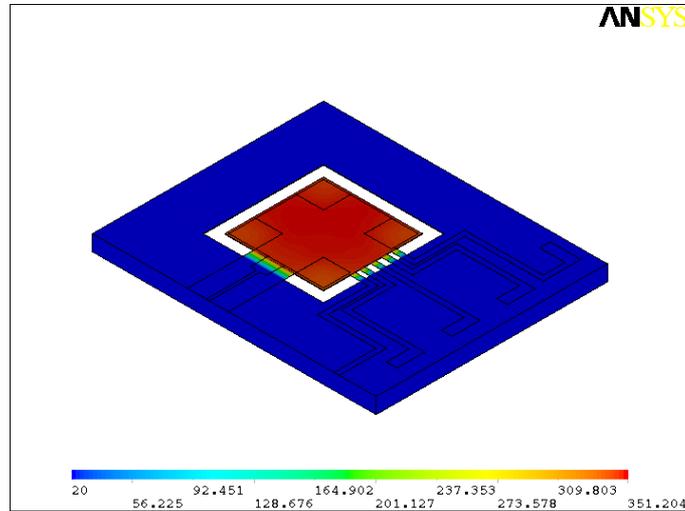


Figura 2.20: Distribución de temperatura de un chip al que se ha aplicado 340 mW. La temperatura máxima, 351 °C se corresponde con la zona activa

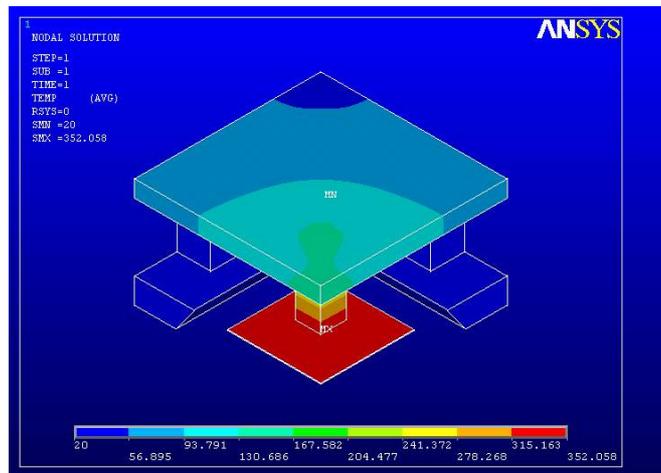


Figura 2.21: Distribución de temperatura de un chip al que se ha aplicado 375 mW. La temperatura máxima, 352 °C se corresponde con la zona activa.

La principal diferencia en los resultados obtenidos con ambos modelos viene dada por la distribución de temperatura en la plataforma de silicio. En la figura 2.22 se presenta una visión más detallada de la zona activa del sensor. La máxima temperatura se localiza en la parte central y la mínima en las esquinas, parte exterior de las columnas. Aunque la diferencia entre la temperatura máxima y mínima de la plataforma es de 25 °C, tan sólo es de 11 °C en las zonas donde se integrarán los materiales sensibles a gases.

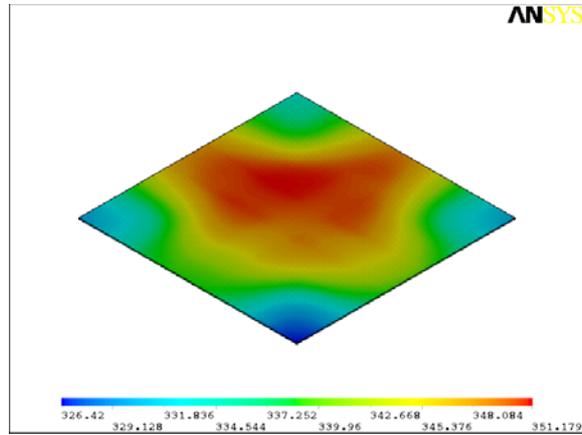


Figura 2.22: Distribución de temperatura obtenida con el modelo completo para la zona activa del sensor

Para el modelo simplificado no se obtiene tanta información ni ésta es tan exacta ya que en esta zona no se contempla la geometría exacta de la resistencia calefactora, ni se han implementado todos los componentes, hecho que afecta a la distribución de temperatura. En la figura 2.23, se muestra un detalle de la distribución de temperatura en la plataforma obtenida con el modelo simplificado. Se observa una diferencia máxima de temperatura de 12 °C.

