

Los Microacelerómetros en la Actualidad

Agustín Leobardo Herrera May*, Ángel Roberto Cortés Pérez** y
Luz Antonio Aguilera Cortés**

RESUMEN

En este trabajo se presenta el estado del arte de las diversas clases de acelerómetros fabricados en la tecnología MEMS (Sistemas Microelectromecánicos). Ésta tecnología permite la existencia de acelerómetros de menor costo, tamaño pequeño, alta sensibilidad y mínimo consumo de potencia con importantes aplicaciones en la industria automotriz, militar y de consumo.

ABSTRACT

This paper presents the state of the art of the diverse classes of accelerometers fabricated in MEMS technology (Microelectromechanical Systems). This technology allows the existence of accelerometers at smaller cost and size, high sensitivity and minimum power consumption, with important applications in the automotive, military and of consumer sectors.

Recibido: 25 de Octubre de 2007
Aceptado: 17 de Abril de 2008

INTRODUCCIÓN

Los acelerómetros se definen como sensores que miden la aceleración lineal a lo largo de su eje sensible. Estos tienen un enorme potencial en los sistemas de seguridad de la industria automotriz tales como: en la activación de las bolsas de aire, en los sistemas de suspensión activa y control de tracción, cinturón de seguridad y alarma antirrobo (Kraft, 2000), (Kuisma, 2001). Además, son utilizados en sismografía, en navegación, en la milicia, en vulcanología, en la exploración petrolera, en robótica, en la vigilancia de las vibraciones de máquinas industriales, en el control de la calidad del transporte de mercancías, en los sistemas de estabilización de imágenes para cámaras, en aplicaciones de realidad virtual, en iPhone, juguetes electrónicos, entre otras (Beeby, 2004, p. 173), (Marek, 1999), (Yazdi, Ayazi, y Najafi, 1998). En la actualidad con los adelantos de la tecnología MEMS (Sistemas Microelectromecánicos) es posible contar con microacelerómetros que presentan las siguientes ventajas: menor costo, tamaño pequeño, alta sensibilidad y un mínimo consumo de potencia que los posiciona en un lugar privilegiado para poder abarcar la mayoría de las aplicaciones antes mencionadas.

La industria automotriz fue la primera en producir microacelerómetros en grandes volúmenes. Los procesos de fabricación de estos sensores son compatibles con los procesos de fabricación de los circuitos integrados (CI). Esto permite que los transductores se fabriquen junto con su circuitería electrónica en el mismo sustrato, obteniendo resultados más confiables y una mayor eficiencia en su funcionamiento. Existen varias compañías que producen microacelerómetros en grandes volúmenes. Uno de los productos más exitosos en el mercado es la serie de ADXL de *Analog Devices Inc.* Esta compañía es líder mundial en la fabricación de microacelerómetros para el sector automotriz. En la Figura 1 se ilustran algunas de las aplicaciones de los microacelerómetros en la industria automotriz (Chaehoi, 2005).

Palabras clave:

MEMS; Acelerómetros; Silicio.

Keywords:

MEMS; Accelerometers; Silice.

A continuación se presentan los principios de funcionamiento, las ventajas y desventajas de las diversas clases de microacelerómetros que existen en la actualidad.

* Centro de Investigación en Micro y Nanotecnología de la Universidad Veracruzana y Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Veracruzana, Boca del Río, Veracruz, México. Calzada Ruiz Cortines 455, CP 94292. Tel 52 (228) 8 42 17 76. Correo electrónico: leherrera@uv.mx.

** Universidad de Guanajuato, Campus Salamanca. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8km. Tel 52 (464) 64 7 99 40. Correo electrónico: aguilera@salamanca.ugto.mx.

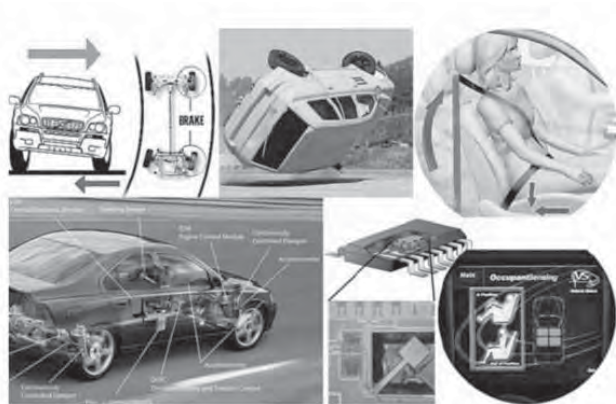


Figura 1. Ilustración de algunas de las aplicaciones de los microacelerómetros en la industria automotriz (Chaehoi, 2005).

CLASIFICACIÓN DE LOS MICROACELERÓMETROS

Los microacelerómetros se pueden clasificar en los siguientes siete grupos según sus mecanismos de transducción:

- Piezoresistivos.
- Capacitivos.
- Corriente de efecto túnel.
- Piezoelectricos.
- Ópticos.
- Térmicos.
- Resonantes.

Las primeras seis clases de acelerómetros tienen su masa de prueba en reposo cuando éstos no experimentan aceleración y la transducción mecánica a eléctrica se realiza por medio del movimiento de su masa sísmica. Mientras que los acelerómetros resonantes tienen elementos continuamente en resonancia para detectar la aceleración externa. A continuación se define el modo de operación de cada uno de los acelerómetros mencionados.

