

Capítulo 6 Fabricación de un sensor químico para detección electroquímica

Este capítulo recoge los resultados correspondientes al tercer demostrador, desarrollo de un sensor químico o biológico que opere en medio líquido. Se presentan las características del funcionamiento y diseño del dispositivo. A continuación se detallan las particularidades del diseño con especial énfasis en la definición de trincheras de anchuras nanométricas. Por último se muestran los resultados del proceso de fabricación y la caracterización electroquímica de los prototipos.

6.1 Características del sensor

Para complementar los sensores presentados, se diseña y fabrica un tercer demostrador compuesto por un sensor que trabaje en medio líquido. En esta aproximación se utiliza como elemento transductor un *cantilever*; la deflexión estática del *cantilever* se detecta mediante variaciones de la corriente electroquímica. En este caso, la circuitería de control será una célula electroquímica con un amplificador estándar. En el primer prototipo no se integra monolíticamente en el chip.

6.1.1 Principio de funcionamiento

El objetivo de este sensor es crear una estructura que se defleca mediante la presencia de una sustancia sobre su superficie. El sistema de detección utilizado consiste en medir variaciones de corriente electroquímica debidas a la deflexión del *cantilever*. El principio

de funcionamiento de la técnica de detección se basa en el microscopio electroquímico de barrido (Apéndice A).

Se utiliza un *cantilever* como electrodo móvil y junto a él se colocará un electrodo fijo, la distancia de separación entre ambos electrodos tiene que ser inferior a los 100 nm. La figura 6.1 muestra un esquema del sistema de dos electrodos.

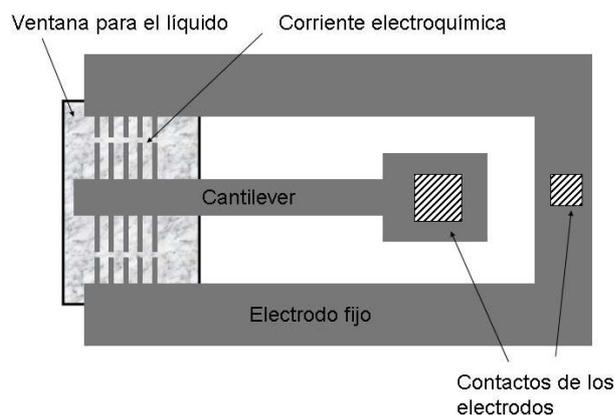


Figura 6.1 Esquema del sensor compuesto por un electrodo fijo y el cantilever. Se observan los dedos que permiten distancias nanométricas entre los electrodos.

Con el fin de mantener la simetría, el electrodo fijo rodea al electrodo móvil, y se aproxima a él en el extremo libre. Es muy importante que se mantenga la simetría, pues en caso contrario podría influir en un movimiento extraño de la palanca. Para conseguir una separación nanométrica entre el extremo libre del *cantilever* y el electrodo fijo, se definen en el extremo unos puentes que unen las dos estructuras y en los que se definen cortes nanométricos. Estos cortes permiten asegurar que la contribución a la corriente del extremo del *cantilever* (zona más sensible a la deflexión) será mayor que la del resto del electrodo. En la estructura final el electrodo fijo y el *cantilever* disponen de unas estructuras enfrentadas, que llamamos *dedos*, que permiten que la separación entre ambos sea menor que 100 nm.

La figura 6.2 muestra un esquema del sensor en situación de equilibrio sin fuerzas externas; la cavidad permite la introducción de líquido. La anección de partículas en la superficie del *cantilever* provoca un estrés sobre éste que hace que se deflecte. Al deflectarse varía la distancia entre los dos electrodos, esta variación provocará un cambio

en la corriente electroquímica entre los dos electrodos. Detectando la variación de corriente electroquímica se podrá detectar la cantidad de sustancia que se ha adherido a la superficie del sensor y así estimar la concentración de sustancia dentro de un líquido determinado. La figura 6.3 muestra el mismo esquema del sensor, donde el *cantilever* se ha deflectado por el estrés provocado por el depósito de partículas sobre su superficie.

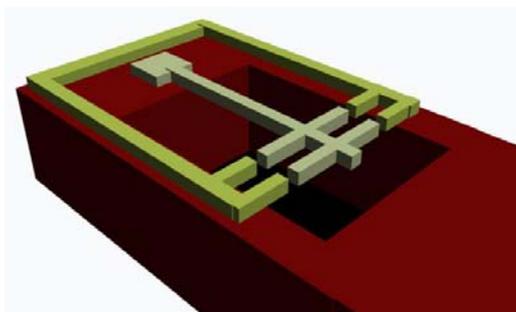


Figura 6.2 Esquema del sensor en situación de equilibrio, en ausencia de fuerzas

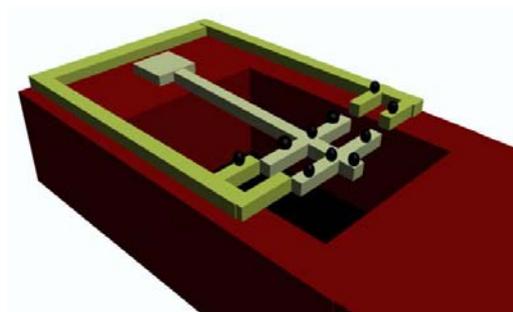


Figura 6.3 Esquema del sensor deflectado debido al estrés causado por la deposición de partículas

6.1.2 Características del diseño

Se ha decidido realizar *cantilevers* de silicio monocristalino, para ello se utilizarán como sustratos de partida, obleas BESOI con $1,3 \pm 0,5 \mu\text{m}$ de espesor del silicio SOI y $1 \mu\text{m}$ de espesor del óxido. La capa de silicio SOI se utiliza como capa estructural. La capa de óxido actúa en parte como capa sacrificial y como capa selectiva de grabado, para definir el micromecanizado de volumen.

Se quiere que el dispositivo sea de alta sensibilidad, de forma que tenga aplicaciones químicas y biológicas ventajosas, como ser capaz de detectar una hibridación en una cadena de ADN. Para aumentar la sensibilidad, de acuerdo con la ecuación 2.8, será necesario que la palanca tenga una constante elástica pequeña. Se diseña el electrodo móvil de modo que la constante elástica k sea próxima a 20 pN/nm . Debido a que el sensor se quiere utilizar en medio líquido y para aplicaciones químicas y biológicas, esta constante elástica permite por ejemplo detectar la deflexión debida a una hibridación en una cadena de ADN [Fritz-02].

Consideramos el caso de la hibridación de 12 oligonucleotidos de ADN, que producen un estrés superficial de 5 mN/m, así la fuerza que crean es de 300 pN. Dado que la palanca es de silicio, el módulo de Young del silicio es 190GPa y $k = 20 \text{ pN/nm}$, de la ecuación 2.7, tenemos:

$$F = k \cdot x \rightarrow 300 \text{ pN} = 20 \text{ pN/nm} \cdot x$$

Siendo x la dirección de desplazamiento del extremo libre del *cantilever*, se deduce que el desplazamiento del extremo es $\Delta x \approx 15 \text{ nm}$. Esta es la deflexión que debemos ser capaces de detectar mediante variaciones de corriente electroquímica.

La figura 6.4 muestra en detalle el diseño del transductor, formado por dos electrodos: uno está conectado al *cantilever* y otro es un electrodo fijo. Los electrodos de silicio cristalino estarán dopados, para aumentar así su conductividad. Los contactos de aluminio, para permitir las medidas electroquímicas, se sitúan alejados de la zona sensible de modo que resulte más sencillo aislarlos del líquido.



Figura 6.4 Vista superior de la estructura en silicio, indicando la apertura que permite la deflexión de la palanca y la entrada del líquido y los contactos de aluminio. Las dimensiones finales varían ligeramente.

La dispersión del grosor de la capa de silicio cristalino influirá en la constante elástica de las estructuras, al deflectarse las palancas en dirección paralela al sustrato es un parámetro que influye notablemente (ecuación 2.3). Por esta razón se han implementado una variedad de estructuras. La tabla 6.1 indica las dimensiones implementadas y el cálculo de la constante elástica considerando la dispersión de la oblea. Se implementan diseños de forma que la constante elástica tenga valores entre 1 y 40 pN/nm. Por mantener las mismas referencias que en los capítulos anteriores, l es la longitud del *cantilever*, w es el grosor en

la dirección de la deflexión (coincide con el grosor de la oblea) y t es la anchura, según la figura 6.5.

| Longitud | | Grosor (determinado por la capa SOI) | | | |
|----------|----------|---|---|---|---|
| l (um) | t (um) | k_1 (pN/nm) ($W=0,8\mu\text{m}$) | k_2 (pN/nm) ($W=1,3\mu\text{m}$) | k_3 (pN/nm) ($W=1,5\mu\text{m}$) | k_4 (pN/nm) ($W=1,8\mu\text{m}$) |
| 400 | 12 | 4,32 | 18,54 | 28,48 | 49,21 |
| 400 | 36 | 12,96 | 55,61 | 85,43 | 147,62 |
| 400 | 100 | 36,00 | 154,48 | 237,30 | 410,06 |
| 500 | 25 | 4,61 | 19,77 | 30,38 | 52,49 |
| 500 | 75 | 13,82 | 59,32 | 91,13 | 157,46 |
| 500 | 100 | 18,43 | 79,09 | 121,50 | 209,95 |
| 600 | 4 | 0,43 | 1,83 | 2,81 | 4,86 |
| 600 | 12 | 1,28 | 5,49 | 8,44 | 14,58 |
| 600 | 44 | 4,69 | 20,14 | 30,94 | 53,46 |
| 600 | 130 | 13,87 | 59,50 | 91,41 | 157,95 |
| 600 | 200 | 21,33 | 91,54 | 140,63 | 243,00 |

Tabla 6.1 Dimensiones de las palancas implementadas e influencia del grosor de la capa de silicio SOI en la constante elástica.

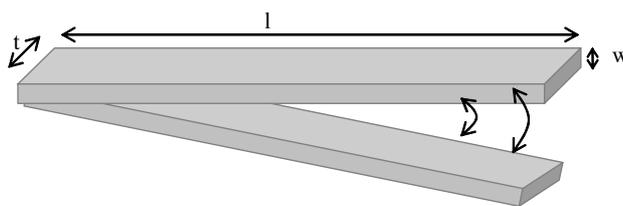


Figura 6.5 Esquema de la deflexión de la palanca, indicando las dimensiones.

Como ya se ha comentado, en los extremos de los electrodos, para confinar la corriente, se diseñan unos *dedos* que permiten minimizar la distancia entre el electrodo fijo y el móvil. Debido a que no se tiene información previa sobre como es el diseño ideal de estas estructuras y que no se sabe con certeza cual es la mejor para definir los cortes nanométricos, se prueban tres diseños, que son los que aparecen en la figura 6.6.

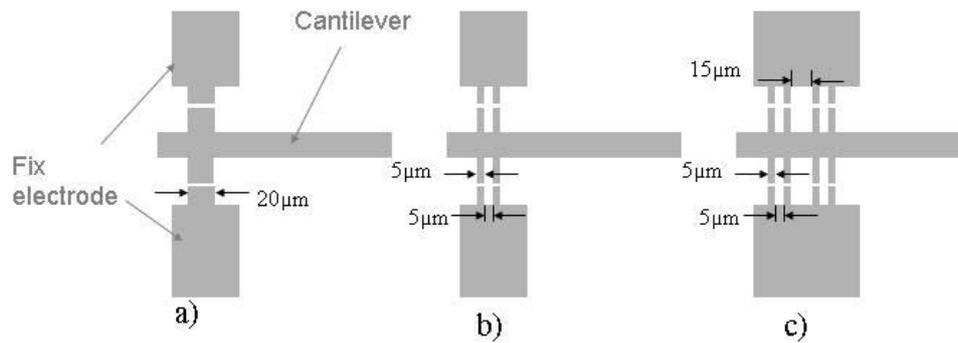


Figura 6.6 Estructuras definidas para minimizar la distancia entre los electrodos.

Con estas características, para cada una de las dimensiones de los *cantilevers* de la tabla 6.1 se han implementado por chip 4 estructuras distintas de los dedos que separan los electrodos: dos con estructuras tipo a), un único dedo de 20 μm de ancho a cada lado del *cantilever*; una b), con dos dedos a cada lado del *cantilever* de 5 μm separadas 5 μm y una c), donde a cada lado del *cantilever* hay 4 dedos de 5 μm de ancho. El diseño del chip está formado por 8 estructuras, correspondientes a *cantilevers* de dos dimensiones. La figura 6.7 muestra el diseño físico de las máscaras correspondientes a un chip. En total en cada oblea se diseña 84 estructuras distintas correspondientes a 11 dimensiones de cantilevers por 4 configuraciones de separaciones entre electrodos, *dedos*. Esta configuración es posible porque se diseña un juego de máscaras de contacto, de forma que se diseña toda la oblea. Habrá 3 niveles distintos de máscaras: el primero para definir las estructuras (el electrodo fijo y el móvil), el segundo para definir los contactos y el tercero para definir las ventanas que permiten el acceso del líquido. Estos niveles se observan en la figura 6.7 y en detalle en la estructura de la figura 6.5.

Además en el diseño ha sido necesario incluir motivos de alineamiento, para alinear el nivel de la máscara de las estructuras y los contactos sobre la misma cara y para alinear con estos niveles la máscara correspondiente a las ventanas por la cara dorso. El alineamiento a doble cara tiene una tolerancia un poco mayor, que se tiene en cuenta al diseñar las estructuras. Los motivos de alineamiento utilizados son estándar para este tipo de procesos.

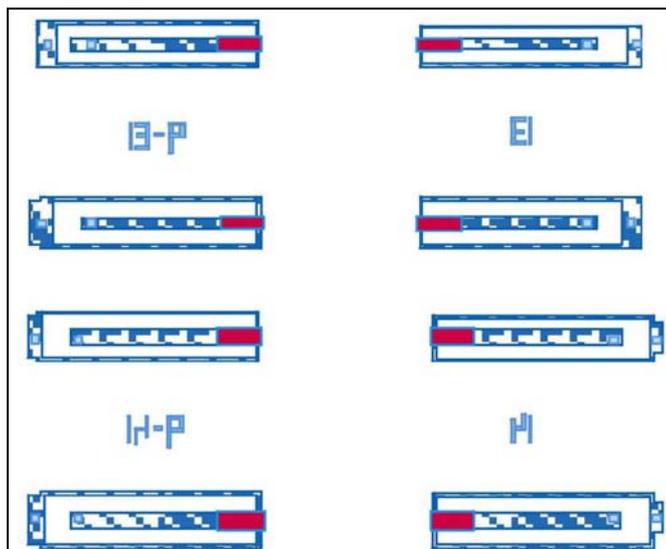


Figura 6.7 Imagen del diseño de las máscaras correspondientes a un chip.

6.2 Proceso de fabricación

El proceso de fabricación, consiste en definir los contactos, las estructuras y los cortes para separar los electrodos y hacer un micromecanizado de volumen para permitir la deflexión de la palanca y la entrada del líquido. Es un proceso de pocas etapas, que ha resultado bastante complejo de ejecución. Los problemas tecnológicos importantes surgen de la liberación de las estructuras y de la definición de la separación entre los electrodos.

Se han probado dos procesos similares, en el primero el micromecanizado de volumen se hace mediante grabado húmedo, en el segundo se hace mediante grabado seco. Además se prueban hasta tres técnicas distintas para definir los cortes nanométricos. Debido al interés tecnológico de la definición de estas estructuras nanométricas, se les dedica la sección 6.3 completa. En este apartado se presentan las etapas globales de los dos procesos de fabricación.

6.2.1 Proceso 1: micromecanizado de volumen mediante ataque húmedo

El primer proceso de fabricación se presenta en la figura 6.8. La característica principal que lo distingue es que el micromecanizado de volumen, que atraviesa toda la oblea desde

la cara dorso hasta el óxido enterrado, se realizará mediante un ataque húmedo en KOH protegiendo la cara componentes durante este ataque.

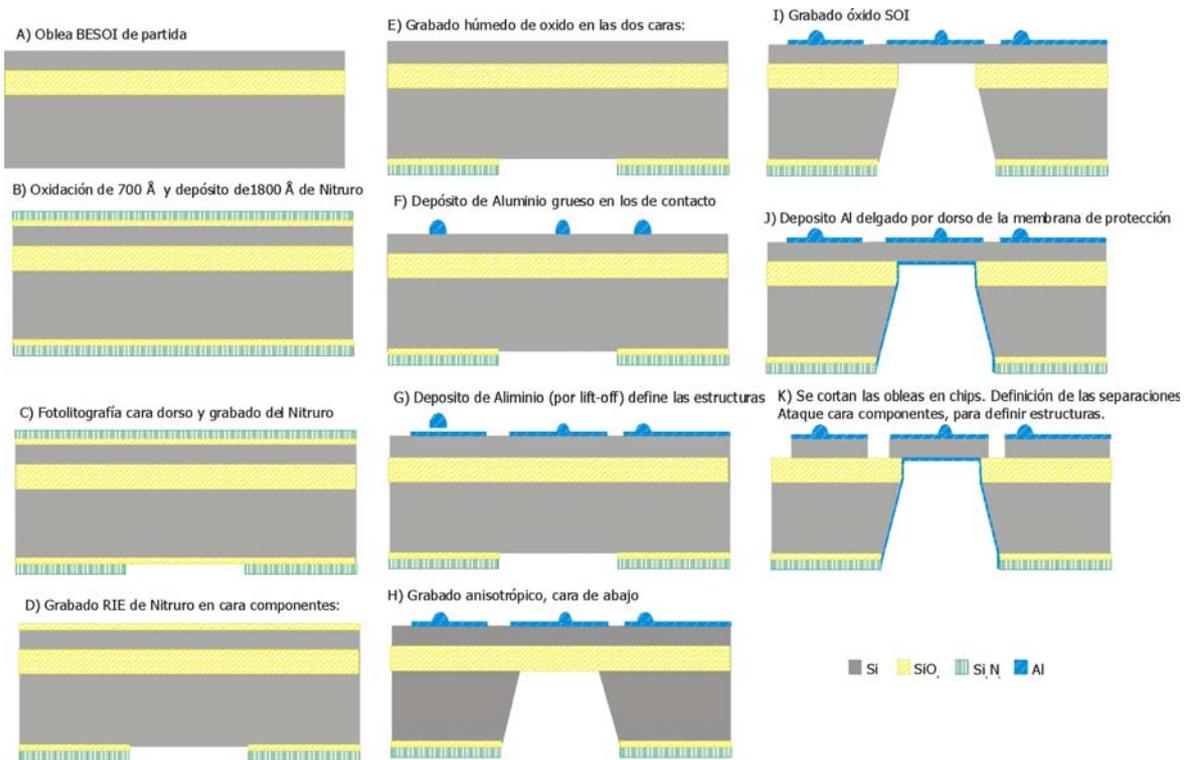


Figura 6.8 Esquema en sección del proceso de fabricación, donde el micromecanizado de volumen se hace mediante ataque húmedo.

Partiendo de la oblea BESOI comercial, A), el primer paso es dopar la capa de silicio SOI para hacerla más conductora: el silicio se dopa con implantaciones de fósforo de 9×10^{12} at/cm² a 90 KeV. A continuación se define la máscara de protección durante el grabado de KOH, esta máscara tiene que ser de Si₃N₄ (Nitruro de silicio). Para ello se crece una capa de óxido sobre el silicio y se deposita nitruro, este proceso en general se hace sobre las dos caras de la oblea B). En la cara dorso se hace una fotolitografía C). Se elimina el óxido en la cara componentes D) y en la cara dorso E).

Se definen los contactos eléctricos en aluminio grueso (1 μm), F). La siguiente etapa es definir las estructuras, éstas se definen mediante fotolitografía óptica, G) y como se transferirá el patrón con RIE, se utiliza como máscara una capa delgada de aluminio (8 nm). Protegiendo la cara componentes, en un soporte especial, se hace el grabado de KOH de la cara dorso a 80° durante 8 horas, H). A continuación se elimina el óxido mediante

ataque húmedo, I), se protege el dorso de la oblea con aluminio, J) y se definen sobre la máscara de la cara componentes los cortes entre electrodos. La última etapa es liberar las estructuras mediante grabado por iones reactivos, K).