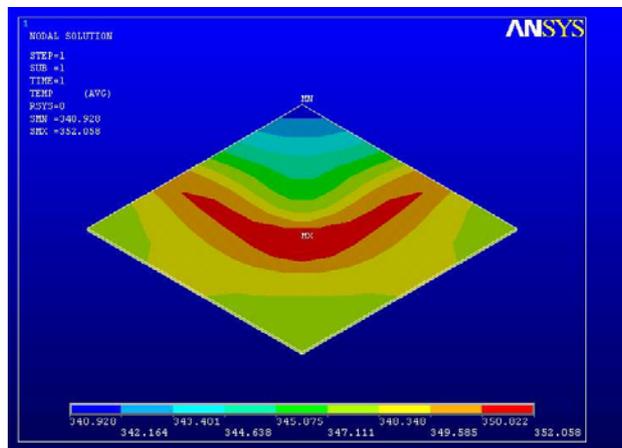


Figura 2.23: Distribución de temperatura obtenida con el modelo simplificado para la zona activa del sensor

La dispersión entre ambos modelos está en torno al 10 %, valor que hace perfectamente aceptable el uso del modelo simplificado cuando se quiera analizar los efectos cualitativamente, como en este caso. De esa manera, se reduce enormemente el tiempo de simulación.

### 2.3 Diseño de las máscaras para la fabricación de la matriz de sensores de gases

En el diseño de las máscaras para el procesado de la oblea de silicio de la matriz de sensores de gases se van a utilizar las dimensiones resumidas en la tabla 2.3, obtenidas de las simulaciones y que proporcionan el mayor aislamiento térmico, dentro de las limitaciones tecnológicas.

El diseño queda limitado por el vidrio, no puede colocarse nada en la zona donde se va a realizar la soldadura anódica del silicio con el vidrio. De ese modo, la integración de los componentes del dispositivo en la oblea queda fijada por las dimensiones de los canales creados por la sierra.

Las dimensiones iniciales para las columnas son  $800 \times 200 \times 200 \mu\text{m}^3$ , pero para darle mayor versatilidad a las máscaras se han diseñado de un modo que permitan también la soldadura anódica con obleas de vidrio con columnas micromecanizadas de  $150 \times 150 \mu\text{m}^2$  y de  $300 \times 300 \mu\text{m}^2$  de sección, en lugar de las de  $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ .

La configuración de los electrodos y de los materiales sensibles a gases que se integrarán en la zona activa se basan en las características de la matriz de sensores de gases utilizada habitualmente en el IPM, centro donde se realizará el depósito de los materiales sensibles. En la figura 2.24, se muestra el esquema típico de la matriz de cuatro sensores desarrollado en el IPM para la detección de diferentes concentraciones de gases.

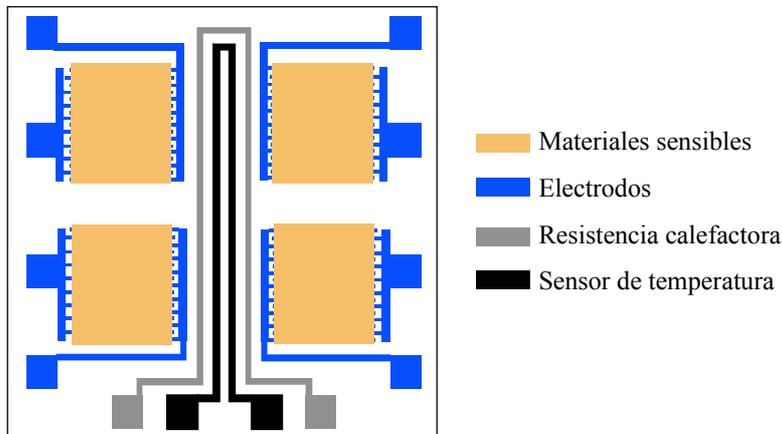


Figura 2.24: Esquema de la matriz de cuatro sensores de gases con electrodos de platino interdigitados desarrollada en el IPM [53].

El tamaño del chip y de las capas sensibles es  $9 \text{ mm}^2$  y  $440 \times 440 \text{ }\mu\text{m}^2$  respectivamente. Los electrodos son de platino y su configuración es interdigitada, la anchura de los dedos es de  $20 \text{ }\mu\text{m}$  y la separación entre ellos de  $40 \text{ }\mu\text{m}$ . Incluye como materiales sensibles diferentes combinaciones basadas en el  $\text{SnO}_2$  [53].

