

Instituto de Investigaciones en Materiales. UNAM

## El azul maya, un antecesor de los materiales híbridos

## Polimerización electroquímica

## Tecnología MEMS: un pequeño mundo con grandes posibilidades

## El conformado superplástico

## Defectos puntuales: su formación, tipos de defectos y algunas propiedades

## El espacio de Einstein y el cielo de Van Gogh



# Tecnología MEMS: un pequeño mundo con grandes posibilidades

Laura A. Oropeza Ramos, IIMAS, UNAM y Mathieu Hautefeuille, Centro UNAMems, UNAM.

La tendencia tecnológica actual se ha inclinado hacia el desarrollo de herramientas que nos permitan explorar el mundo microscópico. Así surge el tema que aquí se aborda. El desarrollo de este tipo de maquinaria infinitesimal\* comenzó alrededor de la década de 1970. En Estados Unidos se llamaron MEMS, que significa *micro electromechanical systems* (microsistemas electromecánicos), en Europa, MST (*micro systems technology*, tecnología de microsistemas) y en Japón simplemente se refirieron a esta tecnología emergente como *micro machines* (micromáquinas). En México, el término MEMS se adoptó de manera generalizada desde hace poco más de un lustro. Sin embargo, lo trascendente es la utilidad que se le ha dado así como la importancia que esta tecnología ha adquirido con el paso del tiempo.

Los MEMS surgieron como dispositivos integrados por elementos mecánicos (partes móviles) y electrónicos (o eléctricos) que funcionaban como sensores y actuadores de tamaños micrométricos, fabricados por medio de técnicas y materiales usados en semiconductores, por ejemplo en obleas de silicio (Si). Estas técnicas de microfabricación se basan en fotolitografía,

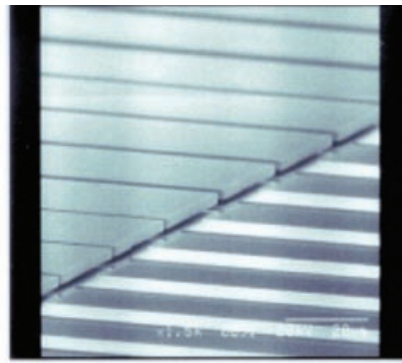
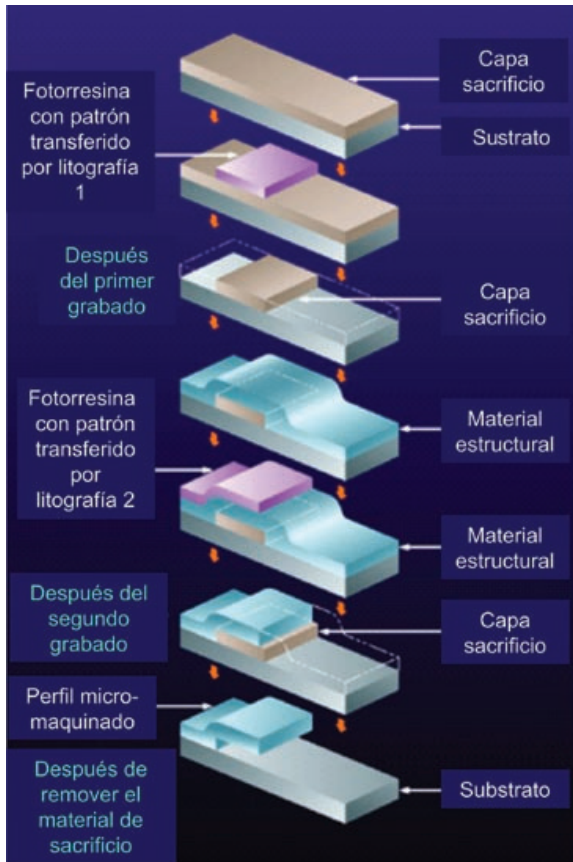
lo que permite sistemas de producción en serie de tal manera que los costos de producción pueden reducirse significativamente.<sup>1</sup> Sin embargo, el concepto de MEMS se ha extendido a otro tipo de miniaturas, incluyendo dispositivos y sistemas magnéticos, térmicos, fluidicos y ópticos, con o sin partes móviles, y a la utilización de otros materiales estructurales como titanio, nitruros, cerámicos, metales y diferentes polímeros.<sup>2</sup> De esta manera, las aplicaciones potenciales de la tecnología MEMS se han esparcido hacia diversas áreas tanto científicas como tecnológicas, como la ciencia básica, la instrumentación médica, la industria automotriz, la de telecomunicaciones y la petrolera, entre otras.<sup>3</sup>

## Elección de materiales para transductores MEMS

Antes de 1996 casi todos los procesos de fabricación de MEMS podían clasificarse en dos categorías principales: micromaquinado superficial (*surface*) y micromaquinado en bloques (*bulk*).<sup>3</sup> El primero genera microestructuras por medio de ciclos de depósito y remoción de capas delgadas sobre un sustrato. El maquinado en bloques se refiere a procesos en los que se



Kiyoto Ota, 2002, *Fu*, hierro colado, 70 × 60 × 20 cm (detalle).



