

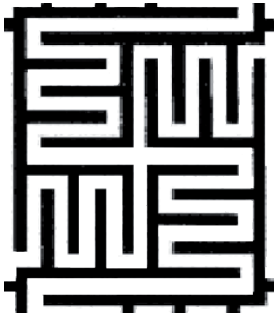
Historia de los micrófonos de consumo masivo: Encuentro entre el micrófono condensador electret y el de sistema micro electro mecánico

Gary W. Elko

mh acoustics LLC. Summit, NJ, USA
gwe@mhacoustics.com

Kieran P. Harney

Analog Devices, Micromachined Products Division. Cambridge, MA, USA
kieran.harney@analog.com



RESUMEN

En este artículo se presenta la historia del desarrollo de micrófonos para el mercado masivo, específicamente los de condensador electret (ECM por sus siglas en inglés) y los basados en la tecnología de sistemas micro electromecánicos (MEMS por sus siglas en inglés). Este trabajo está inspirado en una conversación entre Gerhard Sessler y James West, precursores de los ECM, Ray Stata, pionero de los micrófonos MEMS y los autores. Se comentan los paralelismos en cuanto a la aceptación limitada de estos micrófonos al inicio de su desarrollo tecnológico, considerando las condiciones técnicas, académicas y de mercado en esa época en la que no se preveía que hoy se venderían millones al año.

PALABRAS CLAVE

Micrófono, electret, MEMS, consumo masivo, historia.

ABSTRACT

A history of the development of microphones for the consumer, specifically Electret Condenser Microphones (ECM) and those based on technology of Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) is presented. This work is inspired in a conversation among Gerhard Sessler and James West, beginners of the ECM, Ray Stata, pioneer of the MEMS microphone, and the authors. Parallelism regarding limited acceptance of these microphones at the early stages in development of these technologies are commented considering technical, academic and market conditions in that time when it was not foreseen that today millions would be sold yearly.

KEYWORDS

Microphone, electret, MEMS, consumer, history.

© Acoustical Society of America. Reprinted with permission from *Acoustics Today* 5(2), April 2009.



Reproducido, de la revista *Acoustics Today*, Volume 5, Issue 2, publicado en Abril 2009, con la autorización de la Acoustical Society of America. Traducido por la Dra. Martha Armida Fabela Cárdenas.

INTRODUCCIÓN

En una brillante mañana de otoño del pasado octubre de 2008 se dio un encuentro histórico entre tres personalidades, “iconos de la industria” que fue de sumo interés para la comunidad de especialistas en acústica. Gerhard Sessler y James West regresaron a New Jersey, el hogar de los Laboratorios Bell donde ambos comenzaron sus carreras profesionales, para su presentación como miembros del Salón de la Fama de los Inventores de New Jersey. Ray Stata, fundador de Analog Devices y pionero de los Sistemas Mico Electro Mecánicos (MEMS, por sus siglas en Inglés), se encontraba en New Jersey en viaje de negocios. Los tres se reunieron en el precioso Jardín Reeves-Reed en la ciudad de Summit, New Jersey, ver figura 1, para platicar sobre la evolución de los micrófonos comerciales hacia los MEMS.

Los doctores Sessler y West inventaron el Micrófono Condensador Electret (ECM) en los Laboratorios Bell a principios de los años sesenta.¹ El bajo costo del micrófono ECM y su reducido tamaño han permitido la fabricación de dispositivos modernos para el consumidor tales como los teléfonos celulares, los audífonos y las videocámaras. Como resultado de esto, se fabricaron más de 2 billones de micrófonos ECM solo en el 2008. En 1965, Ray Stata fundó la compañía Analog Devices (AD) que hoy es líder mundial en la tecnología de convertidores semiconductores y de microcircuitos amplificadores. A principios de los noventa, Ray Stata jugó un papel crucial en dar a conocer la tecnología MEMS al promover la fabricación de giroscopios y acelerómetros pequeños y de bajo costo para el mercado automotriz y del



Fig. 1. Kieran Harney, Gary Elko, Jim West, Gerhard Sessler y Ray Stata. (Fuente: Analog Devices).

consumidor en general. Más recientemente, Stata y su compañía desarrollaron la tecnología del micrófono MEMS que es líder mundial. En la década de los ochenta el Dr. Sessler desarrolló mucho de la investigación académica sobre micrófonos MEMS en la Universidad de Darmstadt, Alemania y se le reconoce como uno de los primeros que impulsó la investigación en el campo de los micrófonos de silicio.

