

Capítulo 2

Tecnología MEMS

Desde que el primer circuito integrado fue inventado por Jack S. Kilby en 1958, la miniaturización ha sido una importante fuente de investigación tanto en dispositivos electrónicos como no electrónicos. A finales de 1970, la miniaturización se extendió a dispositivos mecánicos que contenían también electrónica, surgiendo el término MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), más utilizado en el mercado americano y también llamado “Microsystems” en Europa. Durante las últimas dos décadas se ha fomentado ampliamente la investigación en el campo de los MEMS, siendo posible miniaturizar multitud de sistemas tanto mecánicos, fluídicos, electromecánicos o térmicos. En los 90, este campo comenzó a diversificarse en múltiples áreas, comercializándose MEMS para aplicaciones químicas, biológicas o médicas, e introduciéndose en diversos mercados, como el automovilístico y el espacial.

2.1 Introducción

Los MEMS o Microsistemas engloban el diseño, producción y aplicación de dispositivos cuyas dimensiones varían entre 1 y 300 μm . Aunque estos límites no estén claramente definidos, pudiendo existir MEMS que sobrepasan esa barrera, la mayoría de los fabricados actualmente poseen unas dimensiones típicas cercanas a ese orden [1]. Un famoso ejemplo se muestra en la figura 2.1, donde un microengranaje de aproximadamente 100 μm fabricado con tecnología MEMS es sujetado por una

hormiga [2]. Esta foto representa perfectamente la intrusión de artefactos fabricados por el hombre en la escala micrométrica, algo impensable hace escasas décadas.



Figura 2.1: Hormiga sujetando un micro-engranaje de níquel, realizado mediante un proceso LIGA (Siglas alemanas de “lithographie, galvanofornung, abformung”). La hormiga fue metalizada y colocada en una cámara de vacío para ser fotografiada mediante un microscopio electrónico.

Del mismo modo que los circuitos integrados, debido a la elevada capacidad de integración estos dispositivos se pueden fabricar en enormes cantidades, permitiendo reducir costes. A su vez, desde el mercado microelectrónica existe una tendencia clara por reducir el tamaño de los transistores, permitiendo aumentar la robustez, velocidad y precisión de los dispositivos. Aunque la miniaturización dificulte la fabricación desde un enfoque convencional, la complejidad se reduce gracias a los procesos de fabricación, que representan la evolución de las tecnologías de fabricación electrónica y su integración en todo el conjunto.

2.2 Primeros MEMS comerciales

Desde el descubrimiento del microscopio en el siglo dieciséis, el mundo micrométrico ha sido analizado y estudiado exhaustivamente. Aunque este invento permitió descubrir el protozoo, el movimiento Browniano o los cromosomas, por citar algunos ejemplos, los MEMS permiten actuar directamente a escala micrométrica, pudiendo realizar medidas y observaciones que de otro modo serían muy difíciles de realizar. Algunos ejemplos son el descubrimiento de la naturaleza cuántica de los

fonones o la caracterización del flujo de deslizamiento en gases. En otros casos, los avances provienen de una serie de éxitos industriales al aplicar MEMS, como es el caso de la activación de airbag.

Los MEMS para airbag, que aparecieron por primera vez en 1980, consisten en un sistema de escasos milímetros de largo integrado en una oblea de silicio, donde se incorporan componentes electrónicos y un dispositivo electromecánico capaz de detectar un impacto físico. La longitud de la zona de detección es de unos pocos cientos de μm y constituye el corazón del chip, formado por dos peines, uno móvil y otro fijo, entre los cuales varía la capacidad bajo los efectos de un impacto. La miniaturización de este elemento capacitor permite la creación de detectores muy rápidos y de elevada sensibilidad. Estos sensores inerciales permiten medir las aceleraciones tanto en variación de velocidad de traslación, como en variación de velocidad rotacional, recibiendo el primer grupo el nombre de acelerómetros, y el segundo giróscopos. Sin embargo, la principal ventaja de los MEMS reside en poder integrar dispositivos de detección, análisis y procesamiento de señal en el mismo chip. En la siguiente figura se muestra una foto de un acelerómetro basado en tecnología MEMS y empleado para la activación de airbags, junto con toda la electrónica necesaria.