Con estas dimensiones para los materiales sensibles, en cada chip se puede poner una matriz de hasta cuatro óxidos metálicos trabajando en paralelo. Las cuatro capas sensibles poseen el mismo tamaño ( $440 \times 440 \text{ }\mu\text{m}^2$ ) y se han colocado de manera que trabajen a la misma temperatura. Para que la matriz tenga mayor selectividad deben colocarse capas con distintas propiedades (diferentes materiales, espesores o especies dopantes).

En la figura 2.25 derecha, puede verse cómo queda la distribución de los cuatro materiales sensibles sensores en el chip y se presenta una opción para integrar dos materiales sensibles en dos plataformas independientes manteniendo la estructura de las columnas de vidrio (figura 2.25 izquierda).

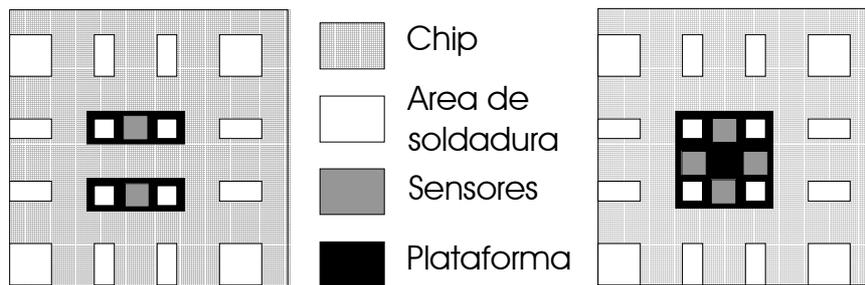


Figura 2.25: Dibujo esquemático de la distribución de los sensores y las columnas en un chip.

### 2.3.1 Elección de materiales de la matriz de sensores de gases

Los materiales más importantes en el sensor de gases son los que forman la membrana, la resistencia calefactora, los electrodos y los materiales sensibles a gases. Existen varias posibilidades a la hora de elegir algunos materiales, en este apartado se dan algunas de las opciones y se determinan los que se usarán para fabricar la matriz de sensores de gases.

#### Capas dieléctricas de la membrana

Los materiales más utilizados como capas dieléctricas en las membranas micromecanizadas en silicio son el  $\text{Si}_3\text{N}_4$  y el  $\text{SiO}_2$  dada la baja conductividad térmica y eléctrica que presentan. En principio, cabe esperar que sea el  $\text{SiO}_2$  el mejor candidato por poseer una conductividad térmica menor al  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , los valores de conductividad térmica encontrados en la literatura para estos materiales dan valores de  $1.4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  para el  $\text{SiO}_2$  [54, 17] y en torno a  $20 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$  para el  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [12, 13, 18]. Las variaciones en el valor de la conductividad térmica del nitruro de silicio se debe a la fuerte dependencia de este parámetro con las características del tipo de proceso de depósito. Pero, el  $\text{SiO}_2$  es un material menos robusto, por lo que es necesario tener

membranas más gruesas de  $\text{SiO}_2$  que de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  para obtener la misma robustez mecánica con ambos materiales. Estas pérdidas no sólo dependen del valor de la conductividad térmica del material sino que también del espesor de la capa, de ese modo se producen más pérdidas cuanto más gruesa sea la capa. Así lo que se gana por un lado con el  $\text{SiO}_2$  por tener menor conductividad térmica, se pierde por otro por la necesidad de tener mayores espesores en la membrana.

Otro dato a tener en cuenta es el estrés inherente a dichas capas. Las membranas de  $\text{SiO}_2$  se curvan más que las de  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , ya que el dióxido de silicio presenta un estrés compresivo, mientras que el nitruro de silicio posee un estrés tensil [55, 56].

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se ha elegido como material para la capa dieléctrica de la membrana al nitruro de silicio. Posteriormente, en el apartado 3.3 del capítulo 3, se detallará el estudio que se ha llevado a cabo para la reducción del estrés en la membrana para mejorar su estabilidad mecánica

### **Resistencia calefactora**

La resistencia calefactora es un componente importante en el sensor de gases que se encuentra integrado sobre la membrana. La resistencia calefactora calentará al dispositivo hasta la temperatura idónea de trabajo. Los materiales habituales utilizados para la resistencia calefactora son platino [57-59] y polisilicio [60-63]. Cada material presenta una serie de ventajas e inconvenientes.

Las resistencias de platino, ampliamente utilizadas como sensores de temperatura dadas las buenas características de repetitividad y linealidad con la temperatura que presentan. Aunque es altamente contaminante para los procesos CMOS debido a la difusión de iones de platino dentro del silicio, esto no supone una gran restricción ya que estas obleas pueden procesarse en equipos diferentes a los habituales de los procesos CMOS.