Inmersos en la belleza del follaje otoñal del Jardín Reeves-Reed, Sessler, West y Stata se sentaron a platicar sobre la evolución de los micrófonos y sobre lo que el futuro pudiera traer en esta materia.

Sessler, West y los micrófonos de condensador electret (ECM)

Gerhard Sessler and Jim West empezaron sus carreras profesionales en los Laboratorios Bell de la compañía AT&T, en la década de los cincuenta. West llegó primero, en 1955, como becario de verano de la Universidad de Temple, mientras que Sessler llegó un poco después, en 1959, como recién graduado del doctorado del famoso Laboratorio del Profesor Erwin Meyer de la Universidad de Göttingen. Ambos empezaron trabajando en el entonces ya bien conocido Departamento de Investigación Acústica, un departamento que contaba con una importante y rica historia en contribuciones al campo de la acústica y a la fundación de la Sociedad Acústica de América. Esta histórica conexión entre Sessler y West es tan importante que consideramos que es necesario mencionar algunos de los sucesos más trascendentes.

Breve historia de la evolución de los micrófonos ECM

Aunque es posible encontrar la palabra micrófono en referencias que datan desde el año 1600, no es hasta 1870 cuando Alejandro Graham Bell se dio cuenta de que las señales eléctricas variantes en el tiempo eran una analogía directa de las variaciones de la presión acústica y que éstas podían usarse para transmitir voz a través de cables eléctricos.² Con esta novedad a la vista, Bell empezó a trabajar en los transductores que se requerirían para la telefonía. Un micrófono y un receptor de armadura móvil fueron las dos piezas construidas por Bell (con algo de ayuda

de Joseph Henry) y estos transductores formaron la base para la patente del teléfono de Bell en 1876. La figura 2 muestra la ya famosa “figura 7” de la patente de Bell de 1876 titulada “Mejora en la Telefonía”,² donde las membranas transductoras de armadura móvil se conectan con (a) e (i) en las bocinas de la entrada (A) y la salida (I).

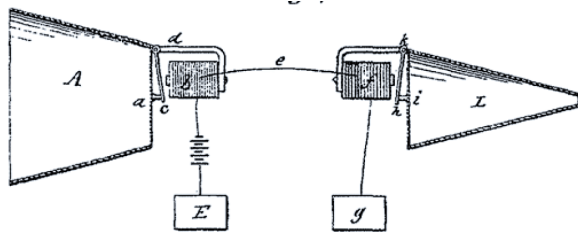


Fig. 2. Figura 7 de la patente de teléfono de Alexander Graham Bell de 1876.²

Así, el trabajo de Bell (y de sus competidores en la carrera para inventar el teléfono) puede considerarse como el principio del desarrollo del micrófono. Aunque la patente de Bell describe los transmisores de armadura móvil (término para micrófono en el campo de la telefonía) y receptores (término para bocinas), el dispositivo que transmitió la ya famosa frase “Mr. Watson, come here, I want to see you” se obtuvo usando un micrófono que consistía de una membrana que contenía una aguja conductora en un baño de agua ligeramente ácida. La modulación de la membrana producida por la voz de Bell causó una variación en el tiempo de la resistencia en el circuito que provocó una modulación correspondiente en el receptor de armadura móvil.

El hecho de que Bell utilizó un dispositivo transmisor de líquido, que fue la base del trabajo de Elisha Gray, ocasionó los alegatos de que Bell se robó el invento de Gray. Sin embargo, la patente de Bell fue registrada en la oficina de patentes antes de que Bell hubiera podido saber sobre los detalles del trabajo de Gray. El uso que hizo Bell del transmisor líquido fue parte del proceso normal de “reducir un invento a la práctica”. Bell también fue acusado de fraude e imprecisión por el gobierno de los Estados Unidos el que promovió la anulación de la patente a favor de Antonio Meucci, un inventor de Staten Island, New York, que había llenado una advertencia (un aviso anual renovable de una patente pendiente) en 1871, cinco años antes de la patente de Bell. El caso fue enviado a la Suprema Corte pero debido a la muerte de Meucci y a que la patente de Bell

expiró, nunca se determinó³ quien era el verdadero inventor del teléfono (y por tanto quién tenía derecho a la patente).³

Bell hizo demostraciones exitosas de su invento alrededor del mundo y se volvió ampliamente conocido como el inventor del teléfono. La telefonía se volvió práctica sólo hasta que Edison⁴ inventó y refinó el micrófono de carbón y que se pudieron obtener niveles adecuados de voz a distancias razonables. El diseño de micrófonos continuó vertiginosamente con el posterior desarrollo del micrófono de bobina móvil, o micrófono dinámico, propuesto por Siemens⁵ en 1874.