Este proceso se realizó en la sala blanca del MIC¹. Aunque todas las etapas son estándar ha habido bastantes problemas durante la realización. Debido a que no había mucha experiencia en hacer grabados de KOH tan profundos protegiendo la cara componentes. Fue necesario realizar varias pruebas para encontrar las condiciones óptimas. Era muy importante la forma de colocar la oblea dentro del soporte que protege durante el ataque. Además el proceso tenía que ser muy uniforme, había que evitar mover la oblea mucho y que sufriera cambios bruscos de temperatura, ya que en caso contrario se rompía (por ejemplo, si el grabado de KOH se hacía en dos etapas, había que sacarla y meterla o si se intentaba comprobar en que punto del grabado estaba), en alguna ocasión el KOH penetraba en la zona protegida atacando las estructuras, de modo que la oblea quedaba inservible.

Otro de los inconvenientes es que una vez atacado todo el silicio sustrato, el óxido enterrado estaba muy estresado (figura 6.9). En alguna ocasión este estrés provocó la ruptura de las membranas, atacándose la cara componentes.

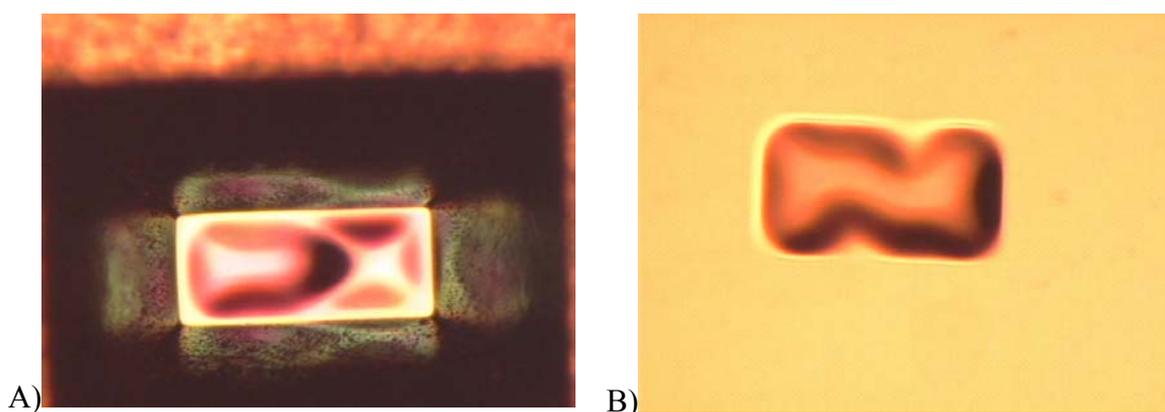


Figura 6.9 Imágenes ópticas de las membranas de silicio y óxido sin estructuras tras acabar el ataque del silicio mediante KOH. A) cara dorso B) cara componentes.

¹ Durante la estancia de investigación realizada entre los meses de octubre y diciembre de 2002 en el grupo de biosensores del MIC

Por último hay que destacar que la idea original era realizar el RIE de las estructuras y a continuación realizar el RIE de las separaciones entre electrodos. Se probó también definir las estructuras y los cortes entre electrodos en el mismo ataque RIE, definiendo sobre la máscara de aluminio los cortes mediante litografía por AFM, este proceso tiene una serie de inconvenientes como veremos en la siguiente sección.

6.2.2 Proceso 2: micromecanizado de volumen mediante ataque seco

Debido a todos los problemas que tenía el primer proceso planteado, es necesario repetirlo y se decide modificarlo ligeramente. El segundo proceso se realiza en la sala blanca del IMB-CNM. El cambio sustancial es que el ataque de micromecanizado de volumen se va a realizar mediante un grabado por iones reactivos profundo (DRIE, *Deep* RIE). Este cambio supone que hay que rediseñar las máscaras, porque la abertura en máscara definida en la cara dorso será más pequeña, al ser en este caso completamente vertical. La figura 6.10 muestra en sección el proceso.

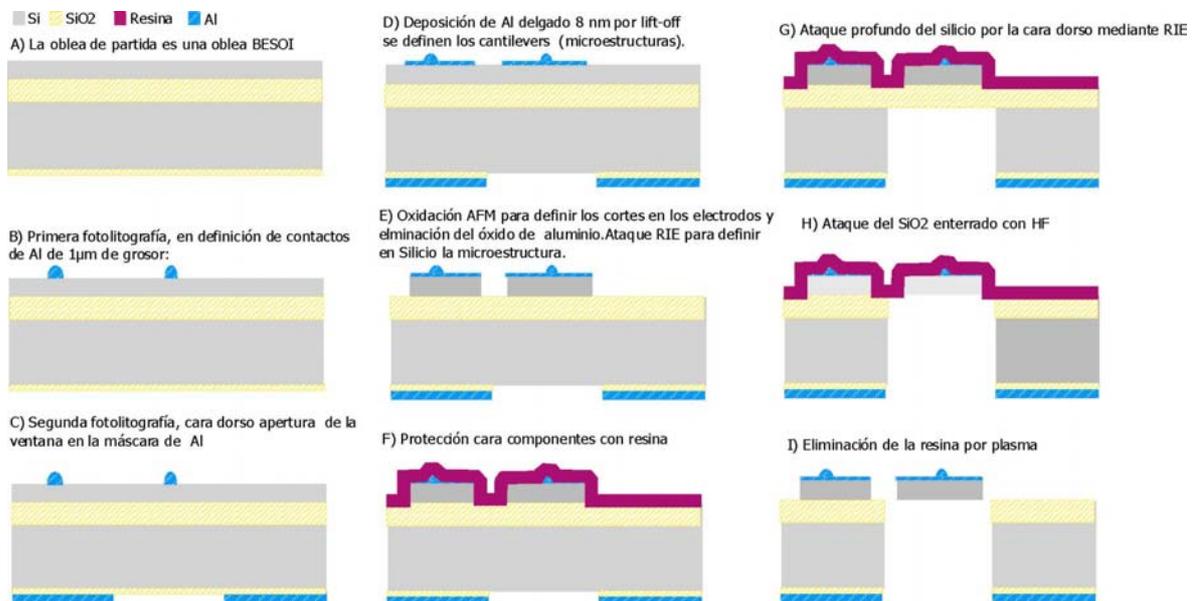


Figura 6.10 Esquema en sección del proceso seguido.

Se parte del mismo tipo de obleas BESOI, A) y se dopa el silicio SOI con una implantación de boro de $1.0 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ a una energía de 50 KeV. A continuación se definen los contactos en la cara componentes, B). Y seguidamente en la cara dorso se define la máscara de aluminio que protegerá durante el grabado DRIE C). Mediante *lift-off* se definen las

estructuras en aluminio, D) y los cortes entre electrodos al menos en alguna estructura, E). A continuación se protege la cara componentes con resina (para evitar ataque indeseado de las estructuras), F). Se realiza el grabado profundo del silicio mediante RIE, G) y se elimina el óxido mediante un ataque húmedo, H) y la resina de protección mediante grabado con plasma, I).

En este proceso los problemas surgen sobre todo en la definición de los cortes entre electrodos, de forma que se tiene que modificar ligeramente. Primeramente se realizan durante el proceso con AFM. Por eso se verán en detalle en la siguiente sección.

6.3 Fabricación de la separación nanométrica entre electrodos

La definición de electrodos separados una distancia inferior a los 100 nm ha sido el principal problema tecnológico de la fabricación de este tercer demostrador. Algo que parecía trivial disponiendo de herramientas de nanolitografía y grabados profundos ha tenido bastantes complicaciones. En este apartado se presentan las técnicas utilizadas en orden cronológico, explicando así porqué se decidió utilizar cada una de ellas y qué problemas han surgido y han requerido uso de otras técnicas o procesos.

6.3.1 Litografía mediante AFM combinada con RIE

La idea original era utilizar litografía por microscopio de fuerzas atómicas para definir las separaciones de los electrodos al final del proceso, dado que se disponía de un microscopio de AFM y experiencia en litografía. Se utiliza una máscara de aluminio para definir las estructuras, porque es una capa muy selectiva al ataque RIE y sobre la que es fácil realizar oxidaciones locales mediante AFM para crear los cortes. La figura 6.11 esquematiza el proceso de litografía sobre el sensor.

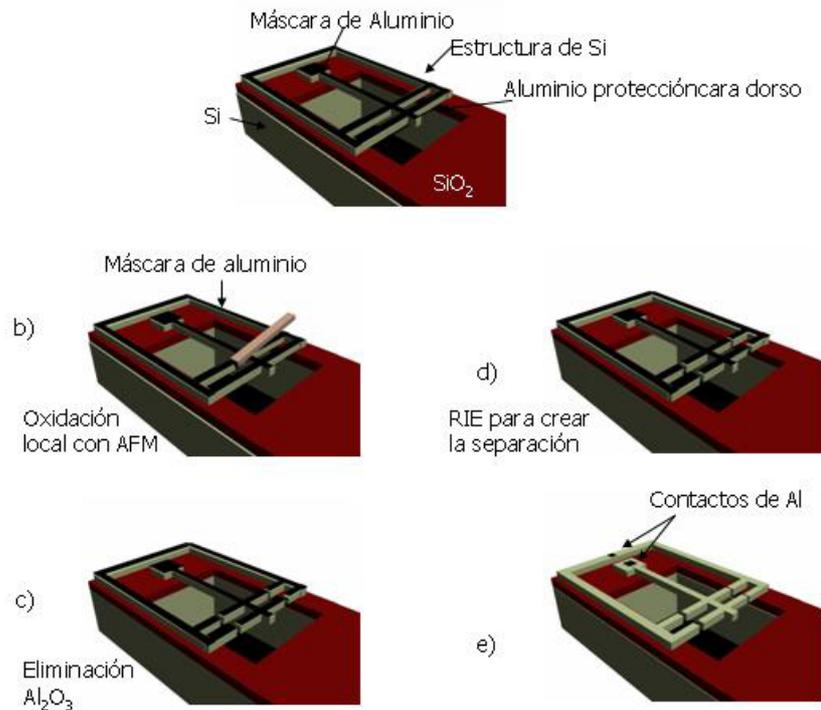


Figura 6.11 Esquema del proceso de fabricación de la separación entre electrodos mediante litografía por AFM y transferencia del patrón con RIE.

En primer lugar se deposita una capa de aluminio de 8nm sobre la estructura, A). Para evitar que el RIE final sobreataque el silicio a través de la cavidad, se protege con aluminio también la cara dorso. Mediante oxidación local del aluminio con la punta de AFM se litografian las líneas que definirán el corte entre los dos electrodos, B). El Al₂O₃ se elimina selectivamente mediante un ataque húmedo, este ataque no elimina el aluminio y tampoco ataca el óxido de silicio ni el silicio, C). Para conseguir eliminar sólo el aluminio oxidado durante la litografía, es necesario que el aluminio esté fresco para hacer la litografía y para eliminar el óxido de aluminio. No pueden pasar más de 3 días desde que se deposita el aluminio, hasta que se elimina el óxido de aluminio. Esto limita sustancialmente el número de líneas que se pueden litografiar por oblea. La siguiente etapa es transferir el patrón mediante grabado por iones reactivos, D) y por último se elimina la máscara de aluminio, E).

La oxidación local con AFM ha tenido lugar en aire (60% de humedad relativa), utilizando puntas de silicio y palancas rígidas. Se ha aplicado una tensión de oxidación de 35 V (positiva respecto a la muestra que está en tierra virtual), la velocidad de rastreo es 0,3 μm /s y la oxidación se realiza en modo no contacto del microscopio (para alargar la

vida de la punta). La figura 6.12 muestra los resultados de las líneas definidas mediante litografía por AFM. En a) se observa la línea definida tras la oxidación, la altura medida (4 nm). En b) se observa la línea tras el decapado del óxido de aluminio como muestra la figura se han conseguido profundidades de 9,5 nm tras eliminar el óxido de aluminio, asegurando que se ha eliminado completamente en esa región. [Villarroya-04]. La variación de alturas entre a) y b) corresponden con la expansión en volumen del óxido de aluminio frente al aluminio.

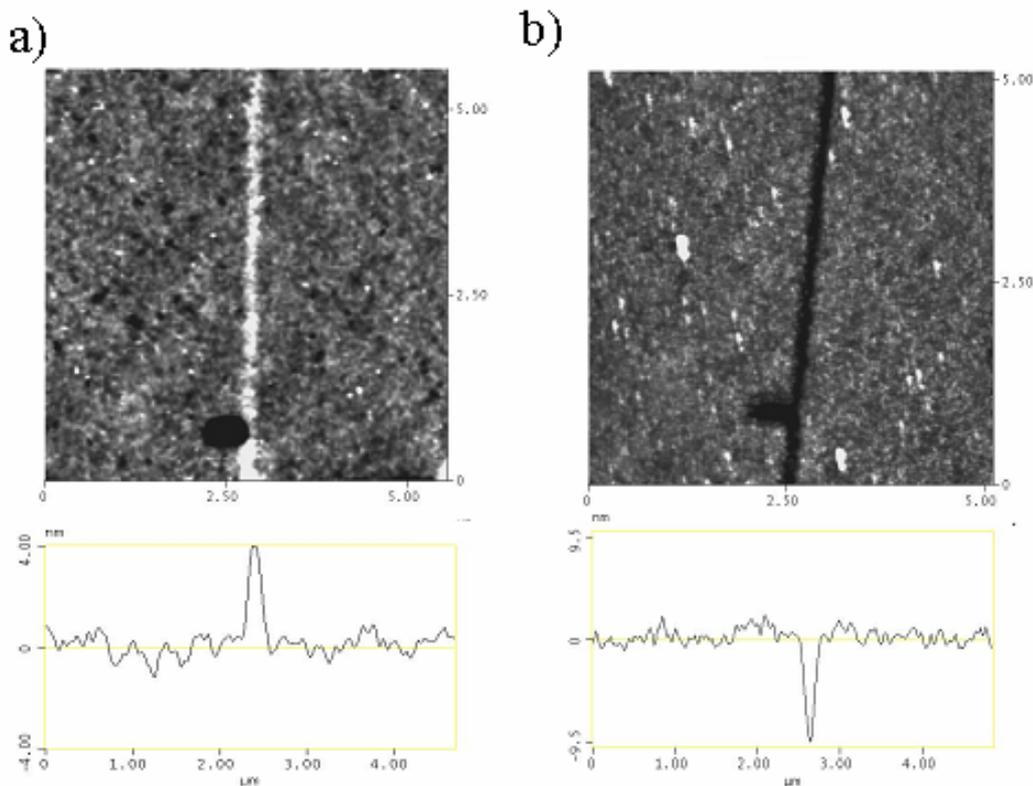


Figura 6.12 Imágenes AFM del proceso litográfico A) Anchura de la línea tras la oxidación. B) Máscara de aluminio tras el decapado del óxido de aluminio.

En un primer ataque parcial de las líneas mediante RIE se consiguen en las mejores condiciones separaciones entre los electrodos de 50 nm. Como muestra la figura 6.13. Un detalle destacable de este proceso es que la oxidación con AFM no puede llegar a definir el corte completo. Al realizar las oxidaciones las estructuras están completamente liberadas y la punta del microscopio al llegar al extremo del dedo encuentra un escalón muy abrupto, de forma que la punta sufre mucho en este punto. Por esta razón se definen los cortes centrados, sin llegar al extremo (se observa este detalle en la figura 6.13 B).

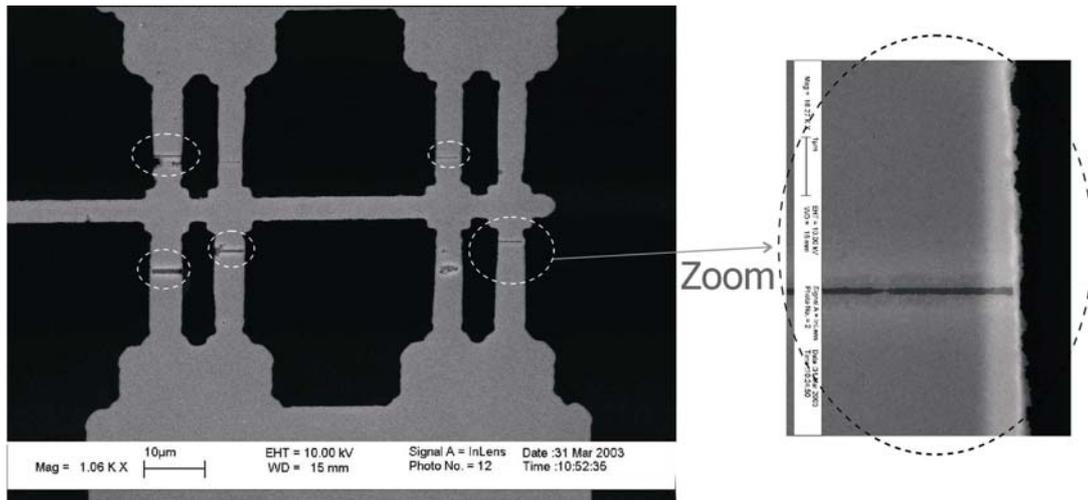


Figura 6.13 Imagen SEM de una estructura donde se han definido las separaciones entre electrodos mediante litografía por AFM y RIE. En detalle se muestra uno de los corte de anchura inferior a los 50 nm.

En la continuación del proceso de grabado para separar completamente los dos electrodos, ha aumentado el sobreataque lateral como muestra la figura 6.14, en esta figura se observan los dos electrodos unidos por la capa inferior de aluminio. Se han separado presionando el *cantilever* con la punta de AFM (figura 6.15). El silicio corresponde a la zona central y los restos de aluminio se ven alrededor de este en 6.14 más oscuro y en 6.15 más claro que la estructura en silicio.

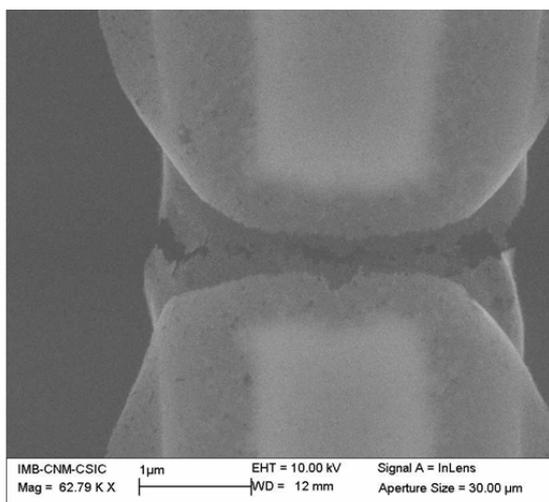


Figura 6.14 Imagen SEM de la estructura tras definir los cortes nanométricos entre electrodos, las estructura está unida por el aluminio de protección de la cara dorso

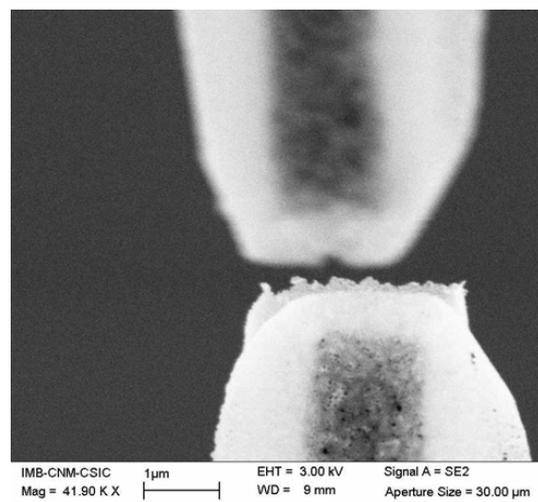


Figura 6.15 Imagen SEM de la misma estructura que en la figura anterior, los dos electrodos se han separado presionando el *cantilever* con la punta del AFM.

