

CAPÍTULO II

¿Cómo se construyen los microespejos MEMS?

2. Procesos y Técnicas de Fabricación de Microsistemas

A pesar de que los microsistemas y en nuestro caso particular los microespejos MEMS, parecen estructuras muy complejas y de difícil construcción, existen varios procesos de fabricación que simplifican su manufactura, llamados procesos de micromaquinado.

Los procesos de micromaquinado reúnen las técnicas usadas para producir las estructuras y partes móviles de los dispositivos microconstruidos. Entre estos procesos, los más comunes son: el micromaquinado de superficie, el micromaquinado en volumen y el proceso LIGA (por sus siglas en alemán) con rayos X.

Se explicará brevemente cada uno de ellos pero se hará énfasis en el proceso PolyMUMPs, que es un micromaquinado de superficie en siete etapas que provee la compañía de fabricación de MEMS, MEMSCAP que es en donde se construirá el y la matriz de microespejos.

2.1 Micromaquinado de Superficie

El micromaquinado de superficie es una de las mejores técnicas que se han desarrollado ya que silicio es el material usado en la producción de circuitos electrónicos (ver figura 2.1).

Además el proceso es muy adecuado para la producción de estructuras micromecánicas móviles sobre la superficie de una oblea de silicio, mediante el depósito de capas estructurales rígidas y de sacrificio, a las cuales se les transfiere un patrón de diseño utilizando técnicas fotolitográficas, para generar la microestructura.

Al final del proceso, las capas de sacrificio son removidas mediante atacados químicos, quedando así un dispositivo completamente ensamblado a microescala.

De este modo se depositan y se transfieren patrones para otras capas, tanto de sacrificio como de estructura, construyendo así la estructura completa del dispositivo. A continuación se explicará más a detalle cada etapa del proceso.

2.1.1 El silicio como material primordial de las estructuras microelectrónicas

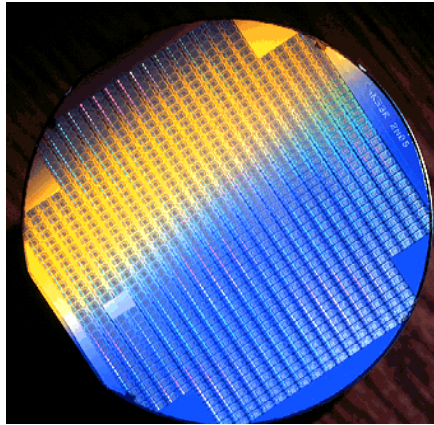


Figura 2.1 Oblea de silicio llena de chips de memoria.

El silicio se maneja por facilidad en forma de obleas, que son rebanadas obtenidas de un largo lingote de silicio crecido de una semilla cristalina. De este modo, los átomos de silicio están arreglados en una estructura cristalina, y la oblea resultante es silicio monocristalino.

Al cortar las obleas, se obtienen ciertos planos cristalográficos paralelos al plano de corte de obtención de la oblea, llamados índices de Miller, los cuales indican el plano cristalino de cómo fue cortado el silicio y a su vez, deben ser especificados por el fabricante (ver Figura 2.2).

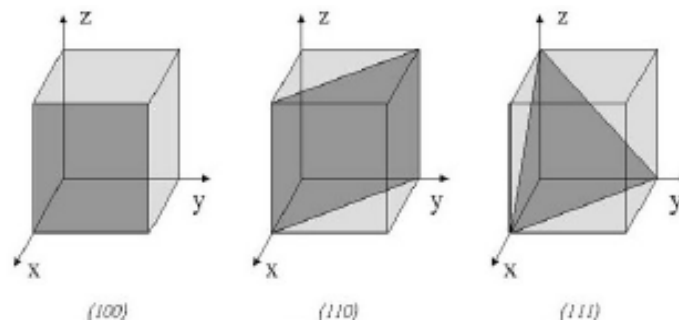


Figura 2.2 Índices de Miller para los planos cristalográficos del silicio

El micromaquinado en superficie se sustenta casi íntegramente en las técnicas básicas para la fabricación de un circuito integrado (oxidación térmica, deposición de películas delgadas, creación de máscaras, litografía, grabado y difusión).

