

2. Tecnología MEMS

2.1 Introducción

Las siglas MEMS son en conjunto, un acrónimo para denotar a lo que actualmente se conoce como Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (Microelectromechanical systems). Son definidos típicamente como dispositivos de pequeñas dimensiones compuestos por elementos activos y pasivos microfabricados y que realizan diferentes funciones como percepción, procesamiento de datos, comunicación y actuación sobre el entorno. Los tipos de dispositivos MEMS pueden variar desde estructuras relativamente simples que no tienen ninguna parte móvil, hasta sistemas electromecánicos muy complejos en la que múltiples elementos se mueven bajo el control de la electrónica integrada.

Gracias a los avances en el campo de los semiconductores, los MEMS son una tecnología que puede aplicarse utilizando una gran diversidad de materiales y técnicas de fabricación; la elección dependerá del tipo de dispositivo que se pretenda fabricar y el sector comercial en el que desee operar. Esta visión de los MEMS, donde microsensores, microactuadores, microelectrónica y otras tecnologías se pueda integrar en un microchip, se espera que sea uno de los avances más importantes del futuro.

Los MEMS en general varían en tamaño desde un micrómetro (una millonésima parte de un metro) a un milímetro (una milésima parte de un metro). En este nivel de escala de tamaño, las construcciones de la física clásica no son siempre ciertas. Debido a la gran superficie en relación al volumen de los MEMS, los efectos de superficie como electrostática y viscosidad dominan a los efectos de volumen tales como la inercia o la masa térmica. Por ello, la etapa de diseño y caracterización de los microsistemas será básica de cara al análisis y desarrollo de nuevas aplicaciones.

Tamaño de un MEMS

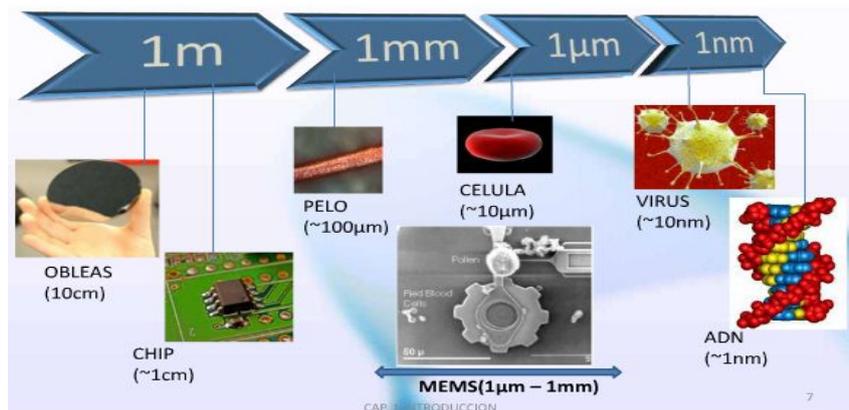


Figura 2.1. Órdenes de magnitud de tamaño de la tecnología MEMS.

La motivación para el uso de esta tecnología con respecto a los dispositivos utilizados hasta ahora es que ofrece, además de un costo menor, un menor consumo, un peso más reducido y un alto desempeño. [1]

La naturaleza del microsistema puede ser eléctrica, magnética, óptica, térmica, mecánica o fluídica y la arquitectura del MEMS engloba circuitos electrónicos y/u ópticos, generadores de señal y receptores, microsensores, microactuadores y microgeneradores.

Los microsistemas se pueden clasificar en seis distintos tipos:

- Sensores: son dispositivos MEMS diseñados para medir cambios en el ambiente. Estos microsistemas incluyen sensores químicos, de movimiento, inerciales, térmicos y ópticos.
- Actuadores: son un grupo de dispositivos diseñados para proporcionar un estímulo a otros componentes o dispositivos MEMS. En los microsistemas los actuadores son operados electrostática o térmicamente.
- MEMS RF: son una clase de dispositivos usados para transmitir señales de radio frecuencia. Los dispositivos típicos incluyen: interruptores, capacitores, antenas, etc.
- MOEMS (Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems) son dispositivos diseñados para dirigir, reflejar, filtrar, y/o amplificar la luz. Estos componentes incluyen interruptores ópticos y reflectores.
- Dispositivos MEMS para microfluidos: son diseñados para interactuar y trabajar con fluidos. Dispositivos como microbombas y microválvulas son creados para manipular pequeños volúmenes de fluido.
- Bio MEMS son dispositivos que, como muchos MEMS para microfluidos, son diseñados para interactuar específicamente con muestras biológicas. Dispositivos como éstos fabricados para interactuar con proteínas, células biológicas, reactivos médicos, etc. y pueden usarse para suministrar medicamentos u otro análisis médico in situ.

Estas seis áreas representan aplicaciones totalmente diferentes de dispositivos MEMS que actualmente se encuentran en uso o en desarrollo para aplicaciones comerciales.

Como se observa en la Figura 2.2, básicamente, los MEMS son sistemas formados por microestructuras, microsensores, microelectrónica y microactuadores. Las microestructuras constituyen el armazón del sistema, los microsensores detectan señales, la microelectrónica procesa la señal y da órdenes al microactuador para reaccionar.

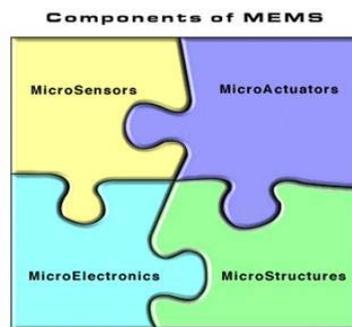


Figura 2.2. Partes de un MEMS

Los MEMS poseen una serie de ventajas frente a los sistemas de mayor tamaño, entre las cuales se encuentran:

- Posibilidad de fabricación masiva con bajo costo.
- Componentes más sensibles.

- Tamaño y peso reducidos.
- Consumo de energía pequeño.
- Alta precisión y biocompatibilidad.
- Partes mecánicas específicamente diseñadas, las cuales serán más rápidas y eficientes.
- Materiales con propiedades que les permiten ser más fuertes y ligeros.
- Desarrollo de componentes electrónicos más rápidos.
- Sistemas mecánicos y ópticos más rápidos y complejos.
- Nuevos dispositivos opto-electrónicos.

Dichas ventajas han favorecido su introducción en un gran número de aplicaciones y mercados y silenciosamente han ocupado un lugar en nuestra vida cotidiana.

2.2 Historia y aplicaciones

A raíz del nivel de madurez alcanzado en microelectrónica, la investigación ha estado desarrollada en la última década al 'mundo pequeño', es decir, a las nuevas micro y nano tecnologías. El progreso paralelo de la mecánica y la electrónica ha creado una nueva tecnología, incorporándolas bajo el nombre de Sistemas Micro-Electro-Mecánicos (MEMS), que se está convirtiendo rápidamente en una de las tecnologías más prometedoras, con un potencial aparentemente ilimitado para dominar desarrollos tecnológicos futuros.

Durante las últimas décadas los investigadores y desarrolladores de MEMS han fabricado un número extremadamente elevado de microsensores para casi todas las modalidades posibles de detección incluyendo la temperatura, la presión, las fuerzas de inercia, química, campos magnéticos, radiación, etc. Sorprendentemente, muchos de estos sensores micromecanizados han demostrado que sus actuaciones mejoran las de sus homólogos a macroescala. Es decir, la versión micromecanizada de, por ejemplo, un transductor de presión, por lo general supera a un sensor de presión fabricado utilizando las más precisas técnicas de mecanizado a nivel de macroescala. No sólo el rendimiento de los dispositivos MEMS es excepcional, sino que su método de producción aprovecha las técnicas de fabricación de un mismo lote utilizadas en la industria de circuitos integrados traducándose en bajos costes de producción por dispositivo, así como muchos otros beneficios. En consecuencia, no es de extrañar que los microsensores hayan sido rápidamente objeto de explotación comercial y que el mercado de estos dispositivos siga creciendo a un ritmo elevado.

Hoy en día, muchos aspectos de la mecánica están siendo reinventados, aunque a escalas variables. El rápido desarrollo del campo de los MEMS iguala al progreso en microelectrónica de hace treinta años que condujo a los modernos microprocesadores de alta potencia y computadoras ultrarápidas.