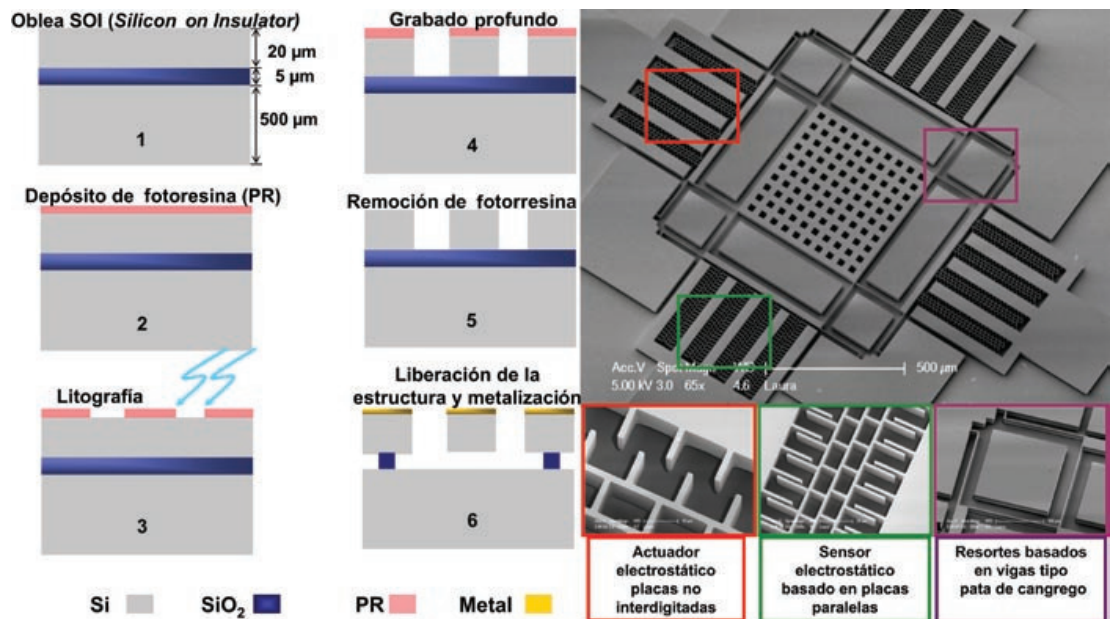
a)



b)

Figura 1. Pasos del proceso de microfabricación superficial. Los depósitos de capas delgadas se utilizan para crear componentes MEMS y obtener espacios de aire entre las capas, permitiendo así el movimiento. Se muestran fotografías de MEMS fabricados con este procedimiento, tomadas con un microscopio electrónico de barrido: a) arreglo de microcantilevers cortesía de María Napoli,<sup>4</sup> Universidad de California, b) microengranes cortesía de los Laboratorios Sandia.<sup>5</sup>

Figura 2. Esquema de un proceso de microfabricación en bloques, que comienza con una oblea tipo SOI- Silicon on Insulator (silicio sobre aislante). En este caso se trata de una capa estructural de silicio de 20  $\mu\text{m}$  sobre 5  $\mu\text{m}$  de  $\text{SiO}_2$  (óxido de silicio), de la cual se remueve o graba material permitiendo estructuras en 3D. Fotografía tomada con un microscopio electrónico de barrido de un microscopio.<sup>6</sup>



graban, esculpen o excavan los sustratos de Si, vidrio u otros materiales, en forma selectiva, para formar microestructuras de mayor profundidad. Ejemplos de dispositivos provenientes de estos dos tipos de flujos de fabricación se muestran en las figuras 1 y 2.

La selección del tipo de proceso de micromaquinado depende de varios criterios, pero la decisión se basa principalmente en las especificaciones del dispositivo y en las tolerancias de fabricación. Estructuras mayores de 10  $\mu\text{m}$  de espesor indican el uso de micromaquinado en bloques, mientras que

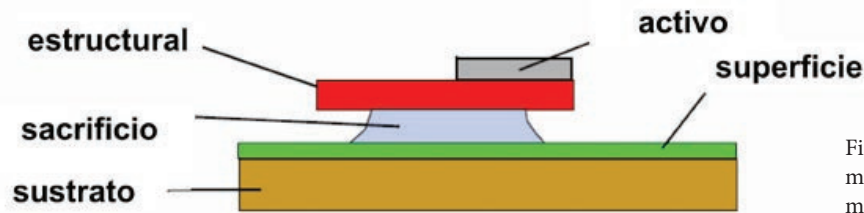


Figura 3. Categorías de materiales micromecánicos en un ejemplo de maquinado superficial.<sup>7</sup>

estructuras de espesores menores de 10µm normalmente requieren procesos superficiales o bien un procesamiento híbrido bloques/superficial.

Dentro de estos procesos, es posible clasificar los materiales involucrados en cinco categorías principales, como se muestra en la figura 3.<sup>7</sup> El material estructural es aquel cuyas propiedades de interés son el módulo de Young, el esfuerzo de cedencia, la densidad, esfuerzos y gradientes residuales, así como propiedades eléctricas, conductividad térmica y estabilidad a largo plazo. Los materiales de espaciamento se remueven completa o parcialmente para liberar las estructuras, de tal forma que pueden adquirir movimiento; por esta razón se les llama materiales de sacrificio. Los materiales de superficie son aquellos que se utilizan para proteger el sustrato o el material estructural de ciertos pasos de abrasión, y son imprescindibles cuando se requiere aislamiento térmico. Los materiales activos se incorporan en las microestructuras para explotar sus características especiales de transducción, como la piezorresistencia del Si para medir esfuerzos, el efecto piezoeléctrico del ZnO, PZT y AlN, para sensado y actuación de esfuerzos, el coeficiente de temperatura de las propiedades termoeléctricas del Si, aluminio (Al) y otros conductores para medir temperatura, así como varios materiales magnéticos que permitan acoplar mecánicamente campos magnéticos.