Con la invención del tubo de vacío Audion, de Lee DeForest, y las mejoras realizadas por la compañía Western Electric en 1916, E. C. Wente, de los Laboratorios Bell, inventó el primer micrófono de condensador basado en un diafragma tensionado que resultó estable y comercialmente viable.⁶ La figura 3 muestra un dibujo perteneciente a la patente de Wente de 1917 que muestra claramente las características principales de un micrófono condensador. El micrófono condensador de Wente estableció las reglas básicas de diseño que son la base para los micrófonos condensadores que todavía se fabrican y se utilizan hoy en día. Un hecho histórico interesante es que Wente utilizó extensamente análisis de circuitos equivalentes para modelar la respuesta a la frecuencia básica en el micrófono condensador. Evidentemente él fue uno de los primeros en utilizar “modelos de parámetros concentrados” para diseñar y entender los transductores electroacústicos.

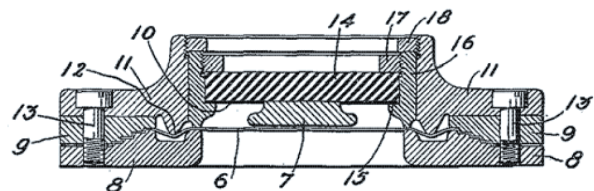


Fig. 3. Esquema del Micrófono Condensador de la patente de Edward Wente de 1917.⁶

Se avanzó aún más con la comercialización del micrófono de cinta inventado por Gerlach⁷ como bocina. El micrófono de la cinta ofrecía direccionalidad bipolar y Olson, de la RCA,⁸ desarrolló mejoras y variaciones de cinta para obtener patrones cardioides e hipercardioides. La directividad del micrófono era necesaria en las transmisiones por radio para captar fuentes por

separado y para incrementar la protección contra la retroalimentación acústica en los sistemas de voiceo público. Ben Bauer⁹ de la Compañía Shure Brothers hizo una contribución significativa a finales de los cuarenta al utilizar un filtro acústico pasivo para controlar la propagación del sonido hacia el fondo del micrófono dinámico. El filtro acústico que propuso formaba un retraso acústico que permitía la formación de un micrófono direccional con un solo diafragma de micrófono. El diseño de Bauen y las variantes del principio todavía se utilizan hoy ampliamente para fabricar micrófonos direccionales.

En 1956, el Departamento de Justicia de los Estados Unidos publicó un decreto que obligó a AT&T a vender su negocio de audio transductores. La mayor parte del negocio de audio profesional fue transferido a la compañía Altec. Por coincidencia, esta transferencia comercial ocurrió al mismo tiempo en que Jim West, entonces estudiante y becario de verano en los Laboratorios Bell, realizaba experimentos para tratar de incrementar la sensibilidad de los audífonos condensadores de alta calidad en base a los micrófonos de condensadores modelo 604AA que fabricaba la compañía Western Electric. West consiguió éxito rápidamente siguiendo el trabajo de Khul, Schodder y Schroeder¹⁰ quienes habían realizado experimentos con un dieléctrico hecho con una membrana Mylar® conocida en ese tiempo como el transductor Sell.¹¹ El transductor nuevo y grande para audífonos que Jim construyó producía niveles mucho más altos de presión sonora que el modelo 640AA. Desafortunadamente, este éxito duró poco ya que la sensibilidad del transductor se redujo considerablemente en unos cuantos meses. Khul, Schodder y Schroeder habían observado que el transductor Sell debía ser polarizado inversamente periódicamente si se deseaba utilizar el transductor por un período más largo de tiempo.

