

CAPÍTULO 1

LOS MICROSISTEMAS ELECTRO MECÁNICOS (MEMS)

El acrónimo MEMS resulta de las siglas en inglés Micro Electro-Mechanical Systems, adoptado por primera vez por un grupo de aproximadamente 80 aficionados, en Estados Unidos, a finales de 1980 [1]. En Europa, esta tecnología es llamada Microsystems Technology (MST).

Los Microsistemas Electro Mecánicos MEMS se refieren a dispositivos que tienen características especiales. Sus dimensiones son menores a 1 mm pero mayores a 1 μm . Además, combinan componentes eléctricos y mecánicos, todo integrado en su mayoría, sobre una capa de sustrato de silicio, lo que hace posible el desarrollo de sistemas completos en un solo circuito para el desempeño de tareas específicas, con aplicaciones en muy diversos campos como las comunicaciones, la industria automotriz, las ciencias biológicas, la medicina, la instrumentación, el control, la robótica, y la industria aeroespacial, entre otras.

El desarrollo de los MEMS es totalmente multidisciplinario, pues las aplicaciones de estos dispositivos son tan amplias como campos de estudio existen. Esto se debe a que esta nueva tecnología brinda características superiores:

- Debido a sus dimensiones y tipo de material empleado para su construcción poseen bajo peso, alta resistencia, estabilidad térmica, pequeño tamaño y volumen
- Poseen altos niveles de desempeño, en cuanto a velocidad de respuesta, precisión, eficiencia y exactitud,
- Alto nivel de integración y seguridad,
- Bajo costo de producción por unidad,
- Bajos niveles de consumo de energía,
- Larga durabilidad,
- Sin costos de mantenimiento.

Así que, la tecnología MEMS, promete revolucionar casi cada producto, reuniendo la micro electrónica basada en el silicio con la micro mecánica, por lo

que, la micro ingeniería hará posible la realización de sistemas completos en un solo circuito.

La Micro electrónica puede ser pensada como el "cerebro" de un MEMS, permitiendo que la capacidad de toma de decisiones aumente en estos nuevos productos, pues los micro sensores recogen información del entorno a través de la medición de parámetros mecánicos, térmicos, biológicos, químicos, ópticos, magnéticos, etc. Una vez procesada dicha información, el sistema responde a través de los micro actuadores de movimiento, posicionamiento, bombeo, filtrado, según sea el caso.

MEMS es la tecnología que permitirá el desarrollo de productos inteligentes, aumentando la capacidad de cómputo micro electrónico con la ayuda de micro sensores y micro actuadores, que harán más amplio el espectro de nuevos diseños y aplicaciones.

1.1 Breve Historia de los MEMS

En 1959, durante la reunión anual de la "American Physical Society", el físico Richard Phillips Feynman, con su célebre plática – "There's Plenty of Room at the Bottom: an Invitation to Enter a New Field of Physics" [2], abrió un nuevo camino para la investigación en el campo de la Física hacia escalas muy pequeñas (micro y nano), lanzando dos retos a la comunidad: el primero, la construcción de un motor eléctrico que fuera tan pequeño que cupiera dentro de un cubo de 1/64 de pulgada. Este premio de \$1,000 dólares ofrecidos por Feynman, lo ganó el ingeniero eléctrico William McLellan en noviembre de 1960. El segundo reto premiado con la misma cantidad de dinero, fue otorgado a Tom Newman en 1985, estudiante graduado de la Universidad de Stanford, por ser la primera persona en escribir la página inicial del libro de Charles Dickens "A Tale of Two Cities", sobre la cabeza de un alfiler utilizando un haz de electrones [3].

A partir de entonces, muchas universidades y laboratorios corporativos, e incluso industrias de producción en línea, iniciaron investigaciones para el desarrollo de los MEMS.

Sin embargo, no fue hasta 1964 que el primer dispositivo (transistor de compuerta resonante) tipo MEMS fue reportado oficialmente por H. C. Nathanson y sus colegas de Westinghouse [4].

Después de seis años, con la invención del microprocesador se desataría el interés por el desarrollo de nuevas tecnologías de fabricación como la litografía, que más tarde aportarían un gran impacto en los métodos utilizados para la fabricación de MEMS.

El primer acelerómetro tipo MEMS fue desarrollado en 1979 por los investigadores de la Universidad de Stanford. Este tipo de micro acelerómetro se convertiría en el primer dispositivo MEMS comercialmente exitoso. En el año de 1998, cerca de 27 millones de micro acelerómetros fueron comercializados.

El interés por el desarrollo de la nano y micro tecnología se incrementó gracias a las aportaciones realizadas durante el periodo de 1980 a 1990. En 1982, el desarrollo del microscopio de escaneo por efecto túnel (scanning tunneling microscope), seguido por el desarrollo del microscopio de fuerza atómica (atomic force microscope) en 1986, hicieron posible la observación a nano y micro escalas.

En 1991, el descubrimiento del nanotubo de carbón y la nueva técnica para la producción de nanotubos desarrollada por Smalley en 1996, fueron los descubrimientos más importantes de este periodo.

En la actualidad, la variedad de dispositivos MEMS y sus aplicaciones se sigue incrementando continuamente.

1.2 Tecnologías de Micro fabricación de MEMS

Existen dos componentes básicas de los MEMS y de la micro ingeniería: la micro electrónica (fabricación de circuitos integrados) y el micro maquinado (fabricación de micro estructuras de movimiento).

