

Aspectos Generales Sobre Micromaquinado

La primera mitad del siglo XX fue testigo del impacto causado por los dispositivos eléctricos y electrónicos en la vida diaria, aun cuando sus dimensiones eran grandes, consumían grandes cantidades de energía, eran poco confiables y muy costosos. Sin embargo, a mediados del siglo XX inicia *la revolución de la microelectrónica*, la cual, con el desarrollo de los procesos de microfabricación, permite producir dispositivos electrónicos cada vez más pequeños y mas baratos. Esta disminución de tamaño y costo continúa hasta nuestros días.

En 1960, el Dr. Richard Feynman presenta su artículo “There is Plenty of Room at the Bottom”, en el cual habla de las ventajas de producir micromaquinas y especula sobre algunos de sus posibles usos, además de motivar y desafiar a la sociedad para desarrollar micromáquinas. Es así como la tecnología de los *Sistemas Microelectromecánicos* (del ingles Microelectromechanical Systems, MEMS; en Europa es llamada *Tecnología de Microsistemas*, del inglés Microsystems Technology, MST), ha sido inspirada por el desarrollo de la microelectrónica y por la visión del Dr. Feynman.

2.1 Definición de MEMS

Si bien se carece de una definición universal para MEMS, todas tienen a la “miniaturización” como característica común. Pero tal divergencia aparente en las definiciones se sustenta en la diversidad de aplicaciones que esta tecnología abarca; sin embargo, se puede decir que la tecnología MEMS es simultáneamente una caja de herramientas, un producto físico, y una metodología, todo en uno: [2]

- Es un portafolio de técnicas y procesos para diseñar y crear sistemas miniatura.
- Es un producto físico frecuentemente especializado y único para una aplicación final; ocasionalmente se puede comprar un producto MEMS en alguna tienda de electrónica.
- La Oficina de Tecnología de Microsistemas de los Estados Unidos, Darpa, refiere: “MEMS es una manera de hacer cosas“. Estas cosas unen las funciones de sensado y actuación con el cálculo y comunicación para controlar físicamente parámetros en la microescala, que causa efectos en escalas grandes.

El proceso de diseño puede ser lento, especialmente si se trata de dispositivos complejos, por ejemplo: la primera demostración de un acelerómetro micromaquinado en silicio se realizó en la Universidad de Stanford en 1979, pero tomó cerca de 15 años antes de que llegara a ser aceptado para aplicaciones a gran escala. Naturalmente, éste fue diseñado y rediseñado, probado y calificado en laboratorios y campo antes de salir al mercado. [2]

Por tanto, la tecnología MEMS puede considerarse que surge de manera definitiva a principios de los 90's, cuando se presenta en el mercado, en grandes volúmenes de

producción, el sensor micromaquinado de presión absoluta para automóviles y el sensor de presión sanguínea. [4]

2.2 ¿Qué es el Micromaquinado?

El micromaquinado es un conjunto de herramientas para el diseño y fabricación que, precisamente, maquina y forma estructuras y elementos en una escala muy por debajo de nuestras facultades de percepción humana, la microescala. El micromaquinado es el fundamento básico en la fabricación de MEMS y se puede definir como la caja de herramientas de los MEMS. [2]

El micromaquinado es un proceso “en grupo”, mediante el cual se fabrican cientos o posiblemente miles de elementos idénticos sobre la misma oblea. La unidad de dimensión es la micra, un factor alrededor de 25 veces más pequeño que el que puede ser logrado con el maquinado convencional. [5]

La industria de los circuitos integrados (CI) ha jugado un papel importante en promover un ambiente adecuado para el desarrollo y crecimiento de las tecnologías de micromaquinado. Muchas herramientas usadas en el diseño y manufacturación de productos MEMS son tomadas de la industria de los circuitos integrados. Por tanto, no debe ser una sorpresa que el micromaquinado cuente con el silicio como material primario, aunque la tecnología ha sido demostrada usando otros materiales. Sin embargo, hay muchos procesos que no son derivados de la tecnología de los circuitos integrados.

2.3 Materiales para la Fabricación de MEMS

Uno de los objetivos de este capítulo es presentar las propiedades del silicio y algunos otros materiales, además de enfatizar que la elección final de los materiales esta determinada por el tipo de aplicación y el costo.

2.3.1 Silicio

El silicio es uno de los pocos materiales que es producido económicamente en sustratos de cristal simple. Su naturaleza cristalina brinda ventajas eléctricas y mecánicas importantes. La modulación precisa de la conductividad eléctrica usando impurezas, además de que, mecánicamente es un material elástico y fuerte son características que hacen del silicio un material adecuado para integrar funciones electrónicas, mecánicas, térmicas, ópticas e inclusive de fluidos. Hoy en día son comunes las obleas de silicio ultra puras. El bajo costo de estas obleas las hace aun más atractivas para la fabricación de sistemas y componentes micromecánicos.

El silicio, como elemento, existe en tres diferentes estructuras: cristalina, policristalina o amorfa. Para comprender cada tipo de estructura, debemos hacer referencia a la visualización de los planos cristalográficos. El silicio tiene una estructura cristalina en forma

de diamante-cúbico la cual puede ejemplificarse como un cubo simple. Así, la unidad más básica se representa como un cubo. Los tres ejes coordenados de mayor importancia son denominados como los ejes principales. Los planos y las direcciones específicas del cristal son designados en referencia a los ejes principales usando los “*índices de Miller*”, la cual es una notación especial para ciencia de materiales, que se compone de tres enteros encerrados por diferentes tipos de puntuación. Las direcciones se especifican con corchetes; por ejemplo, $[100]$ es un vector en la dirección x , referida a los ejes principales (x,y,z) del cubo. El grupo de direcciones con propiedades equivalentes es denotado con signos de intercalación; por ejemplo, $\langle 100 \rangle$ cubre las 6 direcciones con propiedades similares al vector $[100]$ (especifica las direcciones $\pm x, -x, \pm y, -y, \pm z, -z$). Los paréntesis denotan el plano que es perpendicular a una dirección; por ejemplo, (111) es un plano perpendicular a la dirección $[111]$, mientras que las llaves especifican el grupo de todos los planos equivalentes; por ejemplo, $\{111\}$ representa el grupo de los 4 planos cristalográficos equivalentes a (111) . Estos aspectos son representados gráficamente en la Fig. 2.1.