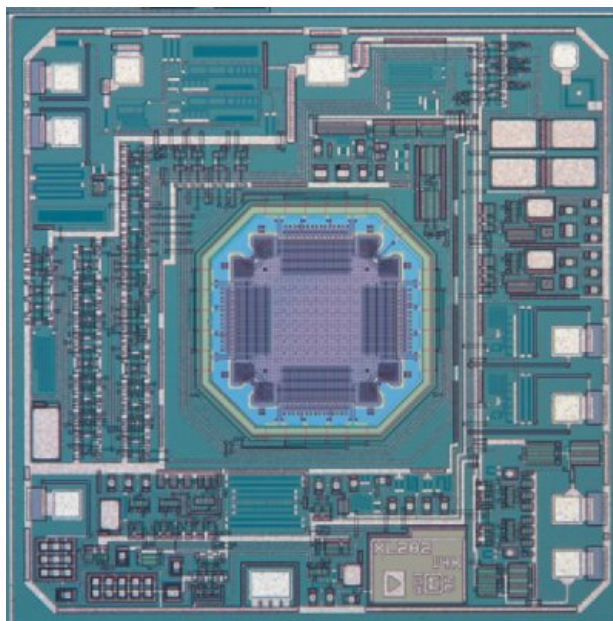


Figura 2.2: Dispositivo basado en tecnología MEMS que permite la detección y control de la activación del airbag.

El segundo mayor éxito industrial derivado de las ventajas de los MEMS llegó en 1990 al emplearlos en los inyectores de cartuchos de tinta. El inyector consiste en una cavidad microfabricada con silicio que sirve como depósito de tinta, un elemento calentador que provoca el movimiento del fluido y una boquilla. El fluido es empujado a través de la boquilla debido a la formación de una burbuja cerca del elemento calentador. Esta burbuja se forma debido a la vaporización de la tinta, empujando la misma hacia el exterior creando un chorro bajo la acción de la fuerza capilar. Las gotas creadas de este modo tienen un tamaño similar al del diámetro de la boquilla, el cual suele ser del orden de $50\mu\text{m}$. Estas gotas golpean el papel, formando el punto básico de tinta.

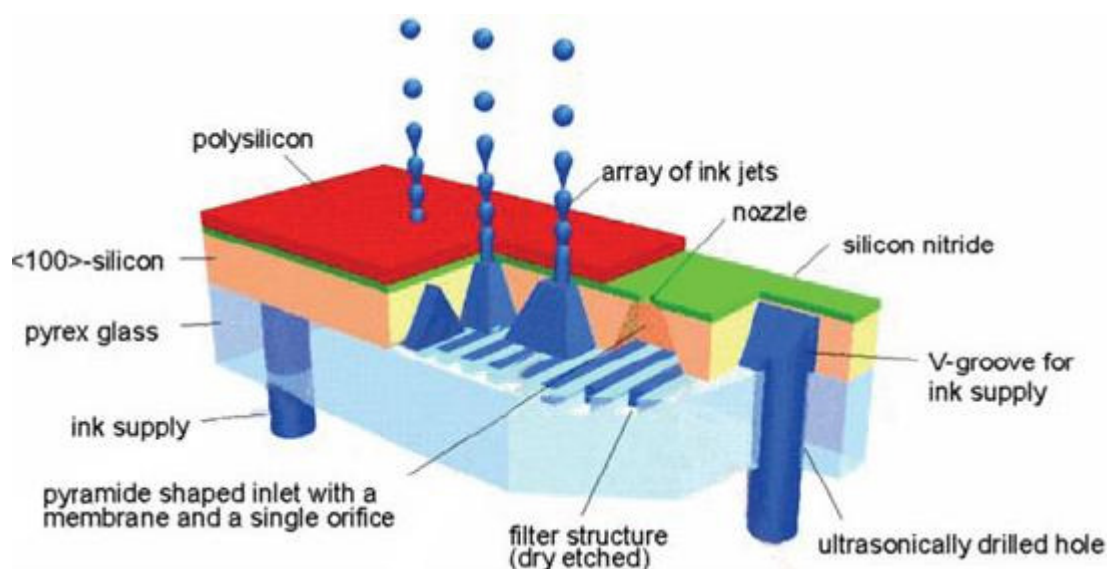


Figura 2.3: Dibujo que muestra los componentes fabricados mediante tecnología MEMS que forman un inyector de cartucho de tinta comercial.