Todo comenzó en 1947, cuando William Shockley, John Bardeen y Walter Brattain de los Laboratorios Bell lograron la construcción del primer transistor de punto de contacto utilizando germanio, de aproximadamente media pulgada de espesor. Este invento demostró la capacidad de construir transistores con materiales semiconductores y abrió la puerta a la creación de transistores cada vez más pequeños. [2]

En 1954, CS Smith descubrió el efecto piezorresistivo de materiales semiconductores, como el silicio y el germanio. Este descubrimiento fue importante para el campo de los MEMS porque demostró que estos materiales podían medir la presión del aire o del agua mejor que los metales.

Como resultado del descubrimiento del efecto piezorresistivo en semiconductores, medidores de presión de silicio comenzaron a ser desarrollados comercialmente en 1958.

Cuando el transistor se inventó, no había un límite de tamaño para cada transistor ya que tenía que estar conectado a cables y otros aparatos electrónicos. Como resultado, la reducción de los transistores llegó a un punto muerto hasta que se inventó el primer circuito integrado. Éste incluía transistores, resistencias, condensadores y los cables necesarios para servir a una aplicación en concreto, por lo que al fabricar en un sustrato todo el dispositivo podría reducirse mucho el tamaño. En 1958, Jack Kilby que trabajaba para Texas Instruments construyó el primer circuito integrado formado por un transistor, tres resistencias y un condensador usando Germanio. Poco después, Robert Noyce de Fairchild Semiconductor inventó el primer chip de silicio, el invento más influyente de todos los tiempos según una encuesta realizada en 2005 por la CNN.

En 1964, un equipo de Westinghouse liderado por Harvey Nathanson produjo el primer lote fabricado de dispositivos MEMS. Este dispositivo estaba compuesto por un componente mecánico con elementos electrónicos y fue llamado transistor de puerta resonante (RGT). La RGT fue una estructura MOS con un resonador de oro. Fue aproximadamente un milímetro de largo y su respuesta estaba muy limitada a una gama de señales eléctricas de entrada. Sirvió

como un filtro de frecuencia para los circuitos integrados mediante la transmisión de las señales sólo dentro un rango de frecuencias. La RGT se diferenció de los transistores convencionales porque no se encontraba fijado al óxido de la puerta, sino que estaba en voladizo con respecto al sustrato. Las fuerzas electrostáticas atractivas controlaban la distancia entre la puerta y el sustrato. La RGT fue la primera demostración de micro actuadores electrostáticos y de las técnicas de micromecanizado superficial.

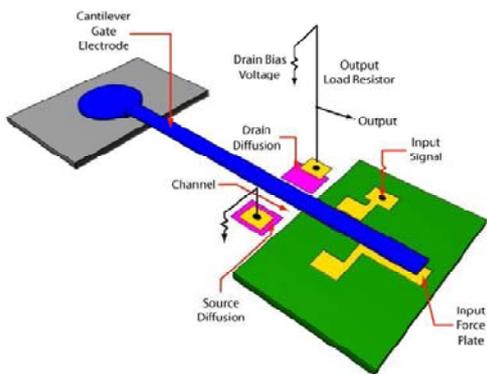


Figura 2.3. Transistor de puerta resonante

Entre 1960 y 1970 se desarrollaron sensores de presión gracias a la evolución en el grabado de las obleas de silicio. En la década de 1960, se fabricaron transistores de silicio mediante el proceso químico de grabado isotrópico de silicio. Al utilizarse tanto el grabado isotrópico como anisotrópico se provocó un gran impulso en el desarrollo de MEMS al poderse crear una gran variedad de estructuras.

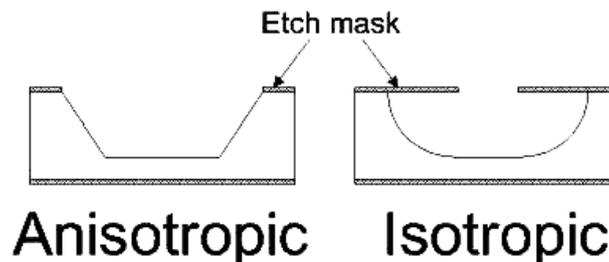
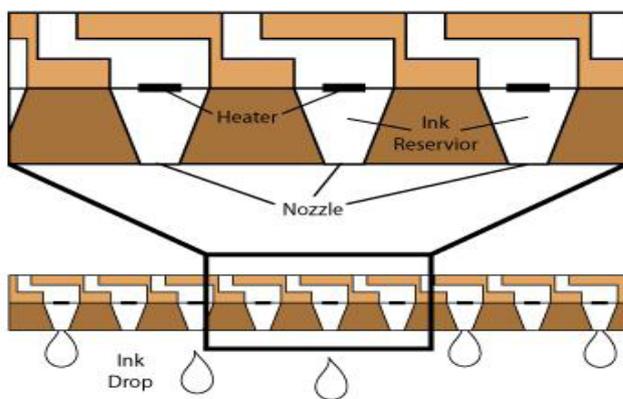


Figura 2.4. Tipos de grabados húmedos

El grabado electroquímico anisotrópico es importante en la fabricación de microsistemas, ya que es la base del proceso de micromecanizado en volumen. Desde su creación, el micromecanizado en volumen sigue siendo un método muy poderoso para la fabricación de elementos de micromecánica, tales como canales microhidráulicos, boquillas, membranas, suspensión de vigas y otros elementos móviles o estructurales. En la década de 1970, un sensor micromecanizado de presión con un diafragma de silicio fue desarrollado por Kurt Peterson, del laboratorio de investigación de IBM. La membrana delgada permitió una mayor deformación, lo que proporcionó una mayor sensibilidad en comparación con otros sensores de presión de membrana de ese momento.

En 1979, a Hewlett-Packard se le ocurrió una alternativa a la impresión de matriz de punto denominado Thermal Inkjet Technology (TIJ). Esta técnica de impresión calentaba la tinta rápidamente, consiguiendo que las gotas de tinta fluyeran por los cabezales de inyección permitiendo una rápida creación de imagen en papel y otros soportes. La tecnología de micromecanizado de silicio se utilizó



en estas boquillas, fabricadas muy pequeñas y densas para conseguir una resolución de impresión alta. Desde que HP llegó por primera vez con el TIJ, se han realizado mejoras para que los inyectores sean más pequeños y densos para mejorar la resolución y actualmente muchas impresoras siguen utilizando la tecnología de inyección de tinta térmica.

Figura 2.5. Esquema de una matriz de inyector

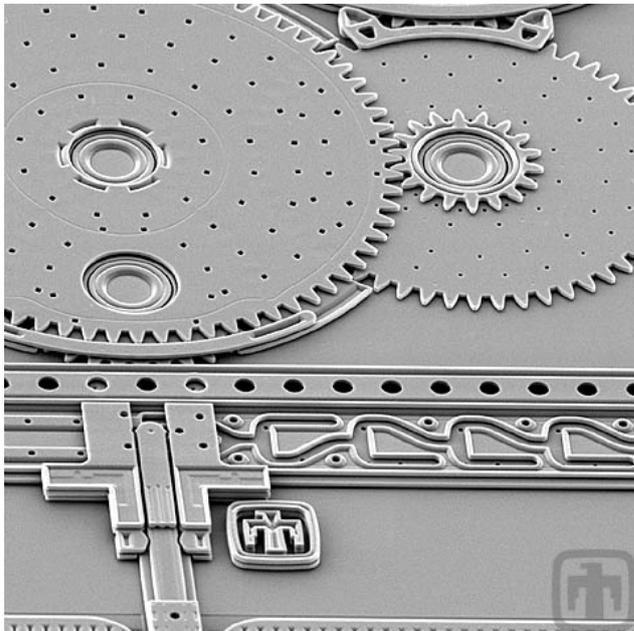


Figura 2.6. Actuadores realizados mediante LIGA

En la década de 1980 un equipo del Centro de Investigación Nuclear de Karlsruhe en Alemania, desarrolló un nuevo proceso llamado LIGA, acrónimo de Lithographie, Galvanoformung, Abformung (Litografía, electroformación y moldeado). Consiste en fabricar un molde grueso de fotorresina con rayos X y rellenarlo con metal. Este proceso es importante en la fabricación de microsistemas, ya que permite la fabricación de alta relación de aspecto, grandes profundidades, precisiones laterales elevadas y rugosidades muy pequeñas.