Actualmente, la expansión en el rango de aplicaciones de la tecnología MEMS ha generado la necesidad de nuevos materiales y nuevas técnicas de fabricación para las estructuras deseadas. Además, tanto el establecimiento como el mantenimiento de líneas de microfabricación clásicas pueden ser de alto costo, lo que restringe la tecnología MEMS a entidades que poseen un cuarto limpio. Todas estas limitantes han forzado el desarrollo de microestructuras con otros materiales y nuevos procesos de uso más conveniente y de menor costo.

Durante los últimos años, la investigación en MEMS se ha ampliado para incluir varios materiales como semiconductores compuestos, diamante, cerámicos y polímeros.<sup>8</sup> Cada vez más, los sistemas MEMS se desarrollan con un proceso propio y una combinación de materiales adecuados. En el ejemplo de la figura 4 se presenta un proceso de fabricación de un módulo de sensores múltiples sobre el mismo sustrato de silicio. Se utilizan cuatro materiales diferentes, elegidos por sus características<sup>9</sup> y tras considerar las diferentes propiedades físicas que detecta cada sensor. Aunque esa tendencia puede aumentar los tiempos de fabricación, también permite producir sistemas a la medida que resuelven problemas específicos. A continuación se mencionan algunos ejemplos de sistemas MEMS en los que los materiales involucrados juegan un papel determinante en el funcionamiento y aplicación de los microdispositivos.

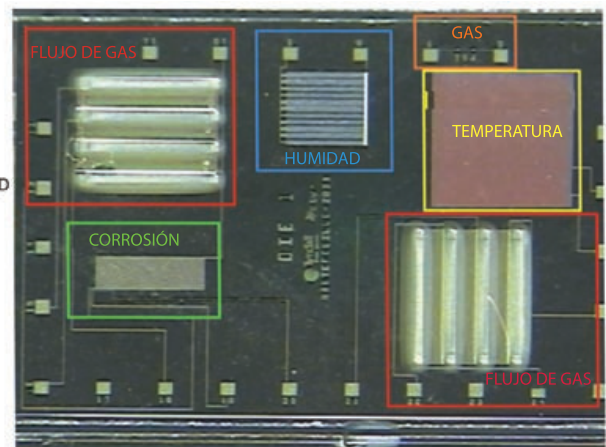
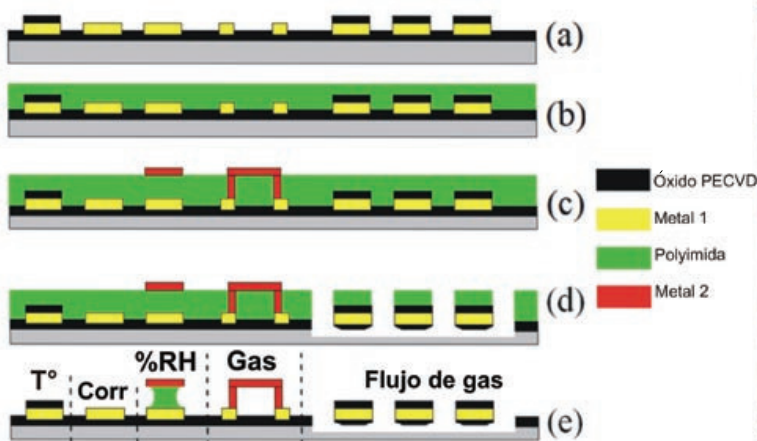
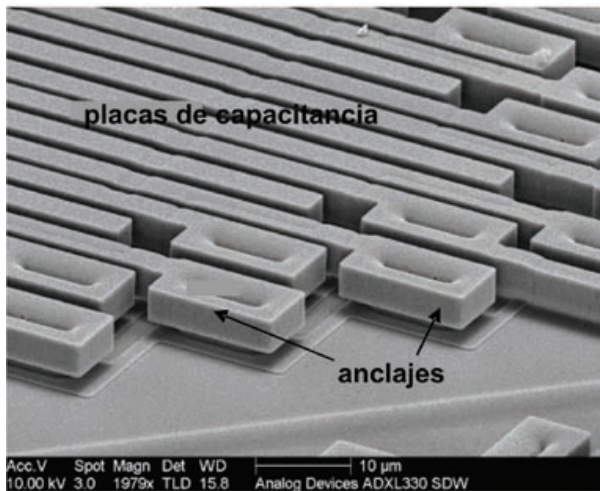
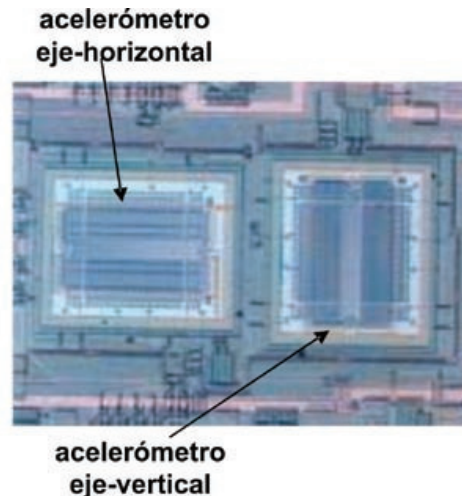