El ataque lateral se observa no solo en las zonas próximas al corte definido, sino también alrededor de la estructura. La figura 6.16 muestra dos imágenes SEM de la estructura liberada tras la eliminación del aluminio: A) vista general, B) Detalle de unos de los *dedos* que separan los electrodos. El *cantilever* está estresado de forma que se desplaza ligeramente del plano del electrodo. La separación entre los dedos es del orden de una micra, demasiado grande para la detección electroquímica.

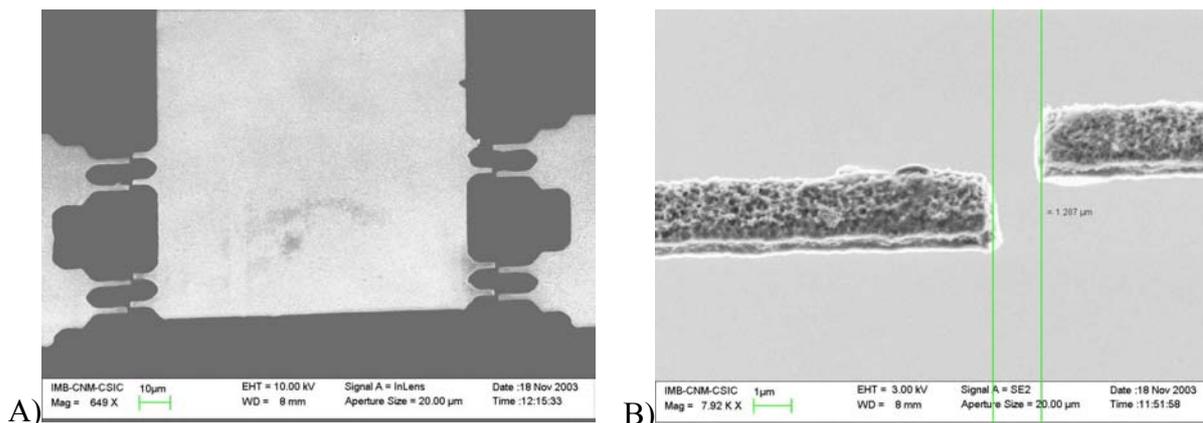


Figura 6.16 Imágenes SEM de la estructura completamente liberada. A) vista general, B) detalle.

Para minimizar este sobre ataque se decide realizar las oxidaciones locales antes de definir las estructuras, así se definirán en el mismo RIE las estructuras y los cortes. Para ello se define la máscara para fabricar las estructuras en aluminio mediante la fotolitografía y sobre ésta la máscara para fabricar los cortes mediante oxidación local con AFM. Este proceso permite llegar con la punta de la oxidación hasta el extremo de los *dedos*, ya que ahora no hay escalón abrupto. La figura 6.17 muestra una imagen AFM en tres dimensiones de la oxidación sobre un *dedo*, en el límite de la máscara el aluminio se levanta ligeramente debido a que la máscara se define mediante un proceso de *lift-off*. Los resultados de la litografía son similares a los anteriores, la anchura de la línea en este caso se ha disminuido ligeramente y es de 120 nm aproximadamente.

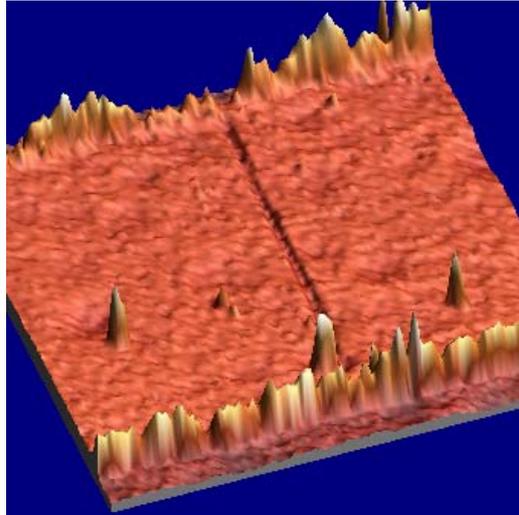


Figura 6.17 Imagen AFM de la máscara de Aluminio sobre uno de los puentes que unen los dos electrodos.

El problema de este proceso surge al intentar hacer el ataque RIE del silicio: se ha atacado la estructura y las trincheras pero además el silicio ha quedado muy dañado, tal y como se observa en las figuras 6.18 y 6.19. Estos resultados indican que el aluminio no ha aguantado el ataque, al eliminar el óxido de aluminio tras la oxidación local para definir las trincheras probablemente se ha eliminado algo de aluminio de la máscara (debido a que ha crecido óxido nativo). Esto ocurre porque ha pasado bastante tiempo (4 días) entre la definición la deposición del aluminio y el decapado del óxido de aluminio.

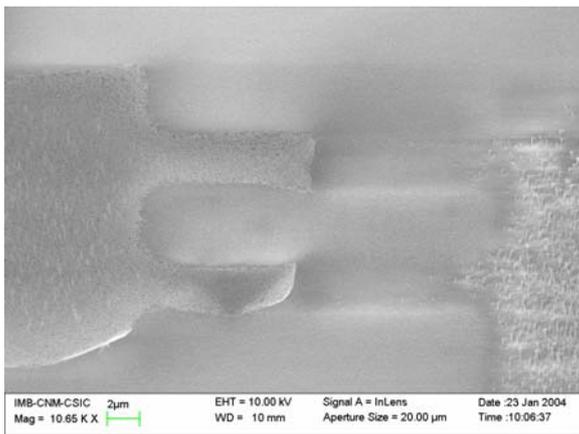


Figura 6.18 Imagen SEM del sobreataque sobre la estructura móvil y el electrodo fijo. Todo el silicio se ha dañado.

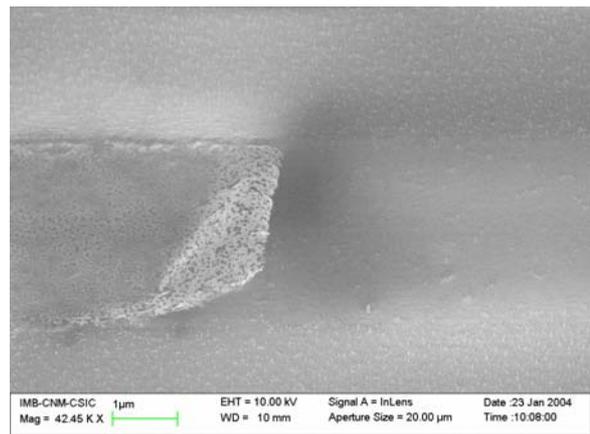


Figura 6.19 Imagen SEM en detalle de uno de los dedos, se observa la capa de aluminio levantada y el silicio agujereado.

El proceso de definición de estructuras utilizando litografía por AFM tiene varios problemas, el más destacable es el debido a los ataques mediante RIE. Otro problema de esta técnica de litografía es que se realiza sobre aluminio y se debe eliminar el óxido de aluminio de forma que sea selectiva al aluminio. Este grabado se hace con una disolución que contiene cromo (IV) sustancia altamente cancerígena que se recomienda no utilizar. Para continuar utilizando el sistema de oxidación con AFM es necesario buscar una alternativa. Una opción podría ser usar cromo como máscara para hacer la litografía. Pero debido a los otros problemas surgidos (líneas demasiado anchas, procesado lento, RIE,...) se busca otra alternativa que además permita obtener mayor número de dispositivos.

6.3.2 Litografía FIB combinada con RIE

En la búsqueda de una alternativa a la litografía por AFM surge la posibilidad utilizar el sistema de haz de iones focalizado del Grupo de Física y Tecnología de Nanoestructura del Laboratorio de Fotónica y Nanotecnología del CNRS (en particular surge la posibilidad de colaborar con el Dr. Gierak). Se trata de utilizar su equipo de haz focalizado de iones para realizar estructuras. Es un equipo fabricado por ellos mismos dentro del proyecto Nano-FIB (de la UE G5RD-CT2000-00344). Este equipo reduce las dimensiones del haz, de modo que se pueden definir estructuras inferiores a los 10 nm, con profundidades de 50 nm en litografía directa [Gierak-01]. Se utiliza una fuente de iones de galio líquido. La principal diferencia de este equipo con sistemas comerciales es que puede aplicarse y combinarse en aplicación a nivel industrial. El equipo trabaja con energía de aceleración de 30 kV y con corrientes del orden de 10 pA.

La idea original era poder fabricar directamente las estructuras con el FIB, las trincheras que queremos definir son de 1 μm de profundidad y 50 nm de ancho en silicio. Con las características del equipo que disponen no parece posible llegar a grabar una micra entera en silicio con estas anchuras. Por esta razón se propone utilizar aluminio como máscara, definir el patrón escribiendo sobre el aluminio y transferir el patrón a la superficie mediante un grabado reactivo de iones.

El proceso de litografía consiste en depositar una capa de aluminio de 8-10 nm de espesor (condiciones similares a las usadas con el AFM) sobre la superficie que se quiere definir.

Una vez depositado el aluminio se realiza un ataque con el FIB de forma controlada para definir las estructuras a litografiar. El control monitorizado del haz de iones permite definir patrones muy precisos; además se puede programar la litografía, de forma que el proceso es automático a lo largo de toda la oblea.

El aluminio puede depositarse por evaporación o por *sputtering*, con cualquiera de los dos métodos se obtiene una máscara capaz de resistir el ataque de silicio. Es imprescindible que la rugosidad de la superficie sea muy inferior al grosor de la capa de aluminio, para que éste pueda actuar correctamente de máscara. En este caso la capa estructural que se quiere micromecanizar, es silicio cristalino.

Para poner a punto esta técnica ha sido necesario probar distintos tiempos de ataque y dosis para encontrar la óptima para realizar la litografía. La figura 6.20 muestra un ejemplo de las líneas que han sido definidas en la máscara de aluminio, las líneas más a la derecha han sido definidas con dosis inferiores.

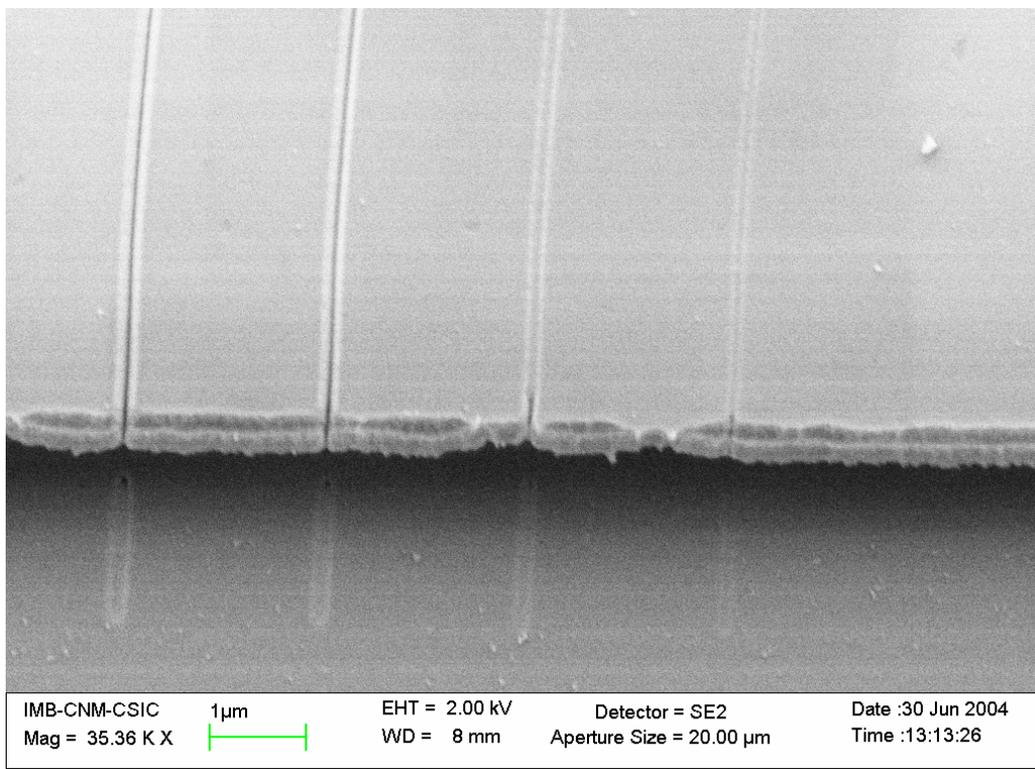


Figura 6.20 Imagen SEM de cuatro líneas definidas sobre aluminio mediante litografía con haz focalizado de iones, se prueban distintas dosis, la de dosis menor es la de más a la derecha.

Mediante microscopio de AFM y SEM se han analizado en detalle las distintas líneas definidas y las distintas dosis. Se ha conseguido definir líneas de 80 nm de anchura. La figura 6.21 muestra el análisis AFM de una de estas líneas. .

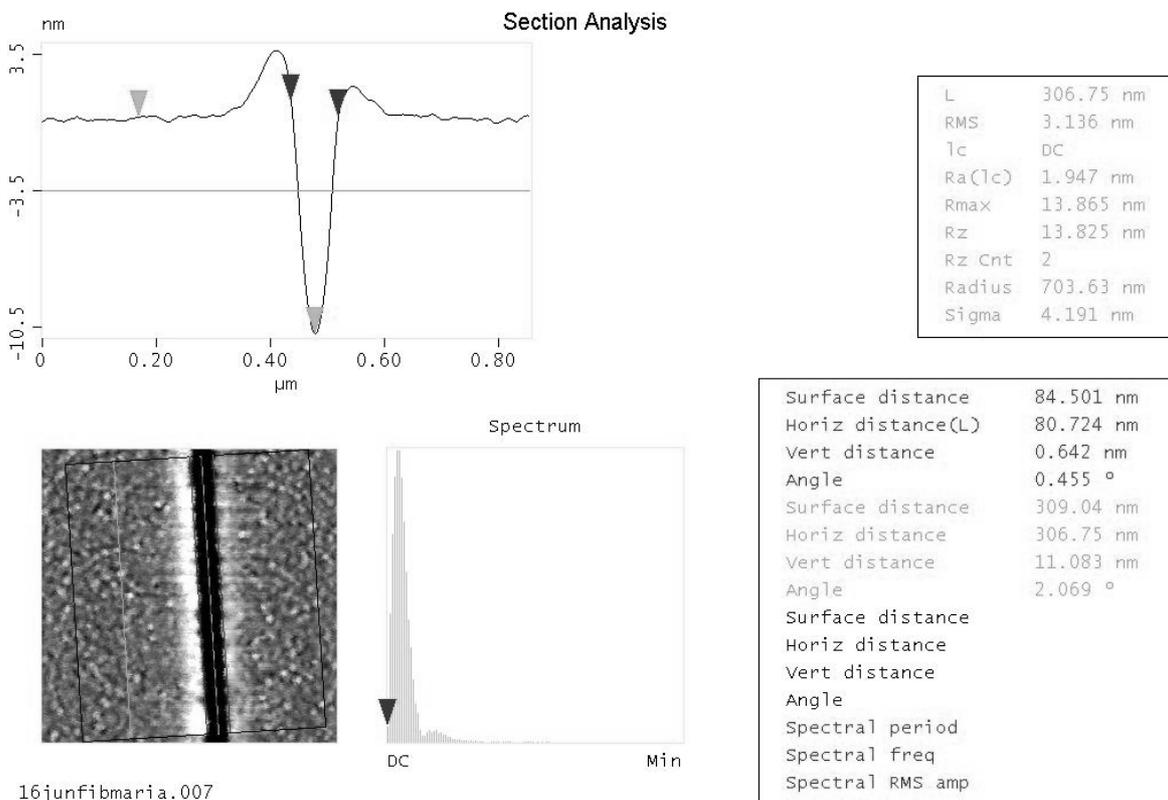


Figura 6.21 Análisis AFM de las líneas definidas con FIB sobre Aluminio. Como muestra la imagen, la anchura de la línea es de aproximadamente 80 nm y la profundidad de al menos 11 nm indica que se ha definido correctamente el patrón.

Como el análisis mostrado en la figura anterior, se realizan imágenes AFM de las diversas dosis empleadas (las dosis se miden en ms/pt, es decir el tiempo que se focalizan iones en cada punto). La grafica siguiente (figura 6.22) indica la anchura de las líneas y la profundidad alcanzada en función de la dosis aplicada. Es necesario que la profundidad de la línea sea superior a 8 nm, grosor del aluminio depositado, de forma que se asegure que se ha eliminado todo el aluminio. De este estudio se concluye que las dosis de 5 ms/pt son las óptimas para litografiar el aluminio de 8 nm, ya que es la dosis que consigue eliminar todo el aluminio y que define las líneas de anchura inferior en estas condiciones. La anchura media definida es de 84,6 nm.

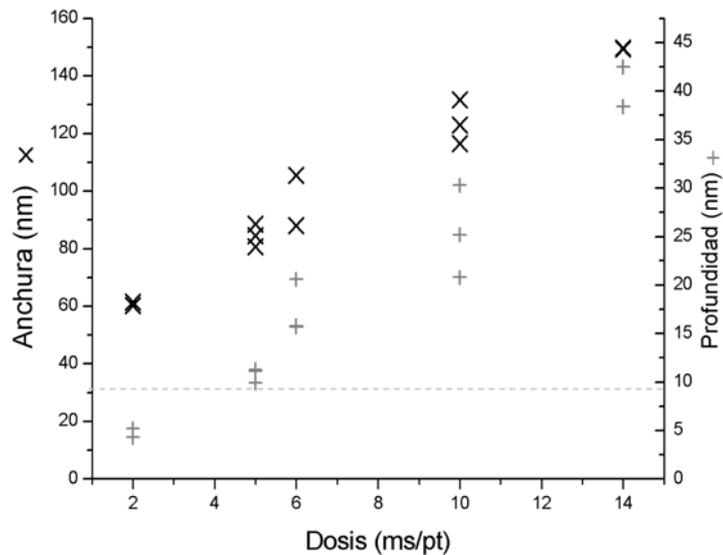


Figura 6.22 Análisis de la profundidad y anchura de las líneas definidas mediante FIB en la máscara de aluminio.

El problema de esta técnica ha sido la puesta a punto de las condiciones de grabado de los ataques por iones reactivos para crear los cortes. Estos ataques se han realizado en la sala blanca del IMB-CNM. Con ataques RIE se disponía de bastante experiencia en el grabado de estructuras y trincheras con dimensiones superiores o del orden de 500 nm. Reducir en un orden de magnitud las dimensiones no es trivial para estos ataques. Se han realizado muchísimas pruebas hasta conseguir condiciones idóneas. El grabado además no resulta demasiado repetitivo, de modo que con dimensiones tan críticas se complica más el proceso.

Para estos ataques se ha utilizado el equipo Alcatel -601 (detalles en capítulo 3) ya que es el equipo más indicado para grabados con mayor verticalidad al tratarse de un sistema ICP (*Inductively Coupled Plasma*). Las primeras pruebas se realizan en condiciones que permiten alta anisotropía en el grabado del silicio para definir trincheras de dimensiones de varias micras. Con un ataque de 1,5 minutos se consigue bastante verticalidad y aunque la anchura superior de la trinchera aumenta, la anchura media parece mantenerse en condiciones óptimas. La figura 6.23 A) muestra una imagen SEM de este resultado, la línea tenía una anchura inicial de 156 nm y tras un ataque de 1,5 minutos la anchura es de 247 nm y la profundidad de 250 nm. El sobreaque lateral es de aproximadamente 50 nm en la parte superior. Debido a que la anchura, a una profundidad de 250 nm, es de sólo 60 nm, que permitirían realizar las medidas electroquímicas, se decide continuar el ataque.

Se realiza un ataque de 7 minutos más, dado que en el primer ataque sólo se han atacado unos 200 nm de profundidad y tras este ataque se sobreataca completamente la estructura (figura 6.22 B).