Este “problema”, como sucede con frecuencia en los hallazgos científicos, se convirtió en oportunidad. Para 1959 Gerhard Sessler se había incorporado a los Laboratorios Bell y Jim West había regresado a la universidad a investigar el problema de la sensibilidad con el transductor de los audífonos en el que había trabajado cuando era becario. En una más de esas extrañas coincidencias que parecen jugar un papel importante en la historia de la ciencia, Sessler también había trabajado con el transductor

Sell. Sessler utilizó el transductor Sell recíproco en su tesis doctoral sobre la propagación del sonido y la absorción de gases en altas y bajas presiones y temperaturas.

Cuando Jim empezó a experimentar con el problema del transductor, accidentalmente (pero por fortuna) dejó desconectada la polarización continua del Transductor Sell. Para su sorpresa, el receptor empezó a sonar muy fuerte otra vez, con su sensibilidad original, ¡ésta se había restaurado al retirarle el voltaje de polarización! (bias). Khul, Schodder y Schroeder también habían observado esta conducta pero no continuaron indagando sobre este fenómeno en su investigación.

En este punto, Sessler y West iban en la dirección correcta y se dieron cuenta que el problema de la sensibilidad se debía al hecho de que el polímero Mylar® se había cargado-compensado lentamente. La carga-compensación estaba causando que se perdiera la sensibilidad poco a poco en el transductor Sell. Cuando entendieron que éste era el problema

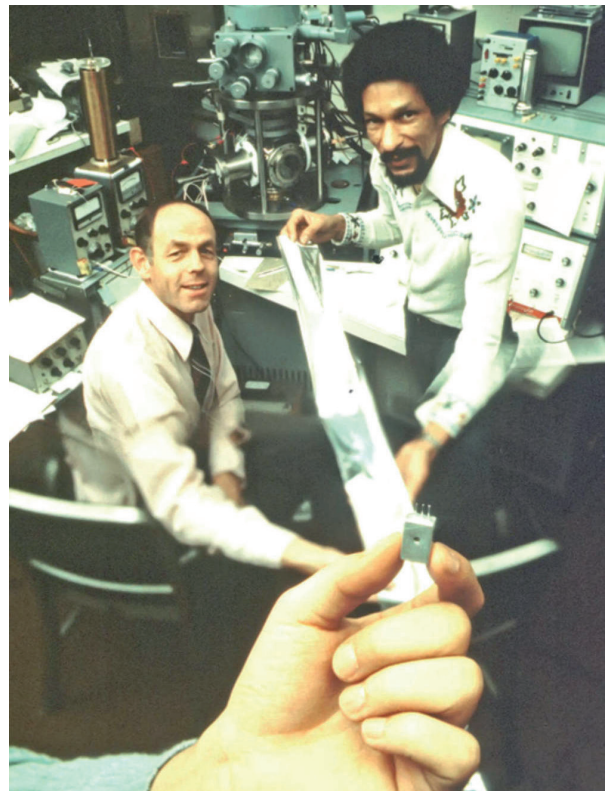


Fig. 4. Fotografía de Gerhard Sessler y Jim West en su laboratorio sosteniendo una hoja de Teflón, en los Laboratorios Bell en 1977. Al frente se muestra un microfono electret Western Electrical. (Fuente: Archivos de los Laboratorios Bell).

se fueron a revisar el Manual de Química y Física CRC¹² que era la enciclopedia de materiales en ese entonces y encontraron que el Teflon® tenía la mayor resistividad en volumen que cualquier otro material que pudieran encontrar (mayor de 10^{18} ohm-cm). Con este descubrimiento, se movilizaron para encontrar algunas hojas de Teflón® de Dupont, el creador del Teflón®. Metalizaron el Teflón® con una fina capa de aluminio y crearon el moderno micrófono electret al tensionar y cargar una membrana de Teflón® sobre un respaldo metalizado. Al igual que el micrófono condensador, el principio del electret era conocido antes de que se construyera un sistema de funcionamiento práctico, de hecho el nombre “electret” fue acreditado a Heaviside en 1892.

Es interesante mencionar que AT&T consideró que el invento del electret no era importante en términos comerciales. Aparentemente, las compañías que fabricaban teléfonos creían que el micrófono de carbón, inventado en el siglo XIX, había sido perfeccionado y su costo reducido a tal punto que ninguna otra tecnología podría sustituirlo. De esta manera pasaron casi siete años después de la primera publicación sobre el electret para que Sony en Japón produjera un micrófono electret para audiograbadoras de cinta portátiles. El diafragma ligero del micrófono electret le proporcionó a Sony un micrófono que era mucho menos sensible al ruido producido por el motor. Una vez que Sony empezó a producir el micrófono electret la producción creció exponencialmente. Un cálculo conservador estima que se producen más de 2 billones de micrófonos electret por año.