Figura 4. Proceso de fabricación de un módulo de sensores múltiples sobre silicio. Se utilizan cuatro materiales diferentes, elegidos por sus características.<sup>9</sup>



a)



b)

Figura 5. Vista desde arriba del ADXL250 de Analog Devices, Inc: Microacelerómetro de doble eje integrado monolíticamente.<sup>12</sup>

### Los ejemplos clásicos con silicio

El silicio es sin lugar a dudas uno de los materiales más importantes de nuestra era. La invención del transistor, que revolucionó la electrónica en los años cuarenta y que finalmente desembocó en el desarrollo de los circuitos integrados, fue posible gracias a la capacidad de este material de funcionar como semiconductor. De ahí surgió la idea de utilizar una base tecnológica similar a la de estos circuitos integrados en sustratos de Si, pero ahora con partes móviles. De esta manera se podía hacer uso de sistemas de transducción electromecánica en el mismo sustrato e integrar estos sensores o actuadores con componentes microelectrónicos para el procesamiento de las señales.

La naturaleza cristalina del Si ofrece grandes ventajas no sólo eléctricas sino también mecánicas. Así, por medio de la utilización de impurezas en el material (agentes dopantes) se puede controlar de manera precisa su conductividad eléctrica. De igual forma, el Si tiene altos valores de elasticidad (módulo de Young ~160 GPa) lo que lo hace mecánicamente robusto.<sup>10</sup> Resulta entonces un material muy atractivo para microactuadores, osciladores y arreglos de alta frecuencia, entre otros.

### El viejo microacelerómetro

Uno de los primeros éxitos comerciales basados en tecnología MEMS fue el activador para bolsas de aire de automóviles, que se basa en un acelerómetro MEMS. La primera demostración de uno en su tipo se realizó en la Universidad de Stanford, California, en 1979.<sup>11</sup> Sin embargo, no fue sino quince años después y tras haber pasado por procesos de diseño, rediseño, caracterización y calificación en el laboratorio, cuando este dispositivo se aceptó para sistemas de seguridad de bolsas de aire en la industria automotriz.

A la fecha la empresa Analog Devices produce la serie ADXL de microacelerómetros comerciales.<sup>12</sup> Cada eje de movimiento se detecta por medio de una masa de prueba, un sensor capacitivo para medir desplazamiento y circuitos CMOS para el procesamiento de las señales, todos integrados en un chip (figura 5). Un acelerómetro unidireccional se puede modelar como un sistema de masa-resorte como se muestra en la figura 6. La masa de prueba es una placa de Si soportada por vigas con dobleces y ancladas a un soporte, las cuales aportan una rigidez efectiva y hacen así la función de resortes. Cuando una acelera-

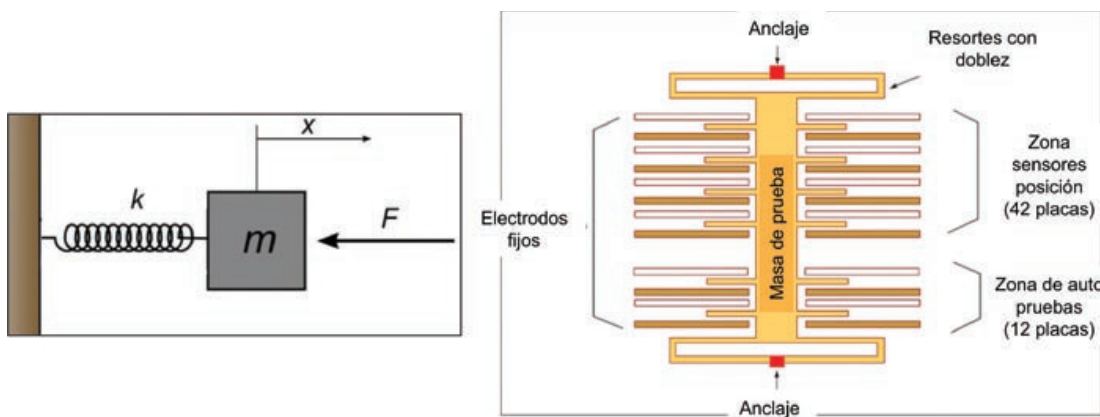


Figura 6. Esquema del modelo de un acelerómetro como sistema de masa resorte.<sup>12</sup>

ción externa ocurre, la masa se mueve con respecto a los anclajes de los resortes. El movimiento se detecta por medio del arreglo de placas paralelas, cuya capacitancia cambia con respecto al desplazamiento de la placa móvil.

### La piezoresistividad para medir presión

La piezoresistividad es un conocido fenómeno físico que se utiliza con frecuencia en sistemas de transducción a cualquier escala. Su nombre se deriva de la palabra griega *piezein* que significa “presión aplicada”. El fenómeno consiste en el cambio de la resistencia eléctrica como respuesta a un esfuerzo mecánico. Fue descubierto por Lord Kelvin en 1856<sup>10</sup> y es una de las tantas propiedades del protagonista de esta sección, es decir, el silicio. Sus coeficientes piezoresistivos dependen de la orientación cristalina y cambian significativamente de una dirección a otra. También dependen del tipo de dopante (tipo-n o tipo-p) y de su concentración.

La esencia del funcionamiento de la mayoría de los sensores de presión micromaquinados consiste en un diafragma soportado en las orillas, que se flexiona en respuesta a una presión transversal (figura 7). Esta deformación se detecta por medio de la medición de los esfuerzos en el diafragma o al medir directamente el desplazamiento del mismo.