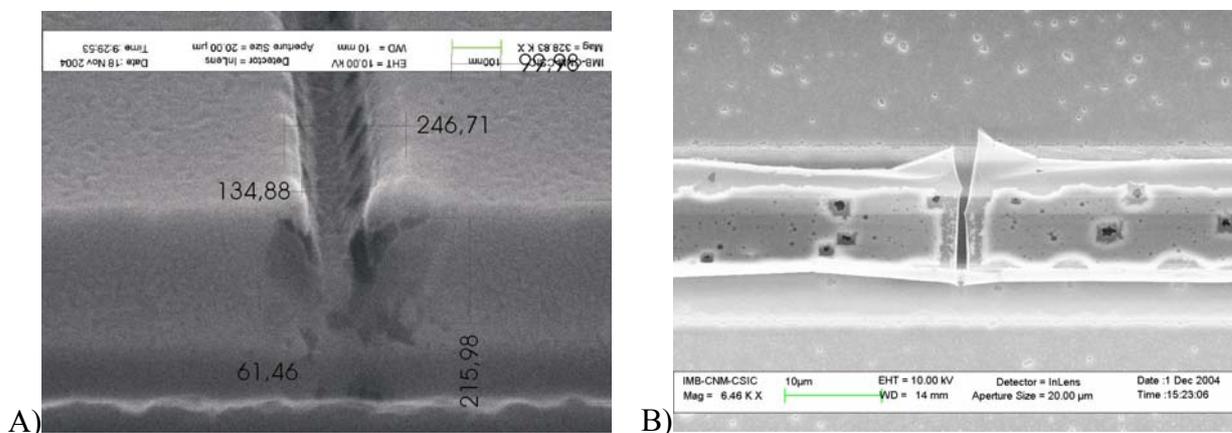


Figura 6.23 Resultados de las pruebas para hacer las trincheras de silicio.

Finalmente se ha encontrado un proceso bastante adecuado para este tipo de ataques. Los gases reactivos SF_6 y C_4F_8 se combinan en una proporción de flujo de de 3:2, aumentando relativamente la presión de la cámara, de forma que realizando ataques cortos (de 7 segundos) en etapas independientes se consiguen los mejores resultados. Los resultados se muestran en la figura 6.24 A) tras dos etapas de proceso y B) tras 7 etapas de proceso. La línea se definió con una dosis de 5 ms/pt, de forma que la anchura del aluminio en la máscara era de unos 85 nm. En la imagen A) se observa un incremento notable de la anchura en la zona superior del corte (156 nm aproximadamente) y la zona inferior de la abertura tiene una anchura inferior a 60 nm. En la imagen B) se observa un mayor sobreataque en la zona inferior de la apertura (anchura 80 nm) y en la zona superior la apertura es de 160 nm.

En estas imágenes puede observarse que el ataque tiende a frenarse en el centro de la trinchera, esto podría deberse a que quedan restos de aluminio redepositado o una mezcla de aluminio y galio que queda dentro del corte. De los últimos resultados mostrados se concluye que se pueden definir estructuras con separaciones inferiores a 100 nm, al menos en la zona central.

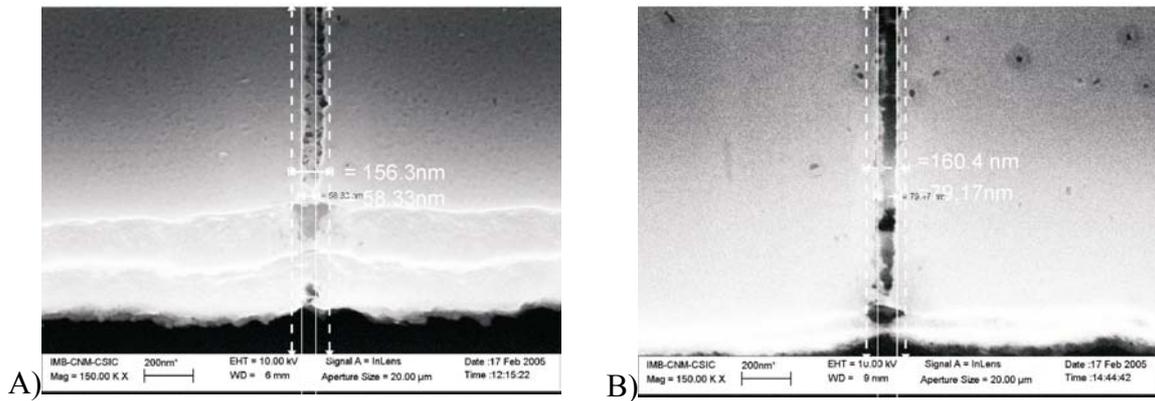


Figura 6.24 Imágenes SEM de los ataques sobre la misma trinchera. Se observa un ligero sobreaunque: A) a mitad de proceso, B) concluyendo el ataque.

Los problemas surgidos, la necesidad de realizar tantas pruebas y la falta de resultados que concluyan positivamente sobre este proceso nos hacen buscar soluciones alternativas como la utilización de otros equipos.

6.3.3 Definición de la separación entre electrodos mediante FIB

La tercera opción para definir las separaciones nanométricas es utilizar un equipo comercial de haz focalizado de iones para realizar los cortes, disponible en el Parque Científico de Barcelona. Se trata de un modelo *Strata Dual Beam 235* de la empresa FEI, este sistema está dotado de una columna de iones y una columna de electrones, lo que permite trabajar conjuntamente con el FIB y el SEM. El equipo permite realizar grabados, para definir estructuras o preparar secciones de muestras para inspección, y deposición de diversos materiales (metales y óxidos). La columna de iones trabaja con una tensión de aceleración de entre 10 y 30 kV, con una corriente del haz del entre 1 pA y 20 nA [Fei].

Este equipo permite definir trincheras con anchura inferior a los 100 nm y 1 μm de profundidad, por la experiencia en ataques sobre sustratos de silicio. Antes de realizar los cortes sobre el sensor se realizan un par de pruebas. La primera de ellas consiste en definir los cortes sobre puentes de silicio del mismo espesor, liberados del sustrato. Al hacer incidir el haz de iones de alta energía sobre el puente, provoca la vibración de este, de forma que no se consigue focalizar el haz sobre el mismo e imposibilita la alta resolución requerida. La figura 6.25 muestra una imagen de esta estructura.

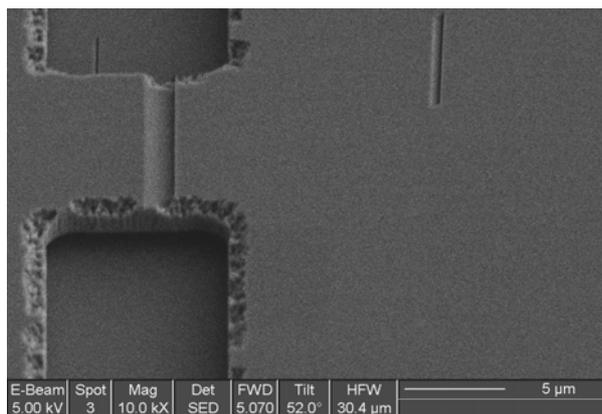


Figura 6.25 Imagen SEM de la marca definida por el FIB al intentar definir un corte sobre un puente liberado

Se intenta definir las estructuras sobre sustratos fijos (no liberados). Sobre sustratos de prueba formados por puentes con estructura SOI que mantienen la capa de óxido se definen también cortes con FIB. Se consiguen en este caso mejores resultados, tal y como muestra la figura 6.26. La anchura del corte es de 70-80 nm, varía ligeramente de una estructura a otra, pero siempre en este rango. La tensión de aceleración del haz utilizada para realizar el corte es de 10 kV y la intensidad de 10 pA.

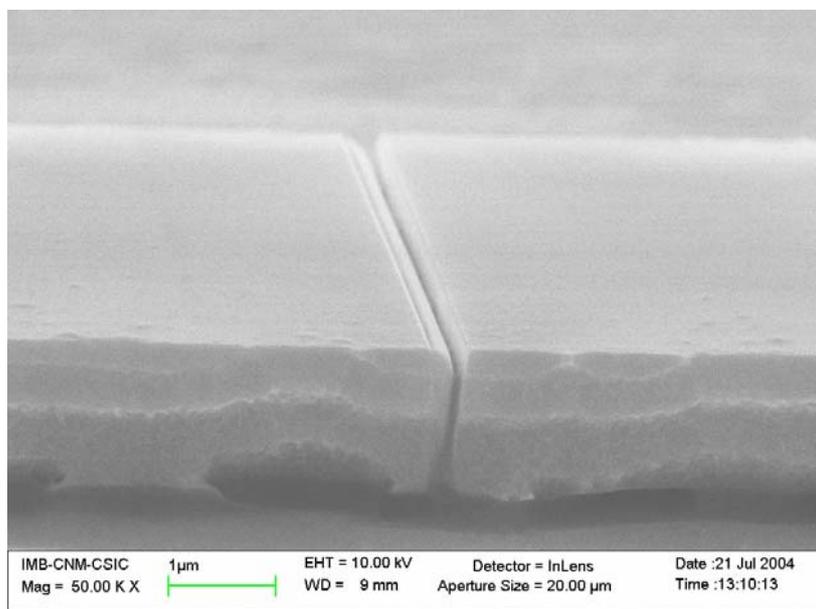


Figura 6.26 Imagen SEM de un corte hecho con el FIB sobre una estructura de cinco micras de largo. La anchura del corte es inferior a los 100 nm.

Se utilizará esta técnica para fabricar los dispositivos finales. Hay que modificar el proceso completo de fabricación para que los cortes se definan antes de atacar completamente el silicio sustrato, de forma que la membrana no oscile durante el ataque FIB. El principal problema de esta técnica es que el proceso de definir los cortes en el FIB es un proceso contaminado CMOS (debido a que en el FIB se depositan metales contaminantes CMOS). Este hecho impide utilizar el *Alcatel 601-E* tras la definición de los cortes.

Se modifica ligeramente el proceso de fabricación. En el ataque profundo del silicio sustrato se atacan en lugar de las 525 μm de grosor del silicio 470 μm , de forma que queda una membrana de 55 μm suficientemente estable. Esta membrana se eliminará tras la definición de los cortes con FIB. La eliminación de la membrana no es trivial. Se intenta eliminar mediante ataques húmedos y secos, en ambos casos hay que proteger la cara componentes y ajustar el ataque para que no se rompan las membranas y se ataque todo el silicio. Mediante ataques húmedos en TMAH saturado hay muchos problemas para proteger la estructura de la cara componentes con cera. Se han intentado variaciones del proceso sin conseguir llegar a ningún resultado óptimo. En los ataques secos se tiene que utilizar el RIE Oxford (ver especificaciones en el capítulo 3). El principal problema del ataque seco es que no se atacan por igual todas las ventanas de un mismo chip, así cuando se hace el ataque, algunas membranas se rompen por sobreataque y otras no se atacan del todo.

6.4 Resultados correspondientes al tercer demostrador

En este apartado se presentan los resultados obtenidos del primer proceso de fabricación y se caracterizan mecánicamente estas estructuras. Por último se presentan los resultados preliminares correspondientes al segundo proceso con la definición de cortes nanométricos y una primera caracterización electroquímica del dispositivo.

6.4.1 Resultados de los procesos de fabricación

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la fabricación completa del dispositivo. La figura 6.27 muestra una imagen SEM de uno de los dispositivos fabricados

utilizando el primer proceso de fabricación (el ataque de la cara dorso se hace mediante grabado con KOH).

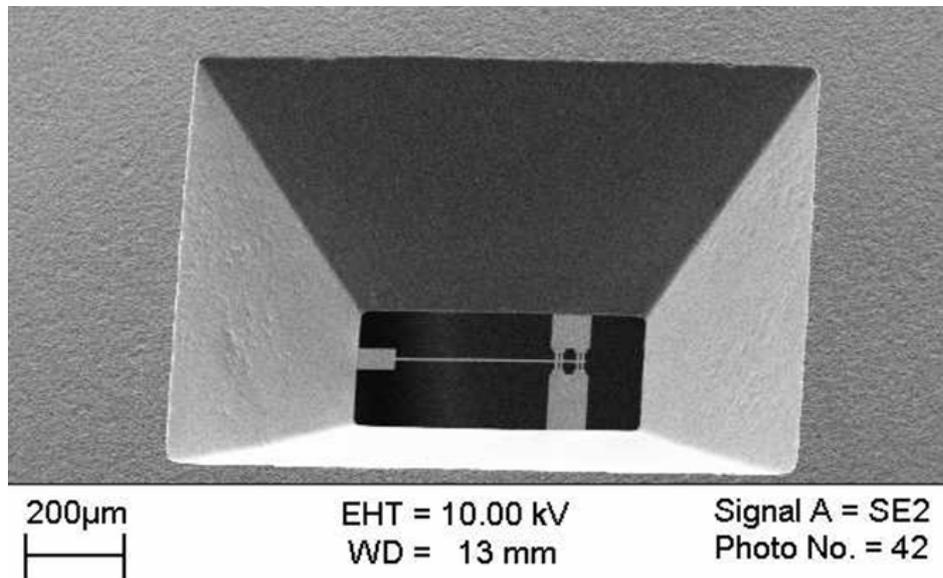


Figura 6.27 Imagen SEM de la cara dorso de la primera estructura fabricada. Se observan las paredes inclinadas típicas de un ataque con KOH. Al fondo de la cavidad se observa la palanca y parte del electrodo fijo.

La figura 6.28 muestra una imagen SEM de una estructura donde se observa el *cantilever* liberado y el electrodo fijo sobre la cavidad. Las separaciones entre electrodos han sido definidas mediante oxidación local con la punta del AFM y transferidas al silicio con un grabado RIE, tal y como se ha presentado en el apartado 6.3.1. Detalles de esta estructura se presentan en la figura 6.16.

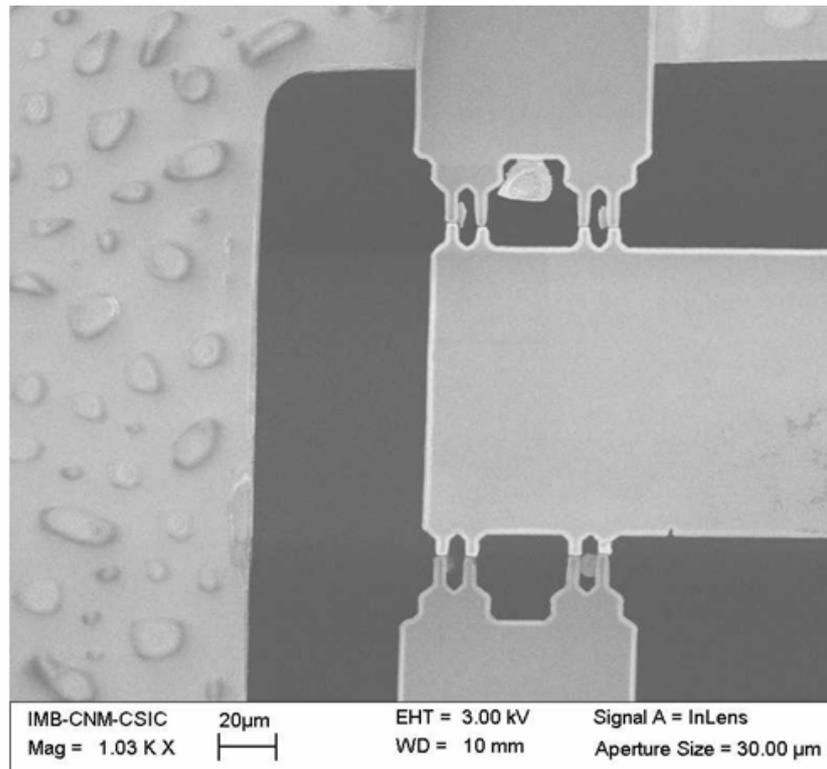


Figura 6.28 Imagen SEM de la estructura liberada

Esta estructura no sirve para detección electroquímica, ya que la separación entre electrodos es muy superior a los 100 nm. De las imágenes anteriores conviene comentar que no ha sido eliminado el aluminio de la cara componentes (máscara), ni de la cara posterior (protección). Éste provoca una tensión sobre el *cantilever* que lo deflecta ligeramente de su posición de equilibrio. En la figura 6.28 se observa la diferencia de altura debida a la deflexión, porque los dedos correspondientes a cada electrodo tienen distinto foco.

6.4.2 Caracterización mecánica del dispositivo

La primera estructura fabricada presentada en el apartado anterior, se caracteriza mecánicamente. En concreto, se trata de medir la constante elástica, que está directamente relacionada con la sensibilidad del sensor. Se utiliza la punta del microscopio de AFM para caracterizar mecánicamente el dispositivo. Con una punta de AFM (con constante elástica de 25 N/m) se presiona el *cantilever* en el extremo libre. La figura 6.26 muestra dos imágenes A) con el extremo libre, B) mientras la punta del AFM presiona al *cantilever*, en

modo contacto. La deflexión del *cantilever* del AFM se mide mediante el sistema de detección del láser del microscopio. La deflexión del *cantilever* del dispositivo fabricado se mide con el microscopio óptico del AFM. Mediante la aplicación de una curva de fuerza con la punta del *cantilever* de AFM sobre el *cantilever* liberado del dispositivo, se obtiene la constante elástica del *cantilever* que es 17 ± 2 pN/nm.

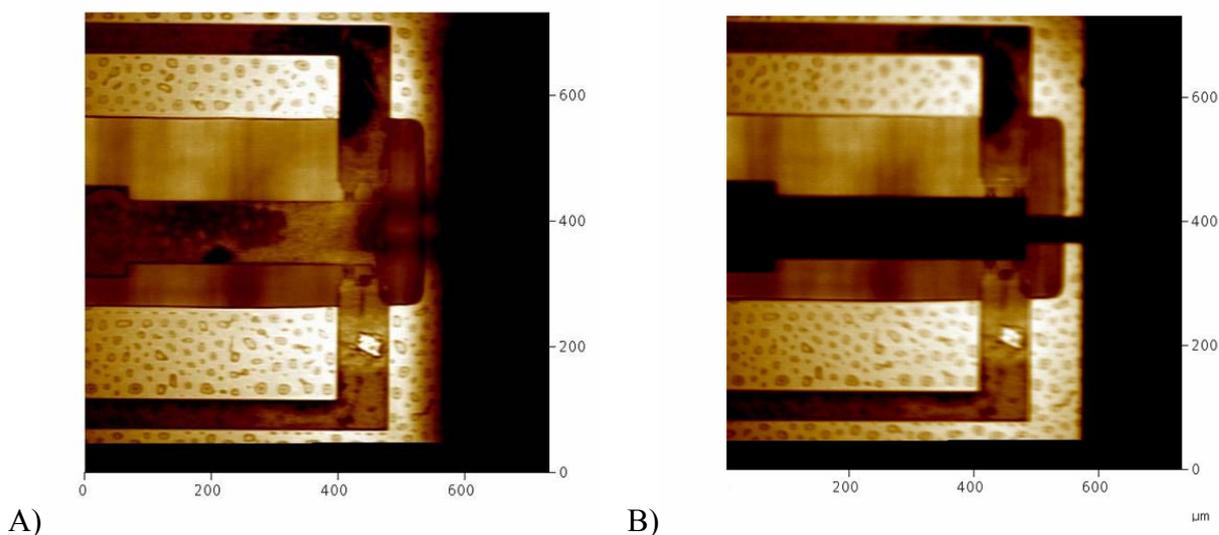


Figura 6.29 Imágenes ópticas de la media de la flexibilidad de la palanca mediante la aplicación de una fuerza con la punta del microscopio de fuerzas atómicas, A) en reposo, B) deflectada por la presión de la punta de AFM.