En 1982, un artículo escrito por Kurt Petersen fue publicado en *The Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE). La publicación se titulaba "El silicio como material mecánico". En el documento se proporcionaba información sobre las propiedades del silicio y datos para manipularlo y fue fundamental para atraer a la comunidad científica en la exploración de estas áreas. Es uno de los artículos más referenciados en el campo de los MEMS.

En 1986 los científicos de IBM desarrollaron un microdispositivo llamado microscopio de fuerza atómica (AFM, de sus siglas en inglés Atomic Force Microscope). El AFM es un dispositivo mecano-óptico capaz de detectar fuerzas del orden de piconewtons (pN). Al rastrear una muestra, es capaz de registrar continuamente su topografía mediante una sonda o punta afilada de forma piramidal o cónica. La sonda va acoplada a un listón o palanca microscópica muy flexible de sólo unos 200 μm . El microscopio de fuerza atómica ha sido esencial en el desarrollo de la nanotecnología, para la caracterización y visualización de muestras a dimensiones nanométricas.

Hubo muchos desarrollos y nuevas aplicaciones en la década de 1980. Cabe destacar en 1988 el primer motor rotativo electrostático de transmisión lateral que se realizó en la Universidad de Berkeley y el desarrollo en 1989 de las estructuras en peine que se mueven lateralmente a la superficie.

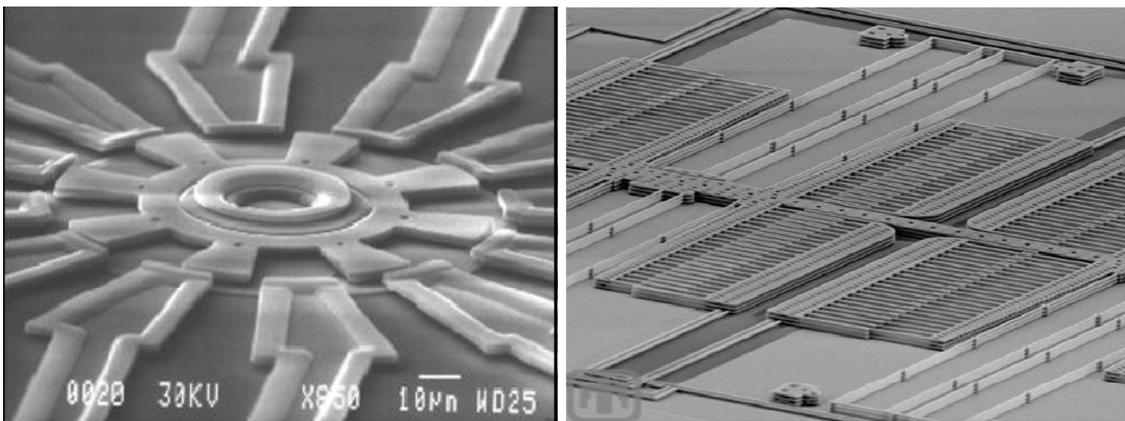
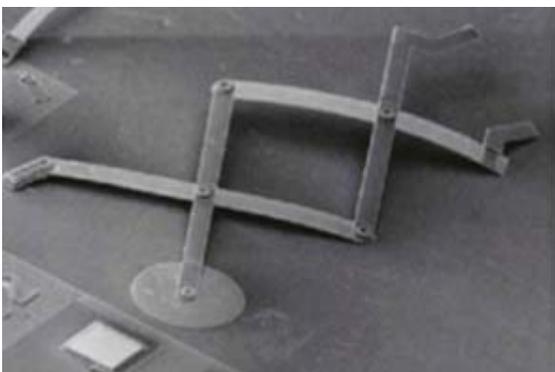


Figura 2.7. (Izquierda) Primer motor rotativo electrostático. (Derecha) Estructuras en peines.

En 1993 el Centro de Microelectrónica de Carolina del Norte (MCNC) creó una fundación que tenía por objeto hacer microsistemas de procesamiento altamente accesible y rentable para una



gran variedad de usuarios. Se desarrolló un proceso llamado MUMPs (Multiusuario Procesos MEMS), que era un proceso de microfabricación para una superficie de polisilicio de tres capas. Desde su creación, varias modificaciones y mejoras han sido realizadas para aumentar la flexibilidad y la versatilidad del proceso.

Figura 2.8. Estructura realizada mediante MUMPs

En 1993 Analog Devices fue el primero en producir en alto volumen acelerómetros micromecanizados superficialmente. Fue muy fiable, muy pequeño y muy barato. Se vendió en números récord, lo que provocó un aumento en la disponibilidad airbags en los automóviles. Hoy en día, los acelerómetros se encuentran en una amplia variedad de productos de consumo, incluidos los sistemas de seguridad y de navegación para automóviles, dispositivos de juego, celulares móviles y sistemas informáticos.

En 1999, Lucent Technologies desarrolló el primer interruptor de red óptica de MEMS. Los interruptores ópticos son dispositivos optoelectrónicos que consisten en una fuente de luz y un detector que produce una salida de conmutación. Proporciona una función de conmutación en una red de comunicaciones de datos. Estos interruptores MEMS ópticos de microespejos se utilizan para cambiar o reflejar un canal óptico o una señal de un lugar a otro en función del ángulo relativo del microespejo. El crecimiento de la tecnología en esta área sigue avanzando.

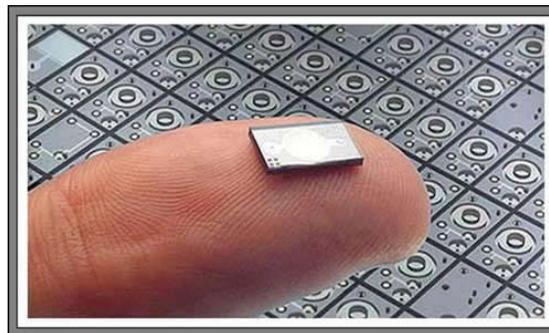


Figura 2.9. Bomba de insulina fabricada por Debiotech SA

Los investigadores todavía están descubriendo nuevas maneras de combinar sensores MEMS y actuadores con las nuevas tecnologías bioMEMS. Se están desarrollando microdispositivos que permiten obtener información del cuerpo humano: como microsensores de visión, medidores de glucosa, de presión sanguínea, de oxígeno en sangre, endoscopios, sistemas de diagnóstico genética, etc. Otra área en la que los MEMS dan lugar a importantes mejoras es la cirugía mínimamente invasiva. Esto es posible gracias a los nuevos dispositivos e instrumentos miniaturizados, que incorporan microestructuras mecánicas, componentes microópticos y de fibra óptica, microsensores táctiles y de presión, entre otros. Los motores lineales para microcirugía controlan la posición de instrumentos quirúrgicos a muy pequeña escala (en el orden de la micra) mejorando los resultados de la mayoría de las técnicas quirúrgicas actuales.

Actualmente, además del sector de bioMEMS, se están desarrollando aplicaciones en diversos campos. El sector automotriz ha estado muy influenciado por el mercado de los MEMS. Una de las aplicaciones más clásicas en este campo ha sido el uso de acelerómetros para sistemas de detección de impactos y activación del airbag. Actualmente los vehículos más modernos vienen equipados con microsensores, procesadores inteligentes de señal y actuadores rápidos que son capaces de reconocer situaciones de peligro y ayudar al conductor a mantener el vehículo bajo control y mejorar así la seguridad activa. Los sensores de presión son otro ejemplo de microsistemas para seguridad en el vehículo, los cuales son usados para la medición de presión en el neumático, control de presión del cilindro de freno, etc.

Dentro de las telecomunicaciones, la microtecnología desempeña un papel fundamental. La rápida expansión de los sistemas de telecomunicación basados en fibra óptica ha provocado un espectacular crecimiento tanto en el número como en el tipo de fabricantes de dispositivos y

componentes ópticos. Debido a la alta precisión requerida para las conexiones ópticas y a la sensibilidad que presenta esta tecnología a los desalineamientos de posición y angulares, los microsistemas son de gran importancia. Gracias a ellos, es posible posicionar fibras de entrada y salida mediante canales micromecanizados, sin necesidad de realizar complejas y costosas operaciones de alineamiento activo. Además, se fabrican numerosas microestructuras con elementos ópticos pasivos (interruptores ópticos, guías de onda, divisores de haz, etc).

