

3 Tecnología para la fabricación de las estructuras de vidrio/silicio

En este capítulo se detallan todos los estudios tecnológicos previos a la fabricación de los dispositivos. El conjunto de pruebas pueden agruparse en cuatro puntos:

- Micromecanizado de las obleas de vidrio
- Soldadura anódica de obleas de silicio y vidrio micromecanizadas
- Tecnología para la fabricación de sensores de gases semiconductores
- Estudios de compatibilización para la integración de sensores de gases y circuitos CMOS en un mismo chip

El micromecanizado de vidrio es una parte importante en los dispositivos que se van a fabricar. La geometría del vidrio requiere la definición de columnas en las estructuras de vidrio/silicio en las que se van a implementar la matriz de sensores de gases (figura 2.1). La existencia de dispositivos mixtos (sensores y circuitería CMOS) hace necesario el desarrollo de una técnica de micromecanizado para la definición de columnas y agujeros pasantes conjuntamente en las obleas de vidrio (figura 2.2). En este capítulo (apartado 3.1) se describen la técnica de serrado mecánico del vidrio desarrollada en el propio centro y algunas alternativas comerciales para la definición de columnas. Se estudia una nueva técnica para definir columnas y agujeros pasantes en el vidrio que consiste en la combinación de dos métodos, serrado mecánico y *sandblasting*.

Las obleas de vidrio micromecanizadas van a soldarse anódicamente al silicio. En el apartado 3.2, se describe el análisis llevado a cabo sobre la soldadura de dichas obleas, así como de un método de limpieza previo a la soldadura que permite optimizar la calidad de este tipo de soldadura.

Otro de los puntos que se desarrolla en este capítulo (apartado 3.3) es el análisis de los procesos involucrados en la fabricación de sensores de gases para la puesta a punto y optimización de la tecnología. Se llevan a cabo un conjunto de test tecnológicos preliminares a la fabricación estudiando diversas opciones para la fabricación de membranas con alta estabilidad mecánica, así como un estudio de las últimas etapas del proceso de fabricación para buscar el procedimiento para la realización del ataque anisotrópico y la soldadura anódica que proporcione un mayor rendimiento.

En este trabajo se ha definido una nueva tecnología mixta para la fabricación de dispositivos que incorporan una matriz de sensores de gases y circuitería CMOS en el mismo chip. La combinación se lleva a cabo eligiendo una tecnología CMOS standard e incorporando los pasos extras que sean necesarios para obtener los sensores de gases. El objetivo principal es evitar cambios en las reglas de diseño de la electrónica y con ello cualquier variación a nivel de diseño, de tal forma que el uso de las celdas standard siga siendo válido. Bajo estas condiciones, se analizan los puntos críticos en la integración de sensores de gases dentro del proceso standard CMOS y finalmente se presenta una posible secuencia de fabricación del dispositivo mixto como resultado de los diferentes test tecnológicos realizados (apartado 3.4).

3.1 Técnicas para el micromecanizado de las obleas de vidrio

La elección del vidrio es una parte importante en el diseño de la estructura, ya que éste ha de ser soldado anódicamente al silicio. Los vidrios utilizados para la soldadura anódica deben poseer unas características adecuadas, como tener una rugosidad menor que $1 \mu\text{m}$ y un coeficiente de expansión térmica similar al del silicio en el rango de temperatura en el que se realiza la soldadura anódica vidrio-silicio. Así se consigue evitar tener problemas de estrés y rupturas de la estructura debido a la expansión del vidrio y el silicio cuando se calienta durante el proceso de soldadura y a las temperaturas de trabajo de la matriz de sensores de gases. Con estas características existen diferentes tipos de vidrios en el mercado, como Hoya SD2 [47], Schott Borofloat 33 [112] y Corning Pyrex #7740 [47]. Se ha elegido el Pyrex #7740 y Hoya SD2 de 1mm de espesor, ya que son los vidrios utilizados habitualmente en el CNM para su soldadura anódica con el silicio con muy buenos resultados.

El micromecanizado del vidrio depende del tipo de estructura que se va a fabricar. Para la integración de la matriz de sensores de gases, únicamente es necesario la realización de columnas de vidrio que sujetan la plataforma de silicio donde están integrados los materiales sensibles a gases, tal como se mostraba en la figura 2.1 (CAP-2).

En el caso de integrar la matriz de sensores y la circuitería CMOS en el mismo chip, el micromecanizado de vidrio requiere además de la definición de columnas en la zona de la matriz de sensores de gases la realización de agujeros pasantes en el vidrio sobre la zona CMOS, tal como se muestra en la figura 3.1.

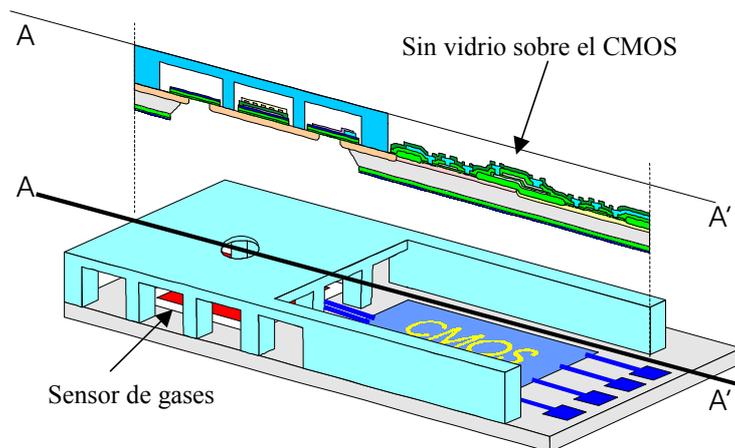


Figura 3.1: Vista esquemática de la estructura propuesta para la integración en un único chip de una matriz de sensores de gases y la circuitería CMOS asociada.

Las columnas de vidrio sujetan la membrana aportando mayor robustez mecánica como se ha comentado anteriormente y en la zona donde está ubicada la circuitería el vidrio quedará abierto durante la soldadura anódica vidrio-silicio para evitar efectos no deseados debido a los campos eléctricos formados durante este proceso en los circuitos CMOS. En este diseño del vidrio se va a incluir adicionalmente un agujero pasante en la zona central del sensor de gases, aunque en este primer diseño no es necesario debido a la existencia de flujo de gas lateral a través de las columnas, pero puede ser una dificultad añadida en futuros diseños. Al incluirla aquí queda evaluada su viabilidad sin necesidad de realizar nuevos tests.

3.1.1 Realización de columnas en obleas de vidrio mediante serrado mecánico

La tecnología que se ha desarrollado para la definición de columnas en el CNM está basada en el serrado mecánico con una sierra de alta precisión. Las ventajas que ofrece este método son:

- Obtención de una geometría precisa
- Buena repetitividad en el proceso
- Posibilidad de su realización en el propio centro
- Método barato: no necesita ninguna máscara para realizar los cortes, ni ningún material extra, únicamente la sierra y el vidrio a cortar

La técnica de serrado mecánico está basada en la realización de cortes o canales con la sierra en dos direcciones perpendiculares X e Y, para la definición de las columnas. En las primeras pruebas se depositaba una fotoresina antes de realizar los cortes para proteger la superficie del vidrio durante el proceso de serrado, como se muestra en la figura 3.2. Con este procedimiento quedaba suciedad en la superficie del vidrio al eliminar la resina. Se probó a serrar las obleas sin esta resina consiguiéndose el mismo rendimiento con la ventaja añadida de que las obleas de vidrio quedaban mucho más limpias, por lo que ya no se depositó más resina en las pruebas de micromecanizado detalladas a continuación. Para esta técnica se utiliza el equipo standard de serrar chips disponible en el centro.

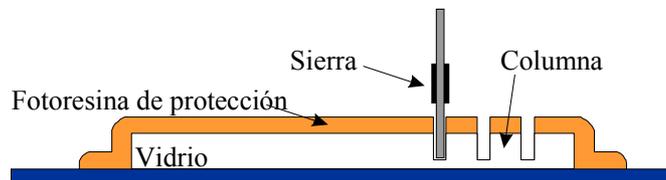


Figura 3.2: Dibujo esquemático del sistema de protección con resina durante el serrado para la definición de columnas en el vidrio.

Las dimensiones de las columnas están fijadas por las características de los cortes (figura 3.3). La profundidad del corte (D), y el espesor de la oblea de vidrio (C) dan la altura de las columnas, de ese modo cuanto más profundo sea el corte más altas serán. La anchura de los canales, o lo que es lo mismo la distancia entre columnas (B), queda determinado por el grosor de la sierra utilizada. Por último, la anchura de las columnas

(A) por el espacio dejado entre dos canales cortados consecutivamente a lo largo de la oblea. Con este tipo de serrado es fácil construir columnas de distintas dimensiones y separación cambiando los parámetros anteriormente mencionados.

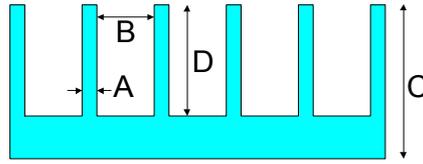


Figura 3.3: Vista esquemática de las columnas de vidrio. A) Anchura de las columnas, B) distancia entre dos columnas, C) espesor de la oblea de vidrio y D) altura de las columnas

Existen tres espesores disponibles para la sierra en el CNM: 150, 650 y 1000 μm . Teniendo en cuenta que en esta aplicación para sensores de gases, la parte activa del sensor (materiales sensibles, electrodos y resistencia calefactora) debe colocarse fuera de las zonas donde se va a realizar la soldadura anódica, es decir, en el espacio entre columnas, sólo es posible la utilización de la sierra de 1000 μm .

La sección de las columnas es un parámetro muy importante en el consumo de la estructura, cuanto más anchas sean las columnas, mayor superficie de vidrio estará en contacto con la membrana de silicio a temperatura elevada, produciéndose mayores pérdidas. Así, desde el punto de vista del consumo interesa conseguir columnas cuanto más delgadas mejor.

Sin embargo, es necesario llegar a un equilibrio, cuanto más delgadas sean las columnas más frágiles serán. De ese modo, se han de reducir lo máximo posible, siempre y cuando las columnas aguanten y no se rompan durante el procesado. Inicialmente, se comenzó con columnas de una altura de 800 μm y de $300 \times 300 \mu\text{m}^2$ de sección, con estas dimensiones no se produjo la ruptura de las columnas siendo el rendimiento del serrado mecánico del 100%.

Una vez visto que estas dimensiones eran factibles, se realizaron pruebas de serrado de columnas con menor sección transversal: 250×250 , 200×200 y $150 \times 150 \mu\text{m}^2$. Se comprobó, que efectivamente, conforme las dimensiones iban disminuyendo aparecía una mayor dificultad en el serrado rompiéndose más columnas y disminuyendo el rendimiento hasta un 80 % para columnas de 150 μm de sección transversal. En la tabla 3.1 se muestran las dimensiones reales de las columnas que se han obtenido en función de los distintos pasos de la sierra.

Paso de la sierra (μm)	Sección columnas (μm^2)
1550	495 x 495 (~ 500 x 500)
1350	295 x 295 (~ 300 x 300)
1300	239 x 239 (~250 x 250)
1250	189 x 189 (~200 x 200)
1200	137 x 137 (~150x150)

Tabla 3.1: Secciones obtenidas para las columnas definidas mediante serrado mecánico con diferentes pasos de la sierra.

En la figura 3.4 se muestran unas fotografías de diferentes columnas de sección cuadrada ($500 \times 500 \mu\text{m}^2$ y de $200 \times 200 \mu\text{m}^2$) y de sección rectangular de $500 \times 200 \mu\text{m}^2$ y una altura de $800 \mu\text{m}$, obtenidas mediante este método en un oblea de vidrio de 1 mm . La calidad de los bordes de las columnas es muy buena, aunque queda ligeramente afectada durante el proceso de serrado, existiendo pequeños defectos en los bordes de las columnas, como puede verse en las fotografías (figura 3.4). Posteriormente se comprobó que estas pequeñas imperfecciones en los bordes de las columnas no dan problemas en la soldadura anódica.

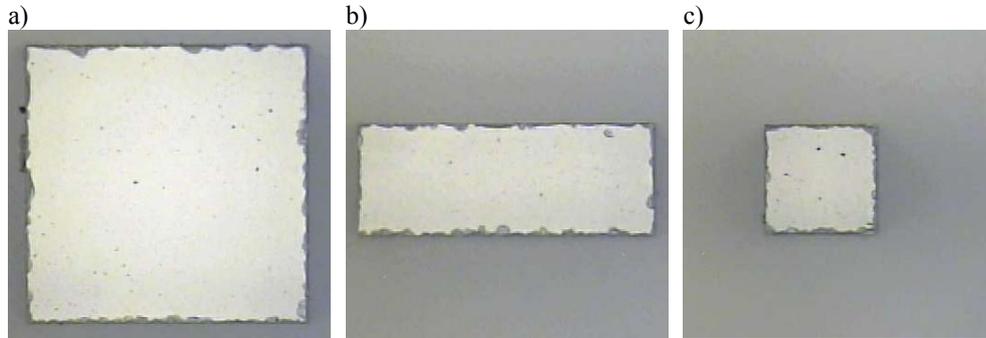


Figura 3.4: Vista superior de las columnas para diferentes secciones: a) $500 \times 500 \mu\text{m}^2$, b) $500 \times 200 \mu\text{m}^2$ y c) $200 \times 200 \mu\text{m}^2$. La altura de las columnas era $800 \mu\text{m}$ para una oblea de vidrio de 1 mm de espesor.

Las columnas obtenidas con esta técnica son prácticamente verticales con un ángulo de casi recto (88°), como puede verse en la fotografía siguiente (figura 3.5). La parte inferior de las columnas es redondeada con un radio de curvatura de $120 \mu\text{m}$, valor que depende de la forma de la sierra seleccionada.

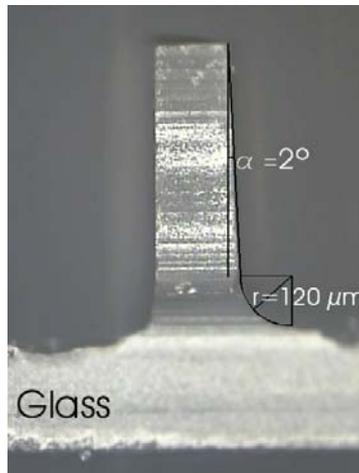


Figura 3.5: Fotografía de una columna de vidrio micromecanizada mediante serrado mecánico con una sección de $180 \times 180 \mu\text{m}^2$.

Esta redondez (figura 3.6 izquierda) en la base de las columnas es perfectamente aceptable para este tipo de estructuras. No obstante, se intentó mejorar el procedimiento de serrado para conseguir columnas con una mejor relación de aspecto utilizando un procedimiento de serrado alternativo. Este nuevo método consiste en realizar tres cortes con una sierra de 350 mm de espesor para crear un canal equivalente al producido con una sierra de 1 mm de espesor. Como puede verse en la figura 3.6 derecha este nuevo método proporciona un perfil menos curvado.