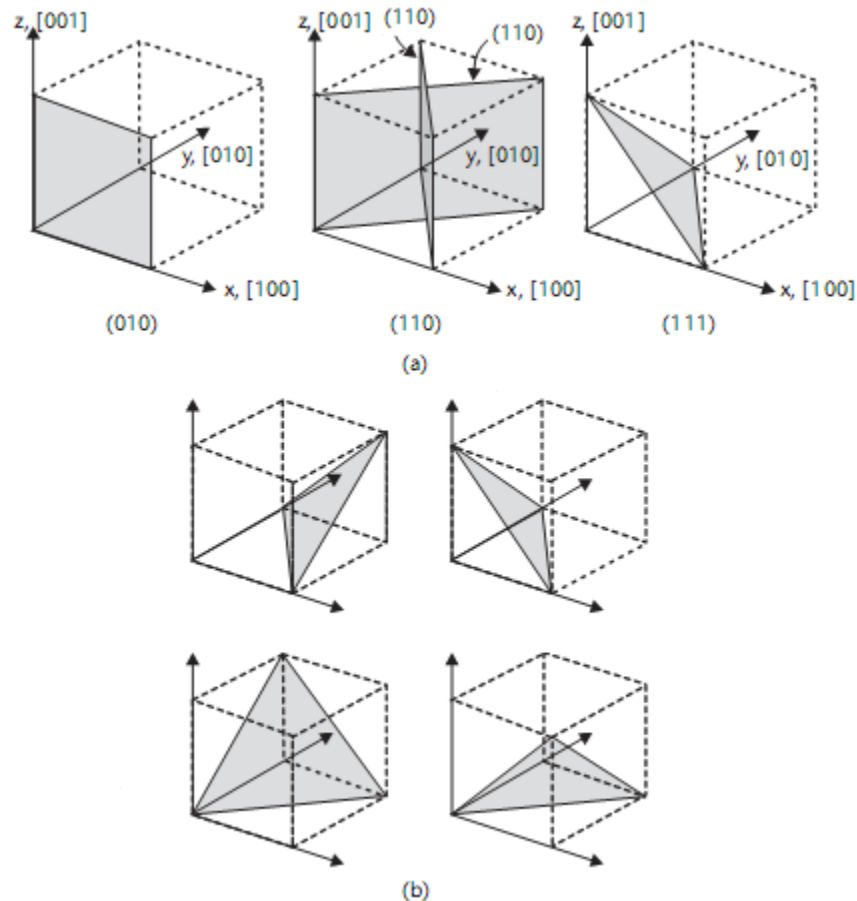


Fig. 2.1 a) Tres planos cristalográficos y sus índices de Miller para un cristal cúbico. Se identifican dos planos (110) equivalentes de la familia $\{110\}$ y b) Los cuatro planos (111) equivalentes de la familia $\{111\}$. [2]

La equivalencia de determinados planos y direcciones se puede definir mediante las operaciones rotación de 90° y de reflexión (mirror) sobre los tres ejes principales del cubo. Por ejemplo, la dirección $\pm x$ es equivalente a $\pm y$ mediante una rotación de 90° ; la dirección $\pm y$ es equivalente a $\pm z$ con la operación de reflexión, y así sucesivamente. Por lo tanto, $\pm x, \pm y, \pm z$ son direcciones equivalentes.

El álgebra de vectores muestra que los ángulos de intersección entre los planos $\{100\}$ y $\{110\}$ son 45° o 90° , los ángulos entre los planos $\{100\}$ y $\{111\}$ son 54.7° o 125.3° . Mientras que, los planos $\{111\}$ y $\{110\}$ pueden interceptarse en 35.3° , 90° o 144.7° . Estos últimos ángulos son de particular interés en el micromaquinado, debido a que muchas soluciones alcalinas, como el hidróxido de potasio (KOH), atacan selectivamente los planos $\{100\}$ de silicio pero no los planos $\{111\}$. Esto se verá mas adelante con mayor detalle.

En microfabricación se cortan las obleas de silicio, delgadas y circulares, a lo largo de planos específicos. El plano de corte, cara superior de la oblea, es conocido como la *orientación del corte*. Las obleas $\{100\}$ dominan las tecnologías MEMS y CMOS, pero también están disponibles las obleas con orientación $\{111\}$, y en menor grado las de orientación $\{110\}$. Es más común decir que una oblea tiene una orientación $\{100\}$, la cual comprende todo el grupo de direcciones posibles, en lugar de una oblea con una orientación (100) .

Para las obleas $\{100\}$ y $\{111\}$ con dopado tipo n y p , existen otras dos especificaciones, como se muestra en la Fig. 2.2.

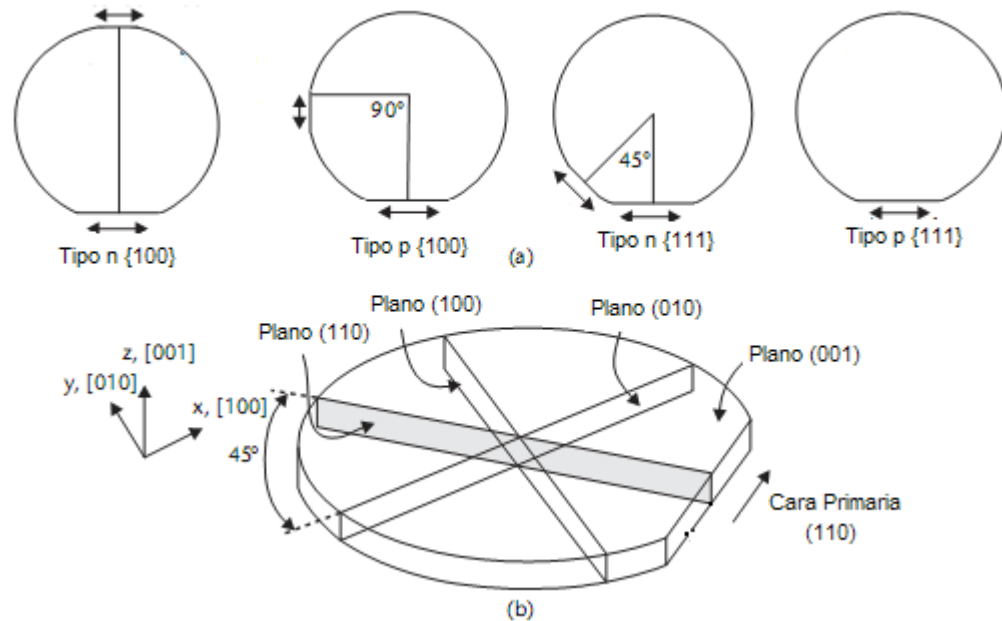


Fig. 2.2 a) Ilustración de los cortes primarios y secundarios de las obleas $\{100\}$ y $\{111\}$ para los dopados tipo n y p y b) Ilustración de varios planos en una oblea con orientación $\{100\}$. [2]

El silicio cristalino es un material frágil y fuerte, elásticamente deformable hasta que alcanza su punto de ruptura. Su módulo de Young depende de la orientación cristalográfica, siendo aproximadamente de 160 GPa. Debido a la naturaleza cristalina del silicio, sus propiedades mecánicas son uniformes en toda la oblea, por lo que las obleas están libres de tensiones intrínsecas. Los niveles de dopado del silicio cristalino no afectan a la mayor parte de las propiedades mecánicas, pero la tensión aumenta cuando las concentraciones de dopado alcanzan niveles de aproximadamente 10^{20} cm^{-3} .