Microacelerómetro piezoresistivo

El efecto piezoresistivo es uno de los mecanismos de transducción normalmente utilizado para los acelerómetros. La descripción básica del efecto piezoresistivo puede resumirse como el cambio en la resistencia de un material al deformarse. La Figura 2 muestra el esquema de la estructura de un acelerómetro piezoresistivo (Plaza *et al.*, 2002). Esta estructura consiste básicamente en una masa sísmica, una viga y un elemento de soporte. El material del piezoresistor generalmente se localiza en el inicio de la viga de soporte en donde la concentración de esfuerzos mecánicos es

máxima (ver Figura 3). Cuando el dispositivo se sujeta a una aceleración a lo largo de su eje sensible, la masa experimenta un desplazamiento que ocasiona deformaciones en la viga soporte. Esta deformación afecta al elemento piezoresistivo provocándole un cambio en su resistencia eléctrica. Esta variación es detectada por un circuito puente de Wheatstone que emite una señal de salida eléctrica.

Un microacelerómetro piezoresistivo puede dañarse cuando los esfuerzos en la viga soporte excedan el esfuerzo de ruptura de su material y por lo tanto requiere elementos de protección. Estos son generalmente topes localizados abajo y encima de la masa sísmica, que limitan el desplazamiento excesivo de la masa sísmica para aceleraciones altas. En condiciones de aceleración pequeña, la masa sísmica tiene libertad

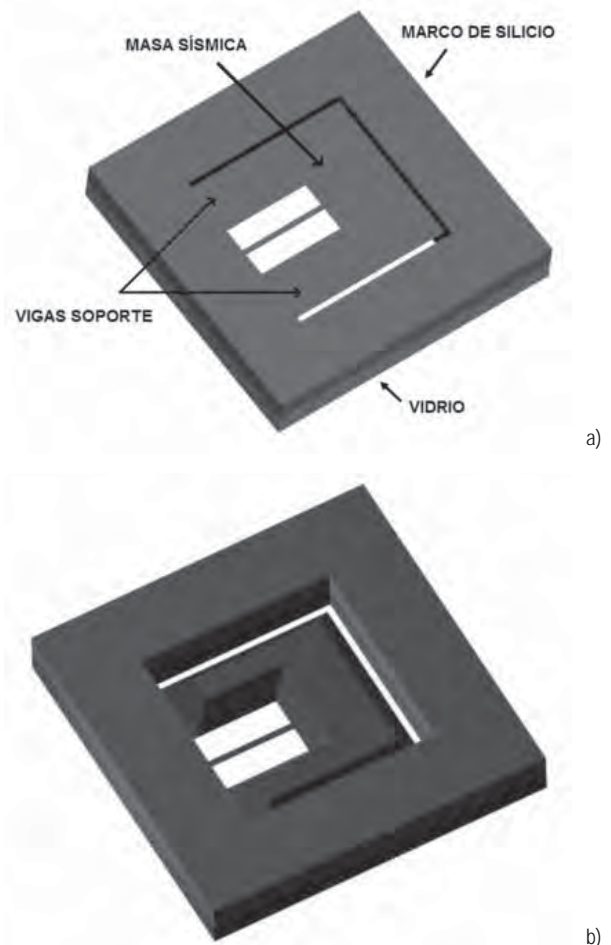


Figura 2. a) Vista isométrica superior. b) Vista inferior de un microacelerómetro piezoresistivo (Plaza *et al.*, 2002).

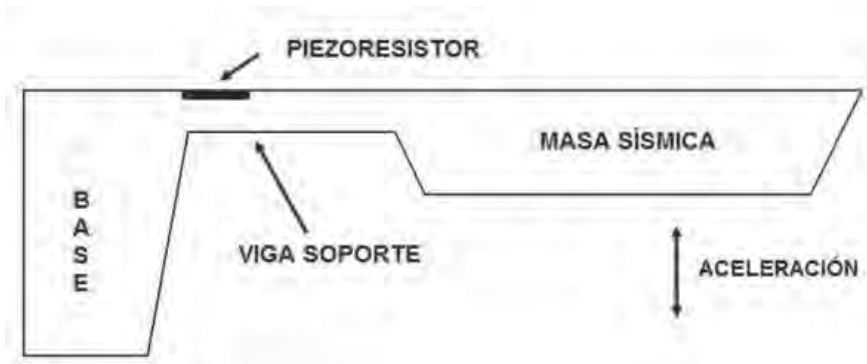


Figura 3. Sección transversal de un microacelerómetro piezoresistivo.

de movimiento. Las principales ventajas del microacelerómetro piezoresistivo son la simplicidad de sus estructuras y sus procesos simples de fabricación. Su principal desventaja estriba en la fuerte dependencia que presenta el piezoresistor con la temperatura. Los investigadores Plaza *et al.*, (1998) diseñaron y fabricaron un microacelerómetro piezoresistivo con tres ejes sensibles (triaxial) con sensibilidad en las direcciones X, Y y Z de 0,160 mV/(Vg), 0,093 mV/(Vg) y 0,464 mV/(Vg), respectivamente. Este dispositivo registró una no linealidad muy pequeña en las direcciones X, Y y Z de 0,52 % FS (Full-scale, por sus siglas en inglés), 0,58 % FS y 0,32 % FS, respectivamente.

Microacelerómetro capacitivo

El microacelerómetro capacitivo sensa la aceleración aprovechando el cambio en la capacitancia de un capacitor formado por su estructura. Uno de sus electrodos está colocado en la masa sísmica mientras que el otro permanece estacionario. Una aceleración provoca una variación en la distancia entre ambos electrodos, alterando su capacitancia inicial en proporción a la aceleración experimentada. Entonces, un circuito electrónico puede medir esta variación de capacitancia.