Este metal presenta una mala adhesión con los óxidos y nitruros de silicio, problema que se soluciona con el uso de una capa de Ta [64], TaSi [65], Cr [66,67] o Ti [68-70] que mejora la adhesión.

El uso del polisilicio, material integrante de la tecnología CMOS, es una alternativa no contaminante frente a las resistencias calefactoras de platino. Otras ventajas que presenta el polisilicio frente al platino es la posibilidad de definir fácilmente motivos de pequeñas dimensiones mediante un grabado seco standard, en lugar de un lift-off y la posibilidad de controlar el valor de su resistividad mediante el dopado con  $\text{POCl}_3$  [71-73]. Su principal inconveniente es la degradación de este material a altas temperaturas.

La selectividad y sensibilidad de los materiales sensibles depende de la temperatura de trabajo, motivo por el cual es importante tener una alta uniformidad térmica en la zona activa. Otro factor importante para la búsqueda de la homogeneidad térmica es evitar posibles puntos calientes que puedan producir fracturas en los calefactores por un calor local excesivo. Muchos autores diseñan calefactores con diferentes geometrías en forma de espiral, de meandro o incluso con formas más complejas [45,74]. Una alternativa tecnológica consiste en colocar una placa conductora debajo del área activa para homogeneizar la temperatura. Con este método se consigue una temperatura uniforme

independientemente de la geometría de la resistencia calefactora [75]. Estas placas homogeneizadoras normalmente suelen ser metálicas [20] o de silicio [21]. En los dispositivos diseñados en este trabajo se ha optado por poner una placa de silicio debajo del área activa.

Existen dos posibilidades para la fabricación de la resistencia calefactora, implementarla en el mismo nivel de metalización que los electrodos [76] o en un nivel de metalización diferente al de los electrodos [77, 78, 79]. Cada opción presenta una serie de ventajas e inconvenientes.

En la primera, los electrodos y la resistencia están en el mismo nivel de metalización, de ese modo, se necesita una única máscara para la definición de ambos componentes, lo que reduce el coste de la fabricación. Pero por otro lado limita el diseño, ya que los electrodos y la resistencia calefactora no pueden cruzarse porque están al mismo nivel de metalización.

Si se elige el segundo método, existe una mayor libertad en el diseño puesto que las resistencias calefactoras quedan enterradas y pueden cruzarse con las pistas de los electrodos sin cortocircuitarse, gracias a la capa aislante de óxido entre ambos niveles de metalización. Pero el número de máscaras aumenta y se necesita una para el calefactor y otra extra para la capa aislante entre electrodos y resistencia. En este caso puede elegirse un material diferente al de los electrodos. Aprovechando este hecho se van a implementar resistencias en dos materiales diferentes: platino y polisilicio.

A partir de ahora se utilizará el nombre de platino-II para el nivel de metalización de los electrodos y platino-I para las resistencias calefactoras enterradas a diferente nivel de metalización de los electrodos.

### **Electrodos del sensor**

Los electrodos del sensor medirán los cambios en las resistencias de los materiales sensibles, valor que depende fundamentalmente del material sensible seleccionado, aunque puede ajustarse mediante las dimensiones de los electrodos, el uso de una configuración interdigitada o en paralelo [80-82] y por supuesto el material del electrodo [83-85].

Los electrodos están colocados en el área activa debajo de los materiales sensibles a gases y los materiales utilizados habitualmente son oro [86,87] y platino [88-92]. Para la fabricación de estos diseños se ha seleccionado como material para los electrodos una bicapa de platino-titanio.

### **Materiales sensibles a gases**

En el microsistema que se desarrolla en este trabajo el FhG-IPM integrará hasta cuatro materiales diferentes, lo que supone una mejora en la selectividad del sistema sensor cuando aparecen gases interferentes o hay mezcla de gases, comparado con la utilización de un único dispositivo con un material.

La elección de los materiales sensibles está altamente relacionada con las especificaciones del sensor, es decir, con la aplicación que se pretenda dar al microsistema. En este trabajo, el campo de aplicación del sensor de gases es la detección de los gases involucrados en el control de calidad del aire para cabinas de coches y aviones ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$ ) y la detección de incendios ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , Halon- $\text{CBrF}_3$ ), ver anexo A.

El depósito de los materiales sensibles se va a realizar en el IPM, donde se han hecho una serie de estudios para diferentes óxidos metálicos analizado su respuesta frente a los gases de interés de esta aplicación y optimizando la técnica de depósito para su integración en los sustratos de silicio.