El polisilicio es un material importante para MEMS. Es utilizado para estructuras micromecánicas, integrar interconexiones eléctricas, termoacopladores, diodos de unión $p-n$, y muchos otros dispositivos eléctricos con estructuras micromecánicas.

Las propiedades mecánicas del silicio policristalino y amorfo varían con las condiciones de deposición pero éstas son similares a las del silicio cristalino. Ambas tienen niveles muy altos de tensión intrínseca.

El silicio es también conocido por conservar su integridad mecánica en temperaturas de hasta 700 °C, aproximadamente. A temperaturas más altas, el silicio empieza a ablandarse y la deformación plástica puede suceder bajo carga. El comportamiento del silicio con gases, químicos, fluidos biológicos y enzimas sigue bajo estudio, pero para la mayor parte de estos materiales, se considera que el silicio es estable y resistente para las aplicaciones de hoy en día.

2.3.2 Oxido y Nitruro de Silicio

Varias formas de óxidos de silicio (SiO_2 , SiO_x , entre otros) son ampliamente utilizadas en micromaquinado, debido a sus excelentes propiedades de aislamiento térmico y eléctrico. Estos también son usados como capas de sacrificio en procesos de micromaquinado de superficie, ya que pueden ser atacados con una gran selectividad utilizando ácido fluorhídrico (HF). Los óxidos de silicio tienden a ablandarse y fluir cuando están expuestos a temperaturas por arriba de los 700°. Una desventaja de los óxidos de silicio es su tensión intrínseca relativamente grande, la cual es difícil de controlar. Esto limita su uso como material para grandes vigas o diafragmas suspendidos.

Los nitruros de silicio son ampliamente usados como películas delgadas de aislamiento y son efectivos como barreras contra la difusión de iones móviles. Su módulo de Young es más grande que el del silicio y su tensión intrínseca puede ser controlada por los diferentes procesos de deposición. Además, son buenos materiales para hacer máscaras que pueden ser usadas en muchas soluciones alcalinas.

2.3.3 Películas delgadas de Metal

La elección de una capa delgada de metal o metales compuestos depende de la aplicación final. Normalmente son depositados por sputtering, evaporación, o deposición química de vapor. Oro, níquel, cobre, titanio, tungsteno, plata, platino y unos cuantos metales más pueden ser electroplateados. Las bicapas de metal consisten de una capa de adhesión (por ejemplo cromo) y una capa intermedia de níquel o platino.

2.3.4 Polímeros

Los polímeros, en la forma de poliamidas o fotoresist, pueden ser depositados con espesores que van desde unos cuantos nanómetros hasta cientos de micras. Debido a sus propiedades de absorción y adhesión, los polímeros han ganado aceptación en el sensado de gases y humedad.

2.4 Procesos de Microfabricación

La tecnología MEMS esta basada sobre un número de técnicas o metodologías. A continuación se presentan los métodos usados en la fabricación de MEMS.

2.4.1 Técnicas de Micromaquinado

De manera general, hay tres procesos básicos de construcción en tecnologías MEMS, los cuales son: la capacidad para depositar películas delgadas de material sobre un sustrato, aplicar un estampado (diseño) encima de las películas por litografía y atacar las películas de material selectivamente.

A continuación se presenta una breve descripción de las principales técnicas o métodos de fabricación, que son empleadas actualmente, para producir microdispositivos.

2.4.1.1 Deposición de Materiales

Es la capacidad para depositar películas delgadas de material. Las tecnologías de deposición MEMS pueden ser clasificadas en dos grupos:

1 *Deposiciones que ocurren a causa de una reacción química.*

Estos procesos aprovechan la creación de materiales sólidos directamente de reacciones, en composiciones químicas en gas y/o líquidos o con el material del sustrato. El material sólido no es usualmente el único producto formado en la reacción. Los productos pueden incluir gases, líquidos, e inclusive otros sólidos.

➤ **Deposición Química de Vapor (CVD)**

El sustrato es ubicado dentro de un reactor, en el cual son suministrados un número de gases. Esta técnica trabaja bajo el principio de provocar una reacción química, bajo una atmósfera controlada, que da como resultado la deposición de un material reactante sobre un sustrato caliente. El proceso se desarrolla por encima de los 300 °C. Los materiales más comunes son el polisilicio, óxidos y nitruros de silicio, tungsteno, titanio y tantalio, así como sus nitruros.

➤ **Electroplateado (Blindaje)**

Esta restringido a materiales eléctricamente conductores, como cobre, oro y níquel. Las películas pueden tener espesores desde 1 μm hasta 100 μm . Básicamente hay 2 tecnologías para realizar el electroplateado o blindaje:

A) *Electroplating*: el sustrato es ubicado en una solución líquida (electrolito), de tal forma que, cuando es aplicado un potencial eléctrico entre un área conductora sobre el sustrato y un electrodo (usualmente platino) en el líquido, toma lugar un proceso químico de oxidación-reducción; resultando en la formación de una capa de material sobre el sustrato y la generación de algún gas en el electrodo.

B) *Electroless plating*: es utilizada una solución química más compleja, la cual

forma un potencial electroquímico suficientemente alto con la solución, de tal manera que la deposición ocurre espontáneamente sobre cualquier superficie. Este proceso es atractivo, ya que no requiere ningún potencial eléctrico externo y de ningún contacto con el sustrato durante el proceso. Por desgracia es muy difícil controlar el espesor y la uniformidad de las películas depositadas.

➤ **Crecimiento Epitaxial**

Es muy similar a lo que ocurre en los procesos CVD; no obstante, si el sustrato es un cristal semiconductor, cristalográficamente ordenado (es decir silicio, arseniuro de galio), entonces con este proceso es posible continuar construyendo sobre el sustrato con la misma orientación cristalográfica. El sustrato actúa como un cimiento para la deposición. Si es usado un sustrato policristalino/amorfo, la película también será policristalina/amorfa. Una ventaja de esta técnica es la alta velocidad de desarrollo del material, la cual permite la formación de películas con espesor considerable ($> 100 \mu\text{m}$).