Los piezoresistores pueden implementarse dopando selectivamente ciertas porciones del diafragma, lo que forma resistores aislados en las juntas donde se deforma el material. En el proceso de diseño se pueden explorar las configuraciones de los piezoresistores, de tal forma que se maximice la señal al colocar los resistores en el punto de esfuerzo máximo del diafragma.<sup>13</sup>

### BioMEMS: en busca de un viaje al interior del cuerpo humano

Dentro del mundo de la miniaturización, han llamado la atención aquellos sistemas que repercuten directamente en aplicaciones médicas y biológicas. En general, los BioMEMS pueden definirse como dispositivos o sistemas construidos mediante técnicas inspiradas en fabricación a escalas micro y nanométricas, los cuales se utilizan para procesamiento, suministro, manipulación, análisis o construcción de entidades biológicas y químicas.<sup>14</sup> Este tipo de dispositivos pueden ocupar un lugar preponderante en una gran variedad de interfaces entre las disciplinas biológicas y biomédicas y los micro y nanosistemas.

Dentro del amplio rango de aplicaciones de BioMEMS se deben mencionar los sistemas para realizar diagnósticos de ADN y microarreglos de proteínas, microválvulas y microbombas, así como nuevos materiales que se emplean para el análisis de microfluidos, la ingeniería de tejidos, las modificaciones de superficie, microimplantes y los sistemas de suministro de medicamentos, entre muchos otros. Al resultado de in-

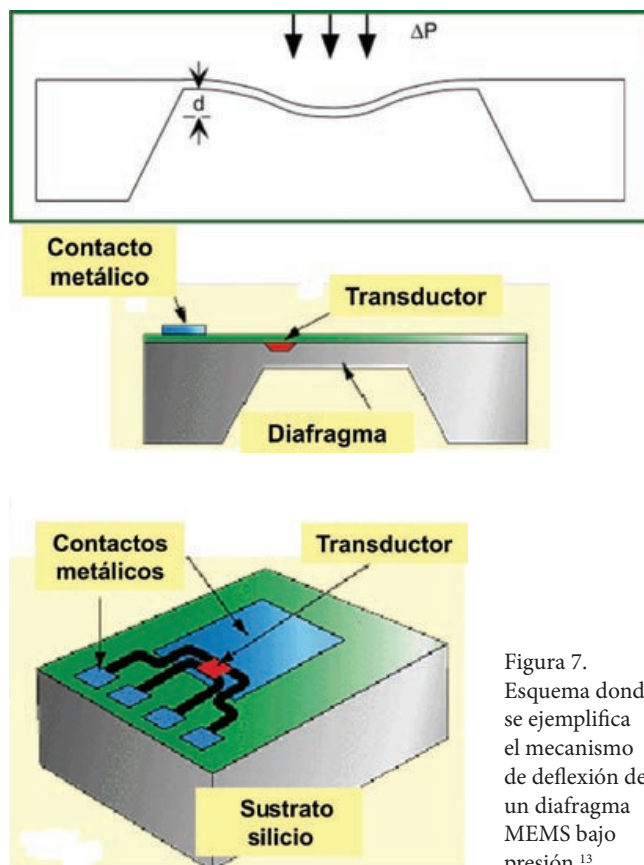


Figura 7. Esquema donde se ejemplifica el mecanismo de deflexión de un diafragma MEMS bajo presión.<sup>13</sup>

tegrar estos sistemas en un mismo dispositivo se le conoce como *lab-on-a-chip* o  $\mu$ TAS (*micro-total analysis systems*).

### Los polímeros como actores fundamentales en la travesía

En años recientes, el uso de polímeros en BioMEMS se ha incrementado considerablemente, ya que pueden utilizarse para diferentes propósitos y ofrecen posibilidades únicas sobre el silicio u otros materiales estructurales. Algunas de las bondades de su implementación en tecnologías médicas o biológicas son su relativo bajo costo, que requieren técnicas de fabricación más sencillas y que pueden depositarse en varios tipos de sustratos para hacerlos compatibles con la electrónica y las tecnologías de microfabricación convencional. Además, muchos polímeros son biocompatibles, característica que les permite integrarse en sistemas biológicos o médicos con mínimo efecto, ya sea en el cuerpo receptor o en el biofluido.

### Exprimidor celular

Un ejemplo de un microdispositivo polimérico es el arreglo que se muestra en la figura 8.<sup>15</sup> Se trata de implementar una técnica que permita caracterizar las propiedades mecánicas de células vivas. El sistema incluye un arreglo de actuadores elec-