Los microacelerómetros capacitivos tienen varias ventajas que los hacen muy atractivos para la industria automotriz. Ellos tienen una baja dependencia a la temperatura a diferencia de los piezoresistivos, poseen una buena respuesta en corriente directa, alta sensibilidad, baja disipación de potencia y una estructura simple. Sin embargo, su principal desventaja es su alta sensibilidad a la interferencia electromagnética, por lo que se necesita un sistema de protección mediante un empaquetado especial para proteger al acelerómetro y a su circuito electrónico.

La Figura 4 muestra la estructura fundamental de un microacelerómetro capacitivo de sensado vertical

(Selvakumar, 1997). En donde la masa sísmica ubicada en la parte superior y el electrodo en la inferior forman un capacitor de placas paralelas. Las aceleraciones en el sentido del eje vertical flexionan la masa, causando un cambio en la distancia de separación entre el electrodo y la masa móvil. Esto origina un aumento o disminución en la capacitancia inicial en función de la dirección de la aceleración aplicada.

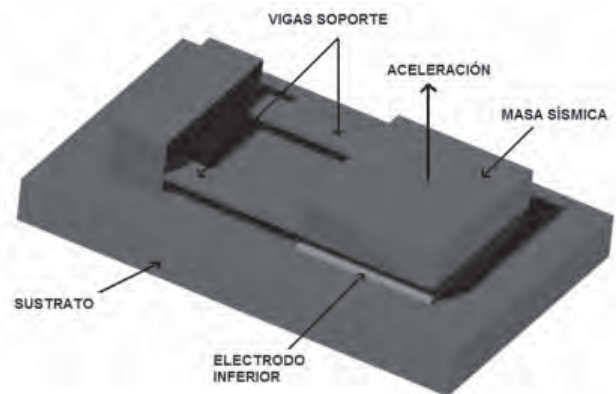


Figura 4. Estructura fundamental de un microacelerómetro capacitivo de sensado vertical (Selvakumar, 1997).

La estructura básica de un microacelerómetro capacitivo de sensado lateral es mostrada en la Figura 5 (Selvakumar, 1997). En ésta, el área de coincidencia de los electrodos conectados a la masa sísmica y los electrodos unidos al anclaje estacionario forma el capacitor. En la presencia de una aceleración, la masa sísmica se flexiona provocando que el espacio entre los electrodos móviles y estacionarios se incremente en un lado y disminuya en el otro. Este fenómeno altera la capacitancia inicial y ocasiona que esta clase de microacelerómetros sean sensibles a aceleraciones paralelas al plano del sustrato de silicio (la cual sostiene a la masa sísmica y electrodos móviles y estacionarios).

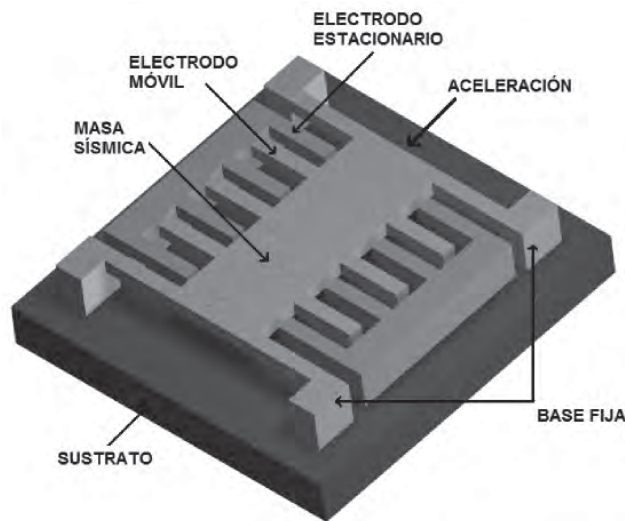


Figura 5. Estructura básica de un microacelerómetro capacitivo de sentido lateral (Selvakumar, 1997).

Los microacelerómetros capacitivos anteriores pueden tener la posibilidad de experimentar impactos entre sus electrodos estacionarios y móviles. Debido a este inconveniente existen microacelerómetros capacitivos de área variante. Estos cambian el área de incidencia entre los electrodos del capacitor, adelantando o atrasando uno de los electrodos respecto al otro.

Hay dos métodos básicos para la fabricación de microacelerómetros capacitivos. Uno es el micromaquinado de superficie, donde el sensor se fabrica sobre el sustrato y el otro es el micromaquinado de volumen, el cual graba la estructura en el volumen del sustrato de silicio. Los acelerómetros micromaquinados en superficie tienen un uso extendido en aplicaciones automotrices e industriales. Aunque la tecnología de micromaquinado de superficie es compatible con la de los circuitos integrados (bajo costo y tamaño pequeño) tienen el inconveniente de producir niveles muy altos de ruido debido a su pequeña masa sísmica, tienen poca estabilidad y falta de flexibilidad. En cambio, el micromaquinado de volumen proporciona un nivel bajo de ruido, buena estabilidad y flexibilidad, pero presenta las desventajas de costo más alto, mayor tamaño y procesos de fabricación más complejos. En la Figura 6 se muestra la imagen SEM (Scanning Electron Microscopy, por sus siglas en inglés) de un microacelerómetro capacitivo uniaxial de sentido lateral fabricado por *Analog Devices Inc* (Chaehoi, 2005).