➤ **Oxidación Térmica**

Es la técnica de deposición más básica y corresponde a la simple oxidación de la superficie del sustrato en una atmósfera rica en oxígeno. Esta es, también, la única tecnología de deposición que consume algo del sustrato en el proceso. A medida que el espesor de la capa oxidada se incrementa, la difusión de oxígeno al sustrato llega a ser más difícil, teniéndose una relación parabólica entre el espesor de la película y el tiempo de oxidación para grosores de películas de más de 100 nm. Este proceso está limitado a materiales que pueden ser oxidados.

2 *Deposiciones que ocurren a causa de una reacción física.*

Lo común para todas estas técnicas es que el material depositado sea físicamente movido sobre el sustrato. No hay reacción química que forme el material sobre el sustrato.

➤ **Deposición Física de Vapor (PVD)**

Abarca un número de tecnologías de deposición en las cuales el material es liberado desde una fuente y transferido al sustrato. Las dos tecnologías más importantes son evaporación y sputtering.

A) *Evaporación.* Involucra el calentamiento de un material fuente a temperaturas altas, generando un vapor que se condensará sobre el sustrato para formar una película. La evaporación es desarrollada en una cámara de vacío a una presión por debajo de 10^{-4} Pa, para evitar contaminar la película de material. Casi cualquier elemento (por ej. aluminio, silicio, titanio, oro), incluyendo muchos metales (cromo, molibdeno, paladio, tantalio, platino, níquel) con punto de fusión alto pueden ser evaporados.

B) *Sputtering.* Emplea temperaturas más bajas que la tecnología de evaporación. El sustrato está ubicado en una cámara de vacío junto con el material a ser depositado, comúnmente llamado blanco. El material o blanco es físicamente bombardeado por un flujo de iones de un gas inerte (usualmente argón) a baja presión, entre 0.1-10 Pa. Los átomos o moléculas

del blanco son expulsados y depositados sobre la oblea o sustrato. Existen muchas clases de sputtering, las cuales se diferencian por los mecanismos de excitación de los iones.

➤ Casting

En este proceso, el material a ser depositado es disuelto, en forma líquida, en un solvente. El material puede ser aplicado sobre el sustrato rociándolo o inyectándolo. El solvente es evaporado quedando una película delgada del material depositado sobre el sustrato. Esta técnica es particularmente útil para polímeros y es el método común para aplicar la película de resist a los sustratos (en litografía).

2.4.1.2 Transferencia de Patrones, Litografía

La litografía, en el contexto MEMS, es la impresión de una imagen (patrón o diseño) a un material fotosensible por exposición selectiva a una fuente de radiación, tal como la luz. Existen diversas clases de litografía, tales como la óptica, de rayos X, atacado de partículas y nanolitografía.

De manera general, cualquier proceso de litografía inicia con la deposición de resist (un polímero que es sensible a la radiación) encima de la oblea, como se muestra en la Fig. 2.3a. A continuación, se expone selectivamente el resist a radiación a través de una máscara que contiene áreas transparentes (o regiones blancas) y áreas que absorben la radiación incidente (o regiones oscuras), como se observa en la Fig. 2.3b.

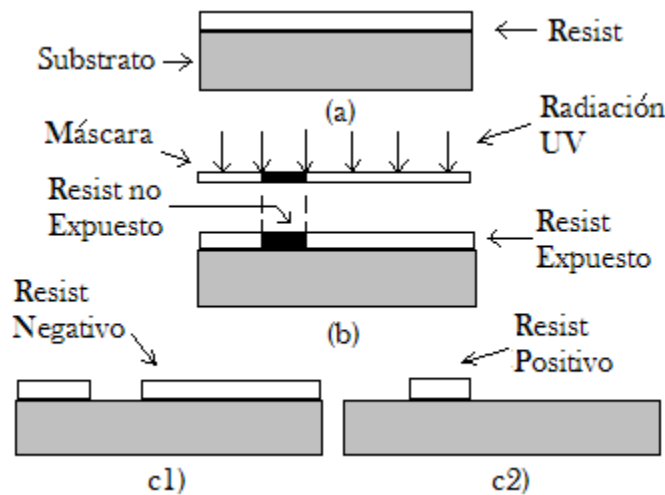


Fig. 2.3 Pasos litográficos: a)Deposición del resist, b)Exposición del resist, c1)Desarrollo del resist negativo y c2)Desarrollo del resist positivo. [6]

La máscara puede estar en contacto con la oblea (lo cual puede ocasionar problemas, tales como una mala alineación de la máscara y/o una deformación o tensión por el contacto), o a unos cuantos micrómetros de la oblea (con lo que se elimina la tensión por el contacto, pero hay limitaciones en la resolución debido a la difracción). Ambos métodos producen una imagen 1:1 de la máscara sobre el resist.

Las áreas expuestas y las no expuestas tienen diferentes solubilidades, siendo las regiones expuestas eliminadas a través de disolventes selectivos. Las regiones expuestas a radiación de *resist negativo* son más solubles que las no expuestas, mientras que, para *resist positivo* las áreas no expuestas son más solubles. En la Fig. 2.3c1 se muestra, como resultado del *resist negativo*, la presencia de una cavidad, mientras que la Fig. 2.3c2 muestra las partes laterales de una cavidad hecha con *resist positivo*.

2.4.1.3 Atacado de Materiales, Grabado

El grabado es producido por la exposición del sustrato a fluidos reactantes que pueden remover material a través de reacciones químicas. Las velocidades de atacado varían dependiendo del sustrato a ser atacado y de la temperatura y proporción de los ácidos en los fluidos reactantes. En general, hay dos clases de procesos de grabado:

1 Grabado Húmedo

Es la tecnología de grabado o atacado más simple, la cual utiliza soluciones acuosas y tiene como ventaja su bajo costo, ya que de 25 a 50 obleas de 100 mm de diámetro pueden ser atacadas simultáneamente. Debido a la naturaleza de los materiales, puede ser de 2 tipos, grabado anisotrópico o isotrópico.

A) Grabado Anisotrópico. Está basado en las diferentes velocidades de atacado sobre los distintos planos cristalográficos, pero también resulta en pérdida de espacio, ya que estos planos no pueden ser verticales a la superficie cuando se atacan hoyuelos o cavidades. Uno de los atacantes más populares es el hidróxido de potasio (KOH), el cual presenta una velocidad de atacado sobre silicio de aproximadamente 0.5 a 2 $\mu\text{m}/\text{min}$. Las Figs. 2.4 y 2.5 muestran ejemplos de atacado anisotrópico en algunas direcciones.