Con el tiempo, AT&T fabricó sus propios micrófonos electret para el mercado en general y para sus teléfonos, pero dicha producción terminó alrededor de 1986 cuando salieron al mercado micrófonos electret de alta calidad y bajo costo. La figura 4 es una fotografía de West y Sessler en su laboratorio (alrededor de 1970). Ambos sostienen una hoja de Teflon® metalizado que fue utilizada para probar la acumulación de carga con diferentes mecanismos, el microscopio de electret JEOL U-3 modificado que se encuentra detrás de ellos fue una de las maneras preferidas para la carga de electrets con precisión. Al frente en la fotografía se puede ver una mano que sostiene un micrófono electret EL2 manufacturado por la División de Productos para el consumidor de AT&T en Indianápolis.



Fig. 5. Fotografía de Jim West y Gerhard Sessler examinando un micrófono electret diferencial de segundo orden en 1973. (Fuente: Archivos de los Laboratorios Bell).

La figura 5 muestra una fotografía de West y Sessler en la cámara anecóica en Murray Hill (la cámara más antigua del mundo), sosteniendo un prototipo experimental de un micrófono unidireccional de segundo orden hecho a partir de un diafragma de un solo electret.¹³

En la figura 6 se ve una fotografía de West, Sessler y Flanagan en el lanzamiento del Apolo 17. West y



Fig. 6. Fotografía de Jim West, Jim Flanagan y Gerhard Sessler en el lanzamiento del Apolo 17, el 7 de diciembre de 1972. Estaban grabando la señal acústica del lanzamiento usando un sensor electret grande (de aprox. 3 pulgadas de diámetro) que podía captar frecuencias muy bajas. (Fuente: Archivos de los Laboratorios Bell).

Sessler previamente habían logrado medir con éxito señales acústicas de extremadamente baja frecuencia derivadas del lanzamiento desde Cabo Cañaveral del cohete Saturno V. La distancia entre Murray Hill, New Jersey y Cabo Cañaveral, Florida es de alrededor de 1800 kilómetros y las señales acústicas del Saturno V fueron detectadas a baja frecuencia donde la absorción atmosférica parecía lo suficientemente baja. El retraso en tiempo entre el lanzamiento y las señales detectadas en Murray Hill fue de poco más de 1.2 horas. Una nota histórica interesante es que a West y a Sessler se les solicitó que no publicaran este hallazgo ya que se utilizaba un método similar para confirmar explosiones nucleares atmosféricas. En la foto Jim y Gerhard estaban tratando de confirmar sus mediciones desde el origen pero la condensación en los electrómetros impidió que se obtuvieran los datos en el último lanzamiento del Apolo.

Gerhard Sessler dejó los Laboratorios Bell en 1975 y se fue a la Escuela Técnica de Darmstadt (hoy la Universidad de Darmstadt) en Alemania. Las razones para este cambio son interesantes. En primer lugar, él sentía que en los Laboratorios Bell la experiencia no se valoraba tanto como en una Universidad. En segundo lugar, también percibió que el péndulo se empezaba a mover, porque la palabra “relevancia” acababa de ser incorporada a los criterios de revisión de los proyectos de investigación. En Darmstadt, Sessler continuó explorando los transductores acústicos y jugó un papel fundamental en la investigación y desarrollo de los sistemas de micrófonos basados en silicio. Cuando se le preguntó qué lo inspiró para investigar en el campo de los micrófonos de silicio, él respondió “estaba en el aire”. Aparentemente, tener buen olfato es un gran atributo para un investigador. Sessler tuvo la suerte de contar con un colega y amigo que era el jefe del departamento de fabricación de Silicio en Darmstadt. Se hizo la conexión con el maquinado de silicio y Sessler y su alumno Dietmar Hohm produjeron los primeros dispositivos funcionales de silicio para micrófonos condensadores con base en el maquinado de silicio a gran escala.¹⁴