De este modo, este proceso se traduce en el método básico y más utilizado para definir estructuras micromecánicas, en el cual se transfiere la información de un patrón contenido en una máscara para lograr las formas y dimensiones de diseño de estas estructuras.

2.1.2 Proceso de construcción y atacado del silicio al construir un microsistema

2.1.2.1 Oxidación Térmica

La oxidación térmica sirve para hacer crecer o depositar una capa de óxido de silicio (SiO_2) sobre una oblea. La oxidación térmica además puede tener varios propósitos: como máscara para el proceso de dopado, como capa aislante de óxido grueso o como capa dieléctrica de óxido delgado (ver figura 2.3).

Como al aplicar la oxidación a la superficie del silicio, esta consume parte del silicio, aproximadamente un 4% del grosor final del SiO_2 , puede utilizarse esta técnica para igualar capas anteriores.

Por otra parte, si lo que se desea es hacer crecer el nivel de silicio se puede utilizar alguna de las dos variantes de la técnica de oxidación térmica, que son la oxidación térmica húmeda y la oxidación térmica seca.

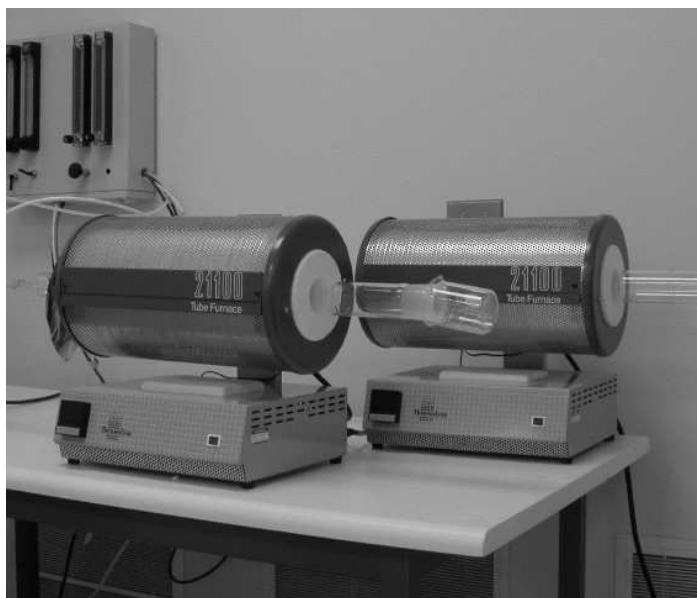


Figura 2.3 Hornos para oxidación térmica.

La oxidación húmeda se realiza introduciendo oxígeno puro o vapor de oxígeno y agua sobre una oblea a altas temperaturas dentro del horno.

2.1.2.1.a) Oxidación térmica húmeda.

Esta técnica utiliza vapor de agua como oxidante sobre la oblea, a una temperatura de 900 a 1000 grados. Es un proceso rápido en el que crece $1 \mu\text{m}$ de SiO_2 cada 2 horas. Sin embargo, se tiene un control mínimo sobre el crecimiento del silicio y por lo tanto se utiliza comúnmente para crear capas aislantes o dieléctricas de baja calidad.

2.1.2.1.b) Oxidación térmica seca.

Esta técnica utiliza al oxígeno como oxidante exponiendo a la oblea a una atmósfera rica en moléculas de este elemento, a una temperatura de entre los 1100 y 1200 grados. Es un proceso lento en el que crece 1 μm de SiO_2 en 40 horas.

La gran ventaja de la técnica es que se tiene una mayor precisión y control del grosor del óxido, logrando así capas con excelentes propiedades dieléctricas, densas y regulares.

2.1.2.2 Deposición

Ésta técnica deposita una capa fina de una sustancia o material encima de la oblea, ya sean óxidos, polisilicio, metales o semiconductores de estructura cristalina, para después eliminarla selectivamente con el proceso fotolitográfico y de oxidación. De esta manera, se “recorta” el material para obtener la capa con la forma y dimensiones que se desean.

Existen dos tipos de procesos, uno físico y el otro químico, los cuales se basan en introducir sustancias en estado gaseoso a baja presión, sin embargo no se abundará en describir a detalle ninguno de ellos:

2.1.2.2.a) Deposición Física en fase vapor, *Physical Vapor Deposition* (LPPVD).