La electrónica de los circuitos integrados (CI) se puede fabricar usando métodos ya bien conocidos como CMOS y VLSI [5]. Sin embargo, para la fabricación de micro estructuras tridimensionales móviles, es necesario emplear otro tipo de tecnología. Dicha tecnología debe ser confiable y debe garantizar un bajo costo de producción.

Como ya es bien sabido, la materia prima para la fabricación de la electrónica es el dióxido de silicio, el cual, debe ser procesado para obtener obleas de silicio ultra puro. Las obleas tienen el grosor deseado y son pulidas a la perfección mediante técnicas químicas y mecánicas [5].

Las propiedades eléctricas y mecánicas de cada capa dependen de la orientación del silicio poli cristalino, de la concentración y tipo de impurezas utilizadas para el dopaje. Las principales etapas del proceso para la fabricación de circuitos integrados son: difusión, oxidación, deposición, enmascarado, litografía, grabado o ataque, dopado, deposición dieléctrica y metalización.

Los procesos utilizados hasta ahora para la fabricación de CI no cuentan con técnicas para la fabricación de micro estructuras móviles en tres dimensiones, por lo que, es necesario agregar nuevas técnicas a dichos procesos. Estas nuevas técnicas utilizadas para la fabricación de MEMS se llaman Micro maquinado de volumen y Micro maquinado de superficie y son compatibles con los procesos convencionales de fabricación de los CI.

1.2.1 Micro Maquinado

El micro maquinado es la tecnología de grabado que permite la fabricación de micro estructuras móviles de tres dimensiones, se basa en las tecnologías de fabricación para CI. Esta técnica puede grabar diversos materiales como polisilicio, óxidos, nitruros, vidrios, polímeros, materiales orgánicos, compuestos de las familias III y IV, y metales.

El micro maquinado se puede realizar tanto con grabado húmedo como con grabado seco [5].

1.2.1.1 Micro maquinado de volumen (Bulk Micromachining)

El Micro maquinado de volumen es una extensión de la tecnología de fabricación de los CI y permite la fabricación de estructuras móviles de tres dimensiones. El Micro maquinado de volumen de silicio utiliza técnicas de grabado seco y grabado húmedo en conjunto con máscaras de grabado (etch masks) y regiones de detención (etch stops) para la construcción de estructuras completas de los dispositivos MEMS sobre el sustrato de silicio, entre las que se incluyen: vigas voladizas, agujeros, surcos, formas piramidales y membranas.

Las dos razones más importantes que hacen de este proceso una tecnología de fabricación viable son:

1. Los grabantes utilizados para el grabado anisotrópico húmedo, como el hidróxido de potasio (KOH), realizan el grabado a lo largo de los planos definidos por el cristal de silicio (silicio mono cristalino).
2. Es posible la utilización de máscaras de grabado para proteger las estructuras que se desean conservar y de esta forma realizar un grabado selectivo; así mismo, se pueden hacer grabados de películas delgadas de metales como oro y cromo.

El inconveniente del Micro maquinado de volumen es que la geometría de la micro estructura queda definida por la orientación de los átomos de la estructura del silicio [6].

1.2.1.2 Micro maquinado de superficie (Surface Micromachining)

El micro maquinado de superficie consiste en la deposición, litografía y grabado por capas de materiales sobre el sustrato para la formación de micro estructuras. Las capas que se depositan pueden ser estructurales o de sacrificio. Las capas estructurales son las que tendrán movimiento y las capas de sacrificio pueden ser o no removidas para la liberación de las capas estructurales. Las capas estructurales tienen un grosor que va desde 0.1 μm hasta 100 μm , y se fabrican con materiales como: nitruros, polímeros, polisilicio y metales; siendo el polisilicio el más estable y resistente [6]. El material principal para la fabricación de las capas de sacrificio es el vidrio de fosfosilicato PSG.

El proceso en general de micro maquinado de superficie contiene tres tipos de elementos:

1. Un elemento de sacrificio
2. Un elemento de micro estructura
3. Un elemento aislador

El micro maquinado de superficie a diferencia del micro maquinado de volumen, permite la fabricación de micro estructuras más complejas.

1.2.1.3 Proceso LIGA

Como es de imaginarse, el micro maquinado requiere de un proceso de litografía muy fino y selectivo para poder realizar los moldes de las micro estructuras.

El proceso LIGA es el acrónimo alemán de X-ray Lithographie, Galvanoformung y Adformtechnik, es decir, litografía, electroformación y moldeado. Este proceso fue desarrollado en Alemania inicialmente fuera de la industria de los semiconductores, para la producción en masa de boquillas de tamaño micrométrico para enriquecer el Uranio 235, esto en la investigación de Física Nuclear [7].

Hoy en día, esta tecnología es utilizada para la producción de moldes micrométricos que permiten la construcción de las micro estructuras que conforman a los MEMS.

LIGA combina el proceso antiquísimo de moldes de cera conocido desde los egipcios con los procesos actuales de litografía de rayos X y la electrodeposición.

Este proceso consiste en poner una capa gruesa de material resistente a los rayos X con un a rango de grosor de micrómetros hasta milímetros. Después de haberse expuesto a radiación con rayos X, se obtiene una estructura resistente, tridimensional, o molde. Posteriormente, a través de la electrodeposición se rellena dicho molde con el material que se requiere para la micro estructura, este material puede ser: plástico, metal, cerámicas y sus combinaciones. Como producto final se obtienen las micro estructuras que conforman al Microsistema Electro mecánico (figura 1.1) [7].