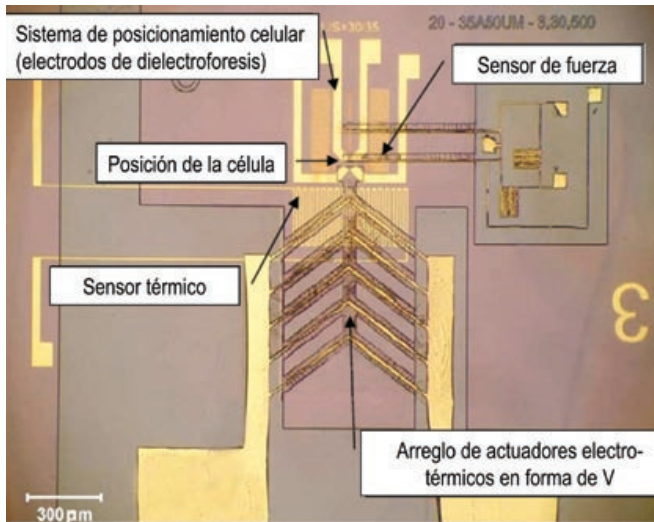


Figura 8. Dispositivo BioMEMS para medir parámetros mecánicos de una célula biológica.<sup>15</sup>

trotérmicos, un posicionador óptico de la célula, un sensor de fuerza y un sensor térmico, todo integrado en un solo chip. La parte principal de este sistema es el actuador polimérico, que logra traslados de varias micras tanto en aire como en líquido. Este comportamiento se debe al alto valor del coeficiente de expansión térmica y a la baja conductividad térmica del polímero estructural, que en este caso se trata de una resina epóxica, el SU-8. Cabe mencionar que además de considerar las propiedades térmicas de esta resina, era necesario crear un mecanismo polimérico que fuera capaz de operar en una solución electrolítica que mantuviera el tejido vivo durante las pruebas.

### Laboratorios en chip

*Lab on a chip* o  $\mu$ TAS (*micro-total analysis systems*) son los nombres con los que se describen los sensores o dispositivos que integran diferentes funciones, como preparación y manejo de muestras, mezclas, separación celular y detección. Muchos de estos dispositivos incluyen más de uno de estos pasos de análisis y han sido desarrollados para la detección y procesamiento de células, proteínas y ADN. Un esquema de la integración de estos sistemas se muestra en la figura 9.<sup>14</sup> El desarrollo de estos microdispositivos integrados podría, en un futuro, simplificar el proceso de ir al laboratorio, esperar durante días los resultados y transportarlos hasta el consultorio de nuestro médico de cabecera. Si tuviéramos un pequeño sistema de análisis portátil, no sólo nos ahorraríamos este trámite, sino que contaríamos con laboratorios miniatura para utilizarlos en poblaciones remotas y aisladas de la tecnología médica.

De todas las funciones que integran los *lab on a chip*, una de las más importantes es el sistema de suministro de medicamento. Utilizando la imaginación, podríamos pensar que en lugar de tomar una píldora o de recibir una inyección intravenosa, podríamos ingerir un microchip (biocompatible) que suministrara dosificadamente el medicamento en una zona muy localizada, exactamente donde el organismo lo requiera. En este sentido, el desarrollo de microagujas y de sistemas de almacenamiento de fluido reciben hoy una atención importante. Un ejemplo es el sistema de suministro medicinal completamente plástico, basado en un microalmacén que no requiere suministro eléctrico de potencia.<sup>16</sup> El dispositivo se muestra en la figura 10 y consiste en un actuador osmótico sobre un sustrato adherido a un patrón definido en PDMS (polydimethylsiloxane), para formar así el sistema de almacenamiento, un

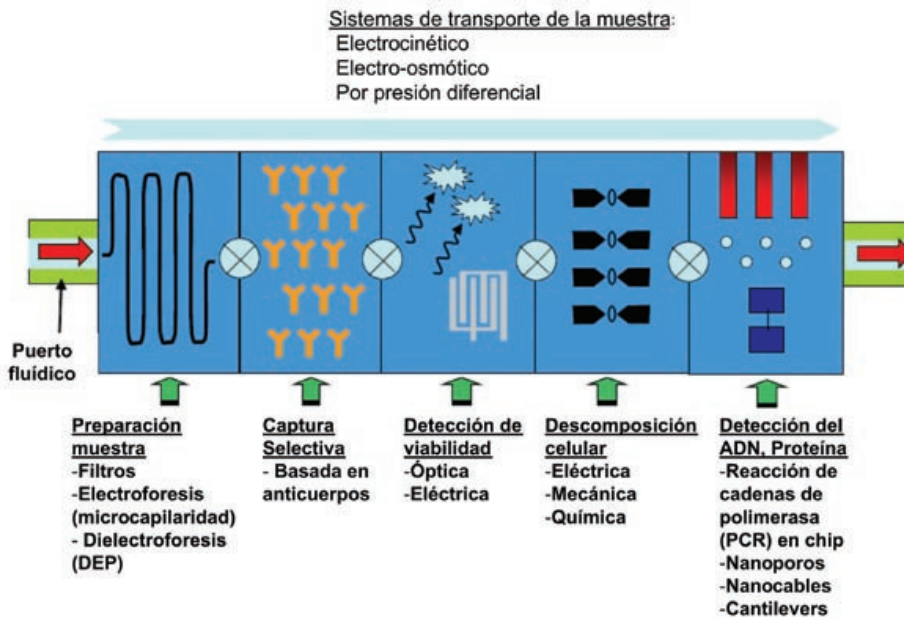


Figura 9. Posible plataforma de integración de un *lab on a chip* para detección de células y microorganismos.<sup>14</sup>