En la actualidad la mayoría de las investigaciones sobre microacelerómetros están basadas en la clase capacitiva, ya que éstos proporcionan alta sensibili-

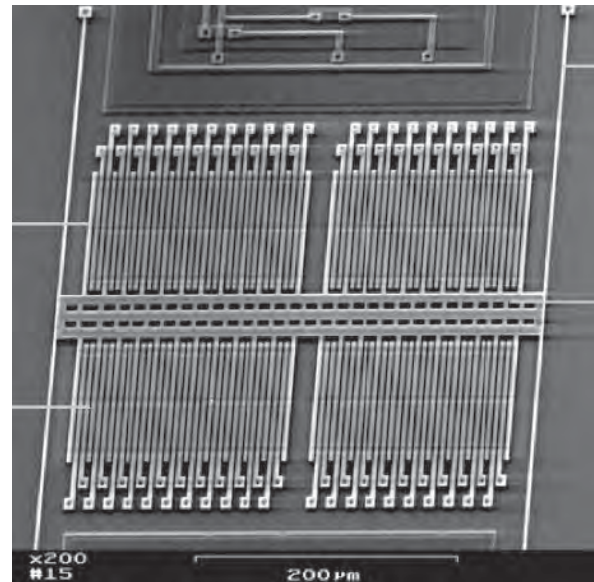


Figura 6. Imagen SEM de un microacelerómetro capacitivo uniaxial de sentido lateral fabricado por *Analog Devices Inc* (Chaehoi, 2005).

dad, nivel bajo de ruido e independencia con la temperatura. Por esto, son muy atractivos en las áreas donde se requiere un alto desempeño. Por ejemplo, los microacelerómetros comerciales utilizados para la activación de bolsas de aire de automóviles presentan una no linealidad menor del 2 % FS para amplitudes de aceleración de ± 50 g (Yazdi, Ayazi, y Najafi, 1998). En cambio, Weigold *et al.*, (2001) diseñaron y fabricaron un microacelerómetro capacitivo capaz de detectar aceleraciones muy pequeñas, de hasta de $1.3 \mu\text{g}$ con una sensibilidad de $79,2 \text{ fF/g}$.

Microacelerómetro de corriente de efecto túnel

Esta clase de microacelerómetros transforman la aceleración de una masa sísmica en una corriente de efecto túnel. Estos microacelerómetros contienen una punta muy fina de material conductor, que mediante una fuerza electrostática se mantiene a unos pocos Angstroms con respecto a un electrodo inferior. Esto provoca una corriente de efecto túnel, la cual se mantiene constante si la distancia de separación entre la punta fina y el electrodo no se altera. Cuando una aceleración es aplicada, se origina un desplazamiento de la masa sísmica que afecta esta distancia de separación, provocando una alteración en la magnitud de la corriente. Un circuito electrónico responde a éstos cambios y ajusta la fuerza electrostática (mediante el voltaje de excitación) para mover la masa sísmica a su posición original y así, garantizar una corriente por efecto túnel constante.

Los microacelerómetros de efecto túnel tienen las siguientes ventajas: una alta sensibilidad, un tamaño pequeño y un ancho de banda grande. Sin embargo, tienen la desventaja de un proceso complejo de fabricación y altos niveles de ruido a baja frecuencia. Un microacelerómetro de este tipo con alta sensibilidad fue fabricado por Liu y Kenny (2001) en un proceso de micromaquinado de volumen utilizando silicio. Este dispositivo registró una sensibilidad de 50 V/g con un ancho de banda de 360 Hz.

En las Figuras 7 y 8 se muestran las imágenes SEM de un microacelerómetro de corriente de efecto túnel realizado en la Universidad de Cornell mediante un proceso de micromaquinado de volumen (Hartwell *et al.*, 1998). Este microacelerómetro es de silicio y posee una alta razón de aspecto (razón entre la profundidad y el espesor).

Microacelerómetro piezoelectrico

Esta clase de sensores detectan la aceleración en base a la carga eléctrica generada en un material piezoelectrico al ser sometida a un esfuerzo mecánico. Los materiales piezoelectricos como el óxido de Zinc (ZnO), nitruro de Aluminio (AlN) y el PZT (Piezoelectric lead Zirconate Titanate, por sus siglas en inglés) al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica, lo que provoca una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie.

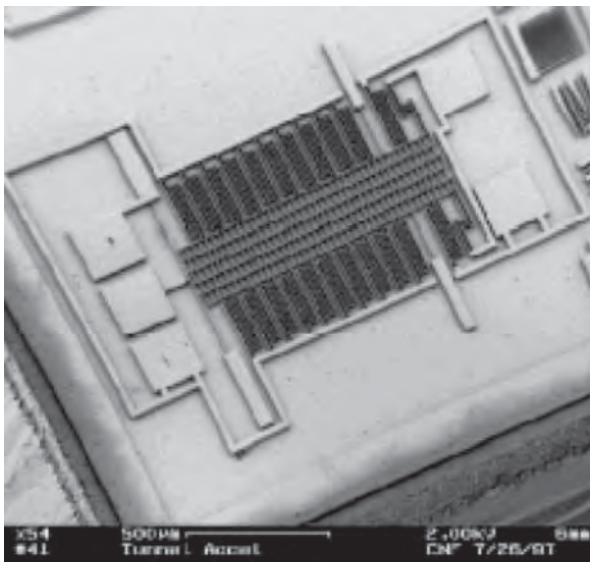


Figura 7. Imagen SEM de un microacelerómetro de corriente de efecto túnel realizado por la Universidad de Cornell (Hartwell *et al.*, 1998).