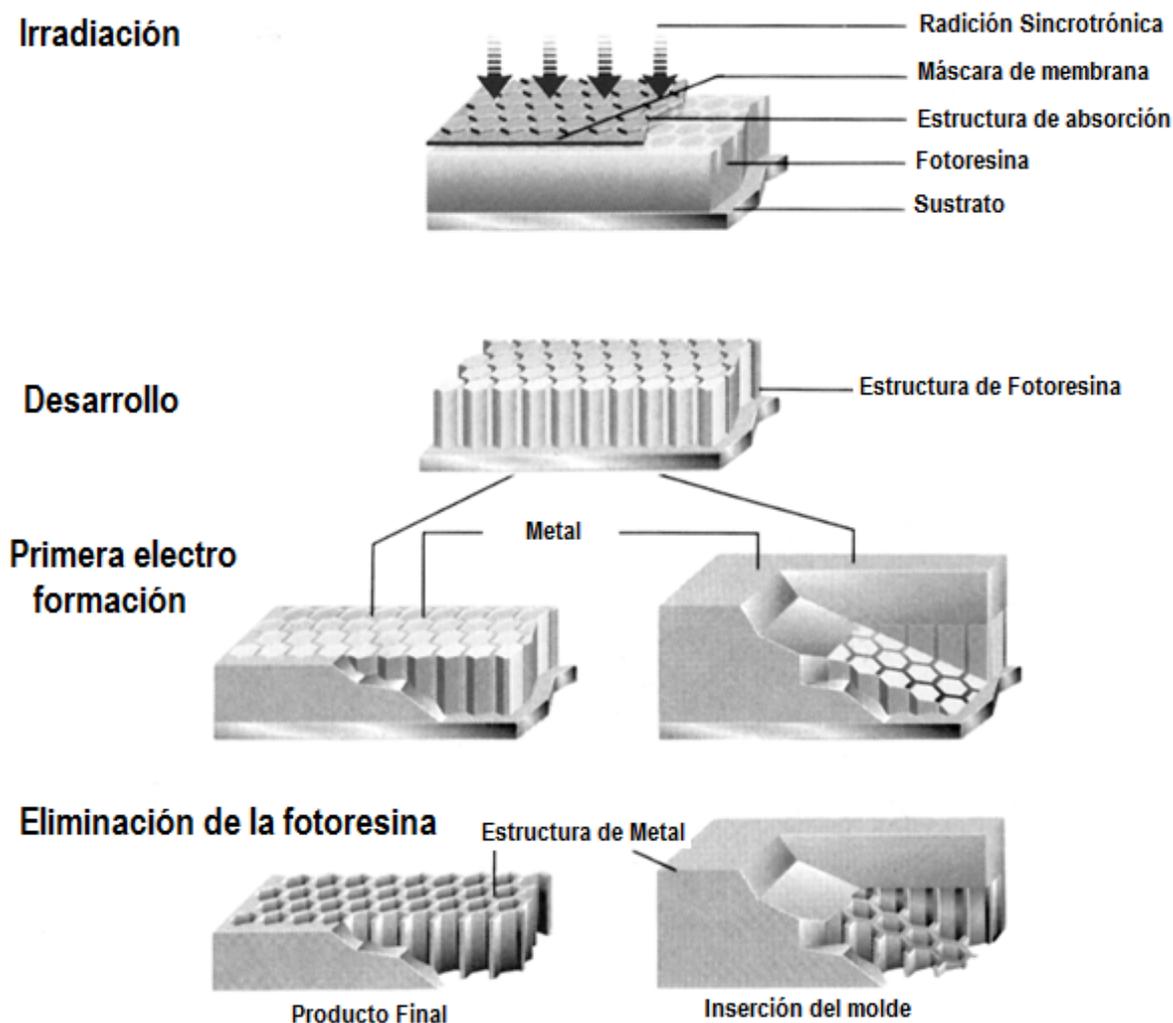


Figura 1.1. Esquema del proceso LIGA.

LIGA ofrece una muy amplia variedad de formas tridimensionales de micro y sub micro escalas, que también pueden ser utilizadas para la producción del empaquetado de los MEMS.

Actualmente, este proceso sigue en investigación sobre todo para el perfeccionamiento y alta resolución de las micro estructuras.

1.2.1.4 Proceso PolyMUMP's

PolyMUMP's fue desarrollado en el Centro de Sensores y Actuadores de Berkeley BSAC (*Berkeley Sensors and Actuators Center*) de la Universidad de California, durante las décadas de 1980 y 1990. El proceso salió al mercado en 1992 y desde entonces es el proceso estándar de micro maquinado de superficie para muchas industrias, ya que permite diseñar y probar los prototipos, acelerando sus procesos de desarrollo. A la fecha, el proceso ha

sido modificado para incrementar su flexibilidad y versatilidad en un ambiente multiusuario [8].

PolyMUMPs es un proceso de micro maquinado de superficie realizado sobre una oblea de silicio de 100 mm de diámetro, tipo n (100) y con resistividad de 1-2 Ωcm . Enseguida, se depositan 600 nm de nitruro de silicio $\text{NB}_{3\text{B}}\text{SiB}_{4\text{B}}$ que actúa como aislante eléctrico entre la oblea y el circuito que se formará. Una vez que se ha depositado la capa aislante, se hace un depósito de 500 nm de polisilicio (Poly0), la cual es una capa fija al plano de tierra; dicha película es modelada mediante fotolitografía (primera máscara o nivel POLY0), y grabada para crear la estructura deseada.