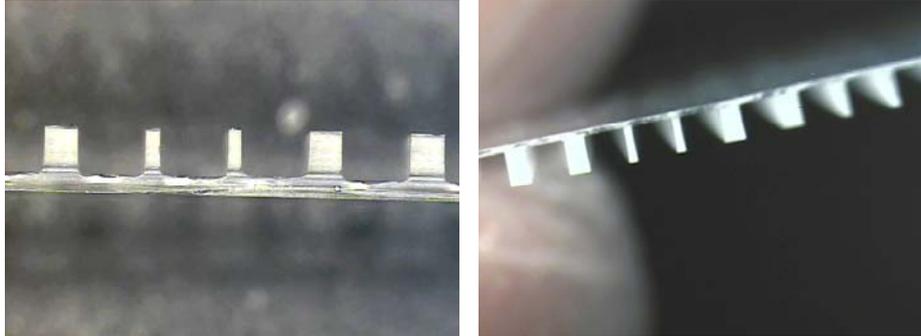


Figura 3.6: Perfil de para unas columnas de $200 \mu\text{m}^2$ de sección obtenidas mediante un sólo corte con una sierra de 1mm (izquierda) y tres cortes con una sierra de 350 mm (derecha).

3.1.2. Alternativas al serrado mecánico para la definición de columnas en el vidrio

Aunque el método de micromecanizado del vidrio con la sierra da muy buenos resultados, se han estudiado otras técnicas comerciales para la realización de columnas en el vidrio:

- Ultrasonidos
- Chorro de arena (*Sandblasting*)
- Definición con láser
- Grabados secos

Todas estas técnicas aportan como principal ventaja frente al serrado mecánico una mayor libertad en la geometría del diseño. En estos casos no hay necesidad de mantener la geometría de cortes y columnas imprescindible en el serrado mecánico.

En la tabla 3.2 se resumen las empresas consultadas junto con la técnica que utilizan y sus principales características. Analizando las especificaciones dadas por las empresas, se puede concluir que sólo Little Things Factory se ajusta a las necesidades del diseño del para la geometría del vidrio. Las empresas que utilizan ultrasonidos no son muy adecuadas ya que las columnas son demasiado frágiles y se romperían durante el proceso (Bullen Ultrasonics, Sensor Prep Services y Corning). El resto de las empresas tienen unas tolerancias muy elevadas y/o perfiles poco verticales para las dimensiones de la estructura (Mikroglass, Planoptik, y Schott).

Empresa	Tecnología	Características	Procesado del dispositivo
Bullen Ultrasonics [113]	Ultrasonidos	Diámetro mínimo para los agujeros: 0.25 mm	Columnas demasiado frágiles: se rompen durante el proceso
Mikroglass [114]	Grabado seco	Grabado isotrópico Diámetro mín: 0.25 mm.	Relación de aspecto pobre (1:1)
Planoptik [115]	Láser	Espesor de la oblea de vidrio: 500-600µm	Las dimensiones mínimas no se ajustan
Sensor Prep Services [116]	Ultrasonidos	Canales, agujeros, cavidades. Angulo: 19°	Perfiles poco verticales. Columnas demasiado delgadas: se rompen durante el proceso.
Schott [117]	Grabado seco	Grabado isotrópico	Relación de aspecto pobre (1:1)
Little Things Factory (LTF) [118]	<i>Sandblasting</i>	Anchura del agujero: 0.3x el espesor Espacio mínimo entre agujeros: 0.3x espesor Angulo: 10°	Mínima dimensión de las columnas 300 x 300 µm ² Esquinas redondeadas
Corning [119]	Ultrasonidos	Diámetro mínimo para los agujeros: 0.10 mm	Columnas demasiado delgadas: se rompen durante el proceso

Tabla 3.2: Resumen de las especificaciones que dan las empresas consultadas para las diferentes técnicas que emplean para la micromecanización del vidrio.

Definición de columnas mediante *Sandblasting*

Se han realizado diferentes test de micromecanizado para la definición de columnas en vidrio en colaboración con la empresa Little Things Factory, mediante *sandblasting*. Este método consiste en lanzar un chorro de partículas abrasivas sobre la superficie del vidrio de tal forma que puede conseguirse fácilmente un amplio rango de microestructuras en diferentes clases de vidrios.

En la elección del vidrio el único requisito es que las obleas puedan soldarse anódicamente al silicio, con estas condiciones las utilizadas habitualmente por dicha empresa son Schott Borofloat 33.

Las columnas obtenidas mediante esta técnica tienen las esquinas redondeadas y una forma típica de volcán, como puede verse en la fotografía de la figura 3.7. La relación de aspecto es de 3 a 1 y el ángulo con la horizontal ha disminuido hasta un valor de 70°. Con este método no pueden conseguirse columnas con dimensiones inferiores a 300 µm.

Debido a las pequeñas dimensiones de estas columnas fue necesario la optimización del método de adhesión de la máscara al vidrio por parte de la empresa. No obstante, se han visto fallos a la hora de definir la matriz de columnas como puede verse en la fotografía de la figura 3.8 derecha.

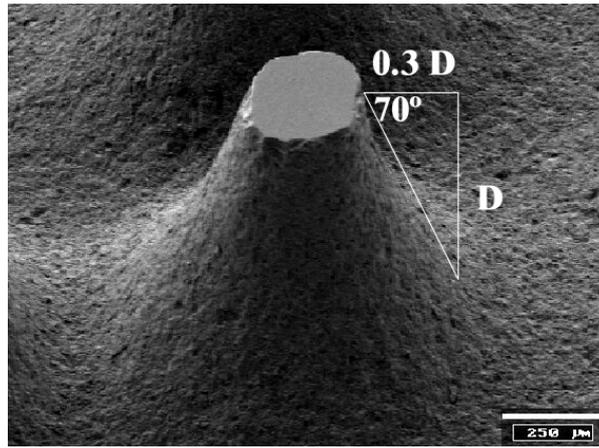


Figura 3.7: Perfil de una columna de 300 μm micromecanizada mediante *sandblasting*.

Comparación entre la técnica de serrado mecánico y *Sandblasting* para la definición de columnas

En las fotografías de la figura 3.8, pueden verse la matriz de columnas obtenidas con cada método: serrado mecánico a la izquierda y *sandblasting* a la derecha. Las principales características de los dos procesos para la fabricación de columnas se resumen en la tabla 3.3.

De estos test tecnológicos puede concluirse que el serrado mecánico es la mejor opción para la definición de columnas delgadas (hasta 150 μm x 150 μm) con una alta verticalidad.

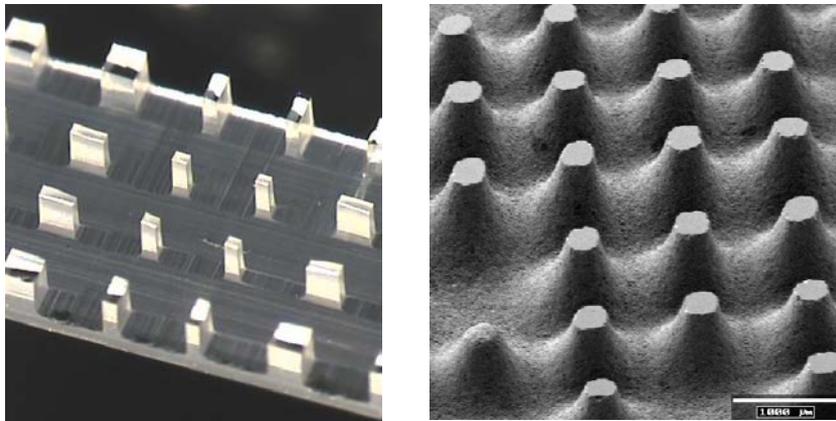


Figura 3.8: Fotografías de unas obleas de vidrio micromecanizadas con una matriz de columnas mediante (Izquierda) serrado mecánico de varias secciones: 500 x 500, 500 x 200 y 200 x 200 μm² y derecha) *sandblasting* (500 μm de diámetro).

	Serrado mecánico	<i>Sandblasting</i>
Angulo	88°	70°
Forma	Paralelopípeda	Volcán
Anchura mínima	150 x 150 μm^2	300 μm diámetro
Procesado en paralelo	No	Sí
Uso de máscara	No	Sí

Tabla 3.3: Resumen principales características de las dos técnicas de micromecanizado

3.1.3 Definición de agujeros pasantes en el vidrio

Debido a la naturaleza del serrado mecánico, esta técnica no es apropiada para la definición de agujeros pasantes en la oblea de vidrio. Por tanto, para la geometría del vidrio compuesta por columnas y agujeros (chip con circuitería CMOS) es necesario combinar dos métodos: el serrado mecánico para la definición de las columnas y otro método para la definición de los agujeros.

Existen diferentes técnicas para la definición de agujeros pasantes en las obleas de vidrio. Una primera opción es el grabado húmedo en disoluciones basadas en HF, este método requiere el uso de una máscara que sea resistente al HF. Esto no es un problema, ya que hay varias posibilidades como algunas máscaras metálicas (cromo, oro) [120,121], los substratos de silicio soldados anódicamente al vidrio [122,123] o las máscaras de polisilicio LPCVD [124]. El grabado húmedo tiene una velocidad alta, pero la verticalidad es baja debido al elevado ataque lateral.

Otras alternativas son el micromecanizado mediante láser y ultrasonidos, pero el principal inconveniente que presentan estas técnicas es la mala calidad de la superficie del vidrio que podría causar problemas en la soldadura. Así estas técnicas requerirían un paso de pulido anterior a la soldadura anódica con la oblea de silicio.

El *sandblasting* ofrece una buena solución para la definición de agujeros en el vidrio, se obtiene una buena calidad en la superficie y permite el procesado en paralelo de una oblea completa lo que proporciona una fabricación muy productiva para este tipo de micromecanizado con agujeros. El estudio de la técnica del *sandblasting* se ha llevado a cabo en colaboración con Little Thing Factory GmbH. Un resumen con las principales especificaciones de esta técnica, para la realización de agujeros pueden verse en la tabla 3.4 [118].

Materiales	Todos los vidrios
Espesor	Hasta 4 mm
Dimensiones máximas	200 mm x 200 mm
Tolerancias	Depende del diseño
Mínimo espacio entre agujeros	Espesor x 0.3~0.5
Diámetro mínimo del agujero	Espesor x 0.3~0.4
Angulo para agujeros pasantes	85°
Rugosidad de la superficie	2-5 μm

Tabla 3.4: Especificaciones dadas por la empresa LTF para la técnica de *Sandblasting*

En la figura 3.9 se muestra una fotografía de una oblea de vidrio (Schott Borofloat 33) micromecanizada con agujeros pasantes y un detalle de uno de los agujeros realizados en la oblea por LTF.

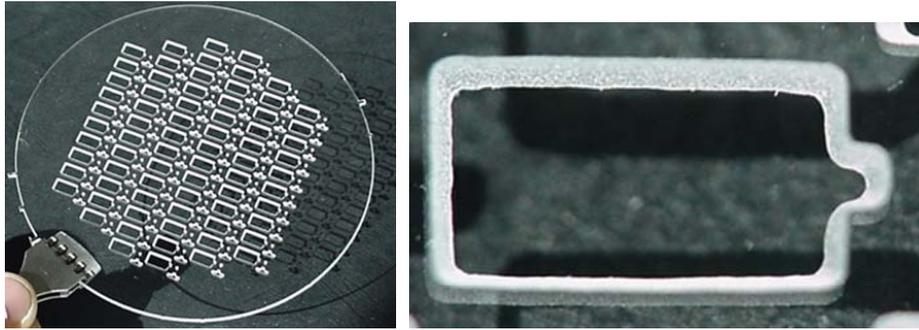
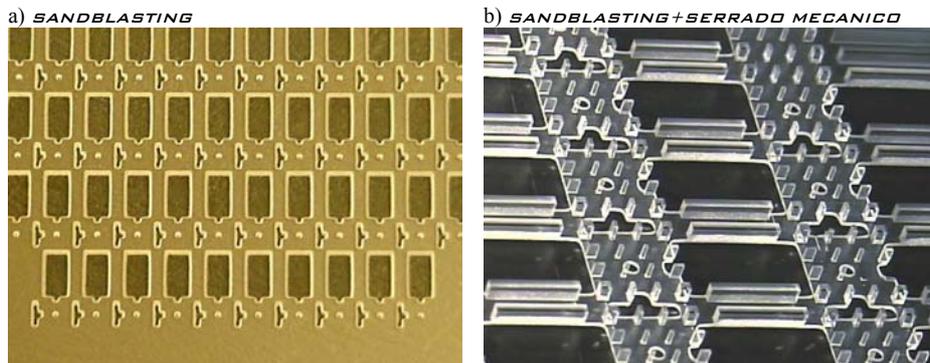


Figura 3.9: Fotografías de una oblea de vidrio (Schott Borofloat 33) micromecanizada con agujeros pasantes realizados por LTF mediante *sandblasting* y un detalle ampliado de uno de ellos.

3.1.4 Combinación de *Sandblasting* y serrado mecánico para la definición de columnas y agujeros pasantes en las obleas de vidrio

Finalmente se ha seleccionado como mejor alternativa el serrado mecánico para la definición de las columnas y el método de *sandblasting* para los agujeros. El proceso final para la micromecanización de obleas de vidrio con agujeros y columnas se realiza en dos etapas combinando ambas técnicas.

El proceso que se sigue es el siguiente: en primer lugar se definen los agujeros pasantes mediante *sandblasting* en las zonas correspondientes a la circuitería CMOS como puede verse en la figura 3.10-a) y posteriormente se sierran estas obleas para definir las columnas siguiendo el mismo procedimiento citado anteriormente. En la figura 3.10-b, puede verse el micromecanizado obtenido en una oblea combinando ambos métodos y en las fotografías c) y d) un detalle de las partes correspondientes a la parte CMOS y a los sensores de gases respectivamente.



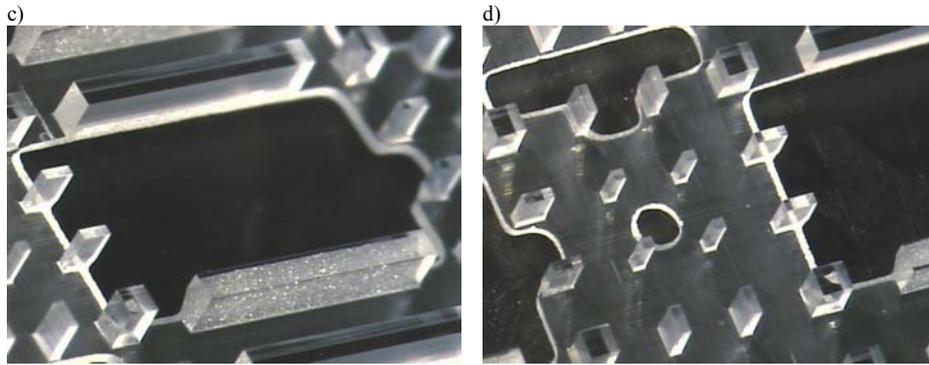


Figura 3.10: Fotografía de un detalle de una oblea a) tras realizar la definición de los agujeros mediante *sandblasting* y b) después de la definición de las columnas mediante serrado mecánico en obleas con los agujeros ya realizados. Fotografía de la zona asociada c) a la parte CMOS y d) a la parte asociada a la matriz de sensor de gases.