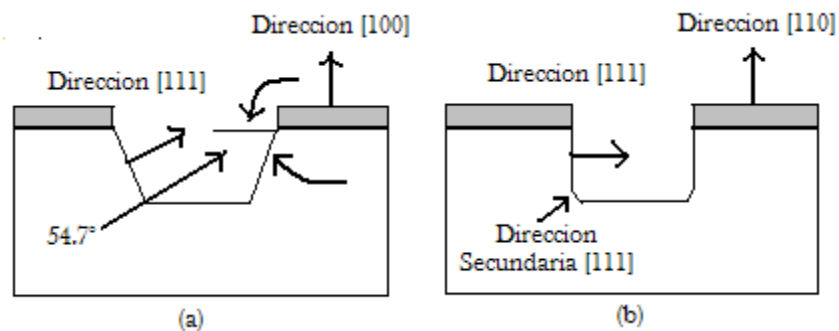


Fig. 2.4 Ejemplos de un: a) Grabado anisotrópico de una oblea de silicio (100) y b) Grabado anisotrópico de una oblea de silicio (110). [6]

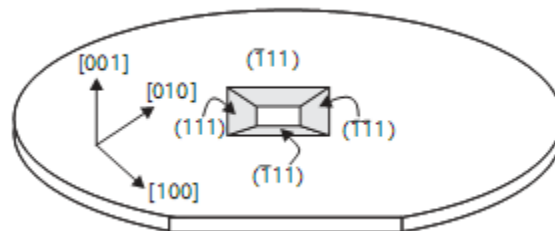


Fig. 2.5 Perspectiva de una oblea de silicio {100} atacada por KOH. [2]

B) Grabado Isotrópico. Produce una remoción de material a una velocidad uniforme sobre todas las direcciones cristalográficas y genera cavidades redondas como se muestra en la Fig. 2.6. El atacante más popular del silicio es el HNA, el cual consiste de una mezcla de ácido fluorhídrico (HF), ácido nítrico (HNO_3) y ácido acético (CH_3COOH). Las impurezas dopantes (tipo *n* o *p*) del silicio pueden ser empleadas para reducir la velocidad de atacado hasta 150 veces, aproximadamente. La Fig. 2.6 ejemplifica este tipo de atacado.

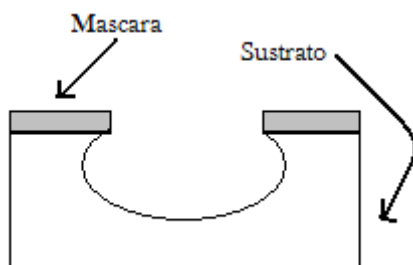


Fig. 2.6 Ejemplo del resultado de un grabado isotrópico. [6]

2 Grabado Seco

Esta tecnología involucra el uso de gases reactantes, usualmente en un plasma a baja presión. El equipo para grabado seco es especializado y requiere de una instalación ultra limpia para mantener en alta pureza a los gases reactantes dentro de una cámara de vacío. Esta tecnología de grabado seco puede dividirse en dos clases:

A) Grabado en Fase Vapor. Es producido por varios reactantes, entre los cuales esta el difluoruro de Xenón (XeF_2). Este reactante es selectivo a una gran variedad de materiales, incluyendo oro, aluminio, dióxido de silicio y nitruro de titanio. El material a ser atacado es deshecho mediante una reacción química con las moléculas de los gases.

B) Grabado en Fase Plasma. Involucra la generación de reactivos químicos neutrales (por ej. flúor, cloro) e iones (por ej. fluoruros de azufre, SF_x^+) que son acelerados, bajo el efecto de un campo eléctrico, hacia el sustrato. Las especies reactivas (neutrales o iones) son formadas por la colisión de moléculas en un gas reactante (por ej. SF_6 , CF_4 , Cl_2 , CClF_3 , NF_3) con una nube de electrones excitados por un campo eléctrico de RF. Cuando el proceso de grabado es puramente químico, producido por la reacción espontánea de neutrones con silicio, es coloquialmente referido como grabado en fase plasma; pero si el bombardeo de iones de la superficie de silicio juega un rol sinérgico en la reacción de atacado químico, el proceso es denominado como atacado de iones reactivos (Reactive Ion Etching, RIE). En RIE, el movimiento de los iones a través del sustrato es casi vertical. Una variante de RIE es el proceso de atacado a profundidad (Deep Reactive Ion Etching, DRIE), el cual usa un plasma de alta densidad para producir grandes paredes verticales, donde son empleadas dos composiciones diferentes de gases. La primera composición de gases crea un polímero sobre la superficie del sustrato y la segunda composición ataca al sustrato, removiendo solo las superficies horizontales del sustrato, la Fig. 2.7 muestra este proceso. Su velocidad de atacado es de 3 a 4 veces mas alta que en los grabados húmedos.

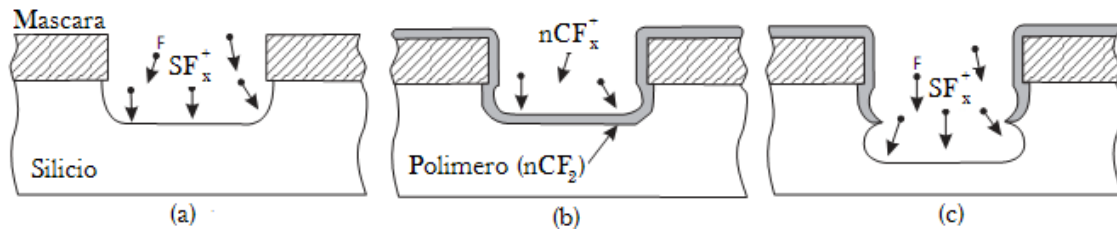


Fig. 2.7 Proceso DRIE: a)Atacado usando un gas, b)Deposición de un polímero y c)Atacado de las superficies horizontales. [2]

Ahora bien, la secuencia en la cual son combinadas varias técnicas o métodos de fabricación determina un proceso de fabricación único. Este puede ser específico para un diseño en particular, o puede ser lo suficientemente general, como para ser usado en la fabricación de un amplio rango de diseños diferentes.