La siguiente capa es una capa de sacrificio de 2.0 μm de PSG (primer óxido). Esta capa es removida al final del proceso. Dicha capa también es modelada por fotolitografía (nivel de máscara DIMPLE) y grabada con una profundidad de 0.75 μm , con el propósito de crear *dimples*, que son pequeñas protuberancias para ayudar a reducir los voltajes de actuación o fenómenos de pegosidad entre las estructuras (*stiction*). Después del modelado y grabado de los *dimples*, se hace otro modelado (nivel de máscara ANCHOR1) con la finalidad de unir la próxima capa estructural (Poly1) al nitruro o al primer polisilicio (Poly0), posteriormente se hace el grabado.

El siguiente depósito es la primera capa estructural, se depositan 2.0 μm de polisilicio (Poly1), se modela con procesos de fotolitografía (nivel de máscara POLY1), y se graba para crear el patrón deseado. Después de la primera capa estructural, se deposita la segunda capa de sacrificio: 0.75 μm de PSG (segundo óxido). Esta capa es modelada utilizando dos niveles diferentes de máscara. El primer modelado (Nivel de máscara POLY1_POLY2_VIA), tiene el objetivo de unir la siguiente capa estructural (Poly2) al segundo polisilicio (Poly1), después del proceso de fotolitografía se hace el grabado correspondiente. El segundo modelado (Nivel de máscara ANCHOR2), tiene el objetivo de unir la siguiente capa estructural (Poly2) al nitruro o al primer polisilicio (Poly0), después del proceso de fotolitografía se hace el grabado correspondiente.

Una vez que se han grabado los espacios para unir o anclar las capas estructurales, se depositan 1.5 μm de polisilicio como segunda capa estructural

(Poly2), se modela la película (nivel de máscara POLY2) y se graba para lograr la estructura deseada. El último depósito del proceso es una capa de 0.5 μm de oro (metal), que sirve para: unir otros dispositivos, conectarlo eléctricamente o como superficie altamente reflectante. La oblea es modelada litográficamente (nivel de máscara METAL) y posteriormente, se deposita y modela el oro. Finalmente, se liberan las dos capas de sacrificio de PSG y la estructura queda totalmente formada [8].

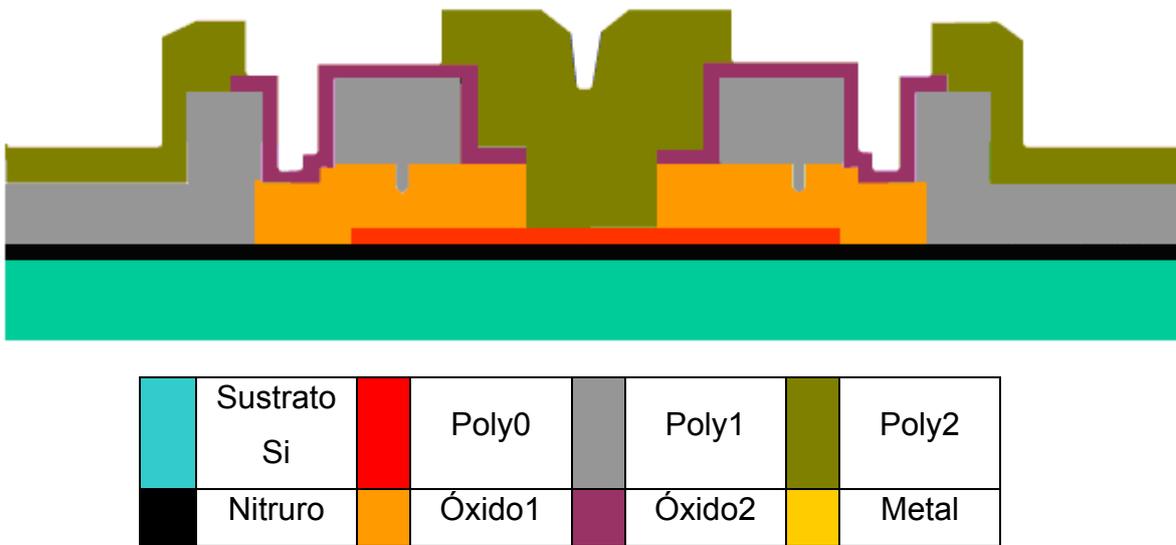


Figura 1.2. Estructura PolyMUMPS's antes de la liberación de las capas de sacrificio.