Desde un punto de vista de mercado, debido a la crisis económica mundial, existe una necesidad urgente para los usuarios finales de revisar sus inversiones en los sensores. La tecnología MEMS ha evolucionado en gran medida en las industrias de usuario-final. Campos como medicina, industriales, aeroespaciales o de defensa han empezado a utilizar sensores MEMS debido a su pequeño tamaño, bajo coste y alta fiabilidad. Es por ello que muchas fuentes afirman que el campo de los MEMS ha crecido exponencialmente desde su creación hace cuatro décadas. [3]

Debido a que estamos viviendo en una sociedad donde la tecnología MEMS está prácticamente en todos los dispositivos de nuestra vida cotidiana (smartphones, netbooks, tablets, libros electrónicos, juegos de consolas y plataformas portátiles de juego, sistemas de navegación, estabilización de imagen, etc), los pronósticos de mercado auguran un gran crecimiento en la fabricación y consumo de esta tecnología.

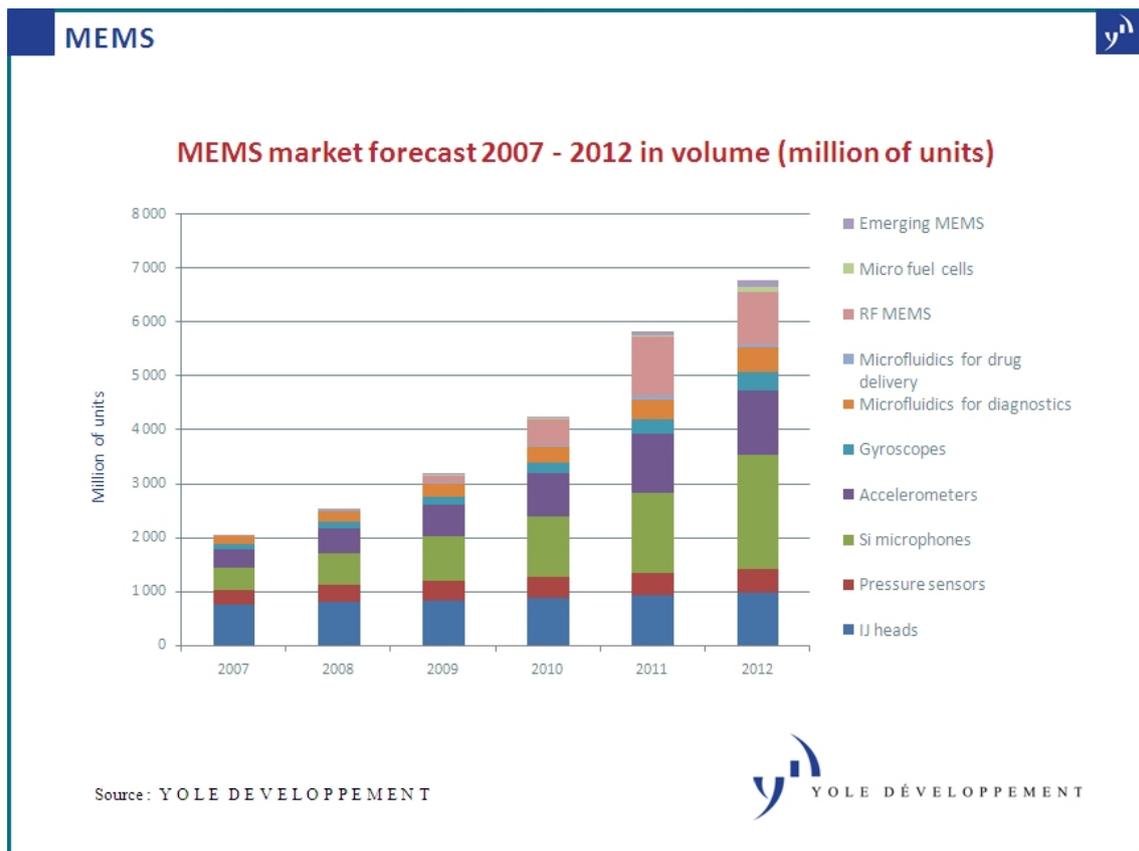


Figura 2.10. Pronóstico de mercado para los MEMS por Yole Development.

2.3 Materiales y procesos de fabricación

Los MEMS se convirtieron en prácticos una vez que pudieron ser fabricados utilizando una modificación de la tecnología de fabricación de semiconductores, normalmente utilizadas en electrónica. Como en la fabricación de semiconductores, los dispositivos MEMS se fabrican habitualmente a partir de obleas de silicio o vidrio. Sin embargo, esta tecnología ha superado sus orígenes en la industria de semiconductores al incluir otras técnicas de fabricación como el moldeo y galvanoplastia, grabado húmedo (KOH, TMAH) y grabado en seco (RIE y DRIE), el mecanizado por electro descarga (EDM), y otras tecnologías capaces de fabricar dispositivos muy pequeños. [4]

La fabricación específica de MEMS crea características físicas en las obleas quitando capas que se pueden sacrificar debajo de las estructuras mecánicas deseadas. Por ello, es habitual utilizar en la fabricación procesos especializados para obtener grabados más profundos. Además, una gran ventaja que posee esta tecnología es la capacidad de poder fusionar obleas en una pila para crear un dispositivo multicapa más grande, así como la posibilidad de tener características en ambos lados de la oblea, lo que le da muchas alternativas a la hora de diseñar el microdispositivo.

En cuanto al proceso de fabricación de MEMS, se basa en el mismo proceso que la industria microelectrónica, por lo que requiere una precisión muy alta en todas y cada una de sus etapas. Esto hace que sea necesario desarrollar complejos sistemas de sensores capaces de controlar, monitorizar y supervisar las características y evolución de dichos procesos. Además de tener en cuenta todo este control en la etapa de fabricación, para asegurar la precisión y funcionalidad del microdispositivo producido, es necesario someter a este a numerosas pruebas una vez finalizada su fabricación.

Los tres rasgos característicos de las tecnologías de fabricación de MEMS son la miniaturización, la multiplicidad, y la microelectrónica. La miniaturización permite la producción de dispositivos compactos de respuesta rápida. Multiplicidad se refiere a la fabricación por lotes inherentes en el procesamiento de semiconductores, que permite generar miles o millones de componentes al mismo tiempo de ser fabricado. Microelectrónica ofrece la inteligencia de MEMS y permite la fusión de sensores, actuadores y la lógica de control. De cualquier modo, la miniaturización y multiplicidad con éxito de los microsistemas no habría sido posible sin la tecnología de fabricación de CI.

Uno de los elementos básicos en el procesamiento de MEMS es la capacidad de deposición de películas delgadas de materiales. No hay un valor fijo para definir el espesor que caracteriza el espesor de película delgada, pero se suele asumir que puede tener espesores desde unos pocos nanómetros hasta unos 100 micrómetros. Hay diversos tipos de materiales que se depositan en la fabricación de MEMS, dependiendo de la función y las propiedades que se requieran. Existen óxidos de silicio térmico, capas dieléctricas, silicio policristalino y deposición de metales. Un aspecto importante a la hora de fabricar microdispositivos mediante deposiciones de capa fina es que las propiedades que presentan, por ejemplo, los metales en sus aplicaciones normales del macromundo, no tienen por qué cumplirse con espesores pequeños. Este factor es importante a la hora de estudiar el comportamiento de dispositivos, ya que varían en función del espesor de la capa depositada. Los procesos de deposición de uso común son: Electroenchapado (Electroplating), Deposición pulverizada (Sputter deposition), deposición física de vapor (PVD) y deposición química de vapor (CVD).

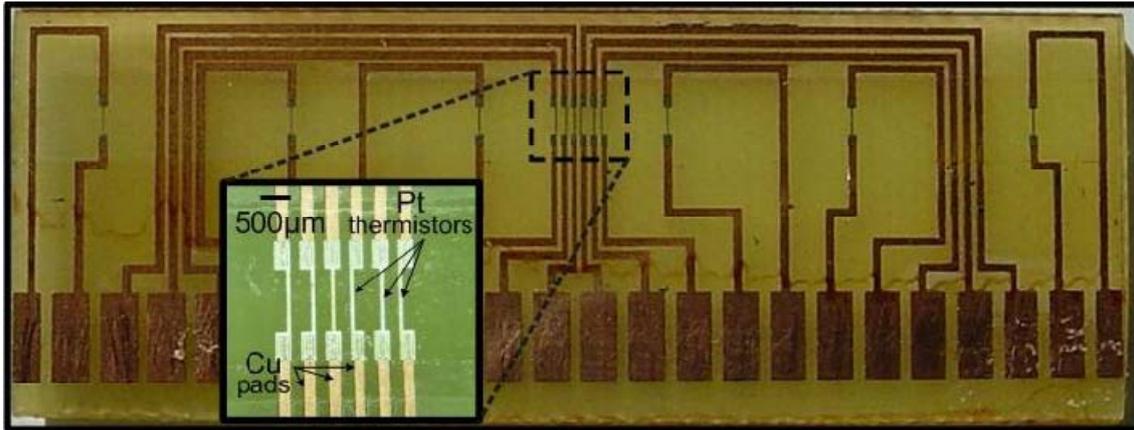


Figura 2.11. Fabricación de un sensor de flujo mediante deposición de Platino.