3.2 Test de soldadura anódica de obleas de silicio y vidrio micromecanizadas

En este apartado no se van a detallar los mecanismos que hacen posible la soldadura anódica entre el vidrio y el silicio [125,126], únicamente se dará una información general de cómo se realiza la soldadura y los resultados que se obtienen para las obleas de vidrio micromecanizadas con columnas de diferentes dimensiones mediante serrado mecánico, *sandblasting* y por último para una oblea que combina ambos métodos para definir columnas y agujeros pasantes en el vidrio.

3.2.1 Soldadura anódica de obleas de silicio y vidrio micromecanizadas con columnas

La soldadura anódica de las obleas de vidrio con las de silicio se lleva a cabo en el equipo Plasmos 150S ubicado en la sala blanca del CNM. Para realizar la soldadura anódica la colocación de las obleas es del siguiente modo: sobre una placa calefactora se coloca la oblea de silicio, a continuación la oblea de vidrio y sobre ésta un electrodo. Se calienta el conjunto a unos 400°C y en ese momento se aplica un potencial elevado de 1000 V entre la placa calefactora que actúa como un ánodo y el electrodo colocado sobre el vidrio, cátodo. Manteniendo el conjunto a esta temperatura y potencial durante una hora. Estos parámetros varían según las características de las obleas que se quieran soldar [127]. En la figura 3.11 se presenta un dibujo esquemático de las obleas durante el proceso de soldadura.

Los primeros test de soldadura anódica se han realizado entre obleas de vidrio con columnas de diferentes dimensiones fabricadas con la sierra y obleas de silicio sin procesar. Así se puede analizar cómo afecta las pequeñas dimensiones de las columnas en la calidad de la soldadura anódica. Estas primeras pruebas de soldadura se han realizado limpiando únicamente con agua desionizada la oblea de vidrio.

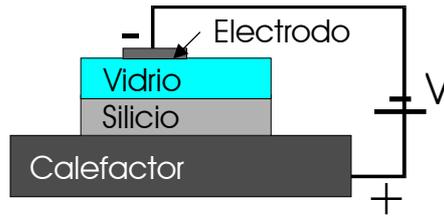


Figura 3.11: Dibujo esquemático de las obleas de vidrio y silicio durante el proceso de soldadura

El porcentaje de área soldada puede analizarse por simple inspección visual, realizando medidas ópticas del área soldada y comparándola con el área de las columnas. Los resultados obtenidos para columnas de diferentes secciones transversales se presentan en la tabla 3.5.

Sección de las columnas [μm^2]	Porcentaje de área soldada (%)
239x239	54 %
189x189	42 %
137x137	30 %

Tabla 3.5: Anchura de las columnas y área soldada en los test de soldadura.

La figura 3.12 muestra dos fotografías de dos columnas soldadas anódicamente a una oblea de silicio. La fotografía de la izquierda corresponde a una columna de sección $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ y la fotografía de la derecha a una de $150 \times 150 \mu\text{m}^2$. Como puede verse en dichas fotos sólo una parte de las columnas, la parte central, ha quedado soldada, incluso en el caso de columnas con una gran cantidad de microroturas en los bordes y posibles restos debidos al serrado. El área no soldada se debe a los defectos en los bordes de la superficie.

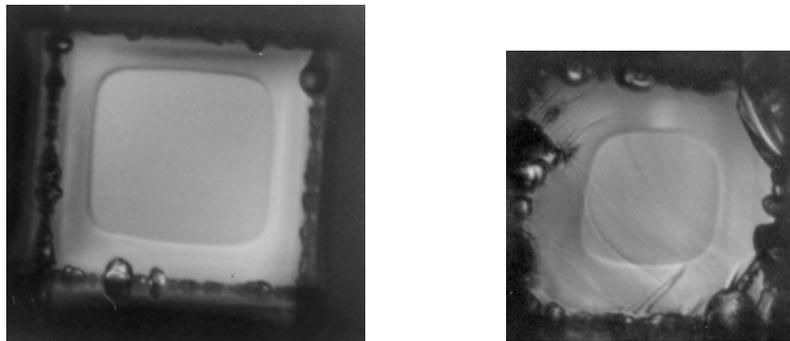


Figura 3.12: Fotos de dos columnas de diferentes áreas soldadas anódicamente a una oblea de silicio. La foto de la izquierda corresponde a una columna de sección $250 \times 250 \mu\text{m}^2$ y la foto de la derecha a una columna de sección $150 \times 150 \mu\text{m}^2$. Estas primeras pruebas de soldadura se han realizado limpiando únicamente con agua desionizada la oblea de vidrio micromecanizada

Las secciones teóricas de las columnas son de 300x300, 250x250 y 200x200 μm^2 respectivamente, sin embargo se observa que existe una diferencia con los valores medidos debido principalmente a la tolerancia en la anchura de la cuchilla utilizada. Típicamente cuchillas de 1mm de espesor como la utilizada pueden tener una tolerancia de hasta $\pm 50 \mu\text{m}$.

Optimización del método de limpieza antes de la soldadura

En las pruebas de soldadura descritas en el apartado anterior, las obleas se limpiaban únicamente con agua desionizada. Para mejorar los resultados previos de la soldadura, se han estudiado algunos métodos para limpiar el área a soldar y eliminar así posibles restos en la superficie del vidrio originados con la sierra durante el serrado:

- Limpieza con agua desionizada (test anteriores)
- Limpieza con acetona
- Limpieza con ultrasonidos
- Grabado húmedo en SiO-etch (25% NH_4F y 6% HF)

Con los dos primeros métodos, limpieza con agua desionizada y acetona, no se aprecian mejoras en la calidad de la superficie del vidrio y con la utilización de los ultrasonidos tampoco las superficies quedan limpias y algunas columnas se rompen durante el proceso de limpieza.

Un grabado húmedo de 2000Å de vidrio en SiO-etch de la superficie de la oblea antes de la soldadura da muy buenos resultados. Este método tiene una ventaja adicional, además de mejorar la calidad de la superficie del área a soldar, redondea las esquinas cóncavas lo que disminuye el riesgo de ruptura.

Finalmente el procedimiento a seguir es una combinación de varios procesos de limpieza acetona, agua desionizada, SiO-etch y por último otra vez limpieza con agua desionizada. Con este proceso realizado justo antes de la soldadura, se consigue una mejora en el porcentaje de área soldada en comparación con el test anterior, (sólo con agua desionizada), pasando de un 42% a un 70 % para columnas de 200x200 μm^2 de sección. Los defectos en los bordes de las columnas han desaparecido y el porcentaje de área soldada aumenta, como puede verse en la fotografía de la figura 3.13 izquierda. En este caso prácticamente todo el área está soldada.

También se han realizado test de soldadura con obleas con columnas obtenidas mediante *sandblasting*. Los resultados presentan un área soldada de forma circular como puede verse en la figura 3.13 derecha, debido a la forma de volcán que presentan estas columnas. En este ejemplo las columnas tienen un diámetro de 300 μm , se observan contornos irregulares en los bordes, pero aún así presentan una buena calidad en la soldadura.

Se ha demostrado que a pesar de las imperfecciones mecánicas en los bordes de las columnas y las pequeñas dimensiones de las columnas tras este método de limpieza, el proceso de soldadura da buenos resultados con un área soldada del 70 al 90 % del área total, dependiendo de la anchura de las columnas de vidrio.

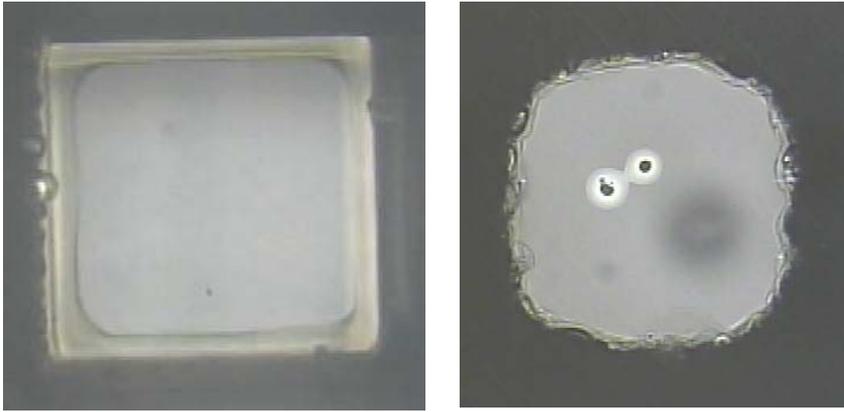


Figura 3.13: Izquierda) Fotografía del área soldada para una columna de $200 \times 200 \mu\text{m}^2$ obtenida con el método de serrado mecánico tras un grabado de 200 nm en SiO-Etch. Derecha) Fotografía del área soldada para una columna de $300 \mu\text{m}$ de diámetro obtenida mediante *sandblasting*. En estas pruebas el procedimiento de limpieza se ha optimizado siendo una combinación de varias etapas: limpieza con acetona, agua desionizada, SiO-etch y por último otra vez limpieza con agua desionizada

Test de tracción

Además de la inspección visual, se realizó un test de tracción que consiste en estirar de las obleas para intentar romper la soldadura. Con este test se ha demostrado que efectivamente la soldadura es fuerte, en caso de ruptura ésta se producía en las columnas de vidrio sin alterar la soldadura como puede verse en la fotografía de la figura 3.14 izquierda. Este mismo test se realizó para obleas con columnas fabricadas con *sandblasting* figura 3.14 derecha. En este caso, la ruptura también se produce en el vidrio y aunque la columna permanece soldada tiene una forma más irregular, hecho que indica un mayor riesgo de fallo en la soldadura para este tipo de columnas frente a las definidas mediante la sierra.

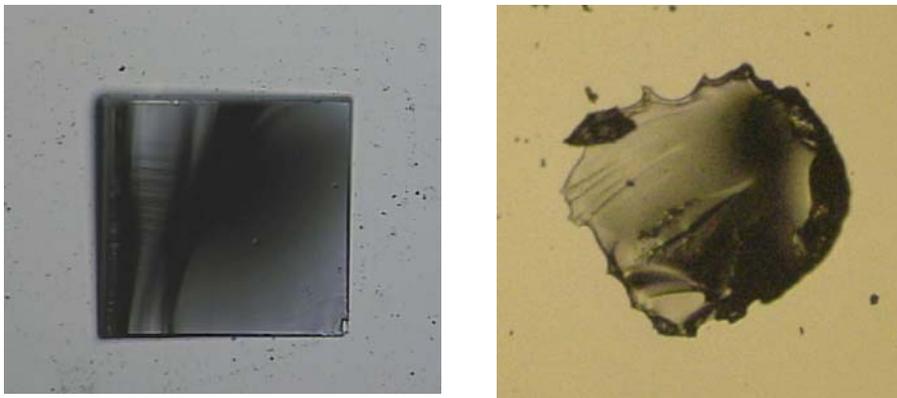


Figura 3.14: Fotografías tras el test de tracción, para una columna realizada con serrado mecánico (Izquierda) y *sandblasting* (Derecha). Se observa que la ruptura se produce por el vidrio, quedando parte de ella perfectamente soldada a la superficie de silicio.

Finalmente, se ha elegido utilizar columnas realizadas mediante serrado mecánico con dimensiones de $800 \times 200 \times 200 \mu\text{m}^3$ que dan buenos resultados desde el punto de vista mecánico y de la soldadura.

3.2.2 Soldadura anódica de una oblea de silicio con una de vidrio micromecanizada con columnas y agujeros pasantes

La última prueba realizada es la soldadura de una oblea de silicio y una de vidrio micromecanizada con columnas y agujeros pasantes mediante la combinación de las técnicas de *sandblasting* y serrado mecánico. A la vista de los buenos resultados obtenidos en obleas procesadas sólo con columnas, es de esperar que con la combinación de ambos métodos no haya problemas, como posteriormente se confirma.

Una vez que las dos obleas de vidrio y silicio han sido soldadas se realizan unos cortes a lo largo de los ejes X e Y con las mismas dimensiones de los dispositivos mixtos (sensores de gases y circuitería CMOS). En la figura 3.15, puede verse en la fotografía de los chips obtenidos

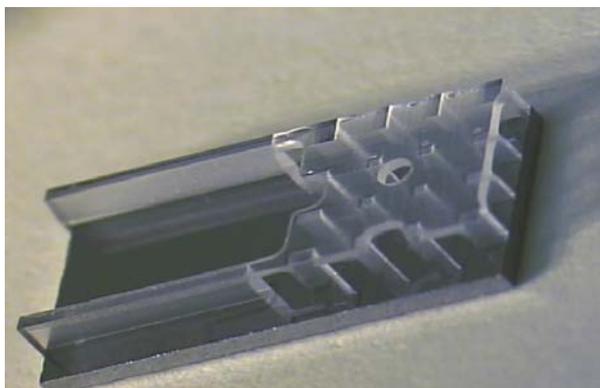


Figura 3.15: Fotografía de un chip individual que se ha obtenido tras serrar una oblea de silicio previamente soldada anódicamente con una de vidrio micromecanizada con la combinación de *sandblasting* y serrado mecánico

3.3 Tecnología de sensores de gases

Antes del proceso de fabricación de los sensores de gases, se han llevado a cabo una serie de pruebas para optimizar los puntos más críticos involucrados en la fabricación:

- Estudio de diferentes técnicas para la fabricación de la membrana
- Técnicas de dopaje de las obleas de silicio, para su utilización en el paro del ataque anisotrópico
- Test para la reducción de esfuerzos mecánicos en las membranas
- Test para la obtención de pistas de metal colgantes entre el marco de silicio y la membrana
- Análisis del grabado anisotrópico del silicio y de la soldadura anódica

En este apartado se presentan los materiales seleccionados para la fabricación de la matriz de sensores de gases y los resultados obtenidos en los diferentes tests.

3.3.1 Estudio de diferentes técnicas para la fabricación de la membrana

El ataque anisotrópico del silicio es una técnica muy utilizada en la fabricación de sensores en microelectrónica para la construcción de voladizos, puentes, acelerómetros y membranas, como en este caso.