2.4.2 Procesos de Micromaquinado

Básicamente, en MEMS, existen dos procesos de micromaquinado, como se muestra en la Fig. 2.8: los *procesos aditivos o micromaquinado de superficie* y los *procesos substractivos o micromaquinado volumétrico*. Cualquier proceso, ya sea comercial o particular existente ocupa cualquiera de estos dos procesos, o en el mejor de los casos una combinación de ambos procesos. [6]

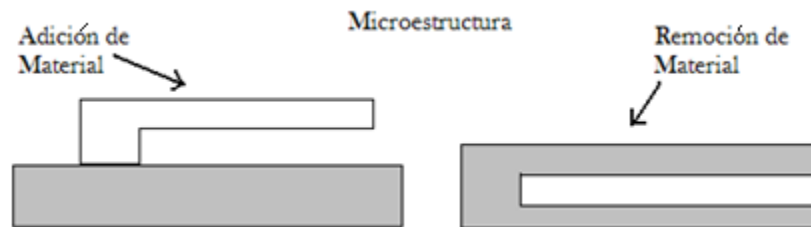


Fig. 2.8 Procesos básicos de fabricación en MEMS: a)Aditivos y b)Substractivos. [6]

La Fig. 2.8 muestra un ejemplo de un microcantiliver simple fabricado utilizando ambos procesos.

2.4.2.1 Micromaquinado de Superficie

Esta basado sobre la sucesiva deposición y atacado de diferentes capas estructurales sobre la superficie del sustrato. El proceso inicia con un material como sustrato. Las estructuras son construidas, encima del sustrato y no dentro de éste, por lo que las propiedades del sustrato no son tan importantes como en el micromaquinado volumétrico y por consiguiente las obleas de silicio costosas pueden ser reemplazadas por sustratos más baratos, tales como los cristales o plásticos. El tamaño de los sustratos puede ser mucho más grande que el de una oblea de silicio. El micromaquinado de superficie es usado para producir capas delgadas sobre un área grande de sustrato, pero el espesor pequeño de sus capas limita las aplicaciones, a aquellas que no requieren de un volumen muy grande.

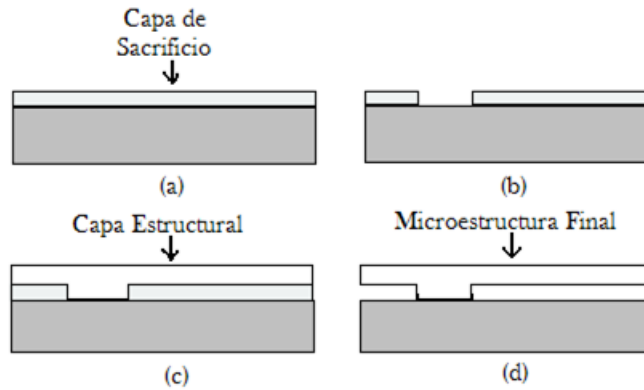


Fig. 2.9 Micromaquinado superficial: a)Deposición de la capa de sacrificio, b)Estampado de la capa de sacrificio, c)Deposición de la capa estructural y d)Atacado de la capa de sacrificio. [6]

La Fig. 2.9 ilustra los principales pasos que componen a un proceso de micromaquinado superficial típico.

2.4.2.2 Micromaquinado Volumétrico

Define estructuras mediante la remoción o atacado selectivo de material que esta dentro del sustrato. Muchas veces las obleas de silicio son usadas como sustrato, por sus propiedades anisotrópicas, para este tipo de micromaquinado. Este proceso inicia con una oblea de silicio u otro sustrato, el cual es atacado selectivamente hasta obtener el microdispositivo deseado, usando atacado húmedo o seco, aunque el atacado mas común en silicio es el atacado húmedo anisotrópico.

La Fig. 2.10 muestra el proceso genérico para producir un microcantiliver, empleando micromaquinado volumétrico.

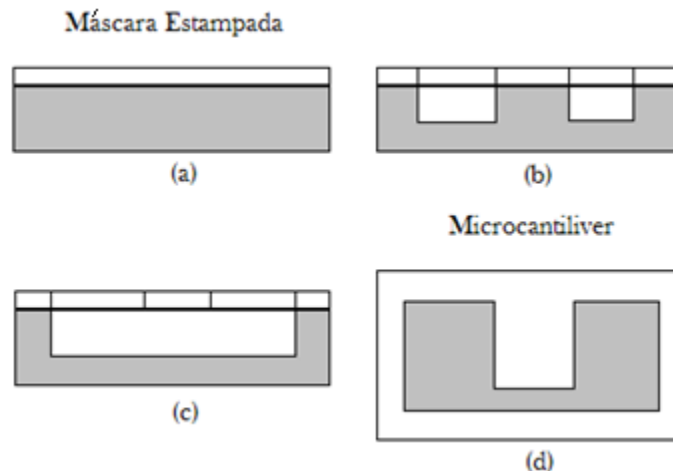


Fig. 2.10 Micromaquinado volumétrico de un microcantiliver: a)Deposición y estampado de una máscara, b)Atacado de los canales laterales, c)Socavado y liberación parcial del microcantiliver y d)Vista superior del microcantiliver. [6]

2.5 Procesos Comerciales para Fabricación en MEMS

Uno de los objetivos del presente trabajo es emplear un proceso de fabricación estándar y comercial; pero, “¿Por qué utilizar un proceso de fabricación estándar?”. Varias son las razones, a favor y en contra, que pueden facilitar la elección de un tipo de proceso. En la Tabla 2.1 se mencionan algunos de los puntos.

| Proceso | Pros | Contras |
|---------------|--|---|
| Estándar | <p>No se tiene que desarrollar un proceso</p> <p>Es relativamente barato</p> | <p>Los procesos y materiales son fijos</p> <p>La flexibilidad es reducida</p> <p>Las aplicaciones son limitadas</p> |
| No - Estándar | <p>Se debe desarrollar un nuevo proceso</p> <p>Ganancia en experiencia</p> | <p>Difícil de trasladar a la industria</p> <p>Baja probabilidad de éxito en las primeras corridas (Proceso iterativo)</p> |

Tabla 2.1 Pros y contras de los procesos estándar y no-estándar para el desarrollo de MEMS.

Dado que nuestras posibilidades de establecer un proceso propio son muy limitadas se ha decidido utilizar un proceso ya definido y plenamente comprobado, por lo que a continuación se describen brevemente tres procesos de fabricación que son genéricos en su naturaleza y usados hoy en día en la manufactura de MEMS.