En este proceso no hay reacción química con el sustrato durante el depósito de las películas delgadas, cuyas composiciones químicas son independientes entre sí, lo que significa que no hay consumo de los materiales ni del sustrato ni de las películas. Además permite hacer depósito de una gran variedad de materiales, lo que lo hace de uso común.

Sin embargo, las películas delgadas pueden reflejar la topología del sustrato, lo que puede traducirse en espesores no uniformes y rompimientos, lo que trae consigo distribuciones no uniformes en la densidad de corriente.

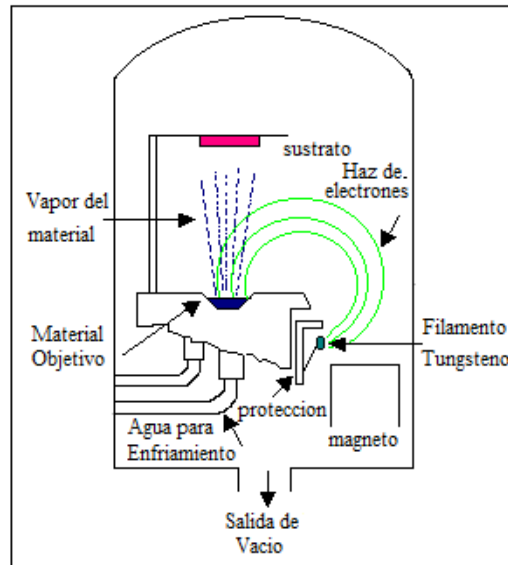


Figura 2.4 Ejemplo del proceso de Deposición Física en Vapor

Existen también variantes de este proceso en cuanto a los sistemas de evaporación, como son la inserción iónica -en la que la evaporación se produce por el calentamiento de un haz de electrones sobre un metal-, la evaporación por arco -en la que la evaporación se produce por efecto de un arco eléctrico desplazándose sobre el metal, o la pulverización catódica, en el que la evaporación se produce por el bombardeo de iones de un gas inerte sobre el metal. En la figura 2.4 se observa un ejemplo de este proceso.

2.1.2.2.b) Deposición Química en Fase Vapor *Chemical Vapor Deposition (LPCVD)*.

En este proceso, diferentes materiales o elementos en fase gaseosa, como monocristales, policristales y amorfos, reaccionan químicamente a presiones relativamente altas y se precipitan sobre la superficie de la oblea para producir el material depositado.

Por ejemplo, en la deposición química como la que se ve en la figura 2.5, se puede lograr el crecimiento de un monocristalino como el silicio, que tenga la misma estructura cristalina que el sustrato; sin embargo se tiene el inconveniente de que el proceso es muy sensible a posibles defectos y a la contaminación, lo que aumenta los defectos potencialmente.

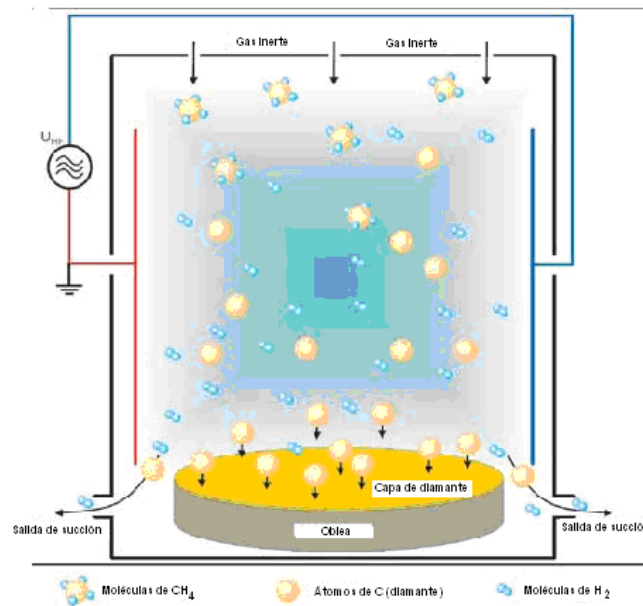


Figura 2.5 Ejemplo del proceso de Deposición Química en Vapor

Algunos métodos para lograr las reacciones en la deposición química son el calor, la luz y el plasma. Estas reacciones se llevan a cabo en un reactor, cuyos subproductos son evacuados al exterior mediante un sistema de bombeo a altas velocidades. En este proceso, las temperaturas son tan elevadas que llegan al rango de los 950°C a los 1000°C.