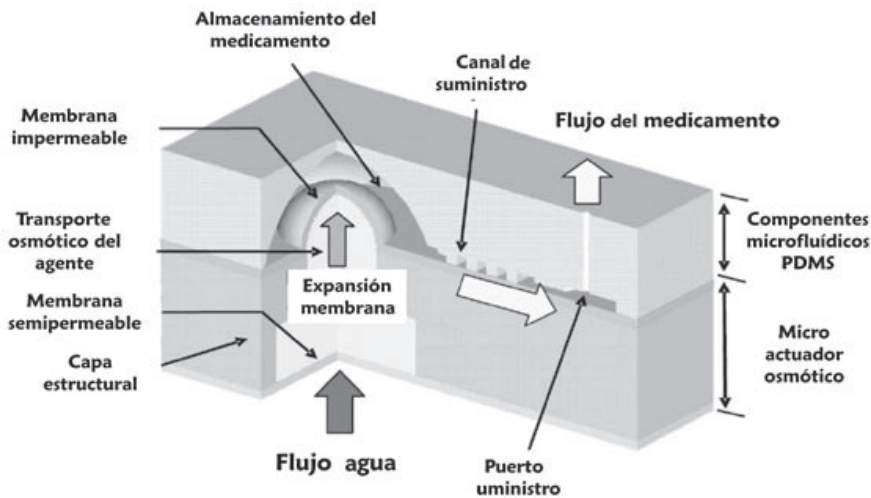


Figura 10. Esquema del microsistema para dosificación de medicamento.<sup>16</sup>

canal microfluídico y un puerto de recepción. Debido a que este dispositivo utiliza un flujo de agua inducido por un mecanismo de actuación por ósmosis, no requiere una fuente de poder eléctrica.

### Integración de estructuras MEMS con circuitos eléctricos

Al final de la década de 1990, existían ya procesos de fabricación bien establecidos de estructuras MEMS con aplicaciones en radiofrecuencia, sensores inerciales y dispositivos de óptica; sin embargo, los progresos tecnológicos en miniaturización de estructuras necesitaban la creación en paralelo de interfaces entre los microsistemas y circuitos electrónicos externos. Efectivamente, los dispositivos MEMS casi siempre necesitan circuitos para excitar actuadores u obtener la señal de salida de sensores. Por otro lado, la forma de economizar en los costos de producción, de espacio y de energía abrieron las puertas a sistemas inteligentes distribuidos como redes de sensores inalámbricos, donde cooperan sensores MEMS y circuitos CMOS (*complementary metal oxide semiconductor*) de bajo consumo.<sup>17</sup>

Según la aplicación, existen dos estrategias de integración (figura 11): 1) La integración híbrida, en la cual los dispositivos MEMS y los circuitos se diseñan y se fabrican por separado con procesos diferentes y no necesariamente conciliables. La interconexión se realiza en la etapa final para formar plataformas con microchips integrados (esta es la estrategia más común y práctica porque permite la reducción de costos de prototipos y de aplicaciones de bajo volumen). Asimismo, este tipo de integración presenta ventajas para diseñadores sin experiencia en microelectrónica que buscan utilizar la tecnología MEMS, debido a que no se encuentra limitada a circuitos CMOS y a que permite desarrollar al mismo tiempo circuitos específicos compatibles con microestructuras existentes o en desarrollo.

2) La integración monolítica, que consiste en desarrollar MEMS y CMOS sobre un mismo sustrato, por medio de un diseño único y de procesos de fabricación sincrónicos. De esta manera, las microestructuras pueden colocarse encima de los circuitos en las últimas etapas de producción o simultáneamente, integrando todo en paralelo. Este tipo de conexión ofrece varias ventajas, como reducción de los costos de fabricación para aplicaciones de gran volumen, miniaturización de módu-

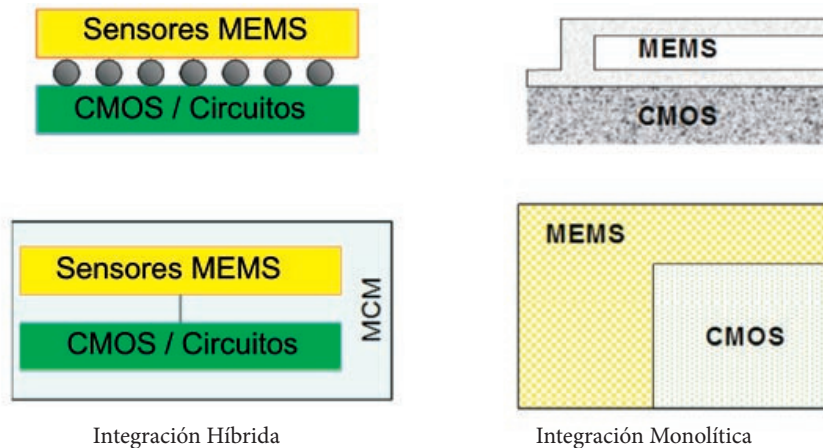


Figura 11. Estrategias de integración MEMS / circuitos electrónicos.



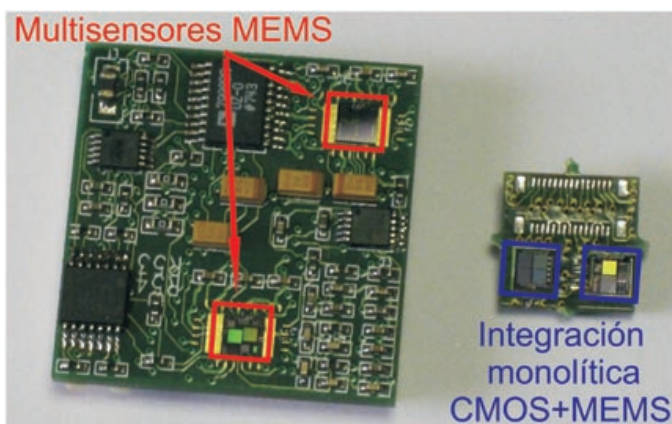


Figura 12. Integración de sensores MEMS sobre plataformas inalámbricas;<sup>9</sup> izquierda: integración híbrida (25mm x 25mm), derecha: integración monolítica (10mm x 10mm).