Este grabado permite la realización de estructuras tridimensionales de forma precisa gracias a la estructura cristalográfica del silicio. En una oblea (100) de silicio la velocidad de grabado en la dirección $\langle 111 \rangle$ es mucho menor que en las direcciones $\langle 100 \rangle$ y $\langle 110 \rangle$ en soluciones alcalinas (KOH, NaOH, etc.) como atacantes. Algunos valores encontrados en la literatura presentan relaciones de 400:1, 160:1 y 50:1 [18], [128] para las velocidades de grabado $v_{\langle 100 \rangle} : v_{\langle 111 \rangle}$ en soluciones de KOH. Estos valores cambian según las propiedades de las soluciones alcalinas: composición, concentración y temperatura. Las condiciones de grabado standard en el CNM presentan un alto valor de anisotropía $v_{\langle 100 \rangle} : v_{\langle 111 \rangle} = 400:1$, para una solución al 40% en KOH a 75°C. Por tanto, este grabado es un buen candidato para la formación de las membranas.

Durante la primera fase del proyecto se desarrollaron tres técnicas en el CNM llamadas P++, *Maskless* y *Bulk-mass* [129, 130]. Todas ellas están basadas en el ataque anisotrópico del silicio, pero cada una posee características propias y diferente complejidad. En la figura 3.16 puede verse una representación esquemática de los perfiles obtenidos para el dispositivo con cada una de las técnicas de grabado.

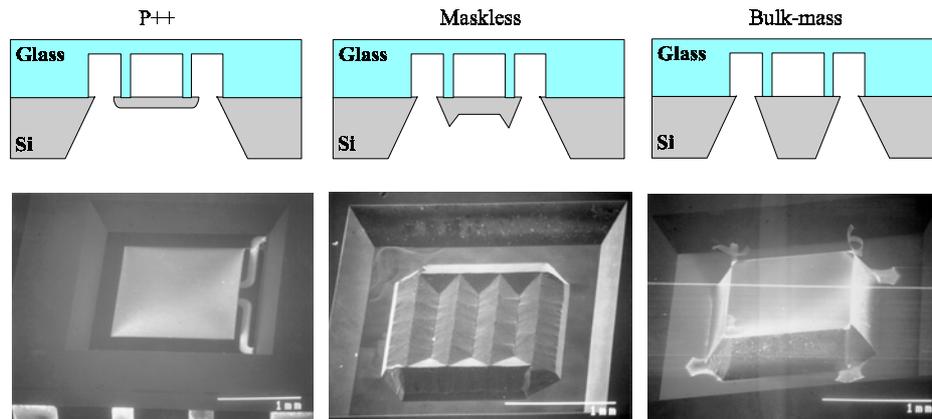


Figura 3.16: Vista esquemática y fotografías de los dispositivos obtenidos para las diferentes técnicas de grabado del silicio (P++, *Maskless* y *Bulk-mass*)

La técnica llamada P++ está basada en el típico ataque anisotrópico, cuyo paro se realiza mediante una región de silicio altamente dopada con boro. Para soluciones alcalinas es necesario tener una concentración de al menos 10^{19} - 10^{20} at/cm⁻³ de boro para que el paro sea efectivo [131, 132]. De ese modo controlando el perfil de la concentración de

dopantes se puede ajustar el espesor de la plataforma que quedará tras realizar el ataque anisotrópico por la cara dorso de la oblea de silicio y conseguir membranas muy finas. Con esta técnica, el límite mínimo en el espesor vendrá dado por la robustez mecánica de la estructura ya que membranas muy finas se rompen fácilmente.

La técnica denominada *Maskless* [133] es la más complicada de las tres, el ataque anisotrópico se realiza en varias etapas, con grabados en diferentes planos. El uso de esta técnica requiere un diseño muy cuidadoso de diferentes máscaras y de estructuras de compensación para los bordes, para conseguir las estructuras tridimensionales deseadas.

La técnica denominada *Bulk-mass* es la opción más simple, se trata de realizar un ataque anisotrópico que finalizará cuando se ha atacado todo el espesor de la oblea. La principal desventaja que presenta esta técnica es que se obtienen plataformas muy gruesas, con el mismo espesor que la oblea inicial, lo que supone un alto consumo para calentar el área activa del sensor a la temperatura de trabajo [134]. Esta técnica también requiere poner estructuras de compensación para las esquinas convexas en el diseño de la estructura.

Finalmente se ha elegido la técnica P++, por presentar un mayor control en el espesor de la plataforma de silicio y un número menor de niveles fotolitográficos que la técnica de *Maskless* y menor consumo que la técnica de *bulk-mass*, de acuerdo con los resultados preliminares obtenidos en la fase previa del proyecto *GlassGas*.

3.3.2 Técnicas de dopaje de las obleas de silicio

El dopaje de las obleas de silicio es un paso importante en la fabricación de los dispositivos sensores, por dos motivos fundamentales. En primer lugar la concentración de boro debe estar muy controlada ya que se utilizará como método de paro en el ataque anisotrópico del silicio para la formación de la membrana. Por otro lado, hay que tener cuidado con el daño que se puede inducir en la superficie de las zonas dopadas especialmente en las zonas en las que se va a realizar la soldadura anódica con el vidrio, ya que podrían producirse problemas en la calidad de la soldadura o incluso no llevarse a cabo.

Se han estudiado dos procesos diferentes para la definición de las zonas dopadas, uno mediante implantación iónica y el otro con un predeposición y difusión de boro por fuente sólida con obleas dopantes BN-1250.

La decisión para la elección del método de dopaje debe hacerse buscando el equilibrio entre los siguiente puntos:

- Minimizar al máximo el consumo del dispositivo, para lo cual cuanto más delgadas sean las membranas mejor
- Robustez mecánica del dispositivo, plataformas muy finas se rompen más fácilmente
- Calidad de la superficie dopada para poder realizar la soldadura anódica

Implantación iónica

La implantación iónica se realiza lanzando un haz de iones cargados acelerados contra la superficie a dopar. La energía y la dosis de la implantación determinarán el perfil de dopantes, su concentración y penetración.

El proceso completo para realizar la implantación iónica comienza con una oxidación térmica a 1100°C. A continuación se realiza una fotolitografía y un grabado seco para definir las zonas a implantar. Posteriormente se lleva a cabo la implantación iónica y se deposita un óxido Pyrox para evitar el escape de los dopantes durante el recocido a alta temperatura para redistribuir los dopantes y conseguir una mayor profundidad de la zona dopada. Para conseguir una mayor concentración de dopantes, y se repite el proceso completo tras eliminar el óxido Pyrox. En la tabla 3.6 se muestran las principales etapas realizadas en este proceso.

Implantación iónica		
Nº	Etapas	Características
1	OXIDACION TERMICA A 1100°C	ESPEJOR: 10.000 Å
2	FOTOLITOGRAFIA STANDARD OBLEAS 2 CARAS	CARA COMPONENTES
3	GRABADO SECO DEL OXIDO	
4	DECAPADO DE RESINA	
5	IMPLANTACION IONICA DE BORO	ENERGÍA: 150 KEV DOSIS: 2E16 AT/CM ²
6	DEPÓSITO DE OXIDO PYROX	ESPEJOR: 2500 Å
7	RECOCIDO	TEMPERATURA: 1000°C TIEMPO: 120 MINUTOS
8	ELIMINACION DEL OXIDO PYROX	
9	IMPLANTACION IONICA DE BORO	ENERGÍA: 150 KEV DOSIS: 2E16 AT/CM ²
10	DEPÓSITO DE OXIDO PYROX	ESPEJOR: 2500 Å
11	RECOCIDO	TEMPERATURA: 1000°C TIEMPO: 120 MINUTOS
12	ELIMINACIÓN DEL OXIDO	OX. PYROX Y TERMICO

Tabla 3.6: Etapas para la realización de la implantación iónica de boro

Si se utiliza la técnica de implantación iónica los dopantes no penetran mucho en la oblea para los niveles de energía del equipo disponible en Sala Blanca del CNM. Los espesores de la plataforma de silicio tras el ataque anisotrópico no superan las 2-3 µm. Las dimensiones de la membrana 2.2x2.2 µm², son relativamente grandes, por lo que las plataformas de silicio muy finas presentan una alta fragilidad motivo por el cual esta técnica queda descartada.

Dopado mediante fuente sólida con obleas dopantes BN-1250

La técnica de dopado mediante fuente sólida con obleas dopantes BN-1250 se inicia con la definición mediante fotolitografía de las regiones a dopar. Se realiza un predepósito de boro introduciendo las obleas de silicio a dopar junto con las dopantes BN-1250 en un horno a alta temperatura. Este proceso consta de tres fases: una rampa ascendente de temperatura hasta alcanzar 1240 °C, a continuación las obleas permanecen a dicha

temperatura en el horno durante un tiempo variable y por último una rampa de temperatura descendente. Una vez depositados los dopantes en la superficie se realiza una oxidación húmeda y un decapado posterior para eliminar los residuos generados en el proceso anterior. Finalmente se realiza la difusión del boro predepositado en el silicio mediante un recocido a alta temperatura. En la tabla 3.7 se resumen las principales etapas de este proceso con sus características.

Definición de las zonas dopadas mediante fuente sólida

Nº	Etapas	Características
1	OXIDACION TERMICA A 1100°C	ESPEJOR: 15.000 Å
2	FOTOLITO STANDARD OBLEAS 2 CARAS	CARA COMPONENTES
3	GRABADO SECO DEL OXIDO	
4	DECAPADO DE RESINA	
5	PRE DEPOSITO DE BORO CON OBLEAS DOPANTES BN-1250	TEMPERATURA: 1240°C TIEMPO VARIABLE
6	OXIDACION HUMEDA PARA ELIMINAR RESIDUOS	TEMPERATURA: 800°C TIEMPO: 20 MINUTOS
7	DECAPADO HUMEDO DEL OXIDO ANTERIOR	10% HF
8	DIFUSION DEL BORO PREDEPOSITADO	TEMPERATURA: 1150°C TIEMPO: 60 MINUTOS
9	DECAPADO HUMEDO DEL OXIDO	

Tabla 3.7: Etapas para la definición de las zonas dopadas mediante fuente sólida

La penetración de los dopantes y concentración en superficie puede ajustarse controlando el tiempo que están las obleas en el horno a 1240 °C durante el dopado con boro (etapa 5 de la tabla 3.7). En la figura 3.17, se muestran los perfiles de dopantes obtenidos mediante la técnica de *Spreading Resistance* para varias muestras con distintos tiempos, desde 0 minutos (sólo rampa ascendente y descendente) hasta 40 minutos (rampa ascendente, 40 minutos a 1240 °C y rampa descendente).

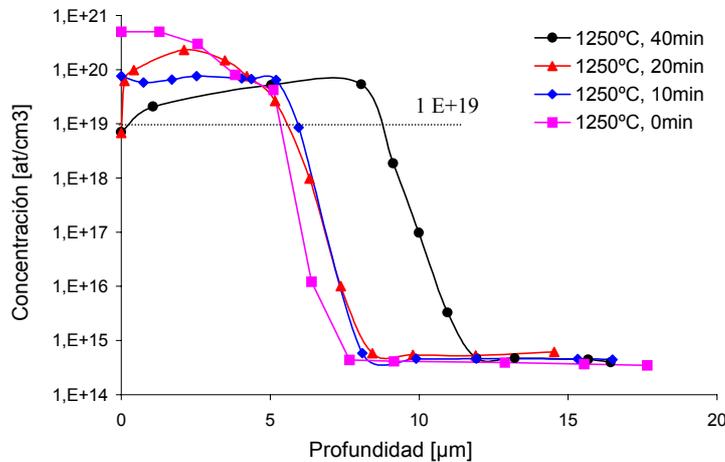


Figura 3.17: Perfil de dopantes para varias muestras dopadas con obleas BN-1250 para distintos tiempos de dopado en el horno.

Con esta técnica se consiguen plataformas más gruesas que con la implantación iónica, incluso en el peor caso que se obtienen plataformas de silicio de 5 μm . Finalmente, se ha seleccionado este método de dopado con fuente sólida, ajustado los parámetros para obtener plataformas de silicio de unas 10 μm . Este valor proporciona una buena robustez mecánica de la estructura manteniendo un bajo consumo.

La concentración de impurezas, en el caso de usar obleas dopantes BN, es elevada. Por simple inspección visual de la oblea pueden verse algunos defectos locales asociados a la elevada concentración de átomos de boro en superficie, como puede verse en la figura 3.18. Esta rugosidad puede afectar a la soldadura anódica, motivo por el cual se han realizado una serie de medidas para ver el perfil de estas irregularidades en las obleas.



Figura 3.18: Obleas dopada con boro mediante el método de fuente sólida.

En la figura 3.19, se presenta la rugosidad obtenida en la parte exterior de la oblea, zona más dañada, donde se observa que la superficie es muy plana con una rugosidad inferior a 0.3 μm . El mismo test se ha realizado en el centro de la oblea obteniéndose valores similares.

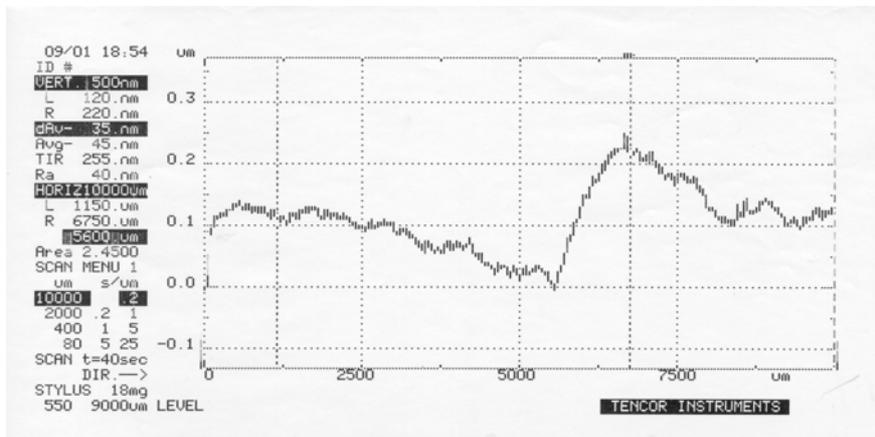


Figura 3.19: Rugosidad obtenida en una oblea dopada con boro mediante fuente sólida.

Las pruebas de soldadura demuestran que efectivamente estas pequeñas rugosidades no afectan a la soldadura. Así se confirma la viabilidad de realizar el dopaje de las obleas mediante fuente sólida.

3.3.3 Test de reducción de esfuerzos mecánicos en las membranas

El estrés es un problema muy frecuente en las capas dieléctricas delgadas que forman la membrana. Dicho estrés provoca cambios en el comportamiento de estas capas reduciendo su estabilidad mecánica e incluso pudiendo producir rupturas.

Las capas delgadas se depositan normalmente a elevadas temperaturas. El estrés se produce durante el enfriamiento si el coeficiente de expansión térmica de la capa delgada y del sustrato son diferentes, siendo este fenómeno más acusado cuanto mayor es la diferencia entre los valores de estos coeficientes.