Un detalle de interés es que los Laboratorios Bell también estaban trabajando en su propio micrófono de silicio. Sin embargo, este esfuerzo se disolvió sin mucho éxito después de que los dispositivos iniciales mostraron tener un desempeño acústico

pobre debido a que el diafragma era muy rígido, (incluso después de modificar con impurezas en un intento para reducir la rigidez a la flexión). Los Laboratorios Bell también fueron innovadores al utilizar tempranamente sistemas micro electro mecánicos y de hecho hicieron experimentos en micrófonos MEMS pero estos dispositivos se quedaron como experimentos de laboratorio ya que a la compañía no le interesaba producir dispositivos comerciales. Las semejanzas con respecto a como fue desdénado el micrófono electret, no se pueden pasar por alto.

Como uno puede ver, hay un fuerte hilo histórico que une la invención del micrófono en 1876 con los micrófonos MEMS de silicio de hoy. Gerhard Sessler y Jim West jugaron un papel crucial en la creación del ubicuo electret de hoy y los futuros micrófonos MEMS de silicio para aplicaciones en micrófonos de consumo general.

Stata y los sistemas micro electromecánicos (MEMS)

Después de graduarse del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT en inglés) en 1957, Ray Stata persiguió su objetivo de crear una compañía que fuera un lugar para ingenieros creativos que desarrollaran componentes electrónicos. En 1959, de manera casual se encontró en la Plaza Harvard con Matthew Lorber, un excompañero del MIT. Juntos crearon una compañía llamada Solid State Instruments que luego vendieron a Kollmorgen Corporation. El Sr. Stata fue nombrado vicepresidente de comercialización de la División de Inlad Controls de Kollmorgen. Con el fruto de la venta de la compañía Solid State Instruments y la experiencia en Kollmorgen, Stata y Lorber fundaron la compañía Analog Devices Inc., (ADI), en enero de 1965. Su primer producto fue un amplificador operacional de propósito general – un módulo de tamaño pequeño que se utilizó en equipos de prueba y medición. Desde el principio, el objetivo era lograr un amplificador operacional de alto desempeño que fuera realmente útil al consumidor (ver figura. 7-8).

La compañía Analog Devices continuó creciendo y en 1969, al lograr ventas de más de \$8.7 millones de dólares, empezaron a vender acciones generando así el efectivo que se necesitaba para convertirla en



Fig. 7. Matt Lorber y Ray Stata en 1965. (Fuente: Analog Devices).



Fig. 8. Ray Stata presenta los amplificadores operacionales. (Fuente: Analog Devices).

fabricante de circuitos integrados. Al mismo tiempo que continuaron manufacturando otros productos innovadores, la adquisición de la compañía Pastoriza Electronics permitió que Analog Devices se convirtiera en la compañía que llegó a dominar el mercado de convertidores análogo a digital y digital a análogo.

A lo largo de estos primeros años, Ray Stata quería crear una compañía de ingeniería tecnológica donde los ingenieros pudieran enfocarse en el desempeño de los productos. Con este enfoque en las áreas centrales de amplificadores operacionales, convertidores análogo-digital y digital-analógico y procesadores de señales digitales (DPS por sus siglas en inglés) Stata creó una serie de productos de muy amplio uso en el mundo actual de la acústica y el audio.

Desde que fundó la compañía ADI, Ray Stata ha infundido en ésta un fuerte espíritu

emprendedor. Se impulsó la creación de nuevas ideas y muchas se apoyaron y financiaron como productos potencialmente innovadores. A mediados de la década de los 80, algunos ingenieros de ADI empezaron a explorar una nueva tecnología llamada MEMS (Sistemas Micro electromecánicos). Para 1989 se estaban haciendo prototipos experimentales de acelerómetros MEMS en los que se puso suficiente financiamiento para explorar más esa tecnología y desarrollar un producto para el mercado.

El elemento central de un acelerómetro MEMS típico es una estructura tipo viga móvil con “masas de prueba” movible de palancas. Este elemento se compone básicamente de dos juegos de vigas (dedos); un juego está fijo a un plano fijo sólido en un sustrato, y el otro juego está unido a una masa conocida montada sobre resortes que se pueden mover en respuesta a la aceleración. Bajo aceleración hay un cambio en la capacitancia detectada entre los conjuntos de vigas fijas y móviles.¹⁵

Las dimensiones de estas estructuras MEMS son del orden de micras, por lo que requieren el uso de tecnologías de fotolitografía y grabado de muy alta precisión en silicio. Estos dispositivos también necesitan circuitos electrónicos de muy bajo ruido para detectar los cambios extremadamente pequeños en la capacitancia (medidos en el orden de los femtofaradios). Las estructuras MEMS se forman esencialmente cristales simple de silicio o de polisilicio depositado a muy altas temperaturas en la superficie de una plaqueta de cristal simple de un silicio. Se pueden crear estructuras con características mecánicas muy diferentes usando esta tecnología flexible.