2.5.1 PolyMUMPs

Es un proceso de micromaquinado de superficie con tres capas de polisilicio, dos capas de sacrificio y una capa de metal. Ocho niveles de máscara crean siete niveles físicos. El tamaño de la característica mínima en PolyMUMPs es de 2 μm . [7]

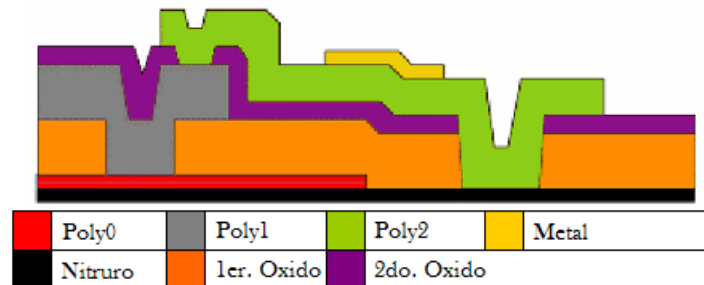


Fig. 2.11 Vista transversal que muestra las 7 capas del proceso PolyMUMPs. [8]

La Fig. 2.11 muestra la sección transversal del proceso PolyMUMPs. Las características generales de éste proceso de micromaquinado son: (1) el polisilicio es usado como el material estructural, (2) el óxido depositado (PSG) es utilizado como capa de sacrificio y (3)

el nitruro de silicio es usado como un aislante eléctrico entre el polisilicio y el sustrato. Algunos de los dispositivos que se pueden fabricar en PolyMUMPs incluyen: dispositivos acústicos (micrófonos), acelerómetros, microfluidos, robóticos y tecnología de displays. [8]

2.5.2 MetalMUMPs

En este proceso pueden construirse estructuras grandes de Níquel, entre 18-22 μm , así como estructuras de polisilicio y nitruro y si el diseño lo requiere, también se pueden crear zanjas con cierta profundidad dentro del sustrato, atacadas con KOH. [7]

El níquel electroplateado es usado como material estructural primario y/o capa de interconexión eléctrica. El polisilicio dopado puede ser usado para elementos resistivos, estructuras mecánicas adicionales, y/o atravesar interconexiones eléctricas. El nitruro de silicio es usado como una capa de aislamiento eléctrico. El óxido depositado es usado para capas de sacrificio. La zanja en el sustrato de silicio puede ser incorporada para aislamiento térmico y eléctrico. Una capa de oro, de baja resistencia eléctrica, puede ser usada para cubrir las paredes laterales del níquel. El tamaño de la característica mínima en MetalMUMPS es de 5 μm . Los dispositivos que se pueden fabricar en MetalMUMPS incluyen: relevadores, microfluidos, interruptores magnéticos y dispositivos de RF. La Fig. 2.12 muestra un microdispositivo fabricado con el proceso MetalMUMPS. [9]

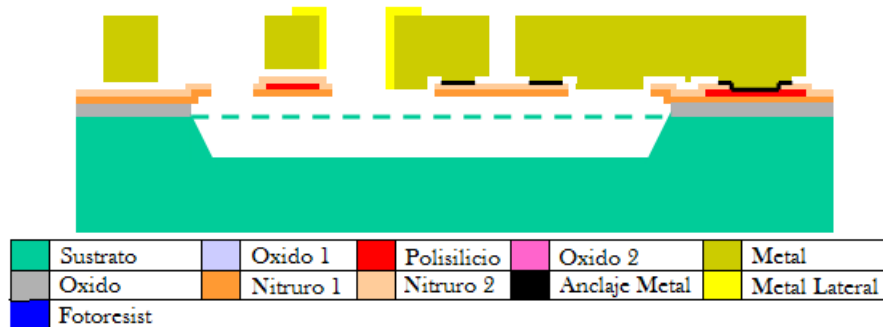


Fig. 2.12 Vista seccional de un microrelevador fabricado usando todas las capas del proceso MetalMUMPs. [8]

2.5.3 SOIMUMPs

La Fig. 2.13 muestra un dispositivo hecho en SOIMUMPs. El proceso tiene las siguientes características generales:

- Una oblea de silicio sobre aislante (Silicon-on Insulator, SOI) es utilizada como el sustrato de inicio. El usuario puede seleccionar entre dos tipos de sustratos:
 - Silicio con 10 μm de espesor
Espesor del Oxido: $1 \pm 0.05 \mu\text{m}$
Espesor del Sustrato: $400 \pm 5 \mu\text{m}$
 - Silicio con 25 μm de espesor
Espesor del Oxido: $2 \pm 0.1 \mu\text{m}$
Espesor del Sustrato: $400 \pm 5 \mu\text{m}$
- La capa de Silicio es dopada, después estampada y atacada hasta detenerse en la capa de Oxido. Esta capa puede ser usada para estructuras mecánicas, estructuras resistivas, y/o interconexiones eléctricas.

3. El Sustrato puede ser estampado por la parte inferior y atacarlo hasta la capa de Oxido. Esto permite crear hoyos sobre el Sustrato.
4. Un proceso de enmascaramiento (Shadow-Masked Metal) es empleado para generar características de Metal, como pads, interconexiones eléctricas, y superficies tipo espejos.
5. Una segunda capa de metal que permite desarrollar características más finas y de mayor precisión, pero limitadas a áreas no atacadas en la capa del Silicio.

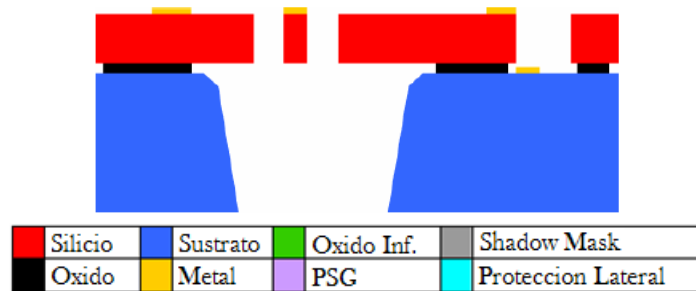


Fig. 2.13 Vista de la sección transversal que muestra todas las capas del proceso SOIMUMPs. No a escala. [10]

Dado que el proceso no fue optimizado con el propósito de fabricar un dispositivo en específico, los espesores de las capas fueron seleccionados para adaptarse a la mayoría de los usuarios y las reglas de diseño fueron desarrolladas con el objetivo de garantizar la realización de diferentes diseños.