El primer material elegido es el  $\text{SnO}_2$ , material ampliamente utilizado en sensores de gases, cuya tecnología de depósito y lift-off está disponible en la Sala Blanca del IPM [93,94].

El segundo óxido metálico que se va a implementar en la matriz es el  $\text{ZnO}$ , cuyas buenas propiedades para este tipo de aplicaciones se conocen desde 1954 [95]. Desde entonces, han aparecido muchas publicaciones sobre este material [96-100].

El CTO ( $\text{Cr}_x\text{Ti}_y\text{O}_3$ ) aparece reportado por primera vez en 1990 [101-102], este material presenta un mejor comportamiento frente a cambios de humedad en comparación con el  $\text{SnO}_2$ .

En 1967 se reportó por primera vez los cambios inducidos en el valor de la resistencia del  $\text{WO}_3$  en presencia de gases [103]. Desde hace diez años, las actividades para desarrollar sensores de gases basadas en el uso de este material han aumentado considerablemente, hecho que queda reflejado en el alto número de publicaciones en este periodo [104-106]. Al mismo tiempo, el primer dispositivo comercial ya está en el mercado [107]. La principal ventaja que presenta este óxido metálico es la buena sensibilidad que presenta en la detección de  $\text{NO}_2$  [108-110].

**Resumen de los materiales utilizados en la fabricación de la matriz de sensores de gases en las estructuras de vidrio/silicio**

En la tabla 2.4 se resumen los materiales seleccionados para la fabricación de la matriz de sensores de gases.

Componente	Material
Substrato	Silicio
Vidrio	Pyrex #7740 (1mm)
Capa dieléctrica	Nitruro de silicio
Resistencia calefactora	Platino/Polisilicio
Electrodos	Platino
Capas sensibles	$\text{SnO}_2$ , $\text{ZnO}$ , CTO y $\text{WO}_3$

Tabla 2.4: Materiales utilizados para la fabricación del dispositivo final.

### 2.3.2 Diseño de la matriz de cuatro sensores de gases

Cada material sensible tiene dos salidas para los electrodos, por lo que como hay cuatro materiales supone tener ocho pistas que conecten la zona activa con el marco. Esto provoca pérdidas de calor a través de cada pista y por tanto una disminución del aislamiento térmico. Para reducir estas pérdidas caloríficas a través de las pistas se ha realizado el diseño de forma que sólo haya un contacto común de referencia y otros cuatro adicionales, uno para cada electrodo del sensor, con este método se reduce el número de pistas de ocho a cinco.

Se han realizado dos diseños diferentes de la matriz de sensores de gases, cuya principal diferencia viene dada por el elemento calefactor de la estructura contemplando la posibilidad de implementar resistencias en el mismo nivel de metalización de los electrodos (diseño 1) o enterradas (diseño 2), la distribución de los cuatro sensores en la zona activa es la misma. En las figuras 2.26 y 2.27 muestran el *layout* de los diseños.

El primer diseño posee el elemento calefactor exterior al mismo nivel de metalización que los electrodos con una forma similar al del diseño anterior. Se ha diseñado esta forma para la resistencia porque es la que proporciona una temperatura más uniforme en la zona donde está los materiales sensibles a gases. El segundo diseño posee una resistencia calefactora enterrada, es decir, en un nivel de metalización diferente a la de los electrodos en forma de cruz rodeando los sensores y dejando fuera las columnas de vidrio. Este diseño requiere el uso de una capa aislante entre la resistencia calefactora y los electrodos.

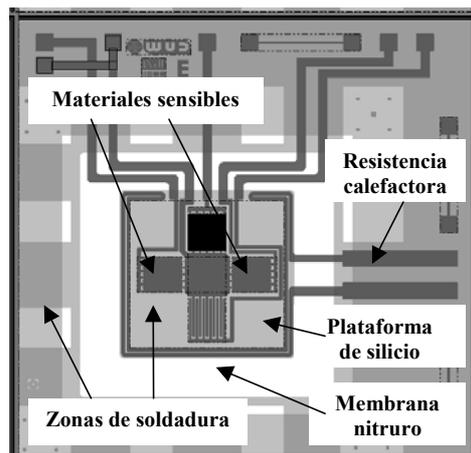


Figura 2.26: Primer diseño con la resistencia calefactora y electrodos al mismo nivel de metalización.