2.3.1 Silicio

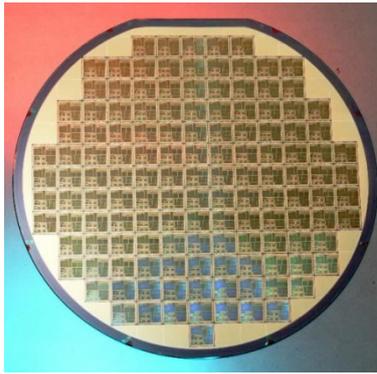
El silicio es un elemento químico metaloide, número atómico 14 y situado en el grupo 4 de la tabla periódica de los elementos formando parte de la familia de los carbonoides de símbolo Si. Es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre (27,7% en peso) después del oxígeno. No existe en estado libre, sino que se encuentra en forma de dióxido de silicio y de silicatos complejos.

El silicio es un semiconductor intrínseco y su resistividad a la corriente eléctrica a temperatura ambiente varía entre la de los metales y la de los aislantes. La conductividad del silicio se puede controlar añadiendo pequeñas cantidades de impurezas llamadas dopantes. La capacidad de controlar las propiedades eléctricas del silicio y su abundancia en la naturaleza han posibilitado el desarrollo y aplicación de los transistores y circuitos integrados que se utilizan en la industria electrónica.

La utilización de la tecnología microelectrónica en combinación con las tecnologías de micromecanizado del silicio, tanto micromecanizado en volumen (bulk micromachining) como micromecanizado en superficie (surface micromachining) han permitido la aparición de nuevos elementos sensores y actuadores.

Además de presentar unas características óptimas para la industria microelectrónica, el silicio tiene unas excelentes propiedades mecánicas. Por ejemplo, el módulo de Young del silicio es de valor similar al acero o al níquel. Además, el uso multidisciplinario del silicio para funciones electrónicas y no electrónicas en el mismo chip nos lleva a un nuevo concepto de sistemas de transductores dentro de la microelectrónica, ya que estos microdispositivos se benefician de los principales factores que han hecho posible el extraordinario desarrollo de la microelectrónica.

En microelectrónica, el silicio aparece en forma de obleas, que no son más que finas planchas sobre las que se construyen microcircuitos mediante técnicas de dopado, grabado químico y deposición de materiales. Existen obleas de silicio monocristalino y policristalino, donde las primeras se obtienen a partir de silicio muy puro y las segundas están formadas por silicio de menor pureza.



Dada la situación actual de la industria microelectrónica, es de prever que el silicio siga siendo durante mucho tiempo el material base para la fabricación de circuitos integrados. Por ello los sensores y actuadores basados en tecnología de silicio están en el punto de mira y son los dispositivos que parecen más prometedores a la hora de definir los futuros microsistemas. De todo ello se deduce la gran importancia de compatibilizar las tecnologías de microfabricación del silicio para la fabricación de sensores y actuadores con la tecnología de fabricación de circuitos integrados.

Figura 2.12. Oblea de silicio con un lote de MEMS

2.3.2 SU-8

El SU-8 es el polímero elegido para la fabricación de la mayor parte de nuestro microsensar debido al bajo precio del equipamiento necesario para tratarlo comparado con el de las máquinas necesarias para otro tipo de materiales, así como el precio del producto en sí. El hecho de ser biocompatible y con buena resistencia química y mecánica también hacen de él una buena elección para la realización de estructuras microfluídicas. [5]

Se define como una resina epoxy negativa fotosensible a la radiación ultravioleta, es decir, a una longitud de onda aproximadamente de 365 nm. Es un compuesto formado por la resina epoxy bisphenol-A/ formaldehído Novolac y un disolvente orgánico, que dependiendo del tipo de SU-8, será gamma-butyrolactone (GBL) o cyclopentanone. El objetivo de dicho disolvente es determinar la viscosidad del SU-8 y deberá ser controlado en función del espesor. Al principio, el único disolvente existente era el GBL, sin embargo, posteriormente la empresa MicroChem desarrolló la serie “SU-8 2000” en la que sustituyó el GBL por ciclopentanone para conseguir de este modo una mayor adhesión en los sustratos.

Fue desarrollado y patentado por IMB-Watson Research Center (USA) y actualmente es uno de los polímeros más utilizados en la fabricación de microsistemas debido a las interesantes propiedades que posee.

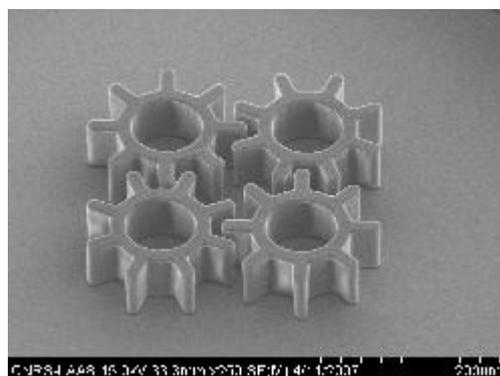


Figura 2.13. Pieza realizada por Fotolitografía en SU-8 (espesor de 100 μm)

A continuación se muestra un cuadro resumen con las principales propiedades de este polímero:

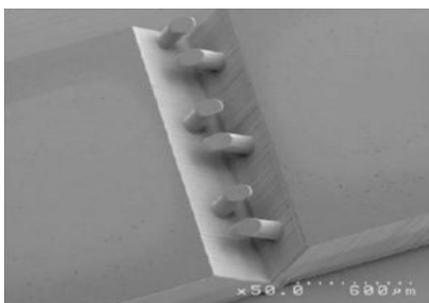
Propiedad		SU-8 serie 2000
Tono		<i>Negativo</i>
Máximo espesor en una sola deposición		<i>250 μm</i>
Relación de aspecto		<i>10:1</i>
Condiciones de almacenamiento/Vida		<i>15-30 °C / 1 Año</i>
Módulo de Young (GPa)		<i>2.0</i>
Coeficiente de expansión térmica, CTE (ppm/°C)		<i>52</i>
Resistencia a tracción (MPa)		<i>60</i>
Elongación hasta la ruptura (%)		<i>6.5</i>
Conductividad térmica (W/(m·K))		<i>0.3</i>
Adhesión a un sustrato de: (MPa)	Si	<i>53</i>
	SiN	<i>43</i>
	Ni	<i>45</i>
	Au	<i>29</i>
	Cu	<i>38</i>
	Cristal	<i>pobre</i>

Tabla 2.1. Características del polímero SU-8 serie 2000 de MicroChem

Además de las propiedades vistas en la tabla, que se refieren a propiedades térmicas y mecánicas, existen otras que se comentan a continuación: [6]

- Es un material biocompatible, lo que lo hace interesante en dispositivos de aplicaciones microfluídicas.
- Es hidrófobo, esta propiedad es importante a la hora de fabricar dispositivos microfluídicos ya que evita que el líquido se pegue a las paredes.
- Es de bajo coste, ventaja a la hora de realizar prototipos.
- Tiene buena resistencia mecánica y química. Es más rígido que el PDMS y por lo tanto se minimiza el riesgo de deformación de estructuras.
- No se le ha observado dominio plástico.
- Es transparente, lo que lo hace interesante a la hora de realizar dispositivos microfluídicos debido a la posibilidad de poder ver el camino que realizan los fluidos.

Como se ha comentado anteriormente, el SU-8 es un material ampliamente utilizado por los desarrolladores de dispositivos MEMS. Gracias a las diferentes técnicas de fabricación se pueden obtener estructuras complejas. Por ejemplo, jugando con la inclinación de la radiación ultravioleta se pueden conseguir estructuras inclinadas,



para lo cual es necesario tener un buen control de la inclinación del foco de luz. En la imagen 2.14 se puede observar un adaptador de fibra óptica realizado en SU-8 mediante la técnica de exposición inclinada.