los multifuncionales (figura 12) y la facilidad de realizar auto-pruebas y autocalibración de los dispositivos integrados.<sup>9,17</sup> También ayuda a resolver cuestiones de interconexión, compatibilidad y acoplamiento entre dispositivos; sin embargo, el proceso involucra una mayor complejidad, ya que requiere procesos de fabricación diseñados alrededor de la tecnología CMOS, los cuales no son siempre compatibles con los de las microestructuras. En este sentido, las especificaciones de fabricación CMOS, como la temperatura crítica y la resolución límite condicionan la elección de materiales y procesos disponibles.<sup>18</sup> A pesar de los desafíos que representa implementar esta forma de integración, sigue siendo considerada como la mejor opción del futuro.

## Conclusiones

Hablar de MEMS significa hablar de una tecnología emergente que no sólo se remite a una aplicación o a un solo dispositivo. Implementar en un mismo chip transductores MEMS con componentes electrónicos aumenta las capacidades computacionales de la microelectrónica y así se promueve la generación de productos inteligentes. Esperamos que en el breve muestrario de microdispositivos presentado en este artículo se refleje que para el desarrollo de la tecnología MEMS es necesario involucrar diversas disciplinas científicas y tecnológicas. En todas ellas, los MEMS que mayor éxito y posicionamiento han tenido son los que representan nuevos paradigmas en relación con las formas existentes en el mundo macroscópico, ya que permiten explorar otras áreas de investigación y desarrollo con las ventajas de la miniaturización.

La evolución de los MEMS ha promovido una innovación permanente de los procesos de microfabricación, en la cual la selección, análisis y procesamiento de materiales son fundamentales. El que este pequeño mundo esté virando del uso del Si como material principal al uso de polímeros biocompatibles,

abre grandes posibilidades para el desarrollo emergente y necesario de microdispositivos biológicos y médicos. Quizás en un futuro no muy lejano sea posible viajar por el interior del cuerpo humano gracias al uso de esta tecnología.

## Bibliografía

- <sup>1</sup> S.D. Senturia, *Microsystem Design*, Springer, 2004.
  - <sup>2</sup> G. Kotzar *et al.*, "Evaluation of MEMS Materials of Construction for Implantable Medical Devices", *Biomaterials*, **23**(13), (2002), 2737-2750.
  - <sup>3</sup> M. Madou, "Fundamentals of Microfabrication: The Science of Miniaturization", Florida, 2002.
  - <sup>4</sup> M. Napoli, "Modelling and Control of Electrostatically Actuated Microcantilever Arrays", tesis de doctorado, Universidad de California, Santa Barbara, 2004.
  - <sup>5</sup> www.sandia.gov
  - <sup>6</sup> L.A. Oropeza-Ramos, Ch.B. Burgner y K.L. Turner, "Robust micro-rate sensor actuated by parametric resonance", *Sensors and Actuators A: Physical*, **152**(1), (2009), 80-87.
  - <sup>7</sup> G.K Fedder, "MEMS Fabrication", IEEE ITC International Test Conference, 2003.
  - <sup>8</sup> C. Liu, "Recent Developments in Polymer MEMS", *Advanced Materials*, **19**(22), (2007), 3783-3790.
  - <sup>9</sup> M. Hautefeuille *et al.*, "Miniaturised Multi-MEMS Sensor Development", *Microelectronics reliability*, **49**(6), (2009), 621-626.
  - <sup>10</sup> M. Maluf, K. Williams, *An Introduction to Microelectromechanical Systems Engineering*, Artech House.
  - <sup>11</sup> L.M. Roylance y J.B. Angell, "A Batch Fabricated Silicon Accelerometer", *IEEE Trans. Electron Devices*, **26**(12), (1979), 1911-1917.
  - <sup>12</sup> www.analog.com
  - <sup>13</sup> M. Gad-el-Hak, *MEMS: Applications, The MEMS Handbook*, CRC Press, 2006.
  - <sup>14</sup> R. Bashir, "BioMEMS: State-of-the-Art in Detection, Opportunities and Prospects", *Advanced Drug Delivery Reviews*, **56**(11), (2004), 1565-1586.
  - <sup>15</sup> W. Zhang *et al.*, "A Polymer V-Shaped Electrothermal Actuator Array for Biological Applications", *J. Micromech. Microeng.*, **18** 075020 (8pp).
  - <sup>16</sup> Y. Suyd L. Lin, "A Water-Powered Micro Drug Delivery System", *J. Microelectromechanical Systems*, **13** (2004), 75-82.
  - <sup>17</sup> H. Baltes *et al.*, "CMOS MEMS—Present and Future", *Micro Electro Mechanical Systems*, (2002), 459-466.
  - <sup>18</sup> M. Beunder, *Choosing a CMOS Compatible MEMS Manufacturing Approach*, Cavendish Kinetics, Países Bajos, 2004.
- \* Es el título de la famosa plática impartida por Richard Feynman en 1983, como continuación de sus predicciones publicadas en 1960, acerca de la construcción de micromotores de Si y otros desarrollos infinitesimales.