2.1.2.3 Litografía

Este proceso consta de cuatro etapas que se ilustran en la figura 2.6:

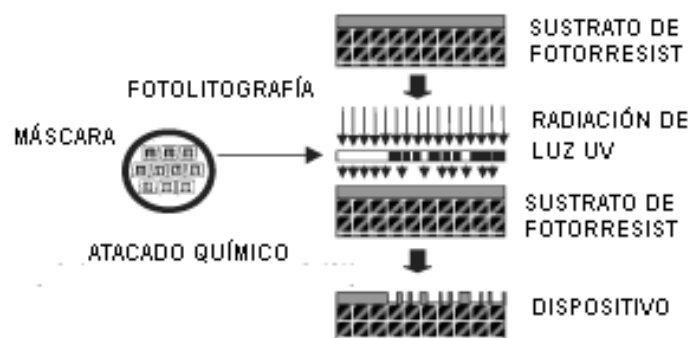


Figura 2.6 Esquema del Proceso Litográfico

2.1.2.3.a) Se produce una máscara que generalmente es de un material transparente como vidrio, cristal o cuarzo, cubierto por un patrón opaco de cromo. Como el microsistema final está construido por diferentes materiales, a cada uno de éstos le corresponde una máscara propia, cuyo patrón dependerá de nuestras especificaciones de diseño.

2.1.2.3.b) Se cubre la oblea de silicio con un material fotosensible, llamado resina o fotoresina que es un polímero sensible a la luz ultravioleta. Existen dos tipos de fotoresina, la positiva y la negativa.

2.1.2.3.c) Se coloca la máscara encima de la fotoresina, con una máquina alineadora que ajusta la oblea a la máscara y entonces se le dirige una luz ultravioleta a la fotoresina a través de la máscara, exponiendo así a la fotoresina con el patrón de la máscara. La fotoresina se activa y adquiere el patrón de la máscara. Cuando incide luz ultravioleta en fotoresina positiva, ésta la debilita, tal que al eliminarla, se tiene la transferencia de una imagen positiva de la máscara. Cuando incide luz ultravioleta en fotoresina negativa, la endurece tal que la fotoresina que no fue expuesta es eliminada, obteniendo una imagen negativa de la máscara. Este paso se puede apreciar en la figura 2.7.

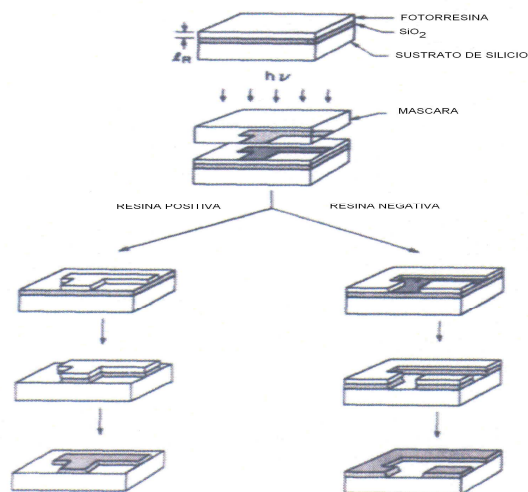


Figura 2.7 Ejemplo de transferencia de información para fotoresina positiva y para fotoresina negativa

2.1.2.3.d) Por último, se ataca la fotoresina no polimerizada con alguna solución química, para disolverla y eliminarla manteniendo los patrones de las máscaras y cuya disolución dependerá de la dureza de la fotoresina. Después se le lava con un disolvente para eliminar cualquier residuo.

2.1.2.4 Grabado

El grabado sirve para remover las áreas que no fueron cubiertas con la fotoresina y eliminar residuos de las zonas donde no queremos que haya material, el cual es atacado eliminándolo en las partes donde no hubo máscara durante el proceso litográfico.