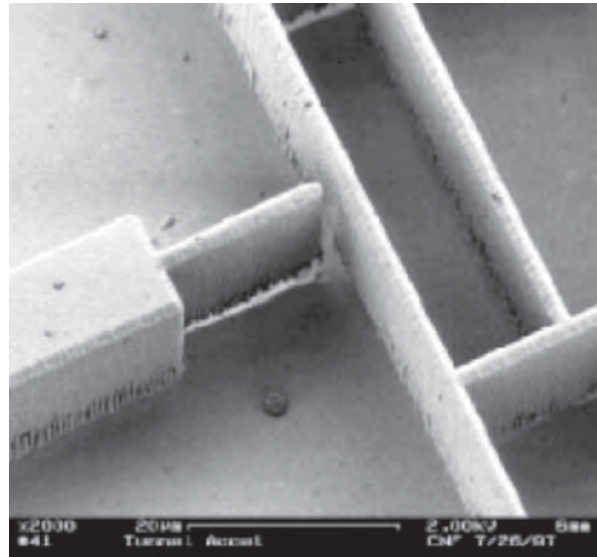


Figura 8. Imagen SEM que muestra la interfase de la punta fina conductora y la masa móvil de un microacelerómetro de corriente de efecto túnel realizado por la Universidad de Cornell (Hartwell *et al.*, 1998).

Es posible implementar acelerómetros usando materiales piezoelectricos y tecnologías de micromaquinado. A diferencia de los microacelerómetros piezoresistivos, los piezoelectricos son dispositivos activos, ya que éstos generan su propia potencia y teóricamente no necesitan suministro de potencia eléctrica.

La Figura 9 muestra la estructura básica de un microacelerómetro piezoelectrico, que utiliza una película delgada de material piezoelectrico (PZT) depositada entre la masa sísmica y el electrodo inferior. La masa sísmica ejerce una fuerza sobre el material piezoelectrico cuando experimenta una aceleración en la direc-

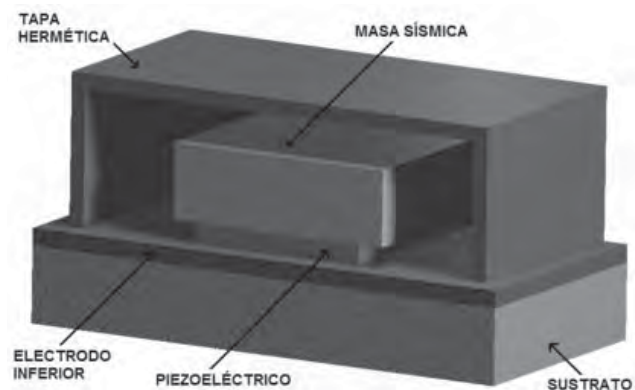


Figura 9. Estructura básica de un microacelerómetro piezoelectrico.

ción de polarización del material. La fuerza sobre el material piezoeléctrico genera una carga eléctrica que puede ser detectada por un amplificador.

Un microacelerómetro piezoeléctrico tipo voladizo se ilustra en la Figura 10. En éste, una viga en voladizo actúa como masa sísmica y elemento sensor. La estructura de la viga está compuesta de polisilicio dopado en boro, una película de nitruro de silicio (Si_3N_4), otra de óxido de Zinc (ZnO) y una de Platino (Pt) en la parte superior (DeVoe y Pisano, 2001). En este caso el ZnO actúa como el material piezoeléctrico. Cuando una aceleración es aplicada se origina una deflexión en la viga, lo cual genera esfuerzos mecánicos en su material piezoeléctrico (ZnO) y genera una carga eléctrica en ella. Entonces, un amplificador detecta la carga eléctrica.

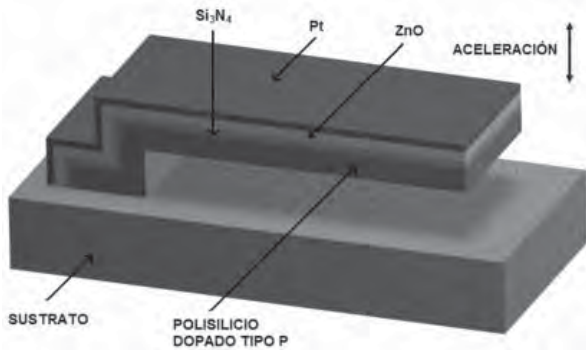


Figura 10. Estructura de un microacelerómetro piezoeléctrico tipo viga en voladizo (DeVoe y Pisano, 2001).

Los microacelerómetros piezoeléctricos tienen la ventaja de utilizar muy baja potencia y de tener una integración monolítica con el circuito electrónico. Sin embargo, los coeficientes piezoeléctricos (que determina la sensibilidad) del material sensible son dependientes de la temperatura. Por lo que, la compensación de la temperatura es necesaria para esta clase de microacelerómetros. DeVoe *et al.*, (2001) desarrollaron dos técnicas de fabricación para integrar películas de ZnO en la superficie de estructuras micromaquinadas que funcionan como microacelerómetros. Este dispositivo registró una no linealidad menor del 2 % FS y una sensibilidad de 0,21 fC/g para aceleraciones menores del $\pm 25\text{g}$.

Microacelerómetro óptico

El microacelerómetro óptico detecta la aceleración en base al principio de modulación de la intensidad luminosa. Este sensor consta generalmente de una fibra

óptica, una masa sísmica conectado a un obturador (elemento que obstaculiza el paso de la luz) y vigas de soporte (Guldemann *et al.*, 2000). Durante una aceleración, la masa sísmica desplaza al obturador lateralmente modulando la intensidad de luz que recibe un fotodiodo. Este último, convierte la intensidad de luz en un voltaje de corriente directa. En las Figuras 11 y 12 se presenta un microacelerómetro óptico fabricado en un proceso de micromaquinado de volumen. Este sensor fue realizado en la universidad de Pohang en Korea del Sur (Lee y Cho, 2004).