Este *cantilever* se había diseñado de $400 \mu\text{m}$ de largo por $100 \mu\text{m}$ de ancho, de modo que dependiendo del grosor de silicio SOI la constante elástica tuviese al menos un valor en el rango de los $1\text{-}40$ pN/nm (tabla 6.1). Para un grosor de $0,8 \mu\text{m}$ le corresponde un valor de $k = 40$ pN/nm. El valor experimental obtenido es ligeramente inferior al calculado teóricamente, pero dentro del rango esperado. La diferencia entre el valor estimado y el obtenido se entienden si nos fijamos en detalle en el proceso de fabricación. Por un lado la longitud del *cantilever* (unas $580 \mu\text{m}$) es significativamente mayor que la diseñada porque la ventana es ligeramente más grande de lo que debía. Además durante la definición de los cortes entre electrodos, se ha atacado también lateralmente el *cantilever*, de forma que su anchura se ha reducido ($95 \mu\text{m}$). La disminución de la anchura y el aumento de la longitud del *cantilever*, de acuerdo con la ecuación 2.3, justifican esta disminución de la constante elástica. Si consideramos en primera aproximación que se trata de una palanca de de 95

μm de ancho y $580 \mu\text{m}$ de largo y un espesor del silicio de $1 \mu\text{m}$, la constante sería de 23 pN/Nm , valor muy próximo al obtenido experimentalmente.

6.4.3 Caracterización electroquímica del dispositivo

Los problemas tecnológicos surgidos han retrasado la caracterización del sensor. No ha sido posible la caracterización completa del sistema. En una primera aproximación se mide la variación de corriente capacitiva entre dos estructuras similares donde se han definido los cortes en los *dedos* para separar los electrodos usando FIB. Estas estructuras no han sido liberadas del sustrato (no se ha eliminado todo el silicio en el grabado profundo ni el óxido enterrado). Estas medidas permiten conocer los niveles de corriente reales que se van a tener y estimar la sensibilidad del dispositivo.

La primera estructura está formada por un *cantilever* de $400 \mu\text{m}$ de largo y $200 \mu\text{m}$ de ancho, la segunda por un *cantilever* de $400 \mu\text{m}$ de largo y $130 \mu\text{m}$ de ancho. Ambas tienen dos dedos a cada lado. La figura 6.30 muestra una imagen óptica A) de la estructura 1 de $200 \mu\text{m}$ de ancho y B) de la estructura 2 de $130 \mu\text{m}$ de ancho. Los dos electrodos se separan mediante un corte con el FIB con una intensidad de 10 pA y una tensión de aceleración de 30 kV .

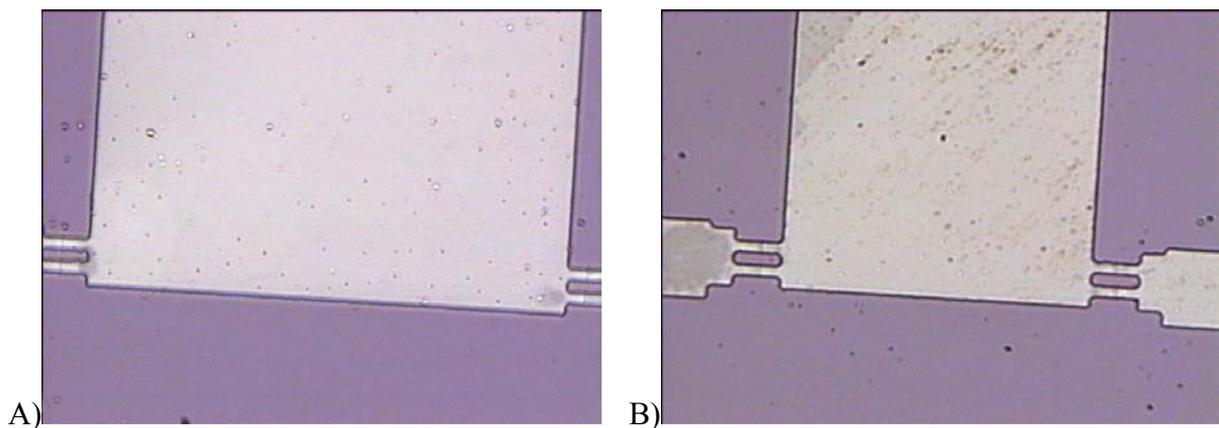


Figura 6.30 Imágenes ópticas de las dos estructuras caracterizadas.

La distancia entre los electrodos definida con el FIB es próxima a los 70 nm , las figuras 6.31 y 6.32 muestran dos imágenes SEM de uno de los cortes definidos en las estructuras.

De estas imágenes se obtiene la anchura de la línea. Se observa en la zona superior del corte un pequeño sobreataque. El proceso de fabricación de cortes con FIB es bastante repetitivo, si bien se han observado variaciones de 5nm en la anchura.

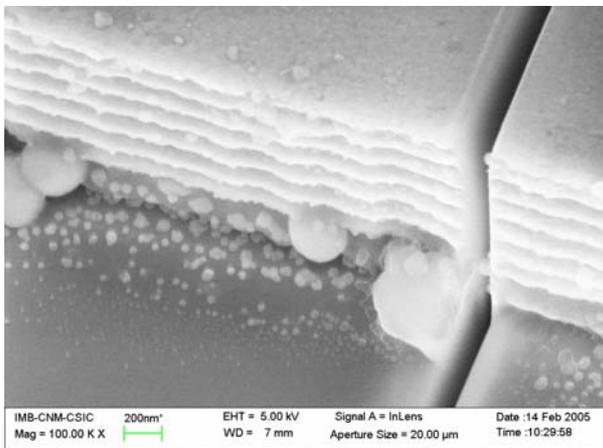


Figura 6.31 Imagen SEM de los cortes definidos en las estructuras mediante FIB.

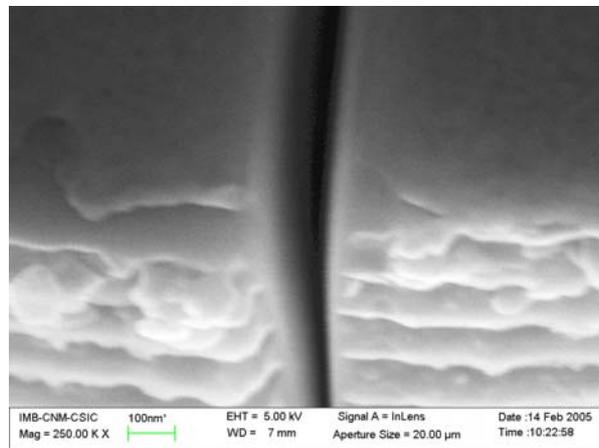


Figura 6.32 Zoom de la imagen anterior, la anchura de la línea es de unos 80 nm.

Para realizar las medidas electroquímicas ha sido necesario realizar un encapsulado del chip, para evitar que los contactos toquen el electrolito. La figura 6.33 muestra una fotografía de la estructura sobre una placa tipo ISFET. En la parte izquierda de la imagen se observa el chip con las dos estructuras conectadas, los contactos están recubiertos por *epoxi*², la parte derecha permite conectar en el sistema de medida. La muestra se sumerge en el líquido. En este chip las dos estructuras mostradas están conectadas simultáneamente.

² Pasta que permite aislar eléctricamente los contactos.

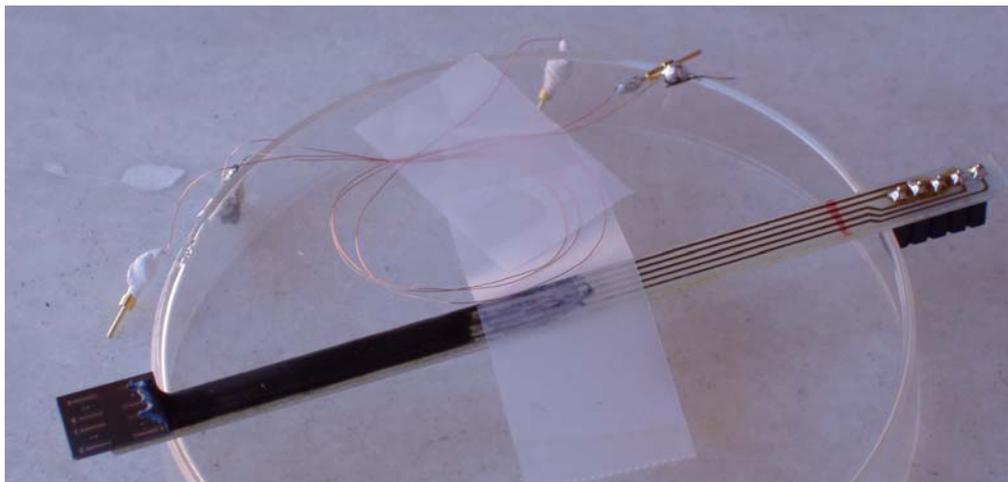


Figura 6.33 Fotografía del encapsulado realizado para hacer medidas electroquímicas.

Se coloca el sistema encapsulado en solución borato tampón, esta solución tiene un pH de 7,5-7,6 y es 0,3 Molar (muy conductora), la composición exacta es 0,15 M de H_3BO_3 y 0,15 M de $\text{Na}_4\text{B}_4\text{O}_7$

Las medidas se realizarán con un sistema de bipotenciostato como en un ESTM. El *cantilever* será como la punta del STM y el electrodo fijo la muestra. Se utilizan además dos electrodos externos: uno de referencia y el contraelectrodo. El electrodo de referencia es un electrodo estable Ag/AgC, como contraelectrodo usamos el electrodo fijo de la estructura que no está midiendo. Antes de realizar las medidas se desoxigena la disolución para evitar corrientes muy grandes, para ello se inyecta Argon.

Se polariza el *cantilever* y mediante un barrido de tensión en el electrodo fijo se mide la corriente que circula por éste. Se aplica una tensión de polarización en el *cantilever* de -100 mV y se hace un barrido de tensiones de entre -2,5 V y 2 V. La figura 6.34 muestra el resultado de esta caracterización de la estructura 1. La gráfica se realiza con una velocidad de barrido de 150 mV/s. En la gráfica se observan los límites de la región faradaica, para tensiones inferiores a -1,5 V y tensiones superiores a 2 V. El salto de la corriente positiva a negativa es debido al cambio de polarización relativa entre los dos electrodos (a -100 mV) y a la corriente iónica entre electrodos. Dado que el nivel de corriente es constante es muy probable que la contribución a la corriente detectada se deba a la capacidad de doble capa.

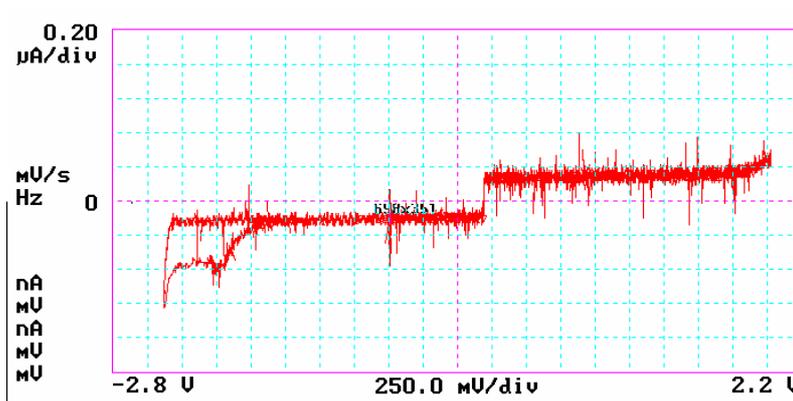


Figura 6.34 Voltanograma de la corriente del electrodo fijo, frente a variaciones de tensión del electrodo, para una tensión del *cantilever* de -100 mV.

Podemos calcular la contribución de la capacidad de doble capa a partir de:

$$i_{\text{capacitiva}} = C_d \frac{dV}{dt} \quad \text{Ecuación 6-1}$$

De la grafica observamos que la corriente es del orden de $0,15 \mu\text{A}$, como $dV/dt = 150 \text{ mV/s}$, la capacidad entre electrodos será de $10 \mu\text{F}$. Si cambiamos la tensión de polarización del *cantilever* a 1 V, la capacidad de doble capa es de $1 \mu\text{F}$, de forma que nos confirma la dependencia entre la corriente detectada y las tensiones aplicadas entre los electrodos. Lo que indica que estamos en la zona de influencia de la formación de la doble capa entre los electrodos y el líquido. Así variaciones de distancia entre electrodos producirán una variación significativa en la corriente medida, dado que la capacidad de doble capa variará.

Podemos analizar con un poco más de detalle los resultados, adquiriendo los datos a través de un osciloscopio. Se realizan las medidas en las dos estructuras. La figura 6.35 muestra los resultados de estas medidas. Para la estructura 1, la corriente capacitiva positiva es $0,16 \mu\text{A}$ y la negativa es $-0,14 \mu\text{A}$. Para la estructura 2, la positiva es $0,14 \mu\text{A}$ y la negativa $-0,17 \mu\text{A}$. Si consideramos la corriente positiva, la capacidad de doble capa para la estructura 1 será de $10,1 \mu\text{F}$ y en la estructura 2 será de $0,93 \mu\text{F}$.

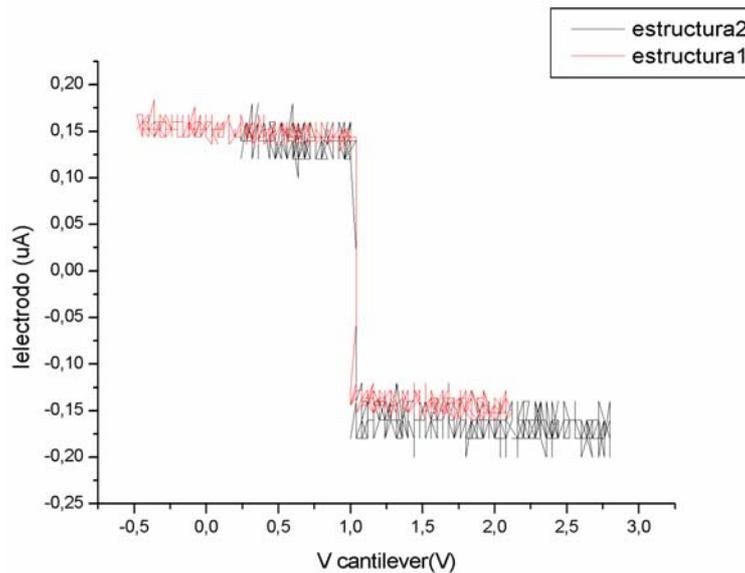


Figura 6.35 Resultados de la voltanometría de las dos estructuras.

Estas variaciones mínimas probablemente se deben a pequeñas variaciones entre las distancias de los dos electrodos en una y otra estructura (el FIB no acaba de definir los cortes exactamente iguales). De forma que nos asegura el funcionamiento del sistema como sensor, una vez se libere el *cantilever*. Las variaciones en distancia entre electrodos y en el área efectiva afectarán a la distancia con la capacidad de doble capa y provocarán cambios detectables y cuantificables en la corriente capacitiva. Es preciso tener en cuenta que la variación de corriente tendrá una pequeña contribución del área total de los electrodos expuesta al líquido que habrá que considerar.

6.5 Conclusiones del capítulo

El tercer demostrador, de diseño sencillo, ha tenido un difícil proceso de fabricación, por diversas complicaciones tecnológicas. El principal problema ha surgido de la necesidad de definir cortes con anchuras inferiores a los 100 nm y profundidades próximas a 1,3 μm . Se han utilizado tres técnicas distintas para obtener estos cortes. Conseguir litografiar líneas de menos de 80 nm ha sido relativamente sencillo utilizando litografía por AFM o por FIB, si bien el ataque RIE posterior para transferir los patrones al silicio ha sido bastante complicado. Con diversas pruebas se han conseguido en los mejores casos cortes inferiores a los 200 nm en la zona superior del corte y en la zona final del ataque próximos a los 70

nm. La tercera técnica utilizada para definir los cortes mediante el ataque del silicio con un haz focalizado de iones se han obtenido trincheras de anchura inferior a los 100 nm. Esta dimensión permite la aplicación de la técnica de detección propuesta. El principal problema es que ha sido necesario modificar el proceso de fabricación y buscar soluciones a los inconvenientes tecnológicos.

La caracterización mecánica de la palanca certifica que el transductor es suficientemente sensible para detectar, por ejemplo, una mutación en una cadena de ADN.

Se ha realizado una primera caracterización electroquímica sobre una estructura donde se habían definido los cortes entre electrodos sin liberar. La posibilidad de realizar estas medidas indica que los cortes entre electrodos se han realizado satisfactoriamente y que la distancia entre electrodos es inferior a los 100 nm. Las medidas de corriente en un sistema de bipotenciostato indican que se podrá utilizar la técnica para la detección de moléculas con suficiente resolución.

Capítulo 7 Conclusiones y prospectiva

En este capítulo se sintetiza el trabajo realizado, se resumen las conclusiones generales de todo el desarrollo y se incluyen las aportaciones más novedosas.

7.1 Síntesis de los resultados obtenidos

Los resultados de esta tesis contribuyen al desarrollo de técnicas y tecnologías para la fabricación de sistemas micro y nano electromecánicos. Además se han desarrollado y caracterizado sensores de masa, que suponen alternativas destacables al estado del arte actual.

Con la presente memoria se ha demostrado la viabilidad de los tres demostradores, los dos sensores de masa basados en palancas resonantes y el transductor para detección electroquímica. Para poder fabricar estos sistemas se ha desarrollado una nueva tecnología que permite la fabricación de sensores integrados utilizando silicio cristalino como capa estructural, se ha estudiado la compatibilidad de esta tecnología con la circuitería CMOS de lectura. Con esta aproximación se consigue que el grosor de la capa estructural es independiente de la tecnología CMOS.

La tabla 7.1 recoge los resolución en masa de los sensores correspondientes a los demostradores 1 y 2: Sensor de masa formado por una matriz de *cantilevers* de polisilicio y sensor de masa formado por un *cantilever* de silicio cristalino, ambos integrados monolíticamente con la circuitería CMOS de detección. Considerando que las medidas se hacen en condiciones ambientales de presión y temperatura. En este punto conviene destacar que el peso del virus del resfriado es de unos 47 fg y el peso de la hemoglobina es

de 107 zg, así los sensores que presentamos pueden utilizarse con suficiente resolución para medir la presencia de un único virus y de varias proteínas.

| Material | Técnica Litográfica | Anchura (w) | Espesor (t) | Longitud (l) | f₀ (Hz) | dm/df (ag/Hz) |
|---------------------------|----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------------|----------------------|
| Polisilicio | Fotolitografía | 1,1 μm | 600 nm | 50 μm | 595k | 71 |
| | Fotolitografía | 0,8 μm | 600 nm | 40 μm | 447k | 36 |
| | Litografía por AFM, EBL | 400 nm | 600 nm | 20 μm | 1,2M | 4,6 |
| Silicio cristalino | Fotolitografía | 1,2 μm | 1 μm | 24 μm | 2,78M | 10 |
| | Litografía por AFM, EBL | 200 nm | 1 μm | 20 μm | 729k | 6,2 |

Tabla 7.1 Sensibilidad alcanzable por los sensores diseñados

Para poder analizar estos resultados en detalle es necesario compararlos con el estado del arte actual. Estos resultados se presentan en la tabla 2.2 y se resumen en la tabla 7.2 donde además se incluyen las características de los sensores fabricados en esta tesis. Nos interesa comparar las prestaciones y la resolución alcanzada.

| Dispositivo | Referencia | Condiciones P, T | Integrable | Detección | Sensibilidad Máxima | Mínima masa reportada |
|---|-------------------|--|-------------------|------------------|----------------------------|------------------------------|
| Membranas piezoeléctricas resonantes | [Nicu-05] | Condiciones ambiente | No | Múltiple | 0,27 pg/Hz | |
| Cantilever resonante | [Ono-03] | P = 10 ⁻⁷ Pa, T constante | No | Simple | 5 ag | |
| Cantilever resonante | [Lavrik-03] | Condiciones ambiente | No | Simple | 5,7·10 ⁻¹⁶ g | 5,5 fg |
| Nanotubos resonantes | [Nishio-05] | P~10 ⁻⁵ Pa T, sin especificar | No | Simple | 100 zg | 150 ag |
| Puentes resonantes | [Ekinci -05] | Ultra alto vacío, T<10 K | | Simple | 1 zg/Hz | 7zg |
| Matriz de Cantilevers Micrométricos | Demostrador 1 | Condiciones ambiente | Sí | Múltiple | 71ag/Hz | |
| Matriz de Cantilevers Nanométricos | Demostrador 1 | Condiciones ambiente | Sí | Múltiple | 4,6 ag/Hz | |

| Dispositivo | Referencia | Condiciones P, T | Integrable | Detección | Sensibilidad Máxima | Mínima masa reportada |
|---|---------------|----------------------|------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Cantilever de Silicio micrométrico | Demostrador 2 | Condiciones ambiente | Sí | Simple/multiple | 10 ag/Hz | 10 fg |
| Cantilever de Silicio manométrico | Demostrador 2 | Condiciones ambiente | Sí | Simple/multiple | 6,2 ag/Hz | |

Tabla 7.2 Resolución y características de los distintos sistemas para detección de masa.