Dada la imposibilidad de la eliminación del estrés, para reducirlo se han desarrollado diferentes técnicas para compensarlo. Una de las técnicas empleadas para el Si_3N_4 , se basa en la compensación del estrés tensil propio del nitruro con el compresivo del óxido de silicio mediante el depósito de una doble capa, primero de óxido plasma y sobre ella de nitruro plasma [135]. Una vez que las capas se han depositado se someten a un recocido y de ese modo se consigue la compensación del estrés entre estas capas y por tanto su reducción. Otra forma de compensación del estrés del nitruro sin añadir capas adicionales, es la implantación iónica de boro en el nitruro. Ajustando la dosis de la implantación puede conseguirse un estrés mucho menor al valor inicial, dependiendo del grosor de la capa [136, 137, 138].

Esta última técnica presenta muy buenos resultados, por lo que se ha utilizado para la reducción del estrés de la capa de nitruro de la membrana. Tras realizar varias pruebas para las membranas de nitruro depositadas comúnmente en el CNM mediante LPCVD, el máximo espesor sin que se produzca pérdida de la planalidad se encuentra alrededor de los 400 nm. Según la experiencia del CNM en fabricación de membranas para la implementación de sensores de flujo y de gases [139, 140], se obtienen buenos resultados para membranas de nitruro con un espesor de 1800 Å de nitruro LPCVD implantadas iónicamente con boro. Para este espesor, los valores óptimos para la compensación del estrés mediante la implantación son: 2.5×10^{15} at/cm² para la dosis y 40 KeV para la energía.

Optimización del estrés de la membrana para el sensor de gases

Las primeras pruebas se han realizado bajo estas condiciones, sin embargo los resultados obtenidos no han sido suficientemente satisfactorios, debido probablemente a que las membranas en estos dispositivos son más grandes debido a la necesidad de incorporar los cuatro materiales sensibles y las zonas para la soldadura anódica que las utilizadas habitualmente para la integración de sensores de gases o de flujo [140]. Por tanto, se ha decidido rediseñar la estructura reduciendo la separación entre el marco y la plataforma central de silicio tal como se muestra en la figura 3.20. Adicionalmente se van a realizar nuevos test para un espesor de nitruro mayor (300 nm) que proporcione mayor estabilidad mecánica.

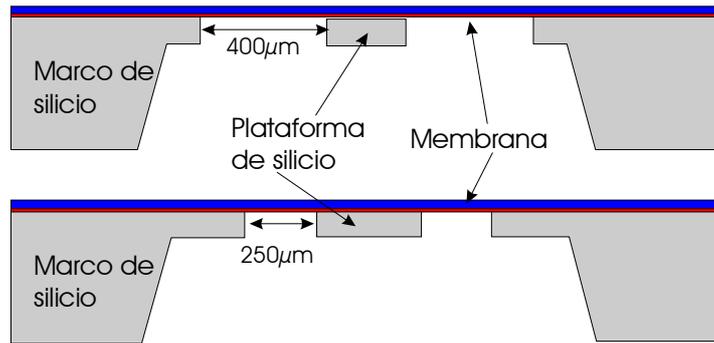


Figura 3.20: Rediseño de la estructura

Otro punto que afecta al estrés es la estequiometría del nitruro. Se han realizado varias pruebas de depósito de nitruro rico en silicio, mediante un cambio en las condiciones de depósito de dicho material. La estequiometría se ha determinado indirectamente midiendo el índice de refracción de la capa de nitruro mediante un elipsómetro, un mayor índice está asociado con un mayor contenido en silicio en la capa de nitruro.

En la tabla 3.8, puede verse que el nuevo nitruro LPCVD más rico en silicio posee un índice de refracción igual a 2.2 frente al índice 2 del nitruro LPCVD, hecho que confirma la existencia de una mayor cantidad de silicio en este nuevo nitruro, para los dos espesores (1.800 y 3.000 Å).

Tipo nitruro	Espesor nitruro (nm)	Gases	Índice de refracción
LPCVD	180	NH ₃ : 200 sccm DCS: 40 sccm	2.0
LPCVD Rico en silicio	180	NH ₃ : 100 sccm DCS: 240 sccm	2.2
LPCVD	300	NH ₃ : 200 sccm DCS: 40 sccm	2.0
LPCVD Rico en silicio	300	NH ₃ : 100 sccm DCS: 240 sccm	2.2

Tabla 3.8: Condiciones de depósito para diferentes nitruros.

Como se había visto anteriormente que la implantación iónica de boro era beneficiosa para la relajación del estrés inherente a la capa de nitruro, este paso también se va a incorporar en los nuevos test con los valores óptimos (dosis y energía) para los dos espesores de nitruro (180 y 300 nm). Teniendo en cuenta lo anterior, los diferentes estudios que se han realizado son los siguientes:

- Espesores de la capa de nitruro de 180 y 300 nm.
- Diferentes estequiometrías: nitruro estequiométrico y LPCVD no estequiométrico (rico en silicio).

La existencia del óxido internivel utilizado como aislante entre la resistencia calefactora y los electrodos del sensor puede afectar al estrés de la membrana debido a que esta capa posee un estrés compresivo. Para que los resultados se acerquen lo más posible a la realidad, se han incluido en la membrana todos los elementos del sensor (resistencia calefactora, óxido internivel, electrodos y materiales sensibles a gases). Las obleas de silicio se han grabado por la cara dorso del silicio sin soldar con el vidrio para analizar la estabilidad de las membranas sin efectos añadidos.

Comparando el número de membranas rotas tras el ataque en KOH, (ver tabla 3.9) se observa que los peores resultados se obtienen para las membranas con un nitruro rico en silicio de 180 nm espesor, por lo que esta opción queda descartada. Estos resultados no eran los esperados inicialmente ya que se esperaba que el nitruro con menor estrés inherente sería con el que mejor resultados se obtendrían. Aunque esto puede entenderse fácilmente teniendo en cuenta que el estrés final de la membrana se debe al conjunto de todas las capas que la forman. Así, la combinación de todos los materiales da diferentes resultados de estrés que sólo la capa de nitruro por sí misma.

Tipo de nitruro	Espesor (nm)	Implantación	Nº de membranas rotas
LPCVD	180	Dosis: 2.5E15at/cm ² Energía: 40 KeV	2-5 %
LPCVD Rico en silicio	180	Dosis: 2.5E15at/cm ² Energía: 40 KeV	25-30 %
LPCVD	300	Dosis: 4.5E15at/cm ² Energía: 100 KeV	0-1%
LPCVD Rico en silicio	300	Dosis: 4.5E15at/cm ² Energía: 100 KeV	1-2%

Tabla 3.9: El número de membranas rotas en las diferentes pruebas

El número de membranas rotas en el caso de tener un nitruro LPCVD de 180 nm es bajo. No obstante el número de obleas que soportaron el proceso fue mucho menor que en los otros casos. Así el rendimiento ha sido inferior, motivo por el cual esta opción también ha sido descartada.

Desde el punto de vista del estrés los mejores resultados se obtuvieron para membranas de 300 nm de espesor. Finalmente se ha optado por utilizar membranas de nitruro LPCVD porque en el depósito standard de nitruro LPCVD se obtienen espesores mucho más homogéneos que con las nuevas condiciones. Actualmente se está optimizando este proceso en Sala Blanca, por lo que puede ser una buena opción para dispositivos futuros.

3.3.4 Test de pistas de metal colgantes entre el área activa y el marco del silicio.

En este estudio se analiza la posibilidad de fabricar pistas de metal colgantes entre el área activa y el marco de silicio del chip, llevándose a cabo la reducción total de las capas dieléctricas de la membrana fuera del área activa del dispositivo como puede

verse en la figura 3.21. De ese modo, la zona activa queda únicamente suspendida por el vidrio. La ventaja que presenta este tipo de diseño es la existencia de un mayor aislamiento térmico de la zona activa del sensor y por tanto una reducción extra del consumo de la estructura.

En un primer paso, se han realizado diseños simples para ver si las pistas metálicas entre el área activa y el marco de silicio se pueden aguantar por sí mismas, para lo cual se dejan unos tirantes de silicio entre el área activa y el marco que sujetan la plataforma central de silicio sin necesidad de soldarla al vidrio para simplificar el estudio.

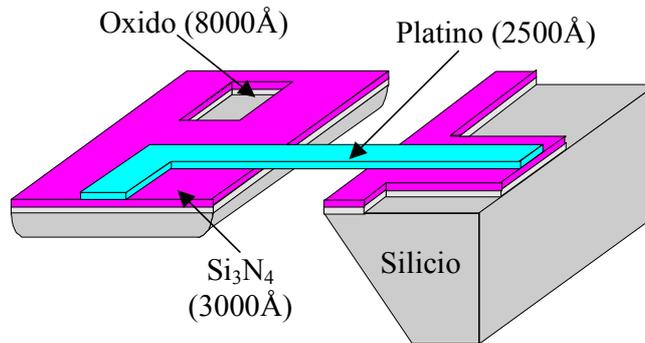


Figura 3.21: Esquema del dispositivo con pistas de metal colgantes.

Se han diseñado estructuras diferentes con membranas de distintos tamaños ($1.000 \times 1.000 \mu\text{m}^2$, $1.500 \times 1.000 \mu\text{m}^2$ y $1.500 \times 1.500 \mu\text{m}^2$) según sean dispositivos para una, dos y cuatro columnas. Para las pistas de platino existen dos posibles geometrías, pistas en forma de zigzag y rectas.

Estos diseños no incluyen ni los electrodos ni los materiales sensibles a gases, por lo que en el proceso de fabricación de estos diseños de test sólo son necesarias cuatro máscaras: para el alineamiento de doble cara (ALIGN), para la definición de las regiones dopadas (PMAS), para la apertura de la ventana para el ataque anisotrópico con KOH por detrás (KOH) y para la definición de las pistas de metal (PLATI). Las principales etapas del proceso de fabricación son:

1. Inicio del Run en Sala Blanca, marcado de las obleas, fotolito con máscara ALIGN y grabado del silicio para definir los motivos de alineamiento de doble cara.
2. Oxidación húmeda, fotolito con la máscara PMAS y posterior grabado del óxido para la definición de las zonas a dopar con boro.
3. Dopado del silicio con boro mediante obleas dopantes BN-1250
4. Oxidación húmeda
5. Depósito de Si_3N_4 e implantación de boro en el Si_3N_4 para disminuir el estrés inherente a la capa de nitruro.
6. Preparación del ataque anisotrópico del silicio por la cara dorso: Fotolito por la cara dorso con la máscara KOH y grabado del Si_3N_4 .

- Definición de las pistas de platino: Fitolito con la máscara PLATI, depósito de platino y *lift-off*.
- Depósito de resina por la cara componentes para protegerla de los procesos que se van a realizar a continuación por la cara dorso.
- Ataque anisotrópico del silicio con KOH por detrás para la formación de la membrana.
- RIE (*Reactive Ion Etching*): Grabado por la cara dorso para la eliminación de las capas dieléctricas que quedan entre el área activa y el marco, dejando así las pistas de metal colgando.
- Eliminación de la resina de la cara componentes.

En la figura 3.22 se muestran tres chips diferentes obtenidos tras el proceso de fabricación. Las características comunes a estos dispositivos son que todos ellos poseen los mismos elementos, las pistas de platino colgantes en forma de zigzag y el área activa sujeta por unos tirantes de silicio. La diferencia entre ellos es la forma y tamaño de la plataforma central de silicio, según sean dispositivos pensados para la soldadura con una (figura 3.22 derecha), dos (figura 3.22 centro) o cuatro columnas (figura 3.22 izquierda).

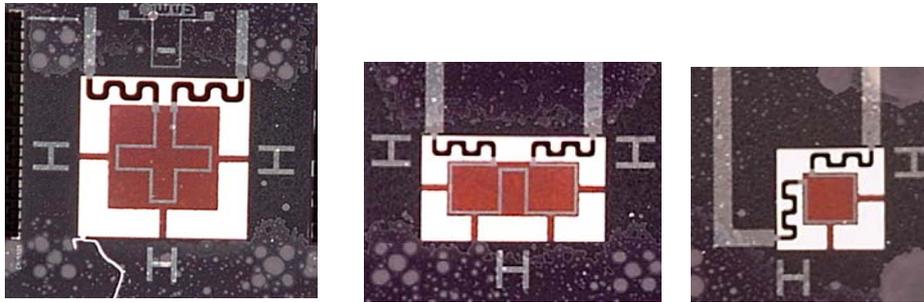


Figura 3.22: Fotografía de tres estructuras de test de pistas de metal colgantes implementadas con diferentes diseños para el área activa.

Una vez que el proceso de fabricación ha terminado y las pistas de metal han aguantado sin romperse, se procede a su caracterización eléctrica. Se han medido las curvas I (V) para cada diseño analizando qué sucede con las pistas al incrementar el voltaje y cual es la potencia máxima que pueden aguantar hasta su fusión o ruptura.

El comportamiento cualitativo en las curvas I (V) es el mismo para todos los chips, en todas las curvas aparecen tres zonas diferenciadas, como puede verse en la figura 3.23. La primera parte de las curvas es una zona lineal típicamente resistiva (zona I) que se extiende hasta alcanzar una intensidad alrededor de los 40 mA.

A partir de este momento se observa una disminución en la intensidad al aumentar el potencial suministrado a las pistas (zona II). Por inspección visual de las pistas de platino se observa que en esta zona, las pistas se van deformando más y más conforme el potencial va aumentando, este fenómeno es más acusado en las pistas en forma de zigzag que en las rectas.

Al volver a aumentar el potencial se observa que la intensidad aumenta de nuevo (zona III) y las pistas se ponen incandescentes. Finalmente las pistas se rompen si se sigue aumentando el potencial, los dispositivos aguantan más potencia conforme mayor tamaño de membrana posean, ver los valores medios obtenidos en la tabla 3.10.

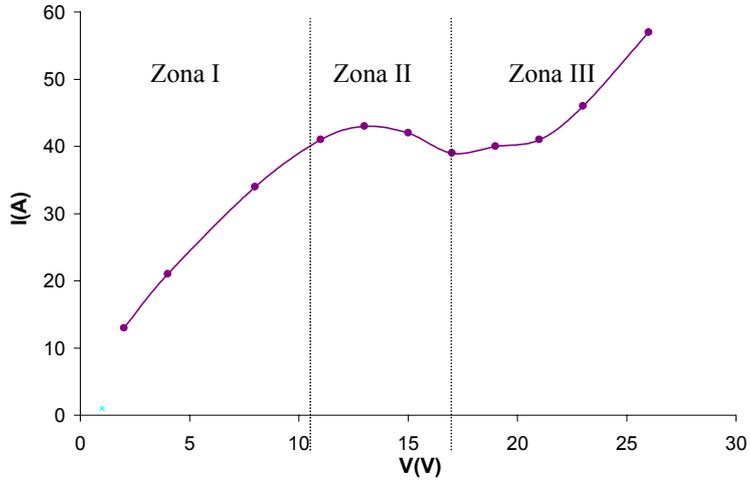


Figura 3.23: Curvas I(V) para las pistas obtenidas para el primer diseño.