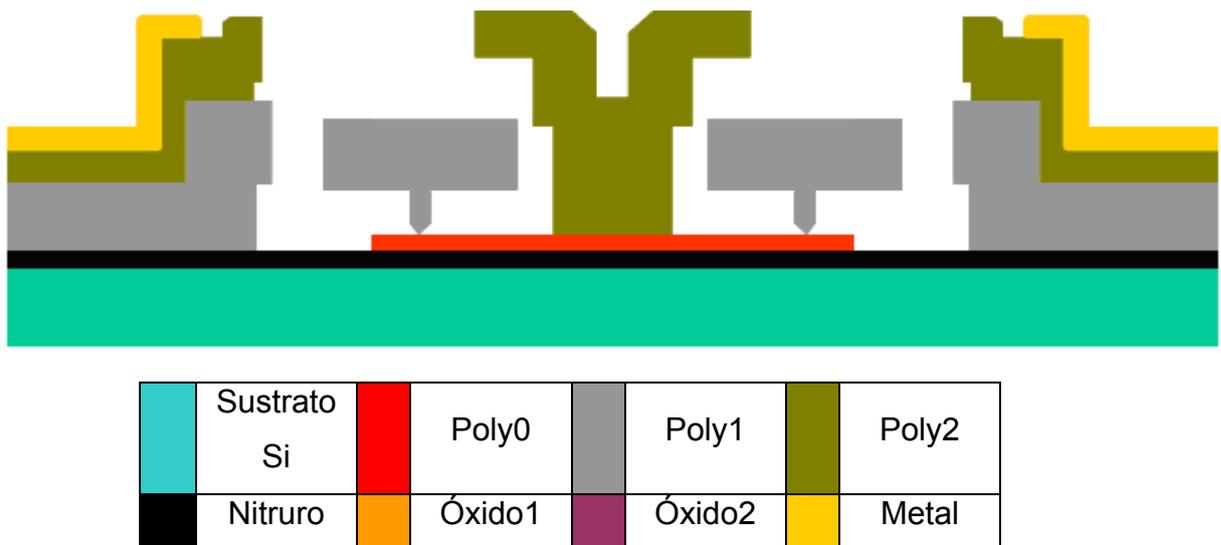


Figura 1.3. Estructura PolyMUMPS's liberada y con depósito de oro.

1.3 Aplicaciones de los MEMS

Hoy en día, los dispositivos MEMS han ganado terreno en muchas aplicaciones en distintos campos. Entre estas aplicaciones se pueden mencionar la industria aeroespacial, de las comunicaciones, biomédica, robótica, entretenimiento y la automotriz.

Sin embargo, las aplicaciones de la tecnología MEMS con más experiencia son:

- Tecnología Automotriz (micro sensores de rotación para sistemas GPS y micro acelerómetros para disparar las bolsas de aire).
- Electrónica de entretenimiento (Procesadores Digitales de Luz DLP para proyectores y pantallas de alta definición).
- Telecomunicaciones (interruptores de alta frecuencia e interruptores ópticos).

Los dispositivos MEMS más empleados en los distintos campos de aplicación son los sensores inerciales, tales como el acelerómetro y el giroscopio. Por lo que, en la siguiente sección se describen con más detalle las distintas aplicaciones de los sensores inerciales tipo MEMS.

1.3.1 Aplicación de los sensores inerciales MEMS

El acelerómetro es un sensor inercial capaz de detectar vibraciones, golpes e inclinaciones en varias direcciones, dependiendo del número de ejes. Su rango se mide en g's (gravidades). Los acelerómetros de bajas g's se aplican para medir vibraciones e inclinaciones, como en el sistema de frenos ABS (*Antilock Breaking System*) y en la suspensión electrónica controlada (*Electronically Controlled Suspension*). Los acelerómetros de g's grandes, se usan para la detección de colisiones (usado en los sistemas de bolsas de aire).

El micro acelerómetro es el elemento central en el sistema de disparo de las bolsas de aire, ya que proporcionan una señal eléctrica proporcional a la aceleración que experimenta el vehículo. Así que, cuando se presente una colisión, existirá una desaceleración brusca, que será detectada por el acelerómetro y enviará la señal de control que activa las bolsas de aire.

Entre los nuevos proyectos que se están desarrollando para la industria automotriz, está el monitoreo de la presión de los neumáticos, llamado TPMS (*Tire Pressure Monitoring Systems*). Este sistema requiere de un sensor de presión y un acelerómetro. Con dicho sistema se podrían evitar los accidentes debidos a la presión baja en los neumáticos. En Estados Unidos a partir de Septiembre del 2007, es obligatorio que todos los vehículos nuevos vengan equipados con dicho sistema [9].

Los acelerómetros, también se pueden instalar en cada uno de los ejes (X, Y, Z) en los vehículos, o bien, en cualquier dispositivo móvil, portafolios, maletas, etc. para detectar cualquier movimiento no permitido cuando se accione el sistema de seguridad y evitar el robo del artículo en cuestión.

Otra aplicación es el programa de estabilidad electrónico (*Electronic Stability Program*), el cual consiste en detectar la diferencia entre los controles de conducto contra la respuesta del vehículo. En caso de haber una diferencia; se le aplica el freno adecuado a cada una de las ruedas para mantener la trayectoria correcta. Esto es una combinación de varios subsistemas que se han desarrollando en los vehículos (ABS = *Anti-lock Brake System*, EBD= *Electronic Brake force Distribution*, TCS = *Traction Control System*, AYC= *Active Yaw Control*).

En el campo de los dispositivos móviles, la combinación de acelerómetros MEMS y el software adecuado, por ejemplo, Scalable Vector Graphics, eliminan la necesidad de utilizar interruptores y botones, para deslizarse y navegar en páginas webs y libros electrónicos, resolviendo de forma muy efectiva el problema de “botón pequeño-dedo grande” de muchos usuarios. Esto lo hace utilizando un giroscopio que actúa como sensor de inclinación/movimiento, el cual puede detectar los movimientos humanos usándolos para orientar la posición de salida de las imágenes en la pantalla; de esta forma el usuario podrá manipular la orientación de las mismas con solo girar o inclinar el dispositivo móvil.

Otra aplicación es la brújula, empleada en los dispositivos móviles, que cada vez es más precisa y amigable en su lectura, pues a través de un módulo inercial que contiene un magnetómetro y un acelerómetro, hace posible que el usuario pueda leer la brújula sin importar la posición o inclinación del dispositivo.

Por otro lado, las empresas de telefonía móvil que tengan como objetivo el mercado de los adolescentes necesitan implementar interfaces más amigables para los video juegos, esto es, que a través de acelerómetros y giroscopios sean detectados los movimientos de la mano y trasladados a acciones en el video juego.

Los teléfonos celulares más recientes ya vienen equipados para capturar fotografías y videos, en los cuales los giroscopios MEMS realizan el trabajo de estabilizar las imágenes de forma muy efectiva, aumentando la calidad de las mismas, sobre todo, por el espacio y capacidad de energía reducidos con el que cuentan los teléfonos celulares.