La principal ventaja de los sensores reportados frente a los ya existentes, es que se tratan de sensores formados por un NEMS o MEMS integrado monolíticamente en chip y de alta resolución (los sistemas presentados en la tabla 2.2 no permiten su integración completa).

Medidas de masa inferiores a 10 fg en condiciones ambientales, únicamente la reporta Lavrik y es de 5,5 fg, su sistema se trata de un sistema no integrable. En cualquier caso los resultados presentados en esta tesis son orden de magnitud. La resolución en masa detectada con el sensor micrométrico de silicio cristalino (demostrador 2) en condiciones ambiente de presión y temperatura es superior a la reportada por Nicu sólo es superada por la reportada por Ekinci, que siempre realiza las medidas en condiciones de alto vacío y a muy baja temperatura.

Si comparamos los distintos sensores en función de la versatilidad de las sustancias que se pueden detectar, en general los sistemas reportados sólo pueden medir una determinada sustancia cada vez; solamente Nicu reporta una matriz de membranas que podría aplicarse para medidas múltiples. Así la matriz de *cantilevers* supone un avance ya que permite medidas múltiples con una resolución cuatro órdenes de magnitud superior a la reportada.

Destacamos además que la matriz de *cantilevers* resonantes también de alta resolución, en comparación con el resto de sistemas reportados, aumenta la versatilidad, precisión y fiabilidad del sensor, ya que permite realizar medidas selectivas en cada estructura, de forma que se detecten diversas sustancias, mediante la funcionalización de las superficies. La realización de medidas diferenciales permite mayor precisión en la medida. Mediante varias medidas iguales dentro del mismo sistema se puede obtener mayor fiabilidad de los resultados.

En el caso del tercer demostrador, hemos presentado una técnica de detección alternativa para sensores basados en *cantilevers* estáticos que trabajan en medio líquido. Mediante un sistema de detección electroquímica estándar se presenta un sistema compacto, sencillo y de alta resolución. Para poder tener un sistema de estas características es necesario fabricar dos electrodos mecánicos (uno de ellos el *cantilever* sensor) que estén separados menos de 100 nm. Cortes de 1 μm de profundidad y anchura inferior a 100nm se han conseguido mediante grabado con FIB. Se ha demostrado de forma indirecta el funcionamiento del mismo y las aplicaciones son prometedoras.

7.2 Aportaciones del trabajo recogido en la memoria

La primera aportación ha sido demostrar el funcionamiento de los sensores propuestos destacando la resolución que pueden conseguir y su particularidad frente a los ya existentes. Además, durante el trabajo realizado se han desarrollado una serie de técnicas y tecnologías novedosas que conviene recoger en este punto.

Se ha fabricado un sensor formado por una matriz de *cantilevers*, que permite la selección independiente de cada uno de los elementos de la matriz de modo que aumenta la versatilidad del sensor. Se ha realizado un estudio sobre la óptima gestión de la matriz, de forma que se minimicen las capacidades parásitas y el sistema de multiplexado no afecte a las medidas.

Se ha desarrollado una nueva tecnología que permite fabricar sistemas micro y nanoelectromecánicos utilizando silicio cristalino como capa estructural, integrando monolíticamente el transductor con la tecnología CMOS. Esta tecnología se basa en preparar los sustratos previamente al proceso CMOS, implementar la circuitería en un proceso CMOS estándar y como proceso post-CMOS fabricar las estructuras mecánicas. Para ello se utilizan sustratos SOI de partida, definiendo regiones independientes para la implementación de la circuitería y para la fabricación de la estructura mecánica, estas regiones deberán estar interconectadas por transiciones con pendientes suaves. De esta tecnología cabe destacar que el espesor de las capas estructural y sacrificial es independiente de la tecnología CMOS utilizada. Además se ha comparado la tecnología con las ya existentes y ésta permite aplicaciones distintas (capítulo 5, apartado 5.1). El

procedimiento de fabricación desarrollado y caracterizado en esta tesis puede generalizarse a otro tipo de sustratos, por ejemplo, para la utilización carburo de silicio como capa estructural.

Se han utilizado técnicas de nanofabricación basadas en microscopios de fuerzas atómicas, en litografía por haz de electrones y en sistemas de haces de iones focalizados. Se ha demostrado que el uso de estas técnicas es compatible con la fabricación del sistema MEMS o NEMS.

Se han puesto a punto diversas técnicas para fabricar trincheras en silicio cristalino con profundidades próximas a una micra y con anchura inferior a 100 nm. Mediante litografía por AFM y litografía por FIB seguido de un grabado se consiguen estas dimensiones. Para ello ha sido necesario optimizar el proceso de grabado profundo mediante ataques con iones reactivos. Realizando los ataques en etapas se consigue mayor control sobre la verticalidad. Se ha puesto a punto el proceso de litografía mediante FIB para definir máscaras de aluminio sobre silicio cristalino. Se ha determinado las dosis necesarias para definir una máscara sobre una capa de 8 nm de aluminio.

Mediante grabado directo del silicio con un FIB se ha conseguido definir cortes de menos de 80 nm de anchura y 1 μm de profundidad.

7.3 Líneas futuras

Con todo el trabajo desarrollado se han abierto nuevos caminos que deberían explorarse. En primer lugar quedaría pendiente calibrar los sensores de masa propuestos. Un modo de hacerlo sería mediante la deposición controlada de bolas de diámetro y masa conocidos.

Sería interesante además detectar moléculas individuales, ya que los sistemas presentados tienen resolución suficiente para detectar algunas moléculas.

Como trabajo futuro a corto plazo, una vez que se han definido todas las etapas necesarias para el proceso de los sensores, debería poder llevarse la técnica al límite y definir los

resonadores de máxima resolución. Habría que funcionalizar las superficies de los *cantilevers* de forma que se disponga de sensores selectivos y específicos.

Hasta el momento a estos sistemas no se les ha aplicado ningún tratamiento para evitar que colapsen contra los sustratos, se ha notado que es necesario para una producción a gran escala y se debería profundizar en ello.

Como líneas futuras a más largo plazo, también se podría utilizar la tecnología desarrollada sobre sustratos SOI en otras aplicaciones MEMS, llevarlo a aplicaciones comerciales con mayores niveles de producción.

Del tercer demostrador propuesto, una vez definido completamente el sistema habría que caracterizar la influencia de la deflexión en la variación de la corriente electroquímica. Seguidamente se debería funcionalizar la superficie por ejemplo con antígenos para detectar anticuerpos.

Apéndice A

Breves Nociones sobre Electroquímica

En este apéndice se recogen las nociones electroquímicas básicas para entender el funcionamiento del tercer demostrador y proporcionar alguna referencia, por si se precisa una consulta más exhaustiva. Se presentan conceptos elementales, que pueden resultar demasiado básicos para personas familiarizadas con la electroquímica, pero dado que no es el tema fundamental de la tesis considero es complementario y necesario incluir estos comentarios.

Definiciones básicas

La **corriente electroquímica** es la que tiene lugar entre dos electrodos colocados dentro de un electrolito. El **electrolito** es una solución con iones conductores móviles, provenientes de una sal. El electrolito suele ser líquido, pero también puede ser en fase sólida. El conjunto de electrodos que intervienen junto con el electrolito reciben el nombre de **celda electroquímica**.

En general entre dos electrodos colocados en el electrolito hay una diferencia de potencial y entre ellos puede pasar corriente o no, según las características del electrolito [Bard-80].

En los electrodos pueden ocurrir dos tipos de procesos. En el primero de ellos las cargas se transfieren a través de la interficie electrodo/solución. Esta transferencia de cargas produce reacciones de oxidación o reducción sobre el electrodo. Debido a que las reacciones obedecen a la ley de Faraday reciben el nombre de **procesos faradaicos**.

Reacciones de adsorción y desadsorción pueden tener lugar sin que la estructura del electrodo se vea modificada, estos procesos reciben el nombre de **procesos no faradaicos**. En este caso las cargas no atraviesan la superficie entre el electrodo y el electrolito [Bard-80].

Capacidad de doble capa

Entre las capas de metal del electrodo y la disolución, debido a la diferencia de tensión, se colocan partículas cargadas y dipolos orientados, es lo que se denomina **doble capa eléctrica**. Para un potencial determinado, la interficie electrodo-disolución puede caracterizarse por la capacidad de doble capa C_d (típicamente con valores entre 10 y 40 $\mu\text{F}/\text{cm}^2$), en muchas ocasiones esta capacidad depende del potencial [Bard-80].

Bipotenciostato

En los sistemas de detección electroquímica es posible controlar el potencial del sistema, este sistema recibe el nombre de **potenciostato**. Para ello se introduce un electrodo que controla el potencial. Este electrodo tiene que ser lo más parecido posible a un electrodo idealmente no polarizable, de forma que su potencial sea independiente de la corriente faradaica que circule por él. Un electrodo idealmente polarizable (IPE, *ideal polarized electrode*) es un electrodo que no permite que exista transferencia de cargas a través de la interficie electrodo-solución, independientemente del potencial aplicado externamente. El sistema está compuesto por 3 electrodos: el **electrodo de trabajo**, el electrodo que permite polarizar la muestra, el **contraelectrodo**, y el electrodo que estabiliza la tensión de la muestra, que recibe el nombre de **electrodo de referencia**. Se trata así de un sistema electrónico realimentado que, a partir de medir la tensión del electrodo de trabajo, ajusta automáticamente el valor de la tensión del contraelectrodo [Abadal-97].

Si se tienen dos electrodos de trabajo y se quiere tener un sistema que trabaje con tensión estable, se necesitan igualmente los dos electrodos auxiliares del potenciostato, el contraelectrodo y el electrodo de referencia. Es el esquema de **bipotenciostato** que se utiliza en el tercer demostrador.

Las curvas típicas de análisis de estos sistemas son las voltometrías, donde manteniendo fija la tensión de uno de los electrodos de trabajo, se hace un barrido de tensión en el otro electrodo y se mide la corriente que circula por él. Estas curvas permiten medir los niveles de corriente capacitiva y las corrientes durante las oxidaciones/reducciones.

La capacidad de doble capa se pone de manifiesto cuando se hace un voltamograma de uno de los electrodos de trabajo con una velocidad de barrido grande entre tensiones dentro del rango IPE. Por Rango IPE se entiende el rango de tensiones donde el electrodo tiene propiedades de electrodo idealmente polarizable. En estas condiciones, la señal medida se debe mayoritariamente a una corriente de desplazamiento de cargas. Esta corriente depende de la velocidad de barrido y la capacidad de doble capa de acuerdo con:

$$i_{capacitiva} = C_d \frac{dV}{dt} \qquad \text{Ecuación A.1}$$

El voltamograma registra dos valores de corrientes capacitivas, uno positivo y otro negativo, en el sentido de subida y bajada de la tensión, debidos a la polarización relativa entre los electrodos [Abadal-97].

Los microscopios electroquímicos de barrido están dotados de un bipotenciostato, realizan un barrido sobre una muestra que es uno de los electrodos, con una punta que es el segundo electrodo de trabajo. Ambas se encuentran dentro de la solución electrolítica, junto con el electrodo de referencia y el electrodo auxiliar [Bard-91]. El diámetro de estas puntas es de entre 0,2 y 50 μm y la distancia de trabajo de entre 5 y 10 veces el diámetro de la muestra [Bard-90].

El objetivo del tercer demostrador es que el electrodo fijo sea equivalente a la muestra y el electrodo móvil que equivaldría a la punta, de modo que la capacidad existente entre ellos sea únicamente la debida a la capacidad de doble capa. Así, midiendo las variaciones de corriente capacitiva se puede detectar la deflexión del *cantilever*.

Apéndice B

Tecnología CMOS CNM 25

La tecnología utilizada es CMOS-CNM25, tecnología de 2,5 μm con 2 niveles de polisilicio y con uno o dos niveles de metal. La utilización de la tecnología con uno o dos niveles de metal dependerá del diseño específico de la circuitería.

El sustrato de partida en procesos estándar son obleas de Silicio de 100mm de diámetro. Las características de estas obleas son:

- Obleas epitaxiadas P- / P
- Orientación del sustrato: $\langle 100 \rangle \pm 1^\circ$
- Diámetro del sustrato $(100,0 \pm 0,3)$ mm
- Grosor del sustrato (525 ± 25) μm
- Dopaje del sustrato: $0,1 \times 10^{15} - 1,0 \times 10^{15}$ at/cm³
- Grosor de la epitaxia $(22,5 \pm 2,5)$ μm
- Resistividad de la epitaxia (6-30) m Ω cm
- Orientación del flat¹: $(110) \pm 1^\circ$

A continuación se detallan los distintos pasos del proceso CMOS. Cada paso corresponde a la definición de un nivel determinado y se presentan en el orden de realización. Para cada nivel se presenta un dibujo esquemático que representa una sección de la oblea en el estado correspondiente del proceso.

¹ Las obleas de silicio tienen en la periferia una zona plana que sirve de guía para orientar la oblea, es el flat.

Definición de pozos

Definir las áreas dopadas en el sustrato. El sustrato de partida son obleas dopadas tipo p, en esta tecnología la definición de pozos consiste en definir las zonas dopadas tipo n, el resto, por exclusión son dopadas tipo p (figura B.3).

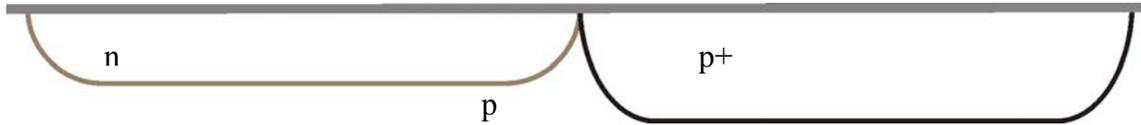


Figura B. 1 Creación de pozos p y n

Definición de áreas activas

Las áreas activas son las zonas donde se colocan los transistores CMOS, las difusiones y los contactos. Fuera de las zonas activas se crece un óxido grueso (de 1µm aprox.) que tiene como función aislar entre si a los transistores y reducir las capacidade parasitas de las pistas de polisilicio y metal con el sustrato (figura B.4).



Figura B. 2 Áreas activas donde se colocan los transistores MOS, son las zonas donde no se ha crecido óxido grueso

Definición Poly 0

Esta tecnología tiene dos niveles distintos de polisilicio, el poly0 (primero en orden en el proceso total) forman la placa inferior de los condensadores. Se definen las zonas donde tiene que ir mediante fotolitografía (figura B.5).



Figura B. 3 Depósito de polisilicio, nivel poly0, para crear condensadores

Definición Poly 1

En los circuitos integrados el poly1 (segundo nivel de polisilicio) puede tener diversas funciones, entre ellas forma parte de los transistores y en ciertas ocasiones puede utilizarse en conexiones (figura B.6).

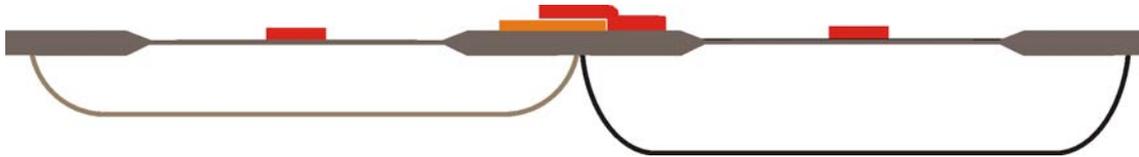


Figura B. 4 Deposición del segundo nivel de polisilicio, poly1

Implantaciones de drenador y fuente

Mediante implantación iónica, se definen los drenadores y fuentes de los transistores CMOS (figura B.7).

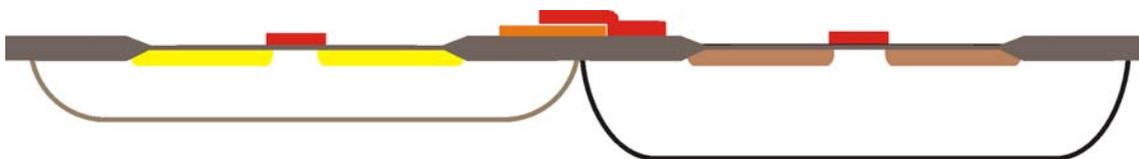


Figura B. 5 Mediante implantación iónica de donadores y aceptores, se crean los drenadores y fuentes

Óxido internivel

El óxido internivel se utiliza de aislante eléctrico entre el polisilicio y el primer nivel de metal. Este proceso de depósito tiene lugar a altas temperaturas (800-1000°C).

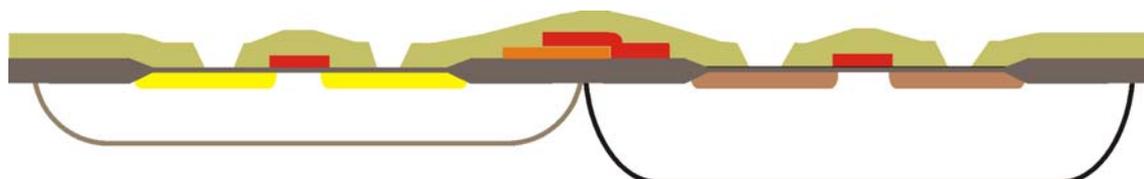


Figura 2. 6 Deposito de oxido internivel, aísla los distintos componentes

Definición Metal 1

Se definen los contactos y pistas correspondientes (figura B.9).

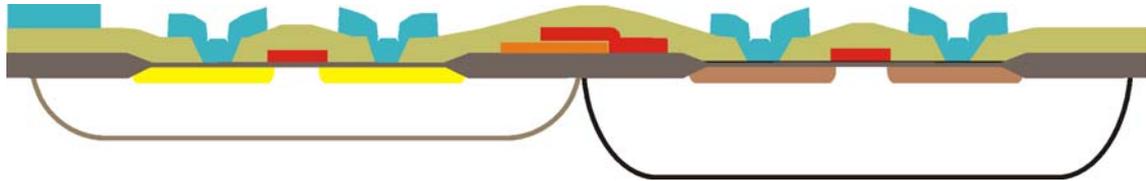


Figura B. 7 Mediante metalización, se crean las pistas de aluminio que enlazan los distintos componentes del circuito

Si en la tecnología se utilizan los dos niveles de metal, para aislar el primer nivel de metal con el segundo, se utiliza una capa de óxido. Este óxido se deposita por plasma a temperaturas inferiores a 400 °C. De forma que el nivel de metal previamente depositado no altere sus condiciones.

Definición Metal 2

En el caso de que el diseño del circuito electrónico precise la utilización de dos metales, se definen los contactos y pistas correspondientes al segundo nivel de metal. En proceso

Pasivación

Es la última capa del proceso, se trata de una capa protectora para preservar las características del circuito (figura B.10). Está compuesta por una capa de óxido de silicio y otra de nitruro de silicio.