Esta técnica es muy selectiva ya que solo ataca aquello que queremos y puede atacar sobre una o varias direcciones de planos cristalográficos. Existen tres tipos de grabados:

2.1.2.4.a) Químico. En este proceso se elimina el material por reacción química, atacando con agentes químicos en estado líquido que disuelven los materiales. En esta categoría se encuentra el grabado húmedo que puede ser isotrópico o anisotrópico (ver figura 2.8), dependiendo de la solución que se utilice para atacar el material, los diferentes planos cristalográficos y las velocidades de ataque que se deseen. Permite tener un mejor control de las dimensiones y las geometrías.

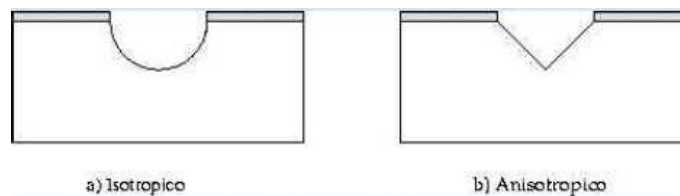


Figura 2.8 Tipos de estructuras después de un grabado a) isotrópico y b) anisotrópico.

2.1.2.4.b) Físico. En este proceso se hace un bombardeo de iones a altas potencias. Es poco selectivo y solo ataca en una dirección.

2.1.2.4.c) Químico-Físico. En este proceso el material es eliminado al bombardearlo con iones que reaccionan químicamente con el.

En esta categoría se encuentra el grabado seco (siendo el más común el proceso RIE, *Reactive Ion Etching*), en el que los iones son acelerados hacia el material, mejorando la grabación en la dirección que viajan los iones. Este tipo de grabado es anisotrópico y no está limitado por la orientación cristalográfica del silicio.

2.1.2.5 Difusión

Esta técnica permite que los átomos puedan moverse dentro de un sólido mediante la introducción de éstos en sustratos diferentes. Además permite cambiar las propiedades conductoras del material, introduciendo impurezas en el silicio al sustituir algunos átomos de silicio por átomos de otros elementos, a esto se le llama dopaje. Dependiendo del tipo de impureza con el que se dope el silicio, se pueden tener semiconductores tipo N o tipo P.

Si el silicio es dopado con boro, se obtienen zonas tipo P, en cambio, si se dopa con fósforo, arsénico o antimonio se obtienen zonas tipo N.

Ésta técnica requiere altas temperaturas, entre los 900 y 1100 grados, y la concentración de impurezas no se presenta uniformemente.

El dopado es una función del tiempo, es decir, entre más tiempo estemos exponiendo el silicio al proceso de dopaje, más dopado se presentará el material. Sin embargo, las altas temperaturas después de la difusión pueden provocar una redistribución de las impurezas.

2.1.3 Ventajas principales del proceso de micromaquinado en superficie

- ⇒ Compatibilidad con el proceso CMOS
- ⇒ Procesamiento en un solo lado de la oblea
- ⇒ Bajos costos.

En la figura 2.9 se muestra un esquema completo del proceso sobre un plano transversal de la oblea de silicio de un microcantilever.



Figura 2.9 Proceso de micromaquinado de superficie para un microcantilever.

Existen tres parámetros clave en la fabricación de microestructuras utilizando este proceso:

- ⇒ Control de la tensión y del gradiente de tensión en la capa estructural para evitar dobleces o escurrimientos en la estructura liberada.
- ⇒ Gran selectividad del atacante para capas de sacrificio que no afecten a las capas estructurales
- ⇒ Evitar que la estructura liberada se llegue a pegar al sustrato

2.1.4 Procesos MUMPS

Los Procesos Multi-Usuario para MEMS o MUMPS, por sus siglas en inglés, forman parte de un programa comercial ofrecido por MEMSCAP, empresa líder en

tecnología MEMS que hace posible que universidades, industrias y gobiernos alrededor del mundo, puedan fabricar sus diseños de MEMS de propósito general a bajos costos.

Los tres procesos estándar ofrecidos por MEMSCAP como parte del programa MUMPS son:

- ⇒ PolyMUMPS: es un proceso de micromaquinado en superficie de dos capas de polisilicio
- ⇒ MetalMUMPS: es un proceso de micromaquinado en níquel eléctricamente chapado
- ⇒ SOIMUMPS: es un proceso de micromaquinado en donde una capa de silicio se coloca sobre un aislante.