Figura 2.14. Adaptador de fibra óptica de SU-8

También se presenta una estructura en forma de malla, en la que se detalla gráficamente la forma de realizar dicha estructura [7]. La estructura consiste en un homogeneizador de flujo.

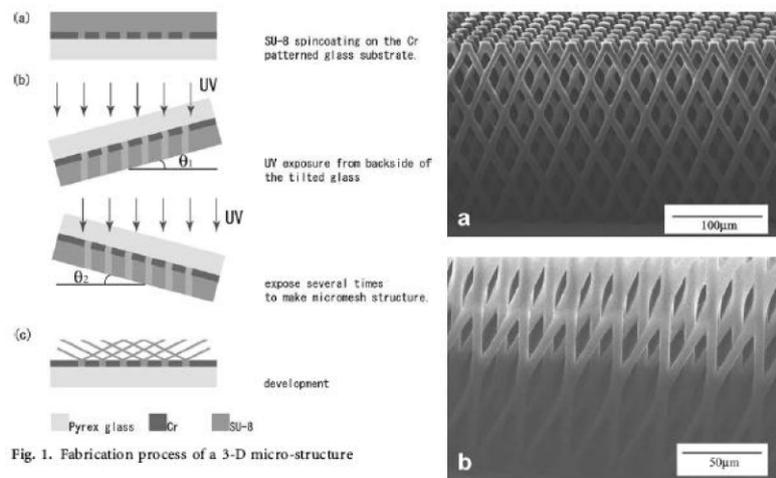


Figura 2.15. Estructura realizada en SU-8 con fotolitografía inclinada

Proceso clásico de fabricación

El proceso SU-8 consiste en hacer micropartes 3D de fotorresina usando un método automático y preciso. La estructura de SU-8 se logra con iluminación UV (~365 nm) sobre la resina epoxy a través de una máscara. Una de las ventajas que presenta este material es el rango de espesores que se puede lograr con un spin coater convencional (650 nm - 500µm) y perfiles de pared verticales a lo largo de toda la microestructura.

Los sustratos típicos para la realización de estructuras en SU-8 son:

- Silicio: Es un sustrato opaco a la radiación ultravioleta, por lo que el proceso de fabricación pierde versatilidad en el caso de que se desee crear un microdispositivo con partes a ambos lados de la oblea de silicio.
- Vidrio y Pyrex: Es el más común de todos los sustratos junto al silicio. Se trata de un sustrato transparente a la radiación ultravioleta y a la luz blanca, y por tanto es interesante a la hora de fabricar microdispositivos fluidicos.
- Cuarzo: Al igual que el vidrio es un material que se está usando como sustrato debido a su transparencia a los UV, pero de uso menos común.
- FR-4: Actualmente está creciendo una tendencia a fabricar microdispositivos de bajo coste realizados sobre FR-4 mediante tarjetas de circuito impreso (PCBs). Esto tiene la gran ventaja del bajo coste del sustrato, del amplio conocimiento que se tiene a la hora de manipularlo y la posibilidad de integración en un mismo dispositivo de fluidica y electrónica.

El proceso clásico de fabricación consta de los siguientes pasos:

a) Limpieza del sustrato.

En primer lugar, para eliminar toda la suciedad y restos de materia orgánica se limpia el sustrato con una solución que depende del tipo de sustrato.

b) Deshidratación

Este paso consiste en someter la oblea a una temperatura de 200 °C durante una hora para conseguir eliminar cualquier resto de humedad que quedase tras la limpieza.

c) Adhesión

La adhesión del SU-8 depende del material con el que se quiera pegar, por ejemplo, la adhesión con oro es mala, con níquel o nitruro de silicio es media y con silicio es buena. Para aumentar la adhesión del SU-8 al vidrio o a las obleas de silicio se usa un aditivo que mejora la adhesión. Una opción clásica era utilizar el clásico aditivo HDMS (Hexametildisilazane) que se usa para películas finas de fotorresinas en fabricación microelectrónica. Otra opción es el uso de una molécula epoxy de tal forma que tiene un grupo metilo que se ancla en el vidrio o el silicio, y por la otra cara un grupo epoxy reacciona con SU-8.

Como se señaló anteriormente, MicroChem con su nueva serie SU-8 2000, en la que se sustituye el GBL por ciclopentanona, ofrece una mejor adhesión para la mayoría de los materiales debido al cambio de dicho disolvente.

d) Deposición

El paso de la deposición es comúnmente conocido como spin coating y es la etapa mediante la cual se consigue una capa de SU-8 de espesor determinado. Dicho espesor se controla con tres parámetros: la viscosidad del SU-8 que se está tratando, el tiempo que dura la deposición y las revoluciones por minuto a las que se somete la oblea en la máquina utilizada para este fin, denominada spin coater. Normalmente, el fabricante del SU-8 proporciona las curvas espesor-rpm.

Figure 1. SU-8 2000 Spin Speed versus Thickness

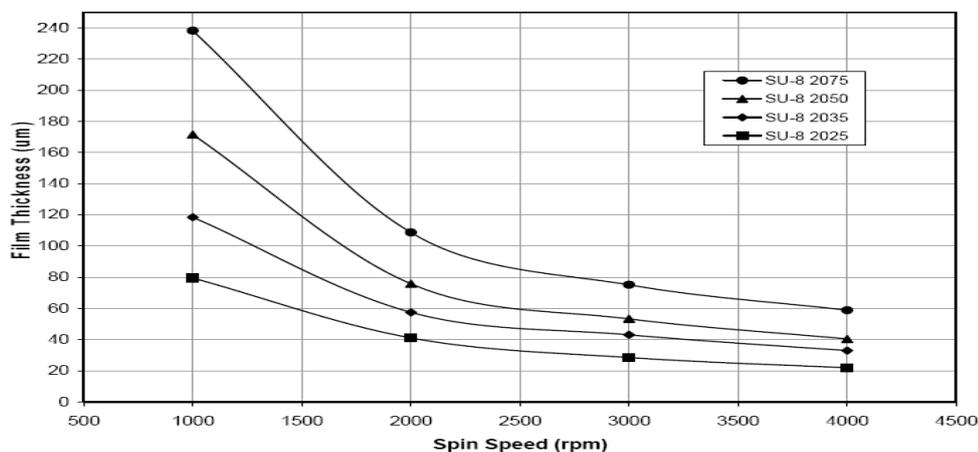


Figura 2.16. Espesor frente a revoluciones por minuto para diversos tipos de SU-8 2000. (Microchem, 2010)

La deposición de la resina en el spin coater depende del tipo de SU-8 que se vaya a utilizar. En el caso de SU-8 2005, cuya viscosidad es muy baja, se suele emplear una jeringa para transportar la resina de la botella al spin coater. Sin embargo algunos autores aconsejan dispensarla directamente desde la botella. [7]

e) Softbake

Este paso, también denominado prebake, se realiza para eliminar el disolvente del SU-8 consiguiendo de esta forma que solidifique. El softbake consiste en calentar el SU-8 en un horno o en un hotplate hasta conseguir eliminar el disolvente. La utilización de horno no es muy aconsejable debido a que el calentamiento se realiza desde todas las superficies hacia el interior, lo que provoca la aparición de una cáscara que no permite la salida de las burbujas de disolvente al exterior. Por ello, lo más recomendable es la utilización de hotplate, en cuyo caso el calentamiento se realiza desde abajo hacia arriba, de modo que dicho gradiente facilita la expulsión de las burbujas. Es muy importante que el hotplate esté totalmente plano, puesto que una pequeña inclinación hace que la resina fluya perdiendo de esta forma la uniformidad del espesor en la capa delgada.

Las temperaturas que se utilizan para realizar el softbake son 65°C durante 5 minutos y luego 95°C durante un tiempo que depende del espesor depositado. En este caso el fabricante proporciona una tabla de tiempos dependiendo de los espesores conseguidos, mostrada en la Figura 2.17. Cabe destacar que estos tiempos son referidos a deposiciones de SU-8 sobre silicio y en nuestro caso, que se depositará sobre FR-4, estos tiempos serán mucho mayores debido al aislamiento térmico que provoca este sustrato.