En general, los sensores inerciales MEMS son esenciales en los videojuegos y en el emergente mercado de los juguetes robóticos. Los más novedosos controles de videojuegos, además de ser inalámbricos, detectan todos los movimientos de la mano, los que se trasladan al video juego de realidad virtual. En los juguetes robóticos son necesarios para realizar movimientos precisos de acuerdo a la orientación y ubicación brindada por los giroscopios y acelerómetros.

Así mismo, todos los dispositivos móviles actuales: computadoras portátiles, computadoras de bolsillo, PDA's, reproductores de MP3, centros de entretenimiento portátiles, utilizan discos duros (HDD) para el almacenamiento de información. Esto implica un problema, ya que con frecuencia se caen y al caerse la cabeza del disco duro puede deslizarse y borrar la información, imágenes, música, películas etc., así que, con un acelerómetro MEMS es posible ofrecer una solución adecuada, es decir, una característica de protección. Cuando el dispositivo móvil está cayendo, el acelerómetro detecta la gravedad cero y da la señal para retirar la cabeza del disco duro.

En el campo de la electrónica para telecomunicaciones, la tecnología MEMS ha sido especialmente importante para el desarrollo de nuevos diseños de elementos específicos que permiten el mejor desempeño de circuitos necesarios para la transmisión. Algunos de dichos elementos son: inductores, capacitores, resonadores, y más recientemente, cantilevers estos son utilizados en la construcción de avanzados interruptores accionados electrostáticamente, los cuales, reconfiguran radios y antenas, y así se podrán controlar apropiadamente las antenas con longitudes variables para teléfonos

celulares, permitiendo transmisión y recepción máximas conforme el teléfono celular se mueve de un área de cobertura hacia otra, independientemente de los límites geográficos y diferencias en los estándares de uso de frecuencia. También se ha aplicado en la combinación de interruptores de radiofrecuencia con otros circuitos para crear filtros reconfigurables utilizados en transceptores de modo múltiple en dispositivos móviles.

Los sistemas de navegación satelital como GPS (Global Positioning System, por sus siglas en inglés), a través de señales de radio frecuencia enviadas por un satélite, pueden ubicar el receptor en cualquier parte del globo terráqueo; sin embargo, en la práctica, la señal emitida por el satélite se pierde fácilmente debido a edificios altos, puentes, antenas, sobre todo en ciudades muy urbanizadas. Bajo este contexto, los sensores inerciales MEMS asisten al sistema GPS. En caso de perder la señal, por medio de acelerómetros y giroscopios se puede implementar un sistema que calcule la distancia y la dirección recorrida durante el tiempo que no se detectó la señal del satélite. Es importante resaltar que la tecnología MEMS es ideal para cada una de las aplicaciones antes mencionadas pues utilizan realmente muy poca energía y espacio, bajo costo de producción, además de tener una mejor velocidad de respuesta.

1.4 Estado de Arte de los MEMS

La nueva estimación del mercado de MEMS para los años 2007 a 2012 espera que dicho mercado alcance un valor de \$14 mil millones de dólares (sólo en el ámbito del chip) para el año 2012. Esto representará el doble que en el año del 2007 de \$7,1 mil millones de dólares. Para el 2008, se espera que el mercado sea de \$7,2 mil millones de dólares, lo cual representa una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta de 14% para el periodo de 2007-2012. El crecimiento de 2007-2010 será más modesto (11%), esperando un incremento fuerte para después del 2010 (Figura 1.4) [10].

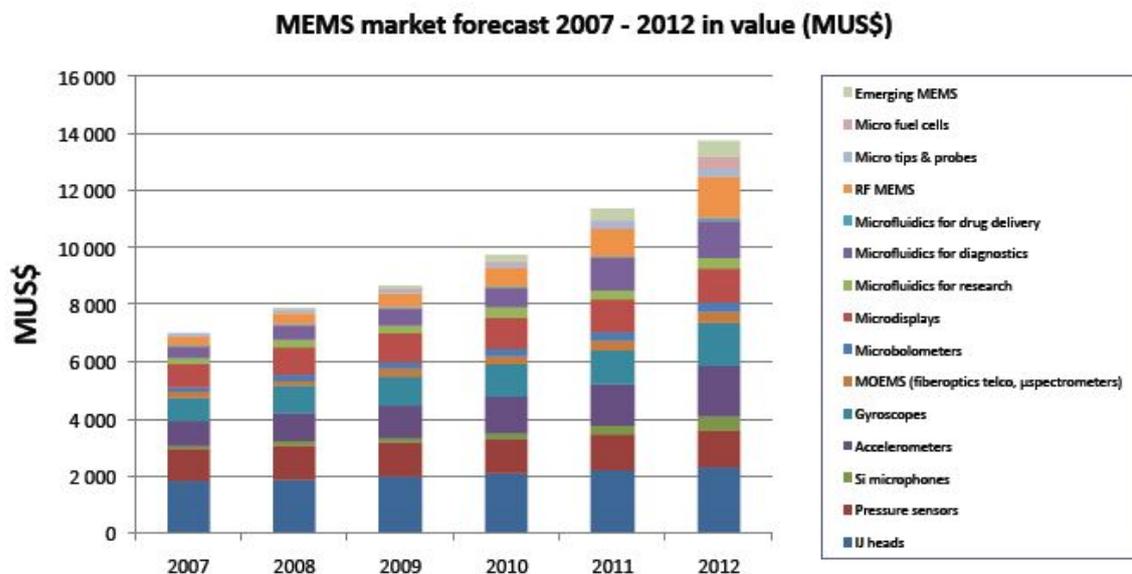


Figura 1.4. Mercado de MEMS 2007-2012.