Dimensiones membrana	Potencia máxima (mW)
1.000 x 1.000 μm^2	700
1.500 x 1.000 μm^2	1300
1.500 x 1.500 μm^2	1500

Tabla 3.10: Potencia a la que se rompen las pistas de platino según los diferentes diseños

La figura 3.24 muestra los mismos diseños que la figura 3.22, pero con las pistas incandescentes. Comparando ambas figuras, puede verse la deformación existente en las pistas de platino, que se produce en la zona II.

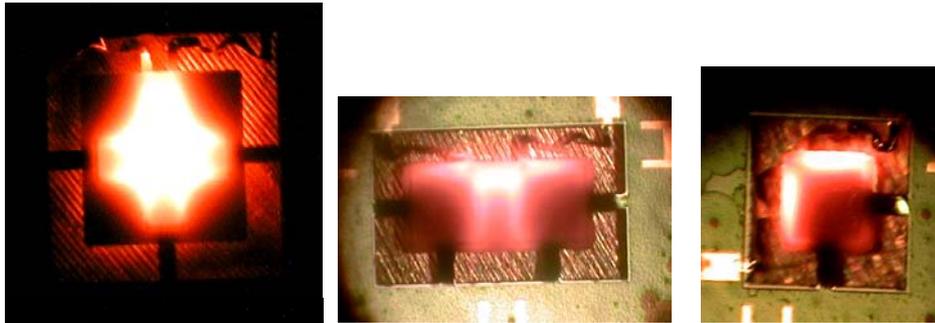


Figura 3.24: Fotos de diferentes diseños de cuatro, dos y una columna con pistas en forma de espiral, cuando están incandescentes.

La eliminación de estos tirantes de silicio puede realizarse si antes de realizar el ataque de las capas dieléctricas se lleva a cabo la soldadura anódica vidrio-silicio. En este caso el área activa únicamente quedaría suspendida con el vidrio, material con muy baja conductividad térmica y por tanto, la zona activa del sensor quedaría más aislada térmicamente consiguiendo alcanzar una disminución en el consumo total de la estructura.

De este estudio puede concluirse que es posible la fabricación de pistas colgantes de platino entre el área activa y el marco de silicio, pero estas estructuras son más frágiles que los diseños con membrana de nitruro. Por ahora estos diseños no se implementarán en el primer prototipo, salvo que sea necesario una reducción extra en el consumo del dispositivo final.

3.3.5 Soldadura anódica de obleas de vidrio con obleas de silicio procesadas

Para la soldadura anódica entre las obleas de vidrio y silicio es necesario aplicar un potencial eléctrico de 1.000 V entre el electrodo colocado sobre el vidrio y la oblea de silicio. De ese modo, se produce el paso de una corriente eléctrica a través de las obleas de vidrio y silicio en el proceso de soldadura.

Las primeras pruebas de soldadura anódica se realizaron con obleas de silicio sin procesar, por lo que no ofrecían ningún problema al paso de corriente eléctrica a través del silicio. Sin embargo, en las obleas de silicio procesadas con sensores de gases existen capas aislantes (capas dieléctricas de la membrana y el óxido internivel) que podían interferir en el paso de corriente a través de la oblea de silicio, impidiendo que se pudieran soldar o que los resultados presentaran una mala calidad debido a una soldadura débil. Las pruebas que se llevaron a cabo demuestran que la existencia de estas capas no afectan a la soldadura.

3.3.6 Últimas etapas del proceso de fabricación de la matriz de sensores de gases: ataque anisotrópico y soldadura anódica

Los dos últimos pasos de la fabricación del sensor de gases, soldadura anódica y ataque anisotrópico para la formación de la membrana, son bastante críticos. Inicialmente la secuencia que se seguía era realizar primero la soldadura anódica de las obleas de vidrio y silicio y después el ataque anisotrópico del silicio por la cara dorso (secuencia A, figura 3.25), con este método se rompían muchas membranas durante el grabado del silicio, debido probablemente al estrés que introduce el vidrio en la membrana.

Para mejorar el rendimiento de estas etapas se probó a realizar este proceso intercambiando el orden, es decir, en primer lugar el ataque anisotrópico y luego la soldadura anódica (secuencia B de la figura 3.25). Con este método, se tenía un buen resultado en el grabado pero se seguían rompiendo muchas membranas al hacer la soldadura.

Se estudió otra alternativa con la que se ha conseguido aumentar el rendimiento con respecto a las dos opciones anteriores que consiste en realizar en primer lugar el grabado

anisotrópico del silicio dejando unas 10 μm , a continuación se lleva a cabo la soldadura anódica y por último se acaba el ataque anisotrópico del silicio(figura 3.26).

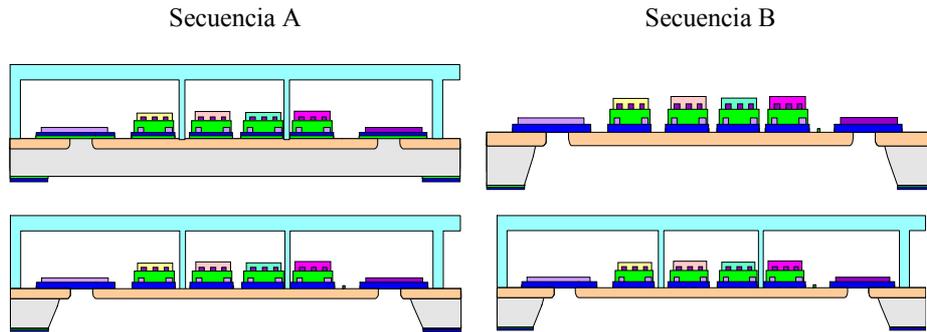


Figura 3.25: Diferentes secuencias para la realización del ataque anisotrópico del silicio y de la soldadura anódica.

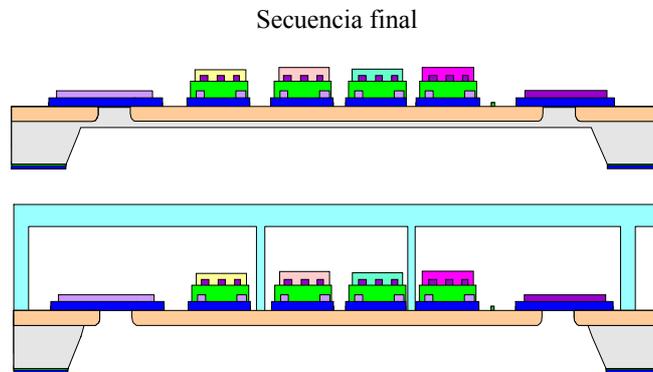


Figura 3.26: Secuencia para la realización de las últimas etapas del proceso de fabricación: ataque anisotrópico del silicio dejando 10 μm , soldadura anódica y finalmente acabar el ataque del silicio.

Finalmente el proceso queda del siguiente modo:

- 1- Grabado anisotrópico del silicio dejando unas 10 μm .
- 2- Soldadura anódica
- 3- Continuación del ataque anisotrópico hasta el final

3.4 Estudios para la compatibilización de las tecnologías: CMOS y de sensores de gases

Debido a las diferencias existentes entre los materiales utilizados y las características propias de los procesos involucrados en la tecnología de fabricación de sensores de gases y el proceso CMOS, descritos en el capítulo siguiente, es necesaria la realización

de un estudio de los principales puntos críticos en la unión de ambas tecnologías en una única. Este paso es previo a la integración de ambos tipos de dispositivos.

3.4.1 Elección del tipo de oblea

El primer problema que se presenta a la hora de compatibilizar las dos tecnologías es la elección del tipo de oblea que se va a utilizar en el proceso de fabricación. En este estudio se contemplan las siguientes opciones:

1. Obleas de silicio delgadas utilizadas habitualmente para la integración de sensores de gases
2. Obleas epitaxiadas pulidas sólo por una cara, cuyo uso habitual integración de circuitos CMOS
3. Obleas epitaxiadas pulidas por las dos caras. Este tipo de obleas se obtienen a partir de las anteriores tras pulirlas por la cara dorso.

Un factor importante a la hora de elegir el tipo de oblea viene dado por la viabilidad de realizar un grabado en KOH del silicio por la cara dorso debido a que la forma seleccionada para fabricar la membrana del sensor de gases es mediante un ataque anisotrópico del silicio con paro automático en una región altamente dopada con boro (10^{19} - 10^{20} at/cm³).

Obleas de sensores de gases

Este tipo de obleas tienen un espesor de 300 μ m, son tipo p ($1e15$ at/cm³) y están pulidas doble cara. Lógicamente, no presentan ningún problema desde el punto de vista de la integración del sensor de gases ya que son las obleas que se utilizan habitualmente para ello.

La incorporación del CMOS en estas obleas en principio es tecnológicamente viable, aunque debe realizarse un análisis preliminar con estructuras de test, para analizar cómo quedan las principales características eléctricas del CMOS y ver si las variaciones que presentan son aceptables comparadas con los valores standard de las obleas epitaxiadas CMOS.

Test de parámetros eléctricos CMOS en obleas no epitaxiadas

Para la determinación de los parámetros eléctricos CMOS en obleas de sensores, se ha utilizado un juego de máscaras que contienen estructuras de test. La tabla 3.11 presenta los valores medios obtenidos para los parámetros eléctricos de transistores PMOS y NMOS, resistencias cuadro y de contacto, en obleas delgadas no epitaxiadas (sensores) y la comparación con valores en obleas epitaxiadas CMOS standard.

A la vista de los resultados puede verse que las desviaciones respecto de los valores standard son mínimas. Por tanto, puede concluirse que el uso de obleas típicas de sensores de gases no supone una restricción desde el punto de vista eléctrico, ya que los valores obtenidos son perfectamente aceptables. Así, la utilización de estas obleas, delgadas y no epitaxiadas, es viable para la integración de circuitería CMOS.

Código	Descripción	Obleas CMOS	Obleas sensores
Vth P3	Tensión umbral transistor PMOS 3x3 (V)	-9.66E-01	-1.06E+00
Bet P3	Ganancia transistor PMOS 3x3 (A/V)	1.52E-04	1.68E-04
Vth FP	Tensión umbral transistor de campo PMOS (V)	-2.39E+01	-2.20E+01
Bet FP	Ganancia transistor de campo PMOS (A/V)	1.14E-05	1.35E-05
Vth N3	Tensión umbral transistor NMOS 3x3 (V)	1.05E+00	1.08E+00
Bet N3	Ganancia transistor NMOS 3x3(A/V)	4.92E-04	5.00E-04
R□ Pozo P	Resistencia cuadro Pozo P (Ω /cuadro)	1.94E+01	2.02E+01
R□ Pozo N	Resistencia cuadro Pozo N (Ω /cuadro)	1.26E+03	1.28E+03
R□N+D	Res. cuadro de drenador NMOS (Ω /cuadro)	2.87E+01	2.85E+01
R□P+D	Res. cuadro de drenador PMOS (Ω /cuadro)	1.06E+02	1.07E+02

Tabla 3.11: Resumen de los valores obtenidos para los principales parámetros eléctricos de los dispositivos CMOS para obleas epitaxiadas CMOS y obleas delgadas utilizadas en sensores.

Obleas epitaxiadas CMOS

Las obleas utilizadas en la tecnología CMOS25, son epitaxiadas p/p+ con una capa de 25 μm de silicio tipo p ($1e14\text{at}/\text{cm}^3$) sobre 500 μm de silicio tipo p+ ($1e19\text{at}/\text{cm}^3$). Este tipo de obleas presentan varios inconvenientes a la hora de incorporar nuestros sensores de gases debido a la dificultad a la hora de realizar el grabado anisotrópico del silicio para la formación de la membrana. Debido a que son pulidas solamente por una cara y por tanto no presentan una buena calidad a la hora de realizar geometrías por la cara dorso. Además de esto, son obleas demasiado gruesas y no puede llevarse a cabo el alineamiento doble cara mediante infrarrojos, método utilizado por la alineadora disponible en Sala Blanca del CNM, que sólo permite el alineamiento en obleas de silicio con espesores inferiores a 450 μm .

Así, el uso de estas obleas epitaxiadas CMOS para estos sensores con circuitería CMOS es inviable. Una posible solución a estos problemas, sería pulir estas obleas por la cara dorso. De ese modo se consigue tener obleas más delgadas y además pulidas doble cara. Con esta táctica se tienen obleas aptas para la incorporación de sensores de gases.

Obleas epitaxiadas CMOS pulidas doble cara

Estas obleas son epitaxiadas, 25 μm de epitaxia tipo p sobre 350 μm de substrato p+. Con estas condiciones, el alineamiento doble cara es posible (espesor < 450 μm), pero la concentración de dopantes en el substrato se encuentra alrededor de $1e19\text{at}/\text{cm}^3$, hecho que puede reducir la velocidad de grabado con KOH o incluso imposibilitarlo. Así es necesario la realización de un test de grabado para este tipo de obleas.

Test de grabado anisotrópico de silicio en obleas epitaxiadas

El objetivo de este test es comprobar la posibilidad de realizar el grabado anisotrópico en las obleas epitaxiadas pulidas por las dos caras. Para ello se ha dopado una oblea con boro mediante fuente sólida con obleas dopantes BN-1250 cuyo perfil de dopantes se ha medido con la técnica del *Spreading Resistance*. De esta forma puede determinarse la

velocidad de grabado en función de diferentes concentraciones de boro en la oblea de silicio.

El test del ataque anisotrópico se ha realizado definiendo unas aperturas en una capa de nitruro que servirá como máscara para el grabado de silicio en una solución de KOH. Se mide la profundidad del ataque para diferentes etapas de grabado mediante un perfilómetro (Tencor). En la gráfica siguiente (figura 3.27) se proporcionan las diferentes velocidades de grabado obtenidas en función de la profundidad del grabado para una solución de KOH a 75°C.

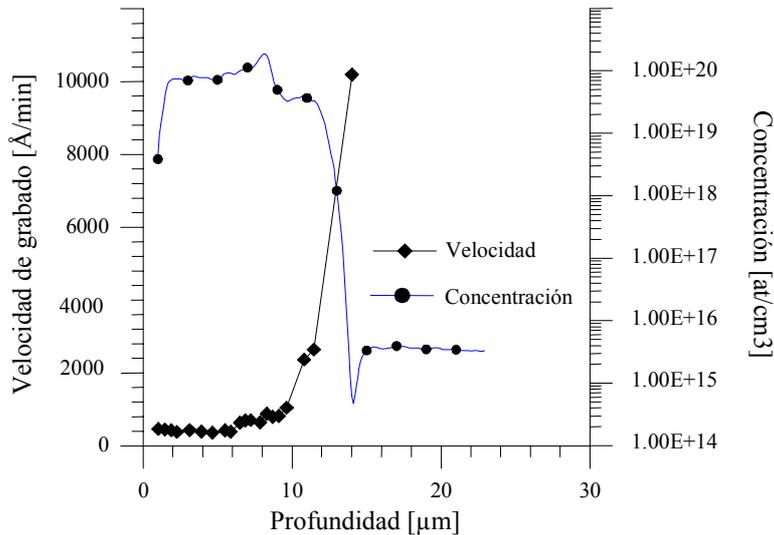


Figura 3.27: Velocidad de grabado de silicio en KOH a 75°C en función de la profundidad del ataque y la concentración de boro.