2.3 Ventajas de la miniaturización

La razón por la que los MEMS se han expandido en múltiples disciplinas científicas se debe a las ventajas que ofrece escalar la tecnología al ámbito micrométrico. En primer lugar, al reducir el tamaño de un objeto se producen fenómenos de escala que afectan a los parámetros del dispositivo de forma distinta a como lo harían en escala macroscópica. A este fenómeno se le conoce como ley de escala [3]. Si reducimos un objeto en un factor de escala “L”, por ejemplo, todas las dimensiones de ese objeto cambiarán la misma cantidad cumpliendo una relación 1:L.

Sin embargo, mientras que la longitud del objeto cambiará en un factor L , su volumen se escalará como el producto de las tres dimensiones, resultando un escalado de L^3 . En la siguiente tabla se detalla el escalado de algunas magnitudes físicas que pueden afectar de forma significativa a un sistema:

Magnitudes y fuerzas físicas	Ley de escala
Masa	L^3
Volumen	L^3
Gravedad	L^3
Tensión superficial	L^1
Fuerza centrífuga	L^4
Fuerza electrostática	L^2
Fuerza elástica	L^2
Fuerza magnética	L^3 / L^4 (*)
Fricción viscosa	L^1
Velocidad de flujo	L^1
Tiempo de difusión	L^2

Tabla 2.1: Ley de escala para diferentes magnitudes y fuerzas físicas. (*)Esta fuerza depende de si existe un campo exterior o no, siendo L^3 y L^4 , respectivamente.

Observando estos escalados se puede comprobar fácilmente como el hecho de miniaturizar un sistema afecta de manera sustancial a las fuerzas que influyen sobre él y cómo se puede utilizar esta información en el diseño del dispositivo para nuestro propio provecho. Por ejemplo, la fuerza gravitatoria sería casi despreciable comparada con la tensión superficial, situación que sería lo inverso de lo que ocurre en el mundo macroscópico.

La miniaturización también implica un menor consumo de potencia, así como una mayor robustez y portabilidad frente a los sistemas convencionales, al estar fabricados en una estructura monolítica y encapsulados en ambientes controlados sin suciedad. Otra ventaja es la reducción considerable de los costes de fabricación por unidad, al producir en serie grandes volúmenes de dispositivos iguales. Este factor repercute no sólo en el ahorro económico, ya que dispositivos más pequeños necesitan menos

material para fabricarse, lo que a su vez reduce el volumen de desechos. Al replicar múltiples unidades con propiedades iguales o semejantes, obtenemos una elevada repetitividad, pudiendo aumentar la fiabilidad en el sistema final mediante múltiples dispositivos que proporcionen medidas redundantes.

Por otra parte, al contar con dispositivos de tamaño tan reducido, el tiempo de respuesta es mucho menor al apenas influir la fuerza de gravedad, como ocurre con el caso de los acelerómetros. En cuanto a sensores y actuadores, este factor se aprecia en una mayor sensibilidad y precisión.

2.4 Desarrollo y aplicaciones

Actualmente, el volumen económico de la actividad relacionada con los MEMS se estima en varias decenas de billones de dólares. En USA, existían 1,6 MEMS de media por persona en el año 2000, y se estima que actualmente ese número ha aumentado hasta 6. Existen multitud de empresas relacionadas con los MEMS, tanto de un modo directo como aprovechando los beneficios, el potencial y las ventajas de ofrece desarrollar esta nueva tecnología en los múltiples ámbitos de aplicación que abarca. La siguiente tabla enumera estas disciplinas, sus correspondientes aplicaciones en tecnología MEMS y algunas empresas involucradas [4].