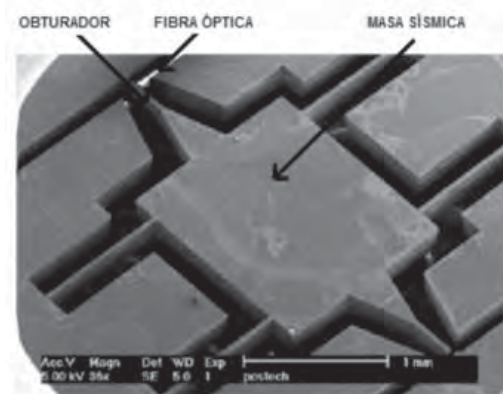


Figura 11. Imagen SEM de un microacelerómetro óptico realizado en la Universidad de Pohang en Korea del Sur (Lee y Cho, 2004).

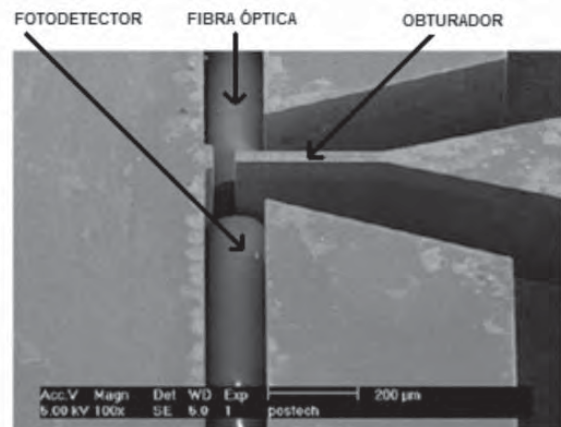


Figura 12. Imagen SEM que muestra el obturador y la fibra óptica de 125 μm de diámetro de un microacelerómetro óptico realizado en la Universidad de Pohang en Korea del Sur (Lee y Cho, 2004).

Las principales ventajas de los microacelerómetros ópticos son su inmunidad a la interferencia electromagnética, su capacidad de operar en ambientes con alta temperatura y sus bajas pérdidas de transmisión. Entre sus principales desventajas están su complicado proceso de fabricación, la necesidad de un empaquetado especial y problemas para determinar eficientemente la dirección de la aceleración aplicada. Un microacelerómetro óptico basado sobre tecnología de silicio y utilizando obleas BESOI (Bond and Etch-Back Silicon On Insulator, por sus siglas en inglés) fue desarrollado por Llobera *et al.*, (2004) con un registro de sensibilidad óptica de 4,6 dB/g.

Microacelerómetro térmico

Este sensor utiliza el mecanismo de transducción de energía térmica para detectar una aceleración. Existen dos tipos básicos de microacelerómetros térmicos: los que utilizan el efecto que el flujo de temperatura de una fuente de calor a una masa sísmica (disipadora térmica) es inversamente proporcional a la distancia de separación entre ellos, y los que trabajan con la distribución de calor en una burbuja de gas.

El primer tipo de microacelerómetro utiliza una masa sísmica posicionada sobre una fuente de calor. Dada una diferencia de temperatura entre la fuente de calor y la masa sísmica, ocurrirá un flujo de calor de la fuente a la masa sísmica. Si el espacio entre la fuente de calor y la masa sísmica es grande, no existirá un gran flujo de calor entre éstos, de modo que la fuente de calor permanece a la misma temperatura. Sin embargo, si la masa sísmica se acerca a la fuente de calor debido a una aceleración, existirá un flujo de calor considerable que producirá una disminución de temperatura de la fuente de calor. La temperatura de la fuente de calor es medida por termopares, dando así una medición de la aceleración. Un microacelerómetro de esta clase fue estudiado por Dauderstädt, Sarro y French (1998), el cual registró una sensibilidad máxima de 50 mV/g para aceleraciones de 0,8 g con frecuencias superiores a 300 Hz.

El segundo tipo de microacelerómetro térmico no tiene partes mecánicas en movimiento. Su operación está basada sobre la transferencia de calor por convección libre de una pequeña burbuja de aire caliente en una cámara hermética (Bugnacki, Pyle y Emerald, 2001). Este sensor consiste de una resistencia (calentador) aislada térmicamente que forma una burbuja de aire caliente. La distribución de calor de esta burbuja cambia en la presencia de una aceleración y pierde simetría con respecto a la resistencia. El perfil

de calor es detectado por dos sensores de temperatura (localizados simétricamente) y ésta es una medida de la aceleración aplicada. La Figura 13 muestra una imagen SEM de un microacelerómetro térmico de éste tipo, realizado por la Universidad de Montpellier (Chaehoi *et al.*, 2006). Este microacelerómetro tiene tres vigas de polisilicio, en donde la viga central actúa como la resistencia (calentador) y las otras funcionan como detectores de temperatura. Además, cuenta con la circuitería electrónica para el acondicionamiento de la señal. La sensibilidad medida por este dispositivo fue de 375 mV/g con un ancho de banda alrededor de 15 Hz. Un nuevo microacelerómetro térmico utilizó diferentes líquidos (agua, etilenglicol y metanol) para sensar la distribución de su temperatura cuando se aplicara una aceleración (Lia, Chen y Cho, 2006). Este dispositivo obtuvo una sensibilidad de 0,9 °C/g para una potencia de operación de 40 mW.