Mientras que al final de la década de los 80 no estaba claro el potencial de utilización de los acelerómetros MEMS en el mercado en general, sí se identificó a la industria automotriz como una de las oportunidades de mercado más prometedoras para los acelerómetros, necesarios para la activación de las bolsas de aire. La tecnología utilizada en ese entonces era una esfera y un tubo sensor¹⁶ relativamente grande y resultaba una solución cara. En el período de 1991 a 1997, con una inversión importante, se presentaron al mercado automotriz dos de los acelerómetros de ADI para la activación de las bolsas de aire los que fueron recibidos exitosamente por el mercado. Su tamaño pequeño y relativo bajo costo impulsó la

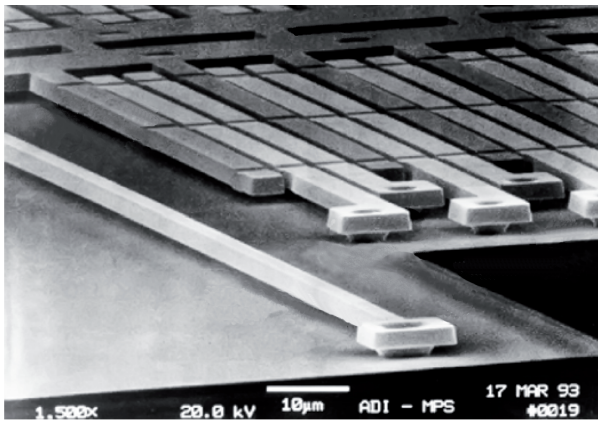


Fig. 9. Estructura del Acelerómetro ADXL50 MEMS. (Fuente: Analog Devices).

adopción masiva de las bolsas de aire para todos los automóviles.

Sin embargo, mientras los MEMS lograban reconocimiento y éxito en el mercado, quedaban desafíos en relación con el desarrollo de una estructura muy flexible y estable para esta tecnología.¹⁷ Durante ese período crítico Ray Stata jugó un papel crucial ya que era el gerente más experimentado dedicado a apoyar esa tecnología. De 1997 al 2000 el Sr. Stata promovió los MEMS en la compañía ADI al incorporarse como Gerente General de la División de MEMS y al dirigir la compañía en este período crítico para su desarrollo.¹⁸ Hoy, la compañía ADI es reconocida como una de las líderes en giroscopios y acelerómetros MEMS con productos en una amplia variedad de áreas, incluyendo la automotriz, la industrial y el mercado en general (ver figura 9). ¿Quién hubiera imaginado que esta tecnología esencial de MEMS, diseñada específicamente para las bolsas de aire en el mercado automotriz, iba a encontrar un uso que hiciera posible la tecnología del Nintendo Wii? Construyendo sobre los sólidos cimientos de sus sensores inerciales, amplificadores y convertidores Analog Devices anunció recientemente una gama de micrófonos MEMS de alto desempeño.

Breve historia de la evolución de micrófonos MEMS

Los sensores de presión son de los primeros ejemplos de éxito comercial del micro maquinado de silicio que datan de 1960 y 1970. En 1982, Peterson¹⁹ describió en detalle el estado de la tecnología de micro

maquinado en su artículo “El silicio como material mecánico”, pero no mencionó específicamente el uso de esa tecnología para producir micrófonos.

En 1983, Roger *et al.*²⁰ describieron un micrófono de silicio micromaqueado con base en el efecto piezoeléctrico. El elemento sensor era un diafragma desviable compuesto de silicio y óxido de zinc (ZnO). El objetivo de ese trabajo era crear un micro sensor que pudiera ser utilizado para monitorear el grosor de la cinta (film) en el área de fabricación de la plaqueta IC como herramienta de control del proceso.