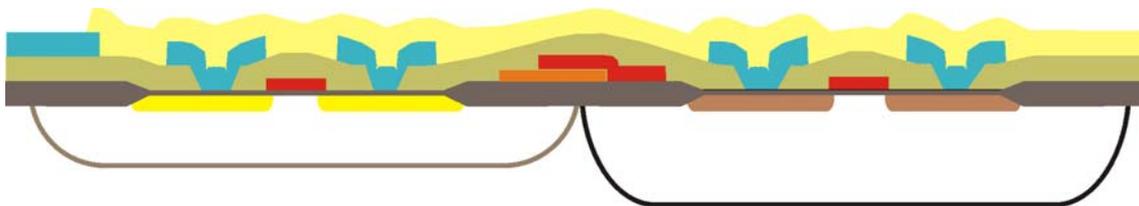


Figura B. 8 Para finalizar, se coloca una capa protectora.

Bibliografía

[Abadal-97] Gabriel Abadal Berini.

Nano-Oxidació de Superfícies de Si(100) mitjançant Microscòpica d'Efecte Túnel en Medi Electroquímic.

Tesis Doctoral. (1997)

[Abadal-99] G. Abadal, A. Boisen, Z. J. Davis, O. Hansen, F. Grey.

Combined laser and atomic force microscope lithography on aluminum: Mask fabrication for nanelectromechanical systems.

Applied Physics Letters Vol. 74, N° 21, pp 3206-3208. (Mayo 1999)

[Abadal-00] G. Abadal, N. Barniol, A. Boisen, F. Campabadal, Z.J. Davis, J. Esteve, E. Figueras, B. Helbo, F. Pérez-Murano and R. Ruiz.

Nanocantilever integrated with CMOS circuitry for high sensitivity mass detection.

Proceedings of the 2nd Iberoamerican Conference on Sensors, pp 120-123. (Noviembre 2000)

[Abadal-01] G. Abadal, Z.J. Davis, B. Helbo, X. Borrisé, R. Ruiz, A. Boisen, F. Campabadall, J. Esteve, E. Figueras, F. Pérez-Murano, N. Barniol.

Electromechanical model of a resonating nano-cantilever based sensor for high resolution and high sensitivity mass detection.

Nanotechnology, Vol. 12. pp 100-1004 (2001).

[Aigner-02] Robert Aigner.

From Microelectronics to Microtechnologies.

Nano et Micro Technologies. Microsystem Technology Fabrication, Test and Reliability.

Proceedings of MIGAS'02, pp 9-34. (2002)

[Álvarez-05] Mar Álvarez, Javier Tamayo.

Optical sequential readout of microcantilever arrays for biological detection.

Sensors and Actuators B, Vol.106, pp 687–690. (2005)

[Arrieta-04] A.A. Arrieta, C. Apetrei, M.L. Rodríguez-Méndez, J.A. de Saja.

Voltametric sensor array based on conducting polymer-modified electrodes for the discrimination of liquids.

Electrochimica Acta, Vol. 49, pp 4543–4551. (2004)

[Arshak-04] K. Arshak, M. Mihov, A. Arshak, D. McDonagh, D. Sutton.

Focused Ion Beam Lithography-Overview and New Approaches.

Proceedings of 24th International conference on Microelectronics (MIEL 2004), Vol. 2, pp 459-462. (Mayo 2004)

[Bakker-02] A. Bakker.

CMOS Smart temperature sensors- An overview.

Sensors 2002, Proceedings of IEEE, pp. 1423-1427. (2002).

[Baltes-05] . Baltes, Brand, Fedder, Herold., Korvink, Tabata

CMOS-MEMS Vol. 2.

Ed. Willey-VSCH. Weinheim. (2005)

[Bard-80] Allen J. Bard, Larry R. Faulkner.

Electrochemical methods, Fundamentals and Applications.

Ed. Wiley. (1980)

[Bard-90] Allen J. Bard, Guy Denuault, Chongmok Lee, Daniel Mandler, David O. Wipf.

Scanning Electrochemical Microscopy: A New Technique for the Characterization and Modification of Surfaces.

Acc. Chem. Res. Vol. 23, pp 357-363. (1990)

[Bard-91] Allen J. Bard, Fu-Ren F. Fan, David T. Pierce, Patrick R. Unwin. David O. Wipf, Feimeng Zhou.

Chemical Imaging of Surfaces with Scanning Electrochemical Microscopes.

Science, Vol. 254, pp. 68-74. (Octubre 1991)

[Baselt-96] David R. Baselt, Gil U Lee and Richard J. Colton.

Biosensor based on force microscope technology.

J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 14, n° 2, pp 789 793. (Marzo/Abril. 1996)

[Baselt-97] David R. Baselt, Gil U. Lee, Karolyn M. Hansen, Linda A. Chrisey, Richard J. Colton.

A High-Sensitivity Micromachined Biosensor.

Proceedings of IEEE, Vol. 85, n° 4, pp 672-680. (Abril 1997)

[Battiston-01] F.M. Battiston, J.-P. Ramseyer, H. P. Lang, M.K. Baller, Ch. Gerber, J.K. Gimzewski, E.Meyer, H.-J. Güntherodt.

A chemical sensor based on a microfabricated cantilever array with simultaneous resonance frequency and bending readout.

Sensors and Actuators B, Vol. 77, pp 122-131. (2001)

[Beeby-03] Stephen Beeby, Graham Ensell, Michael Kraft, Neil White.

MEMS Micromechanical Systems.

Ed. Artech House, Boston. (2004)

[Berger-97A] R. Berger, Ch. Gerber, H. P. Lang, J.K. Gimzewski.

Micromechanics: A Toolbox for Femtoscale Science: "Towards a Laboratory on Tip".

Microelectronic Engineering, Vol. 35, pp 373. (1997)

[Berger-97B] Rüdiger Berger, Emmanuel Delamarche, Hans Peter Lang, Christoph Gerber, James K. Gimzewski, Ernst Meyer, Hans-Joachim Güntherodt.

Surface Stress in Self-Assembly of Alkanethiols on Gold.

Science, Vol. 27, pp 2021-2024. (Junio 1997)

[Binnig-89] . G. Binnig, C.F. Quate, Ch. Gerberg.
Atomic Force Microscope Physical Review Letters.
Vol. 56, n 9. pp 930-933. (Marzo 1986)

[Borwick-04] Robert L. Borwick, Jeffrey F. Denatale, Robert J. Anderson.
Modules integrating MEMS devices with pre-processed electronic circuitry, and methods for fabricating such modules.
Patente US2004227201. (Noviembre 2004)

[Brand-98] O. Brand, H. Baltes.
Sensors Update, Vol. 4 Capítulo 1. Micromachined Resonant Sensors-an Overview.
Editado por H. Baltes, W.Göpel, J. Hesse. Ed. Wiley-VCH. (1998)

[Brosnihan-97] Timothy J. Brosnihan, James M. Bustillo, Albert P. Pisano, Roger T. Howe.
Embedded Interconnect and Electrical Isolation for High-Aspect-Ratio, SOI Inertial Instruments.
Proceedings of Transducers'97. International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, pp 637-640. (Junio 1997).

[Bryzek-96] Janusz Bryzek.
Impact of MEMS technology on society.
Sensors and Actuators A, Vol. 56, pp 1-9. (1996)

[Burg-03] T.P. Burg, S. R. Manalis.
Suspended microchannel resonators for biomolecular detection.
Applied Physics Letters, Vol. 83 N° 13, pp 2698-2700. (Septiembre 2003).

[Campabadal-05] F. Campabadal, S. Ghatnekar-Nilsson, G. Rius, C. Fleta, J.M. Rafi, E. Figueras and J. Esteve.
CMOS degradation effects due to electron beam lithography in smart NEMS fabrication.
Presentado en Microtechnologies for the New Millenium 2005. Symposium Smart Sensors, Actuators, and MEMS II. Pendiente de publicación en Proceedings of SPIE vol. 5836. (Mayo 2005)

[Chau-98] Kevin H.-L. Chau*, Robert E. Sulouff Jr.

Technology for the high-volume manufacturing of integrated surface-micromachined accelerometer products.

Microelectronics Journal, Vol. 29, pp 579-586. (1998)

[Cleland-03] Andrew. N. Cleland.

Foundation of Nanomechanics. From Solid-State Theory to Device Applications.

Capítulo 10: Nanostructure Fabrication I. Ed. Springer. (2003)

[Collard-02] Dominique Collard, Hiroyuki Fujita, Hiroshi Toshiyoshi, Bernard Legrand, Lionel Buchaillot.

Surface Micromachining, an Overview. Nano et Micro Technologies. Microsystem Technology Fabrication, Test and Reliability.

Proceedings of MIGAS'02, pp 35-49. (2002)

[Compañó-01] Ramón Compañó.

Trends in nanoelectronics.

Nanotechnology, Vol. 12, pp 85-88. (2001)

[Cooper-99] E.B. Cooper, S.R. Manalis, H.Fang, H.Dai, K.Matsumoto, S.C.Minne, T.Hunt, C.F. Quate.

Terabit-per-square-inch data storage with atomic force microscope.

Applied Physics Letters, Vol. 75, n°22, pp 3566-3568. (Noviembre 1999)

[Covington-02] J. A. Covington, F. Udrea, J.W. Gardner,

Resistive Gas Sensor with Integrated MOSFET Micro Hot-plate based on an Analogue SOI CMOS Process.

Sensors 2002. Proceedings of IEEE, Vol. 2, pp 1389-1893. (12-14 Junio 2002)

[Craighead-00] H. G. Craighead.

Nanoelectromechanical Systems.

Science, Vol. 290. pp 1532-1535. (Noviembre 2000)

[Davis-02] Z.J. Davis, G. Abadal, O. Hansen, X. Borrisé, N. Barniol, F. Pérez-Murano, A. Boisen.

AFM lithography of aluminum for fabrication of nanomechanical systems.
Ultramicroscopy, Vol. 97, pp 467-472. (2003)

[Davis-03] Z.J. Davis, G. Abadal, B. Helbo, O. Hamsen, F. Campabadal, F. Perez-Murano, J. Esteve, E. Figueras, J. Verd, N. Barniol, A. Boisen.

“ Monolithic integration of mass sensing nanocantilevers with CMOS circuitry”.
Sensors and Actuators A, Vol. 105, pp 311-319. (2003)

[Davis-04] Frank Davis, Seamus P. J. Higson.

Structured thin films as functional components within biosensors.

Biosensors and Bioelectronics. DOI: 10.1016/j.bios.2004.10.001 (Pendiente de publicación).

[Dubois-99] . E. Dubois, J.L. Guffendorff.

Nanometer scale lithography on silicion, titanium and pmma resist using scanning probe microscopy.

Solid-State Electronics. Vol. 43 n°6. pp 1085-1089 (1999).

[ECAS-04] <http://einstein.uab.es/ecas/>

[Envoy-00] Devices. N. Evoy.

Nanotechnology in Microsystems: Prospects and Challenges of Nanomechanical

NSF 2000 Workshop on Manufacturing of micro-electro-mechanical systems. (Noviembre 2000).

[Ekinci-04A] K.L. Ekinci, X. M. H. Huang and M.L. Roukes.

Ultrasensitive nanoelectromechanical mass detection.

Applied Physics Letters. Vol. 84, n° 22. pp 4469-4471 (Mayo 2004).

[Ekinci-04B] K. L. Ekinci, Y. T. Yang, M. L. Roukes.

Ultimate limits to inertial mass sensing based upon nanoelectromechanical systems.

Applied Physics Letters, Vol. 95, N° 5, pp 2682-2688. (Marzo 2004)

[Ekinci-05] Kamil L. Ekinci.

Nanomechanics.

Presentado en Microtechnologies for the New Millenium 2005. Symposium Smart Sensors, Actuators, and MEMS II. Pendiente de publicación en Proceedings of SPIE vol. 5838. (Mayo 2005)

[Esser-03] H. G. Esser, G. Neill, P. Coad, G. F. Matthews, D. Jolovic, D. Wilson, M. Freisnger, V. Philips.

Quartz microbalance: a time resolved diagnostic to measure material deposition in jet. Fusion Engineering and Design. Vol. 66-68, pp 855-860. (2003)

[Fei] <http://www.feicompany.com>

[Figueras-88] Eduardo Figueras.

Estudio de la formación de un óxido de campo enterrado para circuitos V.L.S.I. Mediante un óxido depositado.

Tesis doctoral (Abril 1988).

[Figueras-01] E. Figueras, F. Campabadal, F. Pérez-Murano, J. Esteve, Z.J. Davis, G. Abadal, B. Helbo, O. Hansen, N. Barniol, A. Boisen.

Polysilicon layer for CMOS-compatible nanoresonators.

Proceedings of Microscopy, pp551-552. (2001)

[Fraxedas-02] Jordi Fraxedas.

Propietats nanomecàniques dels materials.

Nanotecnologia i Nanomaterials, pp 65-77. Barcelona. (2002)

[Fritz-00] J. Fritz, M.K. Baller, H. P. Lang, H. Rothuizen, P. Vettiger, E. Meyer, H.-J. Güntherodt, Ch. Gerber, J. K. Gimzewski.

Translating Biomolecular Recognition into Nanomechanics.

Science, Vol. 288. pp 316-318. (Abril 2000)

[Gabriel-04] Kaigham J. Gabriel, Xu Zhu.

Multi-metal layer MEMS structure and process for making the same.

Patente US2004145056. (Julio 2004)

[Gad-02] Mohamed Gad-el-Hak.

The MEMS Handbook.

CRC Press. (2002)

[García-98] R.García, M.Calleja, F. Pérez- Murano.

Local oxidation of silicon surfaces by dynamic force microscopy: Nanofabrication and water bridge formation.

Applied Physics Letters, Vol. 72, pp 2295. (1998).

[Gierak-01] J. Gierak, D. Mailly, G. Faini, J. L. Pelouard, P. Denk, F. Pardo, J. Y. Marzin, A. Septier, G. Schidt, J. Ferré, R. Hydman, C. Chaptert, J. Flicstein, B. Gayral, J. M. Gérard.

Nano-fabrication with focused ion beams.

Microelectronic Engineering, Vol. 57-58, pp.865-875 (2001).

[Gierak-04] J. Gierak, D. Mailly, P.Hawkes, L. Bruchhaus, L. Bardotti, B.Prével, P. Mélinon, A. Perez, R.Hyndan, J.-P. Jamet, J. Ferré, A. Mougín, C. Chappert, V. Mathet, P. Warin, J. Chapman.

Exploration of the ultimate patterning potential achievable with high resolution focused ion beams.

Applied Physics A. Materials Science & Processsing. DOI 10.1007/s0039-004-2551-z (2004).

[Grant-03] D.J. Grant.

Electron Beam Lithography: From Past to Present.

University of Waterloo. (Agosto 2003)

[Greenwood-88] Greenwood J. C.

Silicon in Mechanical sensors.

Journal of PhysicsE: Scientifics Instruments. Vol. 21, pp 1114-1128. (1988)

[Hagleitner-01] C. Hagleitner, A. Hierlemann, D. Lange, A. Kummer, N. Kerness, O. Brand, H. Baltes.

Smart single-chip gas sensor microsystem.

Nature, Vol. 414, pp 293-296. (Noviembre 2001)

[He-05] J. H. He, H. Le.

MEMS mechanical characterization on different thin film materials by bending and scanning along micro-machined cantilevers.

Presentado en Microtechnologies for the New Millenium 2005. Symposium Smart Sensors, Actuators, and MEMS II. Pendiente de publicación en proceedings of SPIE vol. 5836. Sevilla, (Mayo 2005)

[Henley-02] Francois J. Henley, Michael I. Current.

A New SOI Manufacturing Technology Using Atomic Layer Cleaving.

Semiconductor Fabtech, 12th Edition, pp 201-205. (2002)

[Hierold-96] Christofer Hierold, Andreas Hildebrant, Ulrich Näher, Thomas Scheiter, Bernd Mensching, Max Steger, Reinhard Tielert.

A pure CMOS surface micromachined integrated accelerometer.

Sensors and Actuators A, Vol. 57, pp 111-116. (1996)

[Hood-04] Leroy Hood, James R. Heath, Michael E. Phelps, Biaoyang Lin.

Systems Biology and New Technologies Enable Predictive and Preventative Medicine.

Science, Vol. 306, pp 640-643. (Octubre 2004)

[Hsu-01] Wan-Thai Hsu, John R. Clarck, Clark T.-C. Nguyen.

A Resonant Temperature Sensor Based on Electrical Spring Softening.

Proceedings of Transducers'01- Eurosensors XV. (Junio 2001)

[Ilic-00] B. Ilic, D. Czaplewski, H. G. Craighead, P. Neuzil, C. Campagnolo, C. Batt.

Mechanical resonant immunospecific biological detector.

Applied Physics Letters. Vol. 77, N° 3, pp 450-452. (Julio 2002)

[ITRS-04] *International Technology Roadmap for Semiconductors*.

Ed. Semiconductor Industry Association. (Diciembre 2004)

[Ishihara-87] Tshutomu Ishihara, Kenichiro Suzuki, Shinobu Suwazono, Masaki Hirata, Hiroshi Tanigawa.

CMOS Integrated Silicon Pressure Sensor.

IEEE Journal of Solid-State Circuits. Vol. 22. N° 2. pp 151-156. (Abril 1987)

[Jager-00] Edwin W. H. Jager, Olle Inganäs, Ingemar Lundström.

Microrobots for Micrometer-Size Objects in Aqueous Media: Potential Tools for Single-Cell Manipulation.

Science, Vol. 288, pp 2335-2338. (Junio 2000).

[Jakoby-00] Bernhard Jakoby.

Microacoustic sensors for automotive applications.

Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, pp 453-460. (2000)

[Jensenius-00] Henriette Jensenius, Jacob Thaysen, Anette Rasmussen, Lars H. Veje, Ole Hansen, Anja Boisen.

A microcantilever-based alcohol vapor sensor-application and response model.

Applied Physics Letters. Vol. 76, no 188. pp 2615-2617 (Mayo 2000)

[Judy-01] J. W. Judy.

Microelectromechanical Systems (MEMS): Fabrication, Design and Applications.

Smart Materials and Structures, Vol. 10, pp. 1115–1134. (2001)

[Kasten-97] Klaus Kasten, Norbert Kordas, Holger Kappert, Wilfried Mokwa.

Capacitive pressure sensor with monolithically integrated CMOS readout circuit for high temperature applications.