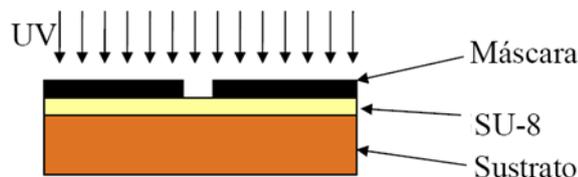
THICKNESS microns	SOFT BAKE TIMES	
	(65°C) minutes	(95°C) minutes
25 - 40	0 - 3	5 - 6
45 - 80	0 - 3	6 - 9
85 - 110	5	10 - 20
115 - 150	5	20 - 30
160 - 225	7	30 - 45

Figura 2.17. Tiempos de Softbake para diversos de espesores. (Microchem, 2010)

f) Exposición

La exposición consiste en iluminar la resina con rayos ultravioleta utilizando una máscara para definir qué parte de la deposición se quiere eliminar y cuál no. La exposición depende del tipo de sustrato y del espesor de la capa depositada. Dependiendo del sustrato con el que se trabaje se tienen varias opciones a la hora de realizar la exposición.

- Sustrato opaco

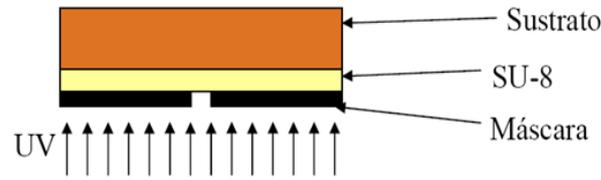


En este caso se expone la radiación ultravioleta sobre la máscara, dejando el sustrato por la cara opuesta.

Figura 2.18. Exposición por la cara superior de la oblea

- Sustrato transparente

En el caso del sustrato transparente se tienen más opciones de iluminación. Se puede iluminar por la cara de arriba como en el caso anterior, pero también por la cara inferior a través del sustrato. O utilizar una estrategia de iluminación que englobe las dos opciones. En el caso de realizar la exposición a través del



sustrato es necesario tener en cuenta los índices de refracción.

Figura 2.19. Exposición por la cara inferior de la oblea

Para conseguir mejorar la etapa de exposición de la oblea se suelen utilizar filtros que permiten obtener mejor acabado superficial en las paredes y evita la contaminación de la superficie por agentes ambientales, efectos que posteriormente son amplificados por el proceso.

En la Figura 2.20 se muestra la energía de exposición que ofrece Microchem en función del espesor de SU-8 depositado.

THICKNESS microns	EXPOSURE ENERGY mJ/cm ²
25 - 40	150 - 160
45 - 80	150 - 215
85 - 110	215 - 240
115 - 150	240 - 260
160 - 225	260 - 350

Figura 2.20. Tiempos de exposición UV para diversos de espesores. (Microchem, 2010)

g) Post Exposure Bake (PEB)

Durante este paso el SU-8 iluminado es polimerizado a través de un mecanismo de fotoampliación catiónica. La polimerización se puede llevar a cabo a temperatura ambiente, o bien para aumentar la velocidad del proceso, se puede realizar a 95°C durante un tiempo que depende del espesor de la capa. La principal ventaja de utilizar bajas temperaturas de PEB consiste en la consecución de tensiones residuales mucho menos importantes que en el caso de 95°C. El PEB puede realizarse en hotplate o en horno y también es importante que la superficie sea muy plana y horizontal.

Después del PEB, el sustrato debe ser enfriado lentamente sin aplicar choque térmico.

La idea principal es conseguir un cierto polimerizado antes de llegar a la temperatura primaria del PEB que está alrededor de 90°C, para prevenir así que fluya. Por ello, la estrategia común es calentar 5 minutos a 65°C y luego 15 minutos a 95°C. No obstante, el fabricante también ofrece una tabla en la que se aconsejan unos tiempos determinados en función del espesor de capa depositada.

THICKNESS	PEB TIME	PEB TIME
microns	(65°C)* minutes	(95°C) minutes
25 -40	1	5 - 6
45 - 80	1 - 2	6 - 7
85 - 110	2 - 5	8 - 10
115 - 150	5	10 - 12
160 - 225	5	12 - 15

* Optional step for stress reduction

Figura 2.21. Tiempos de Post Exposure Bake. (Microchem, 2010)

h) Grabado

La forma estándar de realizarlo es hacer un grabado por inmersión a temperatura ambiente, pero también existen otras técnicas tales como “spray development”. El tiempo de grabado depende del espesor de la capa depositada de SU-8 y puede encontrarse en las hojas de características del fabricante.

THICKNESS	DEVELOPMENT TIME
microns	minutes
25 - 40	4 - 5
45 - 75	5 - 7
80 - 110	7 - 10
115 - 150	10 - 15
160 -225	15 - 17

Figura 2.22. Tiempos de grabado para diversos espesores. (Microchem, 2010)

La sustancia que se utiliza para realizar el grabado se denomina PGMEA, propilen glicol metil eter acetona. Después del grabado se procede a realizar un aclarado con IPA (Isopropanil).

i) Hardbake

El Hardbake es un paso opcional que consiste en someter a la estructura a una temperatura de 200°C, durante un tiempo entre 5 y 30 minutos.

Con este procedimiento se ha explicado el proceso clásico de fabricación del SU-8, que será el que se lleve a cabo en el presente proyecto. De cualquier modo, con este proceso es difícil realizar estructuras complejas puesto que se trabaja con una sola capa. En esos casos se deberán utilizar procesos anidados para poder lograr varios niveles.

2.3.3 PDMS

El polidimetilsiloxano (PDMS) es un polímero ampliamente usado en MEMS para la realización de microsistemas fluidicos. Se trata de un polímero de baja densidad, 0,97 Kg/m³, y bajo módulo de Young (360 – 870 KPa). Presenta interesantes propiedades para la realización de dispositivos microfluídicos como son su hidrofobicidad y biocompatibilidad.

Puede ser tratado de varias formas, mediante grabado húmedo y mediante grabado por plasma para obtener formas determinadas. También se usa para moldeado, mediante el cual se realiza un molde en silicio para posteriormente rellenarlo de PDMS. Finalmente se retira el molde tras un tratamiento térmico y se obtiene la estructura PDMS, también conocido este método como “soft lithography”. [9]

El inconveniente de la utilización de PDMS radica principalmente en dichos procesos de fabricación, puesto que tanto los grabados húmedos como mediante plasma se realizan con máquinas muy especializadas y de muy alto coste. En el caso de realización del molde de silicio se tiene el mismo problema, puesto que para realizar la estructura en silicio es necesaria la utilización de tales máquinas, aunque se está usando cada vez más el SU-8 como sustituto de silicio para estas tareas. Además, para la realización de estructuras fluidicas, como microcanales, el PDMS presenta el inconveniente adicional de su baja rigidez y por tanto, la posibilidad de deformación debido a la fuerza que ejerce el fluido sobre las paredes. Tal inconveniente se salva con el uso de SU-8, un polímero de mayor rigidez que el anterior.

No obstante, el PDMS es un material muy empleado actualmente en la fabricación de microsistemas. Se muestran a continuación algunos proyectos fabricados en PDMS.

En el departamento de Micro y Nanotecnología de la Universidad Técnica de Copenhague en Dinamarca han desarrollado dispositivos microfluídicos realizados en PDMS. Para ello utilizaron moldes de SU-8 con la forma grabada de los canales microfluídicos de perfil rectangular y al depositar el PDMS encima y retirarlo quedaban grabadas en éste. El motivo de utilizar PDMS en vez de SU-8 es que pretendían realizar chips flexibles y que se adaptaran a superficies curvas. Por ello, debido a la elevada fragilidad que presenta el SU-8 con respecto al PDMS, decidieron utilizar este material. [10]

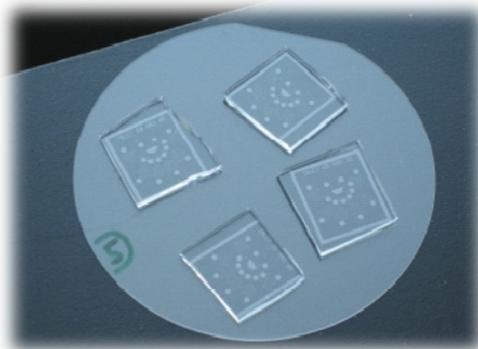


Figura 2.23. MEMS microfluídicos fabricados en PDMS

Otra de las ventajas que tiene el PDMS como material para la fabricación de microsistemas es las propiedades óptimas que posee para ser usado en aplicaciones bioMEMS. Al ser un material con un módulo de Young bajo, ajustable desde 360 a 870 KPa mediante el control de las proporciones de sus componentes, es extremadamente sensible a las tensiones externas y puede alcanzar grandes deformaciones. También es un material de bajo coste, ópticamente transparente y propicio para el uso de métodos de detección óptica. Además, es compatible con

los estudios biológicos, ya que es impermeable al agua, no tóxico para las células y permeable a los gases.