Ámbito tecnológico	Dispositivos típicos / Aplicaciones	Compañías
Medidas de inercia	Acelerómetros, sensores de velocidad, detectores de vibración	Boeing, Motorola, Delco, Honeywell
Microfluidos y ensayo/procesado químico	Lab-on Chip, sensores químicos, controladores de flujo, microagujas, microválvulas	Motorola, Hewlett Packard, Canon, Epson, Agilent
MEMS Ópticos (MOEMS)	Displays, conmutadores ópticos, óptica adaptable	Northrop-Grumman, Lucent, Honeywell
Medidas de presión	Sensores de presión para automoción, aplicaciones médicas e industriales	Goodyear, Delco, Motorola, Ford, Siemens, TI
Tecnología RF (RFMEMS)	Conmutadores RF, filtros, capacitores, inductores, antenas	Rockwell, Hughes, ADI, Raytheon, TI
Otros	Actuadores, sensores de humedad, almacenamiento de datos, sensores de torsión, componentes microsatelitales	Boeing, HP, Siemens, Honeywell, Northrop Grumman, IBM

Tabla 2.2: Compañías involucradas en la tecnología MEMS en los Estados Unidos.

Uno de los campos de aplicación donde más se está investigando y desarrollando actualmente es la microfluídica, y más concretamente orientada a aplicaciones bioquímicas y médicas, formando un área conocida como BioMEMS [5]. Dado que el dispositivo presentado en este trabajo se englobaría dentro de este ámbito, en posteriores capítulos se tratará con mayor detenimiento.

También son de destacar las aplicaciones en el campo de la automoción, como comentamos anteriormente, o la industria aeroespacial, donde la elevada resistencia a vibraciones, golpes y radiaciones que presentan los MEMS los hace ideales para emplearlos como giróscopos, microturbinas, sensores de presión, etc. En el área de la óptica, existe una importante línea de investigación centrada en la realización y el desarrollo de dispositivos que trabajan exclusivamente en el dominio óptico, sin necesidad de conversiones óptico-electrónicas, con las pérdidas y coste que conllevan.

Podemos decir por tanto que la fabricación basada en tecnología MEMS está creando nuevos productos que son más pequeños, de mayor precisión y menor coste, a la vez que proporciona la posibilidad de fabricar dispositivos que no se podrían llevar a cabo de otro modo. Como se aprecia en la Fig. 2.4, aunque no todos los microsistemas fabricados tienen una aplicación práctica, permiten explorar nuevos conceptos en el campo de la miniaturización. Actualmente, la tendencia consiste en investigar aplicaciones concretas en vez de crear nuevos sistemas, dando lugar a una gran diversidad de MEMS en múltiples campos y disciplinas, como muestra el crecimiento en el número de patentes generadas en este ámbito.

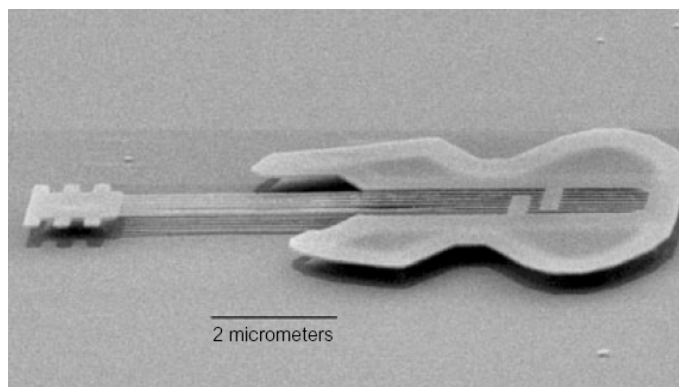


Figura 2.4: Microguitarra con nanocuerdas de 30nm de diámetro, fabricada en Cornell. Si pudiera ser tocada, produciría un sonido en el dominio de los MHz.