Sensors and Actuators A, Vol. 97-98, pp 83-87. (2002)

-
- [Lam-02] David C. C. Lam, Jones I. T. Chong, Pin Tong.
The Role of Water in Delamination in Electronics Packages: Water Evaporation From Epoxy.
IEEE Transaction on Components and Packaging Technologies, Vol. 25, N° 4, pp 708-713.
(Diciembre 2002).
- [Lang-02] H.P. Lang, M. Hegner, E. Meyer, Ch. Cerber.
Nanomechanics from atomic resolution to molecular recognition based on atomic force microscopy technology.
Nanotechnology. Vol. 13 pp. R29-R36. (Septiembre 2002).
- [Lange-02] Dirk Lange, Christoph Hagleitner, Andreas Hierlemann, Oliver Brand, and Henry Baltes.
Complementary Metal Oxide Semiconductor Cantilever Arrays on a Single Chip: Mass-Sensitive Detection of Volatile Organic Compounds.
Analytical Chemistry, Vol. 74, pp 3084-3095. (2002)
- [Lavrik-03] Nickolay V. Lavrik and Panos G. Datskos.
Femtogram mass detection using photothermally actuated nanomechanical resonators.
Applied Physics Letters, Vol. 82, n°16, pp 2697-2699. (Abril 2003)
- [Lavrik-04] Nickolay V. Lavrik, Michael J. Sepaniak, Panos G. Datskos.
Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors.
Review of Scientific Instruments. Vol. 75. N°7. pp 2229-2253 (Julio 2004)
- [Lawes-87] Graham Lawes.
Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis.
Analytical chemistry by open learning. Ed. Wiley. (1987)
- [Li-02] Xiaadong Li, Bharat Bhusman, Kazuki Takashima, Chang-Wook Baek, Yong Kweon Kim.
Mechanical Characterization of micro/nanoscale structures form MEMS/NEMS applications using nanoindentation techniques.
Ultramicroscopy Vol. 97, pp 481-494. (2003)
-

[Luo-03] Hau Luo, Gary Fedder, L. Richard Carley.
Integrated Multiple-Devices IMU System with Continuous-Time Sensing Circuit.
Proceedings of IEEE International Solid-State Circuits Conference. Vol.1, pp 204-205.
(20003)

[Macdonald-04] Noel C. Macdonald, Marco F. Aimi.
Metal MEMS devices and methods of making same.
Patente US2004207074. (Octubre 2004)

[Maly-87] W.Mally.
Atlas of IC Technologies: An Introduction to VLSI Processes.
The Benjaming/Cummings Publishing Company, Inc. (1987)

[Maloberti-01] . Maloberti, Kluwer
Analog Design for CMOS VLSI Systems. F
Academic Publishers, Boston, 2001

[Mandou-02] Marc J. Madou.
Fundamentals of Microfabrication
The Science of Miniaturization. Second Edition. CRC Press. Florida. (2002)

[Martín-05] Cristina Martín, Gemma Rius, Xavier Borrisé, Francesc Pérez-Murano.
Nanolithography on thin layers of PMMA using atomic force microscopy.
Nanotechnology Vol. 16, pp 1016-1022. (Mayo 05)

[Matsumoto-97] K.Matsumoto,
“*STM/AFM Nano-Oxidation Process to Room-Temperature-Operated Single-Electron Transistor and Other Devices*”.
Proceedings of IEEE, Vol. 85, n°4, pp 612-628. (Abril 1997)

-
- [Meister-04] A. Meister, M. Liley, J. Brugger, R. Pugin, H. Heinzelmann.
Nanodispenser for attoliter volume deposition using atomic forces microscopy probes modified by focused-ion-beam milling.
Applied Physics Letters. Vol. 85, nº 25, pp 6260-6262. (Diciembre 2004)
- [Müller-96] M. Müller, W. Budde, R. Gottfried-Gottfried, A. Hübbel, R. Jähne, H. Kück.
A thermoelectric infrared radiation sensor with monolithically integrated amplifier stage and temperature sensor.
Sensors and Actuators A, Vol. 54. pp 601-695. (1996)
- [Nanofib] www.nanofib.com
- [Nathanson-67] Harevey C. Nathanson, William E. Newell, Robert A. Wickstrom, John Ransford Davis JR.
The Resonant gate transistor.
IEEE Transaction on Electron Devices, Vol. 14, nº 3, pp 117-133. (1967)
- [Nexus-02] A NEXUS
Market Analysis for microsystems II 2000-2005.
Task Force Report. (Febrero 2002).
- [Nicu-05] Liviu Nicu, Matthiew Guirardel, Frédéric Chambosse, Pierre Rougerie, Sary Hinh, Emmanuelle Trevisiol, Jean-Marie Francois, Jean-Pierre Majoral, Anne-Marie Caminade, Eric Cattan, Christian Bergaud.
Resonating piezoelectric membranes for microelectromechanically based bioassay: detection of streptavidin-gold nanoparticles interaction with biotinylated DNA.
Sensors and Actuators B, DOI 10.1016/j.snb.2005.01.021. (Pendiente de publicación).
- [Nilsson-04] S. G. Nilsson, X. Borrisé, L. Montelius.
Size effect on Young's modulus of thin chromium cantilever.
Applied Physics Letters, Vol. 85, nº 16, pp 3555-3557. (Octubre 2004)
-

- [Nishio-05] Mitsumasa Nishio, Shintaro Sawaya, Seiji Akita, Yoshikazu Nakayama.
Carbon nanotube oscillator towards zeptogram detection.
Applied Physics Letters Vol. 86, DOI: 10.1063/1.1896426. (publicado On line Marzo 2005)
- [Novosyadlyy-03] Novosyadlyy, S.
Amplitude-phase-shift masks for projection lithography of submicron technology.
CADSM 2003. Proceedings of the 7th International Conference. The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, pp 18-66–68. (Febrero 2003)
- [Obermeier-97] E. Obermeier. Proceedings of Material Research.
Mechanical and Thermophysical properties of thin film materials for MEMS: Techniques and devices.
Society Symposium, Vol. 444, pp 39-57. (1997)
- [Offenberg-95] M. Offenberg, F. Lärmer, B. Elsner, H. Münzel, W. Riethmüller.
Novel process for monolithic integrated accelerometer.
Proceedings of Transducers'95-Eurosensors IX, pp 589-592. (1995)
- [Ono-03] Takahito Ono, Xinxin Li, Hidetoshi Miyashita.
Mass sensing of adsorbed molecules in sub-picogram sample with ultrathin silicon resonator.
Review of Scientific Instruments. Vol. 74, n° 3. pp1240-1243 (Marzo 2003).
- [O'Sullivan-99] C.K. O'Sullivan, G.G. Guilbautl.
Commercial quartz crystal microbalances-theory and applications.
Biosensors and Bioelectronics. Vol 14, pp 663-670. (1999)
- [Ozgur-03] Mehmet Ozgur, Mona Elwakkad Zaghoul.
Method for making CMOS-based monolithic micro electromechanical system (MEMS) integrated circuits and integrated circuits made thereby.
Patente US2003104649. (Junio 2003)

-
- [Parameswaran-95] Lalitha Parameswaran, Charles Hsu, Martin A. Schmidt.
A Merged MEMS CMOS Process Using Silicon Wafer Bonding.
Proceedings of IEDM 95, pp613-616. (1995)
- [Pallás-89] R.Pallás Areny.
Transductores y acondicionadores de la señal.
Ed. Marcombo, (1989).
- [Pereira-03] Maurício Pereira da Cunha, Donald C. Malocha, Derek W. Puccio, Jeremy Thiele, Thomas B. Pollard.
LGX Pure Shear Horizontal SAW for Liquid Sensor Applications.
IEEE Sensors Journal, VOL. 3, n°. 5, pp 554-561. (Octubre 2003)
- [Pérez-Murano-95] F. Pérez-Murano, G.Abadal, N. Barniol, X.Aymerich, J.Servat, P. Gorostiza, F.Sanz.
Nanometer scale oxidation of (100) surfaces with tapping mode AFM.
Journal of Applied. Physics, Vol. 78, pp 6797-6801 (1995)
- [Pérez-Murano-99] F. Pérez-Murano, K. Birkelund, K. Morimoto, J.A. Dagata.
Modulation Scanned Probe Oxidation.
Voltage Applied Physics Letters 75, 199 (1999)
- [Pérez-Murano-02] F. Pérez-Murano.
Tècniques de Nanofabricació mitjançant microscopis de camp proper.
Nanotecnologia i Nanomaterials, pp 45-63. Barcelona. (2002)
- [Pérez- Murano-03] Perez-Murano, F., C. Martin, N. Barniol, H. Kuramochi and H. Yokohama, J. A. Dagata.
Measuring electrical current during scanning probe oxidation.
Applied Physics Letters Vol. 82 N° 18, pp 3086-3088. (2003)
- [Petersen-82] Kurt E. Petersen.
Silicon as a Mechanical Material.
Proceedings of IEEE, Vol. 70, N° 5. pp 420-457. (Mayo 1982)
-

[Pinnaduwege-03] L. A. Pinnaduwege, A. Gehl, D. L. Hedden, G. Muralidharan, T. Thundat, R. T. Lareau, T. Sulchek, L. Manning, B. Rogers, M. Jones, J. D. Adams.

A microsensor for trinitrotoluene vapour.

Nature, Vol. 425, pp 474. (Octubre 2003)

[Pogge-04] Bernhard Pogge, Michel Despont, Ute Drechsler, Chandrika Prasad, Peter Vettiger, Roy Yu.

An integrated Structure and Method for fabricating the same.

Patente WO2004043950. (Mayo-2004)

[Poncharal-99] Philippe Poncharal, Z. L. Wang, Daniel Ugarte, Walt A. De Heer.

Electrostatic Deflections and Electromechanical resonances of Carbon Nanotubes.

Science, Vol. 283, pp 1513-1516. (Marzo 1999)

[Qsense] www.q-sense.com

[Razavi-96] Behzad Razavi.

A Study of Phase Noise in CMOS Oscillators.

IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 31, N° 3, pp 331-343. (Marzo 1996)

[Rius-05A] Gemma Rius

Fabricació d'estructures nanoelectromecàniques amb litografia per feix de electrons.

Trabajo de Investigación de Ciencia de Materiales. Universitat Autònoma de Barcelona.

(Abril 2005)

[Rius-05B] Gemma Rius, María Villarroya, Jaume Verd, Jordi Teva, Gabriel Abadal, Eduard Figueras, Jaume Esteve, Núria Barniol, Francesc Pérez-Murano.

Patterning of nanometer-scale cantilevers integrated in CMOS circuit by e-beam lithography.

Libro de actas de 2nd Nanospain Workshop. (Marzo-05)

[Roukes-01] M. Roukes.

Nanoelectromechanical systems face the future.

Physics World, Vol. 14 (2), pp 25-31. (Febrero 2001)

[Royle-78] L. Royle, J. Angell.

A miniature integrated circuit accelerometer.

Solid Stat Circuits. Digest of Technical Papers. IEEE International. Vol. XXI, pp 220-221. (Febrero 1978).

[Sarid-94] Dorr. Saris.

Scanning Force Microscopy. With Applications to Electric, Magnetic and Atomic Forces.

Ed. Oxford University Press, Oxford. (1994)

[Schilling-93] Donald. Mc Graw-Hill.

Circuitos electrónicos discretos e integrados.

Schilling, Belove. (1993)

[Schulz-04] H. Schulz; H. Pavlicek, N. Reng

Step and flash nanoimprint lithography in Europe.

Proceedings of 4th IEEE Conference on Nanotechnology, 2004, pp 655 – 656. (Agosto 2004)

[Sedra-98] Sedra, Smith.

Microelectronics Circuits.

4th Edition. Ed. Oxford. (1998)

[Serre-98] C. Serre, P. Gorostiza, A. Pérez-Rodríguez, F. Sanz, J. R. Morante.

Measurement of micromechanical properties of polysilicon microstructures with an atomic force microscope.

Sensors and Actuators A, Vol 67, pp 215-219. (1998)

[Sharos-04] L.B. Sharos, A. Raman, S. Crittenden, R. Reifenberger.

Enhanced mass sensing using torsional and lateral resonance microcantilevers.

Applied physics Letters, Vol. 84, N° 23, pp 4638-4630. (Junio 2004)

[Shih-01] Jeng-Shong Shih, Yun-Ching Chao, Mine-Fag Sung, Guann-Jou Gau, Chyow-San Chiou.

Piezoelectric crystal membrane chemical sensor based on fullerene C60.

Sensors and Actuators B, Vol. 76, pp 347-353. (2001)

[Spichiger-98] Ursula E. Spichiger-Keller.

Chemical Sensors and Biosensors for Medical and Biological Applications.

Ed. Wiley-VCH. (1998)

[Sze-85] S. M. Sze.

Semiconductor Devices.

Physics and Technology. Ed. John Wiley and Sons. (1985)

[Tamayo-03] Javier Tamayo.

Structure of human chromosomes studied by atomic force microscopy.

Journal of Structural Biology, Vol. 141, pp 198–207. (2003)

[Technology-99] *Technology roadmap for Nanoelectronics.*-Edition 1999

[Technology-00] *Technology roadmap for Nanoelectronics.*(Noviembre 2000)

[Tennant-99] D. M. Tennant

Nanotechnology.

AIP/Springer, New York. (1999)

[Teva-04] J. Teva, G. Abadal, Z. J. Davis, J. Verd, X. Borrisé, A. Boisen, F. Pérez-Murano, N. Barniol.

On the electromechanical modeling of a resonating nano-cantilever based transducer.

Ultramicroscopy, Vol.100, pp 225-232 (2004).

[Tönshoff-01] H.K.Tönshoff, I.Inasaki. Wiley-VCH.

Sensors in Manufacturing.

Sensors Application Vol.1. (2001)

[Trapp-85] O.D. Trapp, R. A. Blanchard, L. J. Lopp, T. I. Kamins.

Semiconductor Technology Handbook.

Technology Associates, California. (1985)

[Tu-03] Shyo-Lu Tu, Lu-Shan Chiang, Shin-Lin Chu.

A Method to integrate the fabrication process of integrated circuit (IC) devices and the fabrication process of a sacrificial layer.

Patente TW558811. (Octubre 2003)

[Udrea-02] F. Udrea, J. W. Gardner.

SOI CMOS Gas Sensors.

Sensors 2002, Proceedings of IEEE, Vol. 2, pp1379-1383. (12-14 Junio 2002)

[Verd-02] J. Verd, M. Villarroya, G. Abadal, X. Borrísé, F. Pérez-Murano, N. Barniol.

CMOS circuitry for on-chip read-out of a high sensitivity mass nanoresonator.

Actas del congreso DCIS 2002.

[Verd-03] Jaume Verd Martorell.

Sistema de detecció capacitiu pwe a sensors monolítics de massa basats en micro/nanopalanques ressonants.

Trabajo de Investigación de Ingeniería Electrónica, Universitat Autònoma de Barcelona.

(Julio 2003)

[Verd-05] J.Verd, G.Abadal, M. Villarroya, J.Teva, A.Uranga, X.Borrísé, F.Campabadal, J.Esteve, E.Figueras, F.Pérez-Murano, Z.Davis, E.Forsen, A.Boisen, N.Barniol.

Design, fabrication and characterization of a sub-microelectromechanical resonator with monolithically integrated CMOS readout circuit

IEEE Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 14, Nº 3.(Junio 2005)

[Vettiger-02] Vettiger, P.; Cross, G.; Despont, M.; Drechsler, U.; Durig, U.; Gotsmann, B.; Haberle, W.; Lantz, M.A.; Rothuizen, H.E.; Stutz, R.; Binnig, G.K.

The "millipede" - nanotechnology entering data storage.

IEEE Transactions on Nanotechnology, Vol.1, Nº 1, pp 39 – 55. (Marzo-02)

[Vidic-03] . A. Vidic, D. Then, Ch. Ziegler.
A new cantilever system for gas and liquid sensing
Ultramicroscopy, Vol. 97, pp 407–416.(2003)

[Villarroya-02] María Villarroya Gaudó.
Compatibilización de tecnología CMOS con procesos de nanofabricación para aplicaciones NEMS sobre sustratos SOI.
Trabajo de investigación de Ingeniería Electrónica, Universitat Autònoma de Barcelona.
(Septiembre 2002)

[Villarroya-03A] M.Villarroya, E.Figueras, J.Montserrat, F.Pérez-Murano, F.Campabadal, J.Esteve, N.Barniol.
Use of a SOI substrate as a Nanotechnology layer compatible with standard CMOS.
Actas de 4a Conferencia de Dispositivos electrónicos. CDE-03 Pág. 94. (Febrero 2003)

[Villarroya-03B] M. Villarroya, E. Figueras, F. Pérez-Murano, F. Campabadal, J. ESteve, N. Barniol.
SOI-Silicon as structural layer for NEMS applications.
Proceedings of SPIE Vol.5116, pp 1-11. Microelectronic for the new Milenium 2003. Mas Palomas (Gran Canaria). (Mayo 2003)

[Villarroya-04] María Villarroya, Francesc Pérez-Murano, Cristina Martín, Zachary Davis, Anja Bojsen, Jaume Esteve, Eduard Figueras, Josep Montserrat, Nuria Barniol.
AFM lithography for the definition of nanometre scale gaps: application to the fabrication of cantilever-based sensor with electrochemical current detection.
Nanotechnology, Vol. 15, pp 771-776. (2004)

[Villarroya-05] M. Villarroya, J. Verd, J. Teva, G. Abadal, E. Figueras, F. Pérez-Murano, J. Esteve, N. Barniol.

MEMS with integrated CMOS read-out circuit based on sub-micrometric cantilevers arrays for multiple sensing.

Presentado en Microtechnologies for the New Millenium 2005. Symposium Smart Sensors, Actuators, and MEMS II. Pendiente de publicación en proceedings of SPIE vol. 5836. (Mayo 2005)

[Wolter-90] O. Wolter, Th. Bayer, J. Grescher.

Micromachined sensors for scanning force microscopy.

Journal of Vacuum Science Technology B, Vol. 9, nº 2. pp 1353-1357. (Marzo / Abril 1991).

[Wong-00] C. P. Wong, Shijian Luo, Zhuqing Zhang.

Microelectronics: Flip the Chip.

Science, Vol. 290, pp 2269-2270. (Diciembre 2000).

[Yashar-04] David Yashar, Piotr A. Domanski.

MEMS Sensors for HVAC&R Small, Fast, Cheap.

Ashrael Journal pp 69-74. (Mayo 2004)

[Yasumura-00] Kevin Y. Yasumura, Timothy D. Stowe, Eugene M. Chow, Tomothy Pfafman, Thomas W. Kenny, Barry C. Stipe, Daniel Rugar.

Quality Factors in Micron-and Submicron-Thick Cantilevers.

Journal of Microelectromechanical systems. Vol. 9, Nº 1, pp 117-125. (Marzo 2001)

[Zhang-05] Wenhua Zhang, Kimberly L. Turner.

Application of parametric resonances amplification in a single-crystal silicon micro-oscillator based mass sensor.

Sensors and Actuators A. DOI:10.1016/j.sna.2004.12.033. (Pendiente de publicación).

Términos y abreviaturas

| | |
|----------|---|
| AFM | <i>Atomic Force microscope</i> , Microscopio de fuerzas atómicas. |
| EBL | <i>Electron beam lithography</i> , Litografía por haz de electrones. |
| ESTM | <i>Electrochemical Scanning Tunneling Microscope</i> , Microscopio túnel de barrido electroquímico. |
| FIB | <i>Focus Ion Beam</i> : Haz focalizado de iones. |
| ICP | <i>inductively coupled plasma</i> : Plasma de acoplamiento inductivo |
| IPE | Electrodo idealmente polarizable. |
| IMB-CNM | Instituto de Microelectrónica de Barcelona, Centro Nacional de Microelectrónica. |
| ISFET | <i>Ion Sensitive Field Effect Transistor</i> : Transistor de efecto de campo sensible a iones. Por extensión, sensor encapsulado utilizado para medidas en líquido, generalmente de pH. |
| Lift-off | Término inglés que se utiliza para definir procesos definiendo primero la máscara en resina, depositando tras la máscara un metal y eliminando a continuación la resina, así queda definida la máscara o estructura en metal. |
| MIC | <i>Microelectronic Center</i> : Departamento de Microelectrónica y Nanotecnología de la Universidad Técnica de Dinamarca. |
| MW | <i>molecular weight</i> : Peso molecular. |
| Pad | Contacto definido sobre los circuitos integrados para permitir medidas, bien con la tabla de puntas, bien mediante soldadura anódica y contactos externos. |
| PMMA | Polimetil-metacrilato: resina utilizada en procesos de litografía por EBL y en ocasiones por AFM. |
| ppm: | partes por millón. |
| PSG | <i>Phosphorus Silicon Glass</i> : Óxido depositado. |

| | |
|---------|---|
| QCM | <i>Quartz Cristal Microbalance</i> : Microbalanza de cristal de cuarzo |
| QMB | <i>Quartz Microbalance</i> : Microbalanza de cuarzo. |
| RIE | <i>reactive ion etching</i> : grabado por iones reactivos. |
| Sccm | <i>Standar Cubic Centimeter per Minute</i> : Centímetros cúbicos por minuto estándar, unidad utilizada para indicar los flujos de gas que intervienen en los equipos RIE. |
| SEM | <i>Scanning Electron Microscope</i> : Microcopio electrónico de barrido. |
| SOI | <i>silicon on insulator</i> : silicio sobre aislante. |
| Stepper | Sistema de insolación litográfica paso a paso. |
| STM | <i>scanning tunnerling microscope</i> : Microscopio de Barrido por efecto túnel. |
| TMAH | Hidróxido de tetrametil amonio, utilizado para grabados húmedos profundos de silicio cristalino, la velocidad de grabado depende del plano cristalino. |
| TEM | <i>Transmission electron microscope</i> : Microscopio electrónico de transmisión. |