Los resultados muestran que el grabado de silicio para concentraciones de $1e^{19}$ at/cm^3 es posible aunque el tiempo de grabado es superior comparado con obleas no epitaxiadas. Por tanto, se ha demostrado que estas obleas son aptas para este tipo de grabado y que para la utilización del paro del ataque anisotrópico mediante una zona altamente dopada con boro, sólo es necesario la definición de esa zona en la epitaxia, mediante la incorporación de un proceso de implantación de boro anterior al bloque CMOS.

Resumen de los estudios para la elección del tipo de oblea

En la tabla 3.12, se presenta un resumen con las principales características de los diferentes tipos de obleas, así como la viabilidad de su uso en la integración monolítica de CMOS y sensores de gases. Finalmente las obleas que se utilizarán para la fabricación de los dispositivos mixtos serán obleas delgadas de sensores de gases y epitaxiadas pulidas por las dos caras.

	Obleas de sensores	Epitaxiadas pulidas por una cara	Epitaxiadas pulidas por las dos caras
Uso habitual	Sensores de gases	CMOS	Sensores de gases + CMOS
Espesor oblea	300 μm	525 μm	375 μm
Epitaxiadas	No	Si: p/p+ (25/500 μm)	Si: p/p+ (25/350 μm)
Pulidas doble cara	Si	No	Si
Posible integración CMOS/sensores	Si	No	Si

Tabla 3.12: Resumen principales características de las obleas.

3.4.2 Resistencias calefactoras

En los dispositivos que no incluyen circuitería CMOS las resistencias calefactoras se van a realizar en platino y polisilicio alternativamente.

Al incorporar la circuitería hay que tener en cuenta que el platino es un material altamente contaminante de los procesos CMOS y por tanto, si se usa platino debe depositarse al final del bloque CMOS.

El primer paso para la utilización del polisilicio como resistencia calefactora ya se ha dado en los primeros dispositivos fabricados, en los que el chip sólo incluía el sensor de gases. De los dos niveles de polisilicio de la tecnología CMOS es más apropiado el utilizado en segundo lugar para la definición de las puertas de los transistores, más grueso y más dopado, por poseer un menor resistividad. Aun así, dichos valores son más elevados que los del platino.

Si se analizan la resistencia por cuadro del platino y del polisilicio que se obtuvieron en las estructuras de test de los primeros diseños de sensores (tabla 5.1 del capítulo 5), puede verse que la resistencia por cuadro del polisilicio (16.5 Ω) es unas 10 veces mayor a la del platino (1.6 Ω). Esto no conviene desde el punto de vista de la integración monolítica de los sensores con los circuitos CMOS, ya que para un mismo diseño es necesario aplicar un mayor voltaje para calentar la plataforma de silicio a la misma temperatura que en el caso de utilizar platino.

Las celdas básicas standard de los circuitos CMOS están diseñadas para una tecnología de 5 V, por lo que las resistencia calefactoras de los sensores deben alcanzar la temperatura de trabajo (300-400 $^{\circ}\text{C}$) con una alimentación de 5 V. Es necesario re-diseñar los calefactores para obtener resistencias menores (<100 Ω), una posibilidad es hacer las pistas más anchas. Con este método se consigue que la resistencia de platino esté dentro del rango deseado, sin embargo el valor de la resistencia de polisilicio se reduce pero es imposible alcanzar los 100 Ω máximo que requiere el diseño. Por este motivo se ha descartado el uso del polisilicio como material de las resistencias calefactoras de la matriz de sensores.

3.4.3 Efectos de la incorporación de la membrana dieléctrica del sensor en el bloque CMOS

En este apartado se van a analizar las diferentes posibilidades existentes para la fabricación de la membrana y cómo afectará su inclusión en las etapas del bloque CMOS.

Elección del tipo de membrana dieléctrica

Para la implementación de la membrana dieléctrica de la matriz de sensores es necesaria una capa de nitruro de silicio. Existen dos posibilidades: intentar aprovechar algunas etapas standard del bloque CMOS o bien añadir las etapas adicionales necesarias para depositar y definir el nitruro en un paso especial.

El nitruro depositado en las etapas del bloque CMOS no puede aprovecharse para la membrana, ya que se utiliza como nitruro sacrificial y por tanto no permanece al final del proceso, salvo en la etapa de pasivación (bicapa PECVD de oxi-nitruro de pasivación). El inconveniente que presenta esta bicapa es que el estrés no está controlado por tratarse de una etapa CMOS en la que el valor del estrés no es un algo crítico. Por tanto, la mejor opción para asegurar la estabilidad mecánica de las estructuras es aprovechar los estudios previos en el área de tecnología de sensores de gases y añadir las etapas que sean necesarias para definir la membrana como un bloque adicional.

Efectos de la membrana dieléctrica en el bloque CMOS

Una vez que se ha decidido incorporar etapas adicionales al bloque CMOS, es importante analizar en que punto del proceso se van a introducir. Esto queda determinado fundamentalmente por el objetivo claro de afectar lo menos posible la tecnología CMOS.

El depósito de una capa de 1.800 Å de Si_3N_4 se lleva a cabo mediante LPCVD a una temperatura de 800°C. Esta temperatura es suficientemente baja para no afectar a los pozos del CMOS, pero demasiado alta para el aluminio ya que la máxima que puede aguantar este metal es de sólo 450°C. Por tanto, esta capa debe depositarse necesariamente antes del aluminio y esto debe tenerse en cuenta en la definición del proceso de fabricación completo del dispositivo.

Otro de los condicionantes a la hora de insertar estas etapas en el bloque CMOS viene dado por la resistencia calefactora de platino ya que la capa de nitruro debe depositarse anteriormente a dicha resistencia. La única restricción existente se debe a que el platino es depositado después del aluminio y de ese modo la capa de nitruro no puede ponerse justo antes del platino. Así la secuencia quedaría como sigue: depositar en primer lugar el nitruro de la membrana, a continuación el aluminio y por último el platino.

Al insertar una capa de nitruro en el proceso CMOS pueden producirse variaciones en etapas posteriores, especialmente en aquellos de naturaleza eléctrica, debido al hecho de que la presencia de capas aislantes en las obleas puede afectar directamente a la

velocidad de depósito y la homogeneidad de las capas que se depositan. Para analizar estos efectos en la apertura de los contactos del CMOS se ha realizado una prueba de grabado de óxido mediante RIE en obleas con y sin capas de nitruro. Los resultados dan tiempos de grabado similares por lo que la presencia de capas dieléctricas en las obleas apenas afecta a la velocidad del grabado de la apertura de contactos standard del proceso CMOS.

Como conclusión puede extraerse que es posible incorporar una capa de nitruro dentro del bloque CMOS sin afectar negativamente el proceso estándar. Sin embargo, para prevenir posibles daños debidos a grabados no deseados causados por la mala selectividad, es conveniente insertar estas etapas adicionales lo más tarde posible. Por tanto, desde este punto de vista también es mejor la opción del platino para la resistencia calefactora.

3.4.4 Conexión CMOS/sensores de gases

Los metales utilizados para el bloque CMOS y los sensores son aluminio y platino respectivamente. Cuando la electrónica para controlar la temperatura de trabajo del sensor y el bloque para procesar las señales están integrados en un mismo chip junto a los sensores de gases es muy importante tener una buena conexión entre estos dos metales.

Debido al uso de dos niveles de platino, uno para la resistencia calefactora (platino-I) y otra para los electrodos del sensor (platino-II) existen dos tipos de contactos entre el aluminio y el platino. Esto se debe a que la secuencia de estos materiales es el siguiente:

- 1) Aluminio: interconexiones en la circuitería CMOS
- 2) Primer nivel de platino: resistencia calefactora del sensor
- 3) Oxido internivel entre aluminio/platino-II y entre platino-I/platino-II
- 4) Segundo nivel de platino: electrodos del sensor

El contacto del aluminio con la resistencia calefactora es directo, sin embargo la existencia de un óxido internivel entre los dos niveles de platino provoca que el contacto del aluminio con los electrodos se lleve a cabo a través de una apertura en el óxido internivel.

El primer paso para conseguir una buena interconexión entre ambos metales es realizar un pre-grabado antes de depositar el platino para eliminar el posible óxido que se haya podido formar debido a la oxidación natural del aluminio producida durante la fotolitografía y grabado del mismo, minimizando la resistencia entre ambos metales.

Se han diseñado unas estructuras de test tipo Kelvin [141, 142] para medir la resistencia de contacto entre el aluminio y el platino. En la figura 3.28, puede verse un dibujo esquemático de una de ellas, así como una fotografía de una estructura de test ya fabricada, con un área de contacto de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ para medir la resistencia de contacto entre las capas de aluminio y platino.

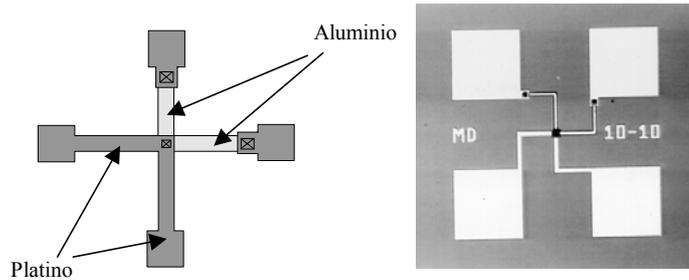


Figura 3.28: Izqda.) Dibujo esquemático de una estructura tipo Kelvin para medir la resistencia de contacto entre el aluminio y el platino. Derecha) Fotografía de una estructura de test de $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ya fabricada.

El platino es un material que presenta una mala adherencia por lo que es necesario el uso de una capa de adhesión. En los dispositivos que se van a fabricar se utilizará Ti (ver capítulo 2, apartado 2.3).

Los resultados obtenidos para la resistencia de contacto Al/Pt presentan valores en torno a 1Ω para un espesor de aluminio de $1 \mu\text{m}$ en contacto con una bicapa de $20 \text{ nm}/150 \text{ nm}$ de Ti/Pt, por lo que existe un buen contacto entre los dos metales.

3.4.5 Estudio del perfil de la pasivación CMOS

La etapa final de un proceso CMOS es el depósito de una bicapa de oxi-nitruro PECVD (4.000 \AA de óxido y 7.000 \AA de nitruro) que cubre toda la oblea salvo los contactos, para evitar la degradación de los dispositivos. Sin embargo, esta etapa debe adaptarse a los nuevos requerimientos de esta tecnología mixta, la pasivación no puede cubrir la zona activa del sensor porque los materiales sensibles deben estar expuestos a los gases.

En este estudio se va a analizar la viabilidad de tener una capa aislante única que sirva a la vez como pasivación del CMOS y óxido internivel entre la resistencia calefactora y los electrodos del sensor de gases.

Desde el punto de vista de la tecnología de sensores, esta capa aislante requiere un perfil de grabado lo menos abrupto posible porque el nivel de platino de los electrodos tiene que subir este escalón (óxido internivel/pasivación) en algunas zonas sin que se produzca su fractura.

El perfil típico tras realizar un grabado húmedo con SiO-etch para un óxido PECVD de 9.000 \AA , condiciones standard del óxido internivel de sensores, es muy suave, como puede verse en la fotografía de la figura 3.29 derecha. Por el contrario, el perfil standard del grabado tipo RIE de la pasivación CMOS es un perfil bastante vertical, como puede verse en la fotografía de la figura 3.29 izquierda. Teniendo en cuenta que ambas capas cumplen la función de pasivar la oblea en la parte CMOS, la mayor limitación a la hora de elegir las condiciones de esta capa viene dada por el tipo de perfil obtenido. Por tanto, se va a utilizar como pasivación CMOS, el óxido internivel típico de la tecnología de sensores (9.000 \AA de óxido PECVD)

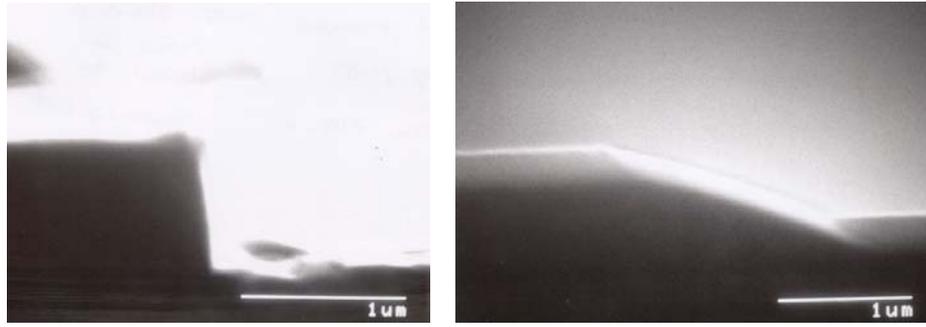


Figura 3.29: Fotografías del perfil típico obtenido en el grabado RIE de la pasivación CMOS y en el grabado en húmedo el óxido internivel del sensor.

3.4.6 Compatibilidad CMOS de los materiales sensibles a gases

El depósito y definición de los materiales sensibles a gases se hace como un post-proceso CMOS una vez estén definidos la resistencia calefactora y los electrodos de platino.

Uno de los problemas que surge al depositar estos materiales se debe a que necesitan un recocido a nivel de oblea a alta temperatura para su cristalización. Los valores típicos de temperatura para estos procesos están alrededor de los 700-1000°C para los materiales habituales como el SnO_2 . Pero el aluminio, material utilizado en la tecnología CMOS posee una temperatura de fusión baja por lo que no deben superarse los 450 °C en estos recocidos. De este modo, debe pensarse en la posibilidad de utilizar materiales que necesiten una temperatura de recocido inferior o en una nueva forma de realizar el recocido.

Dado el alto aislamiento térmico entre la zona del sensor y la CMOS en cada chip, es posible calentar el área activa del sensor mediante la resistencia calefactora a una temperatura elevada sin que el CMOS se vea afectado. Con este método se realizaría el recocido en cada chip, en lugar de hacerse en la oblea completa. El límite térmico para los materiales en este nuevo método de recocido viene dado por los substratos, que no aguantan más de 700 °C.

Los materiales inicialmente escogidos para la integración en la matriz de sensores de gases eran: SnO_2 , WO_3 , CTO ($\text{Cr}_{1.8} \text{Ti}_{0.2} \text{O}_{3+z}$) y ZnO . Con estas ideas se han realizado una serie de pruebas para estos óxidos metálicos, en el Institut für Physikalische Meßtechnik, (FhG-IPM). En este trabajo no se comentan con detalle ni las técnicas de depósito ni las propiedades de los materiales sensibles a gases, puesto que la labor del CNM se ha centrado en el desarrollo de la estructura termomecánica, sin intervenir en la fase de depósito y caracterización de los materiales.