En el centro de Nano-bioMEMS del Instituto de Ciencia y Tecnología de Corea se ha desarrollado un micro-robot fabricado en PDMS capaz de medir las deformaciones que producen los cardiocitos. Éstas son células que se encuentran en el miocardio (tejido muscular del corazón) y son capaces de contraerse de forma espontánea e individual. Mediante este microsistema se pueden controlar las contracciones del músculo cardíaco y poder detectar así síntomas de una insuficiencia cardíaca. [11][12]

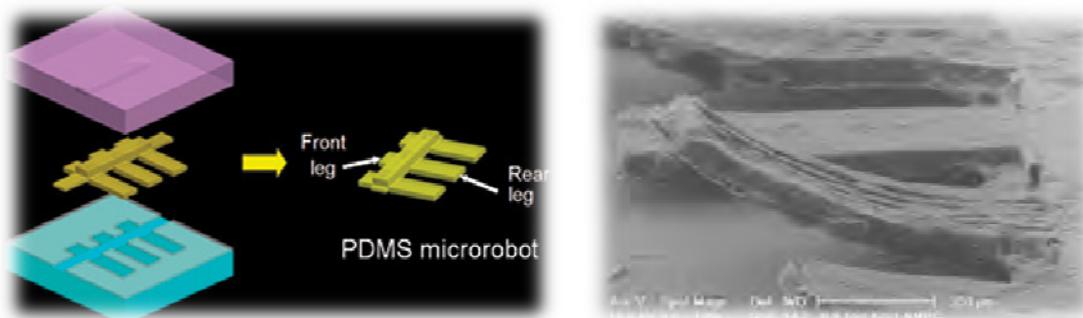


Figura 2.24. Microrobot de PDMS

En la Universidad de Illinois han desarrollado otra aplicación Bio-MEMS utilizando PDMS. Consiste en unas lentes de contacto que son capaces de monitorizar la presión ocular y enviar esos datos a un computador, donde un profesional puede revisarlos y administrar un tratamiento oportuno. Desgraciadamente la ciencia sólo puede retardar el desarrollo del glaucoma, ya que esta enfermedad ocular no tiene aún cura. [14]

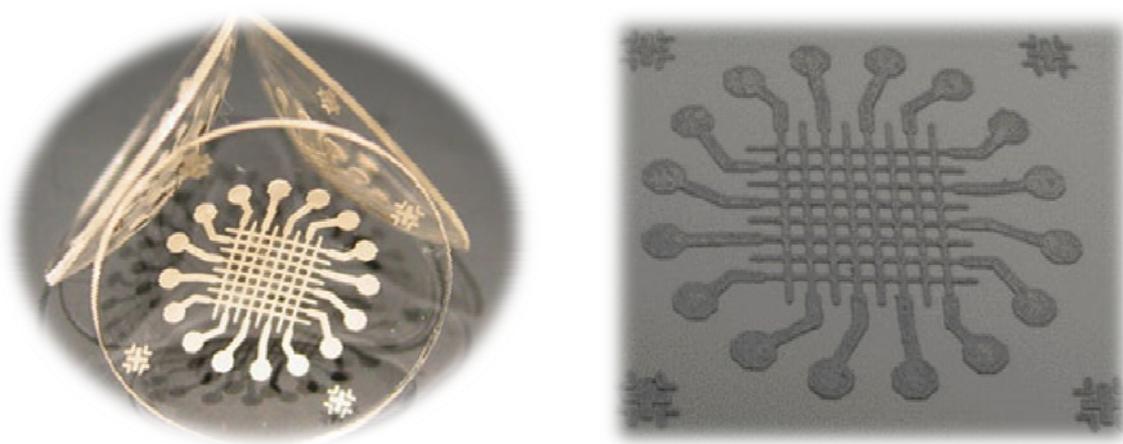


Figura 2.25. Lentes oculares de PDMS

Proceso de fabricación

La función del PDMS en el presente proyecto será servir de sustrato para las máscaras que se fabricarán en SU-8. De esta forma, se depositará PDMS sobre el sustrato, que será acetato, y tras curarlo se fabricará la máscara de SU-8 sobre el mismo. El motivo de realizar este proceso es aprovechar la poca adherencia existente entre el PDMS y el SU-8, de forma que cuando se realice la máscara de SU-8, se podrá despegar del PDMS sin que ésta se adhiera a la superficie y se pudiese romper.

Por ello, el proceso de fabricación que se describirá a continuación sólo contiene los pasos esenciales para conseguir que se cure el PDMS.

a) Preparar el PDMS

El PDMS no viene preparado directamente en un envase, como ocurre con el SU-8, sino que vienen dos sustancias separadas que al mezclarlas en las proporciones adecuadas dan lugar al PDMS. Estas sustancias son el agente curador y prepolímero, las cuales deberán ser depositadas y mezcladas en un recipiente con una relación en peso 1:10, respectivamente.

La mezcla se realizará en un recipiente abierto a la atmósfera y se deberá conseguir que sea lo más homogénea posible.



Figura 2.26. Mezcla del agente curador y prepolímero para obtener PDMS

b) Eliminación de burbujas

Tras mezclar el agente curador y el prepolímero, se introducirá el recipiente en una campana de vacío durante 40 minutos a una presión de 500 mbar para conseguir extraer las burbujas que se hayan generado en el interior del PDMS en la etapa de mezclado.

c) Deposición

Una vez preparado el PDMS, se depositará sobre el sustrato y mediante Spin Coater se obtendrá un espesor función de las revoluciones a las que se programe la máquina.

d) Calentamiento

Tras depositar el PDMS, sólo queda curarlo. Esta etapa se realizará en un Hotplate durante 20 minutos a la temperatura de 80°C. Tras este proceso el PDMS estará preparado para ser utilizado.

2.4 PCB-MEMS

Una tendencia cada vez más extendida en la fabricación de dispositivos MEMS es el uso de materiales que se consideraban exclusivos de circuitos impresos. Esto se debe a lo económico que resulta utilizar en el proceso de fabricación un sustrato de FR4 (Flame Retardants) en comparación con la tecnología convencional basada en silicio.

El sustrato de los PCBs está compuesto de FR4, una sustancia compuesta por fibra de vidrio y resina epóxica. Los PCBs estándar están compuestos por 8 capas de Prepeg (un material fibroso impregnado con materiales de resina reactiva) y una capa de cobre de 35 μm . Las capas de Prepeg y el laminado de cobre se prensan bajo presión y temperatura controladas para conformar el material final que se utilizará en los procesos de fabricación. [13]

La elección de FR4 como sustrato se debe a su bajo coste económico y su fácil adquisición. Pero sobretodo, se está expandiendo mucho gracias a su facilidad para ser mecanizado, permitiendo así la posibilidad de realizar prototipos en poco tiempo y con muy bajo coste. Además, se ha comprobado que es un buen sustrato para realizar deposiciones. Otra ventaja importante a la hora de utilizar este material es la eliminación de la etapa de *Wire Bonding*. Esto se consigue gracias a las técnicas de fotolitografía y deposición de materiales conductores que permiten establecer continuidad eléctrica entre los MEMS y el cobre permitiendo de este modo la posibilidad de realizar medidas de pequeños sensores utilizando herramientas clásicas.

Gracias a la baja conductividad térmica del FR-4 ($K \sim 0,3 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$) se consigue un sustrato muy aislante al paso del calor. Esta característica hace muy interesante el uso de este material para aplicaciones donde es necesario realizar transferencias de calor.

Otra ventaja de utilizar tecnología PCB-MEMS para la realización de dispositivos microfluidicos es su fácil integración en un solo módulo, donde la electrónica y fluidica se conectan directamente mediante pistas de cobre.

Por todas estas características mencionadas anteriormente, los PCB-MEMS están siendo muy desarrollados por investigadores para la fabricación de prototipos experimentales a bajo coste.