### 2.3.3 Diseño de la matriz de dos sensores de gases

Con la misma geometría para el vidrio que en los dos casos anteriores, se ha realizado una variación que consiste en el diseño de un chip con una matriz de dos sensores de gases aislados térmicamente uno del otro integrados en dos plataformas de silicio

independientes sobre una única membrana. Cada sensor posee una resistencia calefactora independiente, de tal modo que puedan trabajar independientemente uno de otro, a diferentes temperaturas. Las resistencias calefactoras en este chip son enterradas, es decir a un nivel diferente de los electrodos de los sensores. En la figura 2.28, puede verse el *layout* de este tercer diseño.

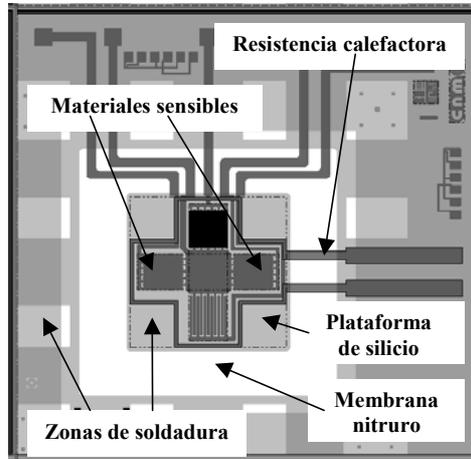


Figura 2.27: Segundo diseño con la resistencia calefactora y los electrodos en diferente nivel de metalización.

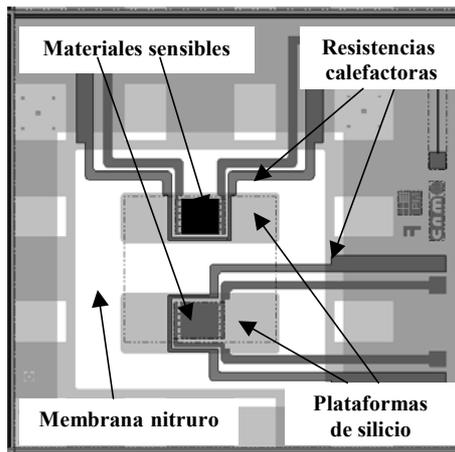


Figura 2.28: Diseño de una matriz de dos sensores de gases con la resistencia calefactora y electrodos en diferente nivel de metalización.

Debido a la existencia del vidrio en los tres diseños, hay una dificultad añadida a la hora de realizar el cableado de los chips para su encapsulado. Para facilitar el encapsulado del dispositivo y la accesibilidad a los pads de los electrodos de los sensores y las resistencias calefactoras, todos ellos se encuentran en la parte superior y en la derecha

en cada diseño. En esta misma zona del marco exterior de silicio también se han integrado estructuras de test para verificar los procesos tecnológicos y resistencias de platino trabajando como sensores de temperatura para poder medir el aislamiento térmico midiendo la temperatura en la parte exterior del chip (marco de silicio).

## 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

Cada chip está formado por una matriz de cuatro sensores de gases y la circuitería CMOS para la lectura de los sensores y el control del calefactor. Estas dos partes están claramente diferenciadas y aisladas térmicamente, como puede verse en la figura 2.29. También se incorporan sensores de temperatura en el marco de silicio que se van a utilizar para comprobar experimentalmente el aislamiento térmico entre la zona activa del sensor y la parte de control (circuitería).

### 2.4.1 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.

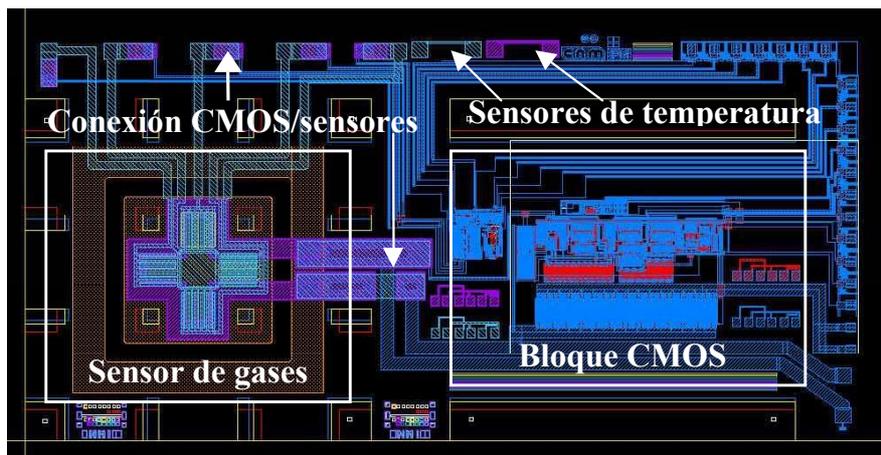


Figura 2.29 Diseño del chip mixto que incluye una matriz de cuatro sensores de gases y la circuitería CMOS asociada

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  $300 \Omega$ , 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 5 V de los circuitos y por tanto ha sido necesario rediseñar esta resistencia haciéndola más ancha para disminuir su valor hasta  $50 \Omega$ .