De estos tres procesos el que es más utilizado dada su generalidad y flexibilidad con el usuario, es el proceso PolyMUMPS y este es el que se explicará aquí más extensamente y con el cual se construyó el prototipo de microespejo torsional

2.1.4.1 Proceso PolyMUMPS

El proceso PolyMUMPS está concebido como un proceso de micromaquinado en superficie de tres capas de polisilicio y facilita la inclusión de muchos y diferentes diseños sobre la oblea de silicio.

Durante el proceso se hace uso de 8 máscaras y se tienen 7 niveles, uno de nitruro de silicio, 3 de polisilicio, 2 de óxido y uno de metal.

De este modo, y como ya se ha mencionada, las 3 capas de polisilicio son las que conforman la estructura del sistema, utilizando para sostener a la estructura óxido fosfosilicatado (PSG) como material de las capas de sacrificio. De igual manera que en el proceso de micromaquinado convencional, se utiliza una capa de nitruro de silicio como aislante del sustrato.

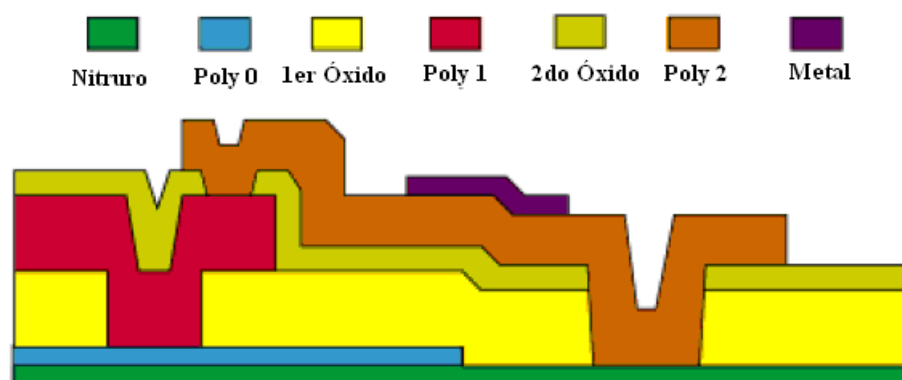


Figura 2.10 Sección transversal de un proceso PolyMUMPS

Como se ve en la figura 2.10 este proceso tiene las características generales del proceso de maquinado en superficie:

- ⇒ Se utiliza polisilicio como material estructural
- ⇒ Se deposita una capa de óxido PSG como capa de sacrificio
- ⇒ Se utiliza una capa de nitruro de silicio como aislante entre el sustrato y el polisilicio.

Sin embargo, la mayor diferencia entre este proceso y el micromaquinado en superficie convencional, es que éste está diseñado para ser lo más general posible y capaz de soportar muchos y diferentes diseños en una sola oblea de silicio.

Sin embargo, como el proceso no está diseñado para fabricar dispositivos con características específicas, el grosor de las capas estructurales y de sacrificio y sus planos, se han establecido para que ajusten al diseño de la mayoría de los usuarios, garantizando el mayor rendimiento posible.

2.2 Micromaquinado en Volumen

El micromaquinado en volumen construye microestructuras en 3D al “cavar” dentro de la oblea de silicio, tomando ventaja de las tres dimensiones espaciales.

Existen dos métodos básicos para formar la estructura en el silicio: el atacado químico anisotrópico y el atacado isotrópico (ver figura 2.10). El anisotrópico utiliza soluciones químicas tales como el KOH que ataca diferentes direcciones cristalográficas, a distintas velocidades.

Ciertos planos cristalográficos son muy lentos de atacar y son llamados planos de paro. El atacado anisotrópico generalmente produce superficies en forma de V, pirámides y canales dentro de la superficie de la oblea de silicio.

El atacado isotrópico ataca a la oblea de silicio en todas direcciones casi con la misma velocidad y produce depresiones redondeadas dentro de la superficie que generalmente se asemejan a esferas o cilindros.