La siguiente convención es empleada para nombrar los niveles del proceso: los niveles que corresponden a las máscaras de los procesos litográficos están escritos con letras mayúsculas. Los nombres de capas específicas de materiales, como por ejemplo el silicio, están escritas con letras minúsculas con la primera letra en mayúscula. Por ejemplo, SOI se refiere al nivel de máscara para definir la forma de la capa de silicio, denominada Silicio. En la Tabla 2.2 se resumen las características de cada capa de material.

| Capa de Material | Espesor [μm] | Nivel Litográfico | Propósito del Nivel Litográfico | Comentarios |
|------------------|--------------|-------------------|--|-----------------------|
| Pad Metal | 0.52 | PADMETAL | Provee metal para interconexiones eléctricas | 20 nm Cr 500 nm Au |
| Silicio | 10 o 25 | | Define estructuras en la capa de Silicio | |
| Oxido | 1 o 2 | SOI | | |
| Sustrato | 400 | TRENCH | Define hoyos en la capa del Sustrato | |
| Blanket Metal | 0.65 | BLANKETMETAL | A través de una oblea define zonas donde se depositará una capa de Metal | 50 nm Cr 600 nm Au |

Tabla 2.2 Nombres de capas de material, espesores y niveles litográficos asociados. [10]

Las reglas de diseño definen el tamaño de las características mínimas y el espacio entre cada nivel litográfico. Las características mínimas de longitud y espacio son reglas obligatorias, las cuales son dadas para asegurar una correcta fabricación. La violación a estas reglas resulta en

estructuras demasiado grandes o pequeñas e incluso la pérdida de algunas características en el diseño. En la Tabla 2.3 se definen el tamaño de las características para cada nivel litográfico.

| Nivel Litográfico | Característica Min [μm] | Espacio Min [μm] | Característica Max. [μm] | Área estampada Max. [mm^2] |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------------|---|---------------------------------------|
| PADMETAL | 3 | 3 | 500 | 20 |
| SOI | 2 | 2 | Ilimitada para un ancho $> 6 \mu\text{m}$ | 33 |
| SOIHOLE | 3 | 3 | N/A | N/A |
| TRENCH | 200 | 200 | 5000 | 20 |
| BLANKETMETAL | 100 | 100 | 5000 | 20 |

Tabla 2.3 Lista las reglas de diseño asociadas a cada nivel. [10]

2.5.3.1 Resumen del Proceso

SOIMUMPs es un proceso de estampado y atacado con 4 niveles de máscaras. Esta tecnología permite generar superficies altamente planas, aunque una de sus desventajas es que solo tiene una capa estructural, capa de Silicio, con lo cual se logra un diseño fácil pero limitado. A continuación se muestra una representación gráfica de los pasos del proceso.



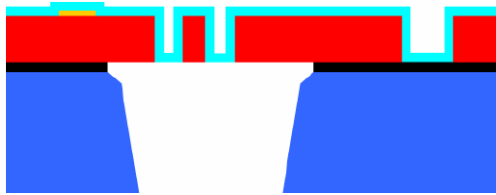
Una capa de cristal de fosfosilicato (PSG) es depositada y la oblea es recocida en Argón para transmitir el dopante, fósforo, a la superficie superior de la capa de Silicio. Después, el PSG es removido usando un atacado químico húmedo. Inicialmente hay una capa de Oxido en la parte inferior de la oblea.



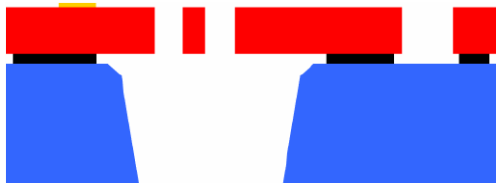
Las obleas son cubiertas con fotoresist negativo y un proceso litográfico desarrolla el primer nivel de máscara, PADMETAL. Una capa de Metal es depositada por evaporación, compuesta de 20 nm de Cr y 500 nm de Au, sobre el fotoresist estampado. En seguida el fotoresist es disuelto dejando el Metal en áreas abiertas.



Las obleas son cubiertas con fotoresist y un proceso litográfico desarrolla el segundo nivel de máscara, SOI. El fotoresist en áreas expuestas es removido, dejando un patrón para usar un DRIE y atacar el Silicio hasta detenerse en la capa de Oxido. Después del atacado, el fotoresist es removido químicamente.



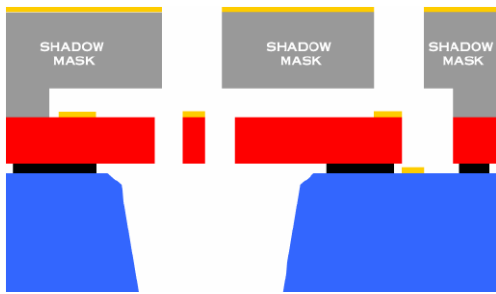
Un material para protección es aplicado sobre el Silicio. La parte inferior de las obleas es cubierto con fotoresist y es desarrollado el tercer nivel de máscara, TRENCH. Un RIE es usado para remover la capa de Oxido de la parte inferior de la oblea, entonces, un DRIE es usado para atacar completamente el Sustrato, deteniéndose en la capa de Oxido. Completado el atacado, el fotoresist es removido. Después, un proceso de atacado húmedo es empleado para remover la capa de Oxido en la regiones definidas por la máscara TRENCH.



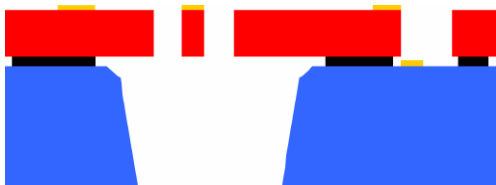
El material de protección es removido con un proceso de atacado seco. La capa de Oxido restante es removida usando un proceso HF de vapor. Esto permite un contacto eléctrico en la capa del Sustrato y genera un socavado en la capa de Oxido.



Una oblea de silicio es usada para fabricar una máscara de sombra para el estampado del Metal. Estas obleas son cubiertas con fotoresist y el cuarto nivel de máscara, BLANKETMETAL, es litográficamente estampado. Es usado un DRIE para atacar esta oblea, produciendo hoyos. Por último, el fotoresist es removido.



La máscara de sombra es alineada y temporalmente unida a la oblea SOI. La capa de Blanket Metal, 50 nm de Cromo y 600 nm de oro, es depositada a través de la máscara de sombra.



La máscara de sombra es removida, dejando una capa de Metal estampada sobre la oblea SOI. Finalmente, las obleas son cortadas en cubos, clasificadas, empaçadas y enviadas a los usuarios.

| | | | | | | | |
|--|---------|--|----------|--|------------|--|--------------------|
| | Silicio | | Sustrato | | Oxido Inf. | | Shadow Mask |
| | Oxido | | Metal | | PSG | | Proteccion Lateral |

Fig. 2.14 Flujo del proceso SOIMUMPS. No a escala. [10]

Finalmente, algunos de los dispositivos que se pueden fabricar en SOIMUMPs son: giroscopios, dispositivos ópticos y tecnología de displays.