En julio de 1983 Dietmar Hohm y Gerhard Sessler solicitaron una patente en Alemania titulada “Transductores capacitivos basados en silicio que incorporan el electret de dióxido de silicio”.²¹ figura 10). Esta primera versión de un micrófono utilizando un respaldo electret de dióxido de silicio cargado se describe en detalle en Hohm y Mulhaupt (1984).²² El prototipo consistía de una placa de respaldo de 10 mm x 10 mm fabricada con un silicio tipo-p con una capa superior de dióxido de silicio de 2 micras de espesor. El diafragma era una membrana Mylar de 13 micras de espesor con una capa de aluminio separada de la placa de respaldo por un anillo de polímero de 30 micras de espesor. Un agujero de 1 mm de diámetro en el respaldo proporciona la ruta para un volumen trasero formado con el cuerpo del micrófono. La estabilidad de carga de largo plazo del electrodo de SiO₂ fue evaluada durante 20 meses y se encontró que no presentaba una disminución que fuera medible. En 1989, Murphy *et al.*²³ describieron prototipos de un micrófono electret de silicio que se fabricó como placa de respaldo una oblea de silicio con un recubrimiento de SiO₂ como el del electret y

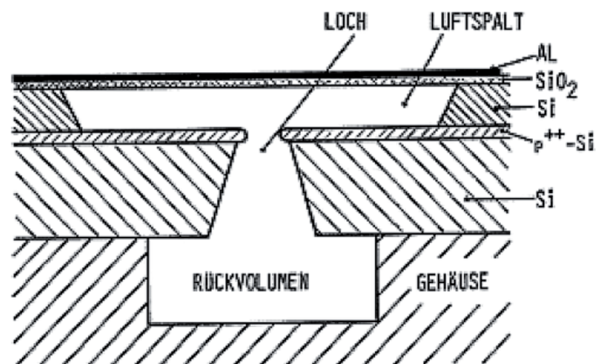


Fig. 10. La patente de Hohm y Sessler de 1983.²¹

utilizando una segunda plaqueta con agujeros a través para formar el espaciador para el diafragma.

En 1989 Hohm y Hess²⁴ presentaron un micrófono de silicio polarizado externamente compuesto por un diafragma formado sobre una plaqueta de silicio y el respaldo formado por una segunda plaqueta. Estos elementos se unían adecuadamente para formar un micrófono (figura. 11). El respaldo estaba hecho de una plaqueta de silicio con una capa electrodo de SiO₂ que también incluía una capa espaciadora para formar el espacio entre electrodos. Se le hicieron ranuras al respaldo para reducir la rigidez de la capa de aire entre el diafragma y el respaldo. El diafragma fue hecho de una capa de nitrato de silicio (Si₃N₄) producida en una plaqueta de silicio separada. El diafragma y el respaldo eran pegadas juntas para formar el transductor final que medía 1.7 mm por 2 mm. Se hicieron mediciones experimentales utilizando un polarizado de DC de 28 V. y reportaron medidas de sensibilidad de circuito abierto comparables a las de los micrófonos convencionales. En sus conclusiones, Hohm y Hess predicen que “los micrófonos de silicio muy probablemente encontrarán aplicaciones en todos los campos donde se requieran dimensiones pequeñas más que una alta relación de señal-ruido”. Este fue el primer micrófono de condensador subminiatura con un diafragma de menos de 1 mm x 1mm.²⁵

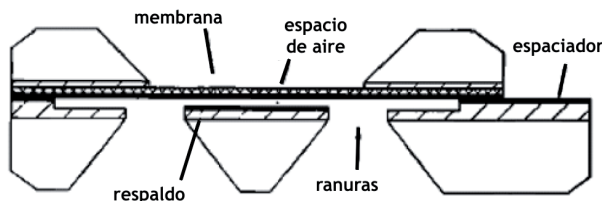


Fig. 11. Micrófono de Silicio transeccional.²⁴

En 1990 Bergqvist *et al.*²⁶ del Instituto Tecnológico Federal de Lausana describieron el micrófono de silicio que tenía un respaldo altamente perforado y un polarizado (bias) de 5 voltios. Describieron el proceso de fabricación de una plaqueta (oblea) de la cual argumentaban que era adecuada para la manufactura de gran volumen. El diafragma y el respaldo fueron fabricados con dos plaquetas separadas que eran unidas posteriormente utilizando el pegado de plaquetas.