En el año de 2007 llegaron al mercado una gran variedad de nuevos dispositivos MEMS: enfocadores automáticos, osciladores y giroscopios de doble eje, solo por citar algunos. Por lo que en la actualidad se han realizado estimaciones con base en unidades MEMS producidas en el periodo de 2007-2012. Se estima que para el año 2012, se entreguen 6,2 millones de dispositivos MEMS en todo el mundo (Figura 1.5) [10].

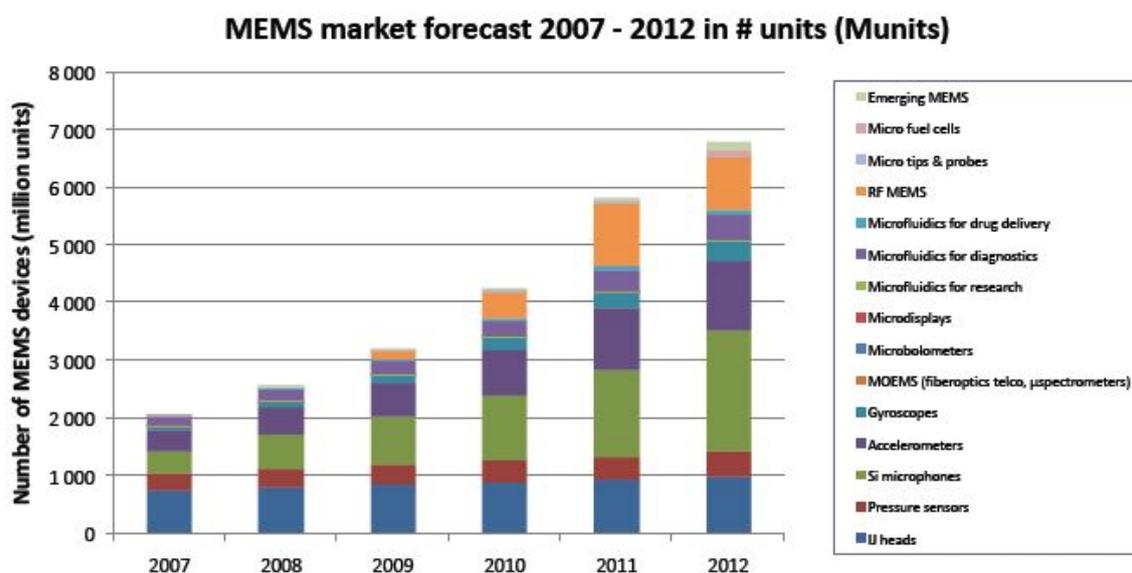


Figura 1.5. Mercado de MEMS por unidad de dispositivos.

Es interesante notar que a pesar del aumento mayor de 2007-2008 en unidades de MEMS (25%), el crecimiento del valor del mercado fue de sólo el 9%. Esto se explica, debido a la fuerte presión de precios sufrida actualmente por los dispositivos de MEMS. Después de 2009 los MEMS de RF y los micrófonos de silicio contribuirán para un aumento en el número de dispositivos MEMS (arriba de 45%). Las aplicaciones de MEMS se pueden dividir en siete campos principales: Automotriz, Aeronáutico, Bienes de Consumo, Defensa, Industrial, Médico y Biológico, y Telecomunicaciones.

Aunque las aplicaciones automotrices hayan sido históricamente el motor del mercado de MEMS crecerán solamente una modesta tasa de 3.5% durante el período de 2007-2012. Por otro lado, las aplicaciones médicas y biológicas, bienes de consumo y telecomunicaciones (inalámbrica) contribuirán significativamente para el mercado de MEMS después de 2010. Sus tasas de crecimiento serán respectivamente 18%, 11% y 40%. En 2012, las aplicaciones de bienes de consumo (esto incluye cabezas de chorro de tinta, MEMS inerciales, micro-pantallas y el desarrollo de dispositivos de MEMS tales como los sistemas de captación de energía, enfoque automático, micro zoom, micro motores será de más de 40% del mercado total. El fuerte crecimiento (21%) para la defensa, se debe principalmente, al uso de los valiosos MEMS inerciales para orientación de municiones. El mercado de MEMS para nuevas aplicaciones y células de combustible tendrá un impacto después del 2009 y durante el período de 2009-2012, su Tasa de Crecimiento Anual Compuesta será de 67% y 158%, respectivamente.

Con base en la Tasa de Crecimiento Anual Compuesta se puede ver que la expectativa es que los MEMS de RF tengan el mayor crecimiento (50%), seguidos por los chips microfluídicos para administración de medicamentos (42%), micrófonos de silicio (32%), chips microfluídicos para diagnósticos (23%), micro puntas y sondas (22%) y microbolómetros (20%).

Los acelerómetros para Interfaces Hombre-máquina en la parte superior de la lista tienen una Tasa de Crecimiento Anual Compuesta excediendo los 120% y una expectativa de valor de mercado de \$500 millones en el 2012. Después, tenemos los MEMS de RF para ATE (Automated Test Equipment - Equipo de Prueba Automatizado) (81%), microbolómetros [11] para la industria automotriz

(54%), inhaladores (41%), microfluídicos para investigación y desarrollo de chips celulares (37%) y análisis proteómica (26%) (Figura 1.6) [10].