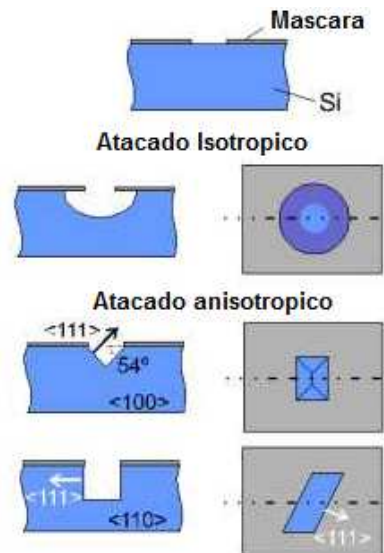


Figura 2.10 Las dos maneras de hacer micromaquinado en volumen

El proceso del micromaquinado en volumen hace uso de la técnica llamada “fusionado de obleas” en el que diferentes obleas de silicio se pegan para unir las permanentemente. Cuando varias obleas se unen para el micromaquinado en volumen, pueden construirse una amplia gama de estructuras mecánicas muy complejas (ver figura 2.11).



Figura 2.11 Acelerómetro construido mediante el “fusionado de obleas”.

El micromaquinado en volumen es entonces, muy similar al micromaquinado en superficie, en el que capas de diferentes materiales se colocan a la vez para luego atacarlas selectivamente con el patrón deseado del dispositivo sobre el sustrato.

Sin embargo, la mayor diferencia entre los dos procesos es que el micromaquinado en volumen puede construir dispositivos en ambos lados del sustrato. Y si se hace correctamente, este proceso puede dejar un gran número de dispositivos libres del sustrato de silicio original.

2.3 Proceso LIGA

El proceso Litográfico de Electrodeposición y Moldeado LIGA (por sus siglas en alemán *Lithographie, Galvanoformung und Abformung*), es muy similar tanto al

micromaquinado en volumen como al micromaquinado es superficie, con sus pequeñas grandes diferencias, como se ilustra en la figura 2.12.

La mayor diferencia de este método, es que utiliza una fotoresina que en vez de ser susceptible a los rayos UV, es susceptible a radiación con rayos X. Esta diferencia en la fotoresina permite crear objetos más altos utilizando el proceso LIGA, ya que pueden ir desde el orden de los micrómetros hasta los milímetros de altura.

Las paredes de las estructuras son suaves y paralelas entre sí. De este modo se pueden crear altas y sofisticadas estructuras, mediante la intensa penetración de rayos X, que al pasar a través de una máscara transfieren la información a una capa de plástico, generalmente polimetil metacrilato (PMMA). La exposición a la radiación, modifica el plástico tal que puede ser removido con una solución química, dejando la estructura plástica con el patrón del enmascarado.

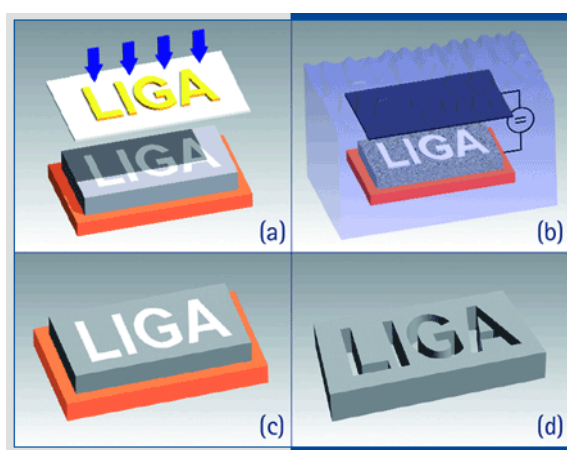


Figura 2.12 Esquema del proceso LIGA a) Exposición a rayos láser b) Plantación de electrones c) Acabado para altura de volumen d) Remoción del sustrato

A pesar de que los procesos anteriormente descritos son los cuatro procesos más popularmente utilizados en la producción de MEMS en laboratorios alrededor del mundo, los investigadores constantemente encuentran nuevas formas de fabricación, más eficientes.

Existen también otros procesos, como el atacado profundo y el micro moldeado, que a pesar de estar basados en procesos como el micromaquinado en volumen y el proceso LIGA respectivamente, aún no han tenido suficiente difusión. O el proceso de plantación electrónica en el que se utiliza un haz de iones para construir de abajo a arriba la estructura, apilando los iones uno encima de otro. Estas áreas de micromaquinado son muy promisorias, pero aún no se han destacado por su flexibilidad con el usuario.