### 2.4.2 Circuitería CMOS

El diseño de los bloques CMOS está basado en la tecnología CMOS25 y en la librería de celdas standard disponibles en el CNM para dicha tecnología.

El grupo de la Universidad de Barcelona ha diseñado dos bloques, uno para regular la temperatura en la zona activa del sensor mediante el control de la resistencia calefactora y otro para la lectura de las resistencias de los materiales sensibles del sensor a través de los electrodos. En este apartado se van a describir brevemente estos diseños, aunque no es el objetivo de este trabajo.

#### **Bloque CMOS para el control de la resistencia calefactora**

El objetivo fundamental de este bloque es conseguir un determinado valor de temperatura en la zona activa del sensor donde se encuentran los cuatro materiales sensibles, mediante el control del valor de la resistencia calefactora. El diseño está basado en el método de modulación por anchura de pulso PWM (*Pulse width modulation*).

El circuito de control opera en dos fases controlados por un reloj. En la primera se inyecta a la resistencia calefactora una pequeña corriente fija y conocida (estado de medida) y en la segunda fase se inyecta la máxima corriente posible (estado de calentamiento). En la figura 2.30 puede verse el esquema de la parte de potencia correspondiente al circuito de control y su circuito equivalente simplificado.

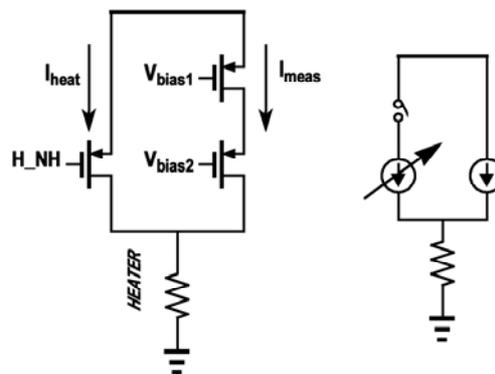


Figura 2.30: Esquema del circuito de la parte de potencia del circuito de control y su circuito equivalente simplificado. [111]

Para controlar las fases de medida/calentamiento se ha diseñado un circuito (ver figura 2.31). La idea de éste es medir el potencial en el nodo asociado a la resistencia calefactora ( $H_{NH}$  en la figura anterior) y compararlo con una referencia externa. Para minimizar el offset y del ruido se ha diseñado una arquitectura diferencial.

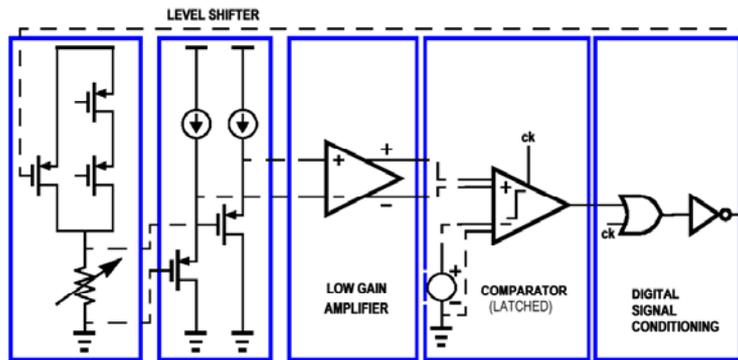


Figura 2.31: Esquema simplificado del diseño del bloque de control de la resistencia calefactora del sensor [111]

### Bloque CMOS de lectura del sensor

La detección de gases se realiza midiendo los cambios en el valor de la resistencia de los materiales sensibles mediante los electrodos del sensor. Se han diseñado dos bloques diferentes para la lectura de estas cuatro resistencias.

El primer diseño está basado en un oscilador cuyo diagrama de bloques se presenta en la figura 2.32. Cambiando la entrada de control del multiplexor puede seleccionarse cada una de las cuatro resistencias a medir.