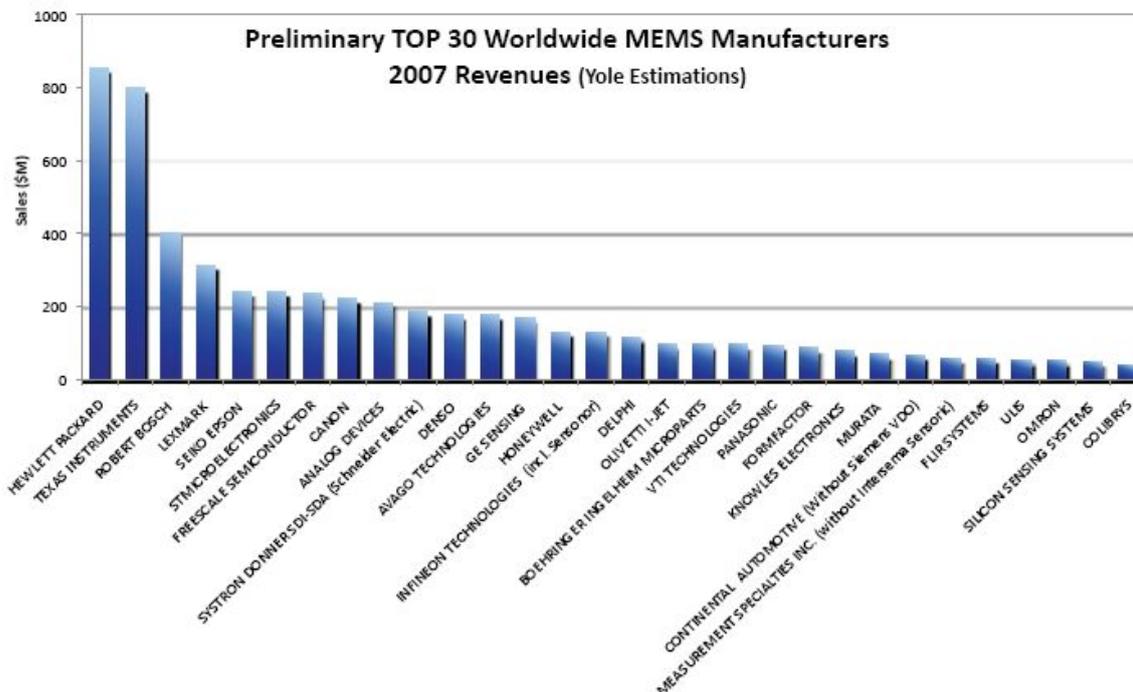


Figura 1.6. Clasificación preliminar de los 30 mayores fabricantes de MEMS.

Es un hecho que no se augura un cambio fuerte para el año 2008, sin embargo, el gran cambio sucederá en el periodo de 2009 a 2010, después de una onda de fusiones de las empresas dedicadas al diseño y fabricación de MEMS.

Las empresas dedicadas hasta el momento al diseño de MEMS saben que, durante el desarrollo y estudio de los dispositivos MEMS existe una constante necesidad de comparar eficientemente los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas con el comportamiento real del dispositivo MEMS, para así poder adaptar los procesos de producción modificando las características geométricas hasta llegar al desempeño requerido para una aplicación determinada.

En conclusión, sabemos que el pleno desarrollo de la tecnología MEMS comprende procesos de optimización y control de calidad, que implican la caracterización dinámica y estática de su forma y desempeño mecánico, respectivamente. Esto requiere de tecnologías no invasivas para la manipulación, excitación y medición del desempeño mecánico de los MEMS.

Las técnicas empleadas para la caracterización de MEMS fundan sus bases en principios ópticos que se revisan en el capítulo 2 de este trabajo.

1.5 Bibliografía y Referencias

1. **Maluf, Nadim.** *An Introduction to Microelectromechanical systems engineering.* Norwood, MA, USA : Artech House MEMS library, 2000. 0-89006-581-0.
2. [En línea] <http://www.zyvex.com/nanotech/feynman..>
3. **Gribbin, John.** *Richard Feynman: A Life in Science.* s.l. : Dutton, 1997.
4. **Pelesko, A. John y Berstein, H. David.** *Modeling MEMS and NEMS.* Boca Raton, Florida, USA. : Chapman and Hall/CRC, 2002. ISBN 1-58488-306-5.
5. **Chen, Wai-Kai.** *The VLSI handbook.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, LLC., 2000. ISBN 0-8493-8593-8.
6. **Lyshevski, Sergey Edward.** *Nano- and Microelectromechanical Systems: Fundamentals of Nano- and Microengineering.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, 2001. ISBN 0-8493-916-6.
7. **Madou, M.J.** *Fundamentals of Microfabrication.* Boca Raton, Florida, USA. : CRC Press, 1997. .
8. **Carter Jim , Cowen Allen, Hardy Busbee , Ramaswamy Mahadevan, Stonefield Mark, and Wilcenski Steve.** *PolyMUMPs Design Handbook.* s.l. : MEMSCap Inc., 2005.
9. *Emergin Market for Microfluidics Applications 2003-2010 market Analysis.* **NEXUS.** Noviembre, 2004.
10. **YOLE Développement.** <http://www.yole.fr>. <http://www.yole.fr>. [En línea] Mayo de 2008.

11. **Leti.** www-leti.cea.fr. *www-leti.cea.fr*. [En línea] 2007. [Citado el: 5 de Noviembre de 2008.]

12. **Leyva, F. Hugo Ramírez.** [En línea]
<http://www.utm.mx/~rruiz/seminarios/docs/11/s09Nov.pdf>.