Test de depósito y recocido de SnO_2

La temperatura óptima, desde el punto de vista del tamaño del grano y la morfología, del recocido en aire sintético para SnO_2 está entre los 700 y 800 °C. Aunque es posible

hacer un recocido a menor temperatura (375 °C) durante varios días y obtener una morfología similar a la obtenida con el recocido de 700 °C, pero los primeros resultados muestran inestabilidades en este material. Sin embargo, es posible llevar a cabo un recocido en cada chip mediante la resistencia calefactora y así combinarlo con procesos CMOS sin dañarlos

Test de depósito y recocido de WO₃

Los recocidos del WO₃ se realizan a temperaturas superiores a los 500°C, Por esta razón, es imposible realizar un recocido a nivel de oblea sin destruir las estructuras CMOS. Desafortunadamente no es posible realizar el recocido a nivel de chip debido a que el WO₃ previamente al recocido es amorfo y soluble en bases (como la utilizada para la eliminación de la resina), por lo que se disuelve en el proceso posterior (*lift-off* tras su depósito) .

Test de depósito y recocido de CTO

La temperatura óptima de recocido de este material está en torno a los 850 °C, temperatura demasiado alta para la realización del recocido en la oblea e incluso para el recocido a nivel de chip. Como alternativa a estos recocidos puede utilizarse un láser pero por el momento no hay resultados sobre este tema.

Test de depósito y recocido de ZnO

La temperatura de recocido de este material está en el rango comprendido entre los 500 y los 700 °C, siendo compatible con un recocido a nivel de chip mediante la resistencia calefactora.

Test de depósito y recocido de V₂O₅

Dada la incompatibilidad del WO₃ con los circuitos CMOS, se ha estudiado un nuevo material, V₂O₅. Los experimentos realizados con las capas de V₂O₅ proporcionan buenos resultados desde el punto de vista de la sensibilidad. Su comportamiento frente a la exposición de NO₂, NH₃, CO y CH₄ es similar al de los sensores basados en SnO₂ o en WO₃ para el mismo rango de temperatura, por lo que podría ser incluido en la matriz de sensores.

Para temperaturas de recocido en un rango de 350- 500 °C se han obtenido buenos resultados por lo que no presentan problemas en el recocido a nivel de oblea. Sin embargo, este material presenta un inconveniente debido a su baja estabilidad en medios agresivos que contengan ácidos o soluciones alcalinas y además es soluble en agua. Así, el uso de este material debe ser restringido según el medio en el que tenga que trabajar.

Resumen del estudio de la compatibilidad de los materiales sensibles

En la tabla 3.13, se resumen los principales resultados obtenidos de las pruebas de recocido de los materiales sensibles a gases que se han desarrollado en el IPM y su posible integración con procesos CMOS.

Material	Compatibilidad del recocido con procesos CMOS
SnO ₂	Sí: recocido a nivel de chip
WO ₃	No
CTO	Difícil, se está estudiando la posibilidad de realizar recocido mediante láser
ZnO	Sí: recocido a nivel de chip
V ₂ O ₅	Sí: recocido a nivel de oblea

Tabla 3.13: Compatibilidad del recocido de los materiales sensibles a gases con procesos CMOS

Los materiales seleccionados a partir de estos test para estos primeros dispositivos son: SnO₂, V₂O₅, CTO y ZnO. Más información de estos materiales referente a las técnicas de depósito, estabilización, morfología y respuesta a diferentes concentraciones de gases pueden consultarse en las siguientes publicaciones [94, 100, 143-145]

3.4.7 Análisis de la influencia de la soldadura anódica vidrio/silicio en los circuitos CMOS

Como se ha comentado anteriormente, el proceso de soldadura anódica entre el vidrio y el silicio se realiza a una temperatura de 400 °C y una diferencia de potencial de 1000 V. Los elevados campos eléctricos que se generan durante la soldadura anódica pueden afectar a la circuitería CMOS ya procesada en la oblea de silicio.

Para analizar estos efectos, se han llevado a cabo una serie de estudios en colaboración con el SINTEF de Noruega. Los test consisten en la medida de los parámetros eléctricos de dispositivos MOS (capacidades y transistores tipo p y n), antes y después de la soldadura anódica vidrio-silicio. Para estos test, se utilizan obleas de vidrio previamente micromecanizadas con cavidades de distinta profundidad.

A partir de los resultados obtenidos en las medidas de las capacidades y transistores puede concluirse que las muestras con cavidades más pequeñas presentan alteraciones mayores [146]. Por tanto, el diseño óptimo para obtener el máximo rendimiento de los circuitos es aquel en el que el vidrio permanece abierto sobre la zona CMOS durante la soldadura anódica.

Una medida adicional para minimizar los efectos del campo eléctrico generado durante la soldadura anódica en los circuitos es diseñar un electrodo específico para este tipo de diseños que minimice el campo en la región donde están ubicados los circuitos.

Habitualmente los electrodos utilizados para la soldadura anódica cubren toda la oblea de vidrio, pero en este caso interesa que el electrodo está abierto en las zonas donde están integrados los circuitos CMOS (zonas sin vidrio). De este modo, se consigue reducir el campo eléctrico en el área CMOS como puede verse en el esquema de la figura 3.30. Para mayor seguridad se dejan 800 micras alrededor del bloque de circuitos. En la figura 3.31, puede verse una fotografía del electrodo utilizado para soldar el vidrio con el silicio en estos dispositivos mixtos.

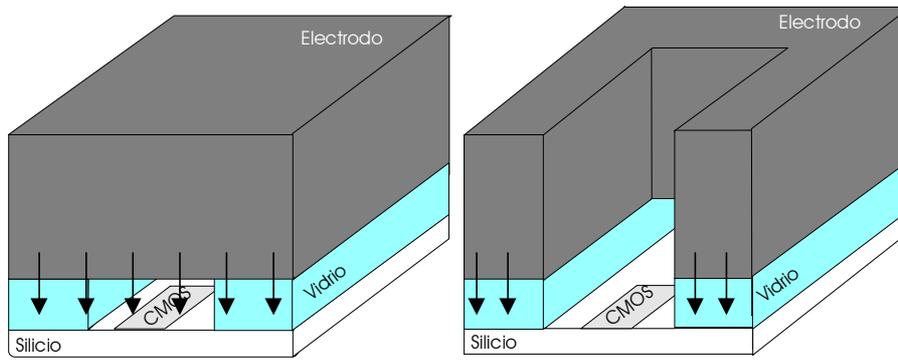


Figura 3.29: Esquema de las obleas en la soldadura con los dos tipos de electrodos: Izquierda) Electrodo habitual, derecha) electrodo diseñado especialmente para estos chips que incluyen una matriz de sensores de gases y circuitería CMOS



Figura 3.30: Fotografía del electrodo utilizado para la soldadura anódica de las obleas de vidrio y silicio para los diseños mixtos que incluyen una matriz de sensores de gases y la circuitería CMOS asociada.

3.4.8 Resumen de los principales puntos de la compatibilización

De los resultados de los diferentes test de compatibilidad presentados en el apartado anterior, puede concluirse que la solución para la integración conjunta de sensores de gases con circuitería CMOS no es única, lo que dota al proceso de una cierta flexibilidad.

Para evitar al máximo posible las interferencias en el bloque CMOS, se han definido dos bloques adicionales anterior y posterior donde se realiza la definición de las zonas dopadas para el paro del ataque anisotrópico del silicio y la definición de la resistencia calefactora, los electrodos y los materiales sensibles respectivamente. Sin embargo, es necesario incorporar algunas etapas para definir la membrana del sensor dentro del bloque CMOS. En la tabla 3.14, se muestra como quedaría la secuencia de las principales etapas del proceso de fabricación completo.

Etapas CMOS	Etapas de Sensores de Gases
Pre-proceso	
	Definición de los motivos de alineamiento
	Definición de las zonas dopadas
Bloque CMOS	
Definición de los pozos p y n	
Definición de las áreas activas	
Ajuste de la tensión umbral de los transistores	
Primer nivel de polisilicio	
Segundo nivel de polisilicio	
Fuente y drenador	
	Preparación del grabado anisotrópico de silicio por la cara dorso y definición de la membrana por la cara componentes
Oxido internivel y apertura de contactos	
Metalización : aluminio	
Post-proceso	
	Resistencia calefactora de platino
Pasivación CMOS/Oxido internivel entre platinos	
	Definición de los electrodos de platino
	Deposito de los materiales sensibles
	Grabado anisotrópico del silicio por la cara dorso
	Soldadura anódica: vidrio/silicio

Tabla 3.14: Secuencia de la principales etapas en el proceso de fabricación.

Conclusiones

El método de serrado mecánico con una hoja de 1 mm de espesor es un buen método para la definición de columnas en el vidrio con una alta verticalidad. Con esta técnica se consiguen columnas de 800 μm de altura con secciones transversales hasta 150x150 μm^2 .

Se ha estudiado una alternativa comercial, *sandblasting*, para la definición de columnas en obleas de vidrio. Las columnas que se obtienen con esta técnica tienen una verticalidad menor (relación de aspecto 3:1 y un perfil vertical de 70°) en comparación con las obtenidas mediante serrado mecánico (relación de aspecto 100:1 y ángulo con la verticalidad 88-90°). Su sección es circular y el diámetro mínimo es de 300 μm . La ventaja que posee esta técnica es que la oblea se procesa en paralelo y el diseño no queda restringido por la necesidad de realizar canales como en el caso de la utilización del serrado mecánico.

Un buen método para el micromecanizado del vidrio con columnas y agujeros pasantes es la combinación de dos técnicas: serrado mecánico y *sandblasting*. Para asegurar la robustez de estas estructuras de vidrio/silicio se han elegido como dimensiones finales 200x200x800 μm^3 para las columnas.

La calidad de la superficie de las columnas es buena y permite la soldadura anódica con obleas de silicio. Se han realizado pruebas de soldadura anódica para optimizar el método de limpieza antes de la soldadura, obteniéndose una alta calidad en la soldadura posteriormente verificada mediante un test de tracción.

Antes de la fabricación final de la matriz de sensores de gases propuesta se han realizado una serie de test tecnológicos para mejorar los procesos más complicados involucrados en su construcción (técnicas para la fabricación de la membrana y de dopaje con boro para su utilización como método de paro del ataque anisotrópico del silicio, test para la reducción de esfuerzos mecánicos en membranas y optimización de la secuencia de las etapas finales del proceso de fabricación de soldadura anódica y ataque anisotrópico).

Se han estudiado diferentes técnicas para la fabricación de la membrana. De entre ellas, se ha elegido la denominada p⁺⁺, que consiste en la construcción de la plataforma mediante el ataque anisotrópico del silicio por la cara dorso con paro mediante una zona altamente dopada con boro. De ese modo, es necesario controlar el perfil de dopantes en el silicio para definir el espesor de la plataforma por lo que se han comparado dos procesos diferentes para la incorporación de boro dentro de la oblea, implantación iónica y difusión mediante fuente sólida con obleas dopantes. Se ha optado por el método de difusión con obleas BN-1250 ajustando los parámetros del proceso para conseguir espesores de unas 10 μm para la plataforma de silicio (zona activa).

Otro test tecnológico realizado es el estudio de diferentes procesos para la reducción de los esfuerzos mecánicos en la capa de nitruro. Se han estudiado diferentes tipos de nitruro con dos espesores diferentes: 1800 y 3000 Å. Finalmente se ha optado por el uso de 3.000 Å de nitruro LPCVD standard implantado iónicamente con boro con una dosis de 4.5×10^{15} at/cm² y una energía de 100 KeV y añadiendo una capa adicional de 300 Å de óxido que mejora la adhesión al silicio.

Se ha analizado la viabilidad de la fabricación de pistas colgantes de platino entre el área activa y el marco de silicio, eliminando la parte de la membrana que fuera del área activa. Se ha demostrado que este proceso puede realizarse con éxito, aunque las estructuras obtenidas son más frágiles que los diseños con toda la membrana de nitruro. Por ahora estos diseños no se implementarán en el primer prototipo, salvo que sea necesario una reducción extra en el consumo del dispositivo final.

Los dos últimos pasos en la fabricación de la matriz de sensores de gases, ataque anisotrópico y soldadura anódica, son dos puntos críticos. Se ha analizado diferentes secuencias para alcanzar el mayor rendimiento, que se consigue realizando en primer lugar el grabado anisotrópico del silicio dejando unas 10 μm , a continuación la soldadura anódica y por último acabando el ataque anisotrópico del silicio.

Se analizan los puntos críticos en la integración de sensores de gases dentro del proceso standard CMOS para evitar cambios en los principales parámetros eléctricos de dicha tecnología y de ese modo las celdas de diseño básicas sigan siendo válidas.

El primer estudio está relacionado con la elección del tipo de oblea, analizando tres posibilidades: obleas de sensores (delgadas y pulidas por las dos caras), obleas epitaxiadas standard CMOS pulidas a una cara y estas mismas obleas tras pulirlas por la

otra cara. Se ha probado la viabilidad de utilizar, en esta tecnología mixta, obleas de sensores y epitaxiadas pulidas doble cara tras demostrar que apenas existen cambios relevantes en los parámetros eléctricos CMOS en las de sensores y que puede realizarse el ataque anisotrópico de silicio para la definición de la membrana en las obleas epitaxiadas pulidas doble cara.

El valor de la resistencia por cuadro de platino es diez veces inferior a la del polisilicio, motivo por el cual, la tensión de alimentación de los circuitos para el polisilicio será superior a los dispositivos con resistencias calefactoras de platino. Se ha seleccionado al platino como material de la resistencia calefactora por la limitación a 5V en la tensión de alimentación de las celdas de diseño básicas de la tecnología CMOS.

Para la membrana dieléctrica del sensor es necesario insertar etapas adicionales dentro del bloque CMOS. El depósito de nitruro debe realizarse antes del aluminio porque la temperatura de este proceso es superior a la de fusión del aluminio.

Los valores para la resistencia de contacto entre el aluminio y el platino son inferiores a 1Ω , quedando así demostrada la buena conexión entre los metales usados en la parte de sensores de gases (Pt) y en los circuitos del bloque CMOS (Al).

Se va a utilizar una única capa aislante como pasivación CMOS y óxido internivel entre la resistencia calefactora y los electrodos del sensor de gases. Para evitar posibles fracturas del platino se ha seleccionado el óxido internivel de sensores que presenta un perfil de grabado menos abrupto.

Los materiales sensibles a gases deben tener una temperatura de recocido baja para no afectar a la parte CMOS. Sin embargo es posible llevar a cabo un recocido de los materiales en cada chip individualmente mediante la resistencia calefactora sin afectar al CMOS gracias al elevado aislamiento térmico de este tipo de estructuras. Con estas ideas, los materiales que se van a implementar en la matriz de sensores de gases son SnO_2 , V_2O_5 , CTO y ZnO.

Los resultados obtenidos de los estudios de compatibilidad demuestran que es posible la combinación de las dos tecnologías para la definición de una única para fabricar dispositivos mixtos que integren en un solo chip una parte sensora y una de circuitería. Finalmente se presenta una posible secuencia de fabricación del dispositivo mixto como resultado de los diferentes test tecnológicos realizados.