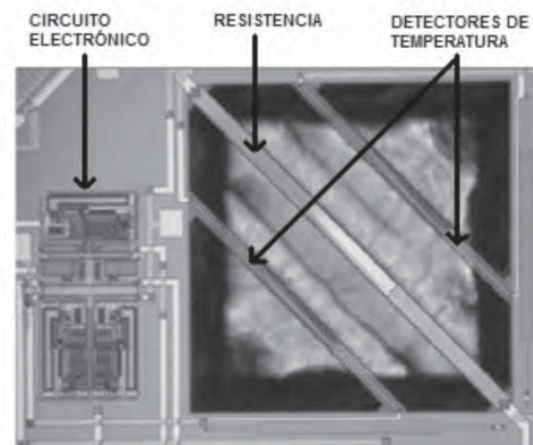


Figura 13. SEM imagen de un microacelerómetro basado en el flujo de gas convectivo (Chaehoi *et al.*, 2006).

La principal ventaja del microacelerómetro térmico es su capacidad de operar sin elementos mecánicos en movimiento (segundo tipo).

Microacelerómetro resonante

El principio de operación de los microacelerómetros resonantes consiste en medir la variación de la frecuencia de resonancia (debida a la aceleración) de una estructura en oscilación. La principal diferencia de los microacelerómetros resonantes con respecto a los anteriores, estriba en que los resonantes siempre poseen una masa oscilando a su frecuencia de resonancia.

Cuando una aceleración es aplicada, una fuerza inercial actúa sobre la masa oscilante del microacelerómetro y provoca una tensión en la estructura en resonancia. Esta tensión altera su frecuencia de resonancia y esta variación es detectada por un mecanismo de sensado.

El mecanismo de sensado y excitación de los microacelerómetros resonantes son variados. Algunos de los más comunes son el sensado piezoresistivo con excitación térmica, sensado piezoresistivo con excitación capacitiva y el sensado capacitivo con excitación capacitiva. La Figura 14 muestra la imagen SEM de la estructura de un microacelerómetro resonante con sensado piezoresistivo y excitación térmica (Aikele *et al.*, 2001).

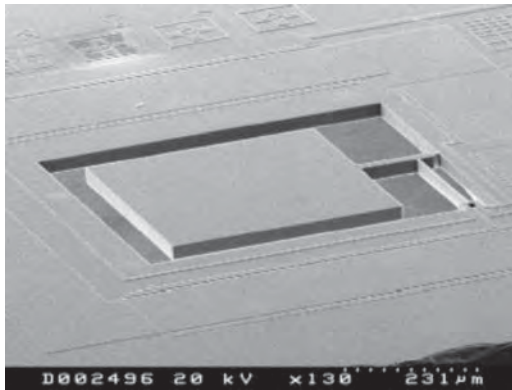


Figura 14. Imagen SEM de un microacelerómetro resonante con excitación térmica y sensado piezoresistivo (Aikele *et al.*, 2000).

La ventaja más importante de los microacelerómetros resonantes es su señal de salida digital. Además, debido a que la señal de salida del transductor es la frecuencia, la sensibilidad a las capacitancias parásitas es mínima. En cambio, la desventaja más importante es su bajo ancho de banda. Además, presenta la necesidad de un empaquetado al vacío para conseguir valores de máximo rendimiento (Seshia *et al.*, 2002). Ferrari *et al.*, (2005) desarrollaron un microacelerómetro resonante en un proceso de micromaquinado de volumen con silicio. El dispositivo consiste de una masa sísmica soportada por dos vigas empotradas y una viga intermedia que opera como elemento sensible. El microacelerómetro utiliza excitación electrotérmicamente y detección piezoresistiva. La sensibilidad obtenida fue de 35 Hz/g a una frecuencia de resonancia de 70 kHz.

Otra clase de microacelerómetro

En la Figura 15 se muestra la imagen de un microacelerómetro innovador fabricado por Ball Semiconductor

Inc (Toda *et al.*, 2002). Éste utiliza una esfera de silicio en levitación como masa sísmica. La tensión eléctrica necesaria para mantener la esfera a la misma posición se emplea como un elemento para medir el valor de la aceleración aplicada. El microacelerómetro tiene la ventaja de medir la aceleración en la dirección vertical y lateral (microacelerómetro de tres ejes) con una gran resolución. Su inconveniente, es su proceso de fabricación atípico y la elevada tensión eléctrica de alimentación (15 V - 30 V).

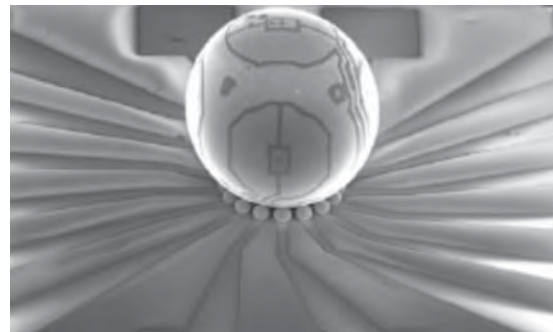


Figura 15. Imagen de un microacelerómetro en levitación electromagnética fabricado por Ball Semiconductor Inc (Toda *et al.*, 2002).

CONCLUSIONES

Los acelerómetros fabricados en la tecnología MEMS presentan considerables ventajas respecto a los sensores tradicionales. Entre estas ventajas se tienen las siguientes: dimensiones pequeñas, bajo consumo de potencia, alta sensibilidad y menor costo. En la actualidad, los microacelerómetros capacitivos son los más utilizados, sobre todo en la industria automotriz para sistemas de seguridad, debido a su alta sensibilidad y poca dependencia con la temperatura. Sin embargo, los microacelerómetros presentan un gran potencial de aplicación en otros sectores como el militar, en la navegación, sismografía, vulcanología, robótica y electrónica de consumo. Esto ha sido posible, al superar en los últimos años obstáculos en los procesos de fabricación, al mejorar la calidad de la circuitería electrónica de interfase y lectura, el ensamble y empaquetamiento de los microacelerómetros.