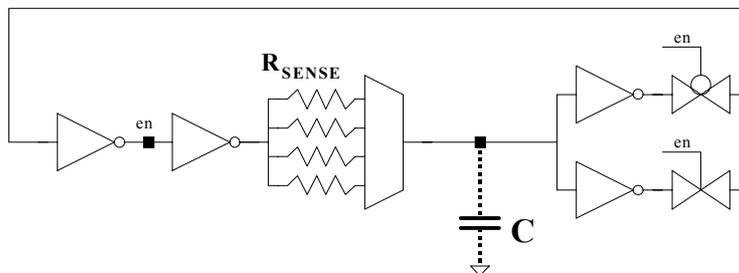


Figura 2.32: Diagrama de bloques para el circuito oscilador [111].

El segundo diseño (figura 2.33) está basado en un inversor con un rango de integración ajustable mediante un condensador externo. Con sólo dos valores de capacidad (3.3 pF y 100 pF) es posible cubrir un amplio rango para los valores de la resistencia (10 K $\Omega$ -200 M $\Omega$ ). Al igual que en el diseño anterior, puede medirse cada una de las cuatro resistencias mediante un multiplexor.

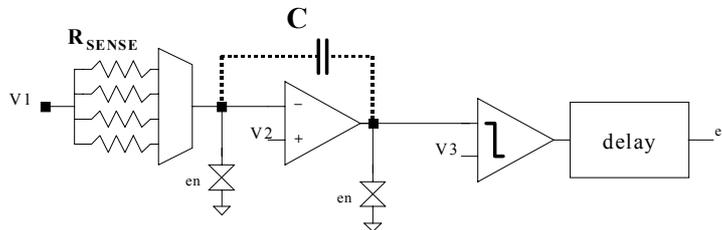


Figura 2.33: Diagrama de bloques para el circuito integrador [111].

## Conclusiones

Se han diseñado una estructura de vidrio/silicio para la implementación de sistemas de 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 central micromecanizada en silicio (donde se colocan los materiales sensibles) y un marco exterior conectados a través de unas columnas de vidrio.

Se ha llevado a cabo un estudio térmico mediante simulaciones FEM para minimizar las pérdidas de calor de la zona activa de la estructura para optimizar el aislamiento térmico y por tanto disminuir el consumo.

Las simulaciones son una buena herramienta para optimizar las dimensiones dentro de los rangos dados por las limitaciones tecnológicas. Se ha creado un modelo paramétrico que permite el estudio de cada variable por separado para analizar la influencia de las principales dimensiones del vidrio (espesor de vidrio, anchura y altura de las columnas) y del silicio (tamaño y espesor de la plataforma, separación entre el marco y la meseta) en el aislamiento térmico de estos dispositivos.

A partir de los resultados de la simulación se han determinado las principales dimensiones de la estructura (espesor del oblea de vidrio, dimensiones de las columnas y de la plataforma central, etc.).

Los diseños de los dispositivos están altamente relacionados con la geometría obtenida mediante el micromecanizado del vidrio, ya que la distribución final de los elementos de los sensores en el chip queda limitado por las zonas de la soldadura anódica de las columnas de vidrio. En estas zonas no puede colocarse ningún elemento del sensor.

Se han diseñado dos dispositivos que incluyen una matriz de cuatro sensores con diferentes materiales sensibles en la misma plataforma central de silicio calentada por una resistencia calefactora, motivo por el cual los sensores trabajan a la misma temperatura. La plataforma de silicio presenta un alto aislamiento térmico con lo que se consigue un área activa con una temperatura alta y homogénea teniendo una buena selectividad y sensibilidad gracias a la combinación de las señales de dichos materiales con un bajo consumo. La principal diferencia entre estos diseños se debe a que en uno la resistencia calefactora está enterrada y en el otro en el mismo nivel de metalización que los electrodos. El diseño con resistencia calefactora enterrada da más libertad a la hora de elegir el material del calefactor, en este caso se van a utilizar alternativamente platino o polisilicio.

Una variación de los dos diseños anteriores es la implementación de una matriz de dos sensores de gases. Este dispositivo consta de dos plataformas de silicio independientes en una misma membrana de nitruro. Cada plataforma posee una resistencia calefactora de tal modo que los dos sensores trabajar a diferente temperatura, gracias a su aislamiento térmico.

El último diseño combina en un mismo chip una matriz de sensores de gases y los circuitos que se integrarán en la zona a baja temperatura (marco exterior de silicio). La matriz de se sensores incluye cuatro materiales sensibles diferentes trabajando a la misma temperatura implementados en una plataforma central de silicio única calentada mediante una resistencia calefactora. La circuitería está formada por dos bloques para el control de la resistencia calefactora y la lectura de las resistencias de los electrodos.