REFERENCIAS

- Aikele, M., Bauer, K., Ficker, W., Neubauer, F., Prechtel, U., Schalk, J. y Seidel, H. (2001). Resonant Accelerometer with Self-Test. *Sensors and Actuators A* 92 (1), 161-167.
- Beeby, S., Ensell, G., and Kraft, M., and White, N., 2004, *MEMS Mechanical Sensors*, (Artech House Inc., New York), p. 173.

- Bugnacki, M., Pyle, P. y Emerald, P. (2001). A Micromachined Thermal Accelerometer for Motion, Inclination and Vibration Measurement. *Sensors* 18, 98-104.
- Chaehoi, A., Mailly, F., Latorre, L. y Nouet, P. (2006). Experimental and Finite-Element Study of Convective Accelerometer on CMOS. *Sensors and Actuators A*, 132 (1), 78-84.
- Chaehoi, S. (2005). *Design and Modeling of MEMS Monolithic CMOS in Technology FSBM: Application to the Accelerometers*. Tesis de doctorado. Universidad de Montpellier.
- Dauderstädt, U. A., Sarro, P. M. y French, P. J. (1998). Temperature Dependence and Drift of a Thermal Accelerometer. *Sensors and Actuators A*, 66(1-3), 244-249.
- DeVoe, D. L. y Pisano, A. P. (2001). Surface Micromachined Piezoelectric Accelerometers (PiXLs). *Journal of Microelectromechanical Systems* 10 (2), 180-186.
- Ferrari, V., Ghisla, A., Marioli, D. y Taroni, A. (2005). Silicon Resonant Accelerometer with Electronic Compensation of Input-Output Cross-Talk. *Sensors and Actuators A* 123-124, 258-266.
- Guldemann, B., Thiebaud, P., de Rooji, N. F. y Turpin, R. A. (2000). Micromachined, Fiber-Optic Based Accelerometer with Shutter Modulation. *Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS'00)*, 710-714.
- Hartwell, P. G., Bertsch, F. M., Miller, S. A., Turner K. L. y MacDonald, N. C. (1998). Single Mask Lateral Tunneling Accelerometer. *Proceedings of Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, New York, NY, USA, 340-344.
- Jiang, X., Wang, F., Kraft, M. y Boser, B. E. (2002). An Integrated Surface Micromachined Capacitive Lateral Accelerometer with 2 μ G/rt-Hz Resolution. *Technical Digest Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head*, 202-205.
- Kraft, M. (2000). Micromachined Inertial Sensors: The State of the Art and a Look into Future. *IMC Measurement and Control* 33 (6), 164-168.
- Kuisma, H. (2001). Inertial Sensors for Automotive Applications, *Technical Digest 11th Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'01)*, 430-433.
- Lee, S. J. y Cho, D. W. (2004). Development of a Micro-Opto-Mechanical Accelerometer based on Intensity Modulation. *Microsystem Technologies* 10 (2), 147-154.
- Liao, K. M., Chen R. y Chou, B. C. S. (2006). A Novel Thermal-Bubble-Based Micromachined Accelerometer. *Sensors and Actuators A* 130-131, 282-289.
- Liu C. H. y Kenny T. W. (2001). A High-Precision, Wide-Bandwidth Micromachined Tunneling Accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10 (3), 425-433.
- Llobera, A., Plaza, J. A., Salinas, I., Berganzo, J., Garcia, J., Esteve, J. y Domínguez, C. (2004). Technological Aspects on the Fabrication of Silicon-Based Optical Accelerometer with ARROW Structures. *Sensors and Actuators A* 110, 395-400.
- Marek, J. (1999). Microsystems for Automotive Applications. *Proceedings 13th European Conference Solid-State Transducers (EuroSensors XIII)*, 1-8.
- Seshia, A. A., Palaniapan, M., Roessing, T. A, Howe, R. T., Gooch, R. W., Schimert, T. R. y Montague, S. (2002). A Vacuum Packaged Surface Micromachined Resonant Accelerometer. *Journal. Microelectromechanical Systems* 11(6), 784-793.
- Plaza, J. A., Chen, H., Esteve, J. y Lora-Tamayo, E. (1998). New Bulk Accelerometer for Triaxial Detection. *Sensors and Actuators A* 66, 105-108.
- Plaza, J. A., Collado, A., Cabruja, E. y Esteve, J. (2002). Piezoresistive Accelerometers for MCM Package. *Journal of Microelectromechanical Systems* 11 (6), 794-801.
- Selvakumar, A. (1997). *A Multifunctional Silicon Micromachining Technology for High Performance Microsensors and Microactuators*. Tesis de doctorado. Universidad de Michigan.
- Toda, R., Takeda, N., Murakoshi, T., Nakamura, S. y Esashi, M. (2002). Electrostatically Levitated Spherical 3-Axis Accelerometer. *Micro Electro Mechanical Systems, 2002. The Fifteenth IEEE International Conference*, 710-713.
- Weigold, J. W., Najafi, K. y Pang, S. W. (2001). Design and Fabrication of Submicrometer, Single Crystal Si Accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 10 (4), 518-524.
- Yazdi, N., Ayazi, F. y Najafi, K. (1998). Micromachined Inertial Sensors. *Proceedings of the IEEE*, 86 (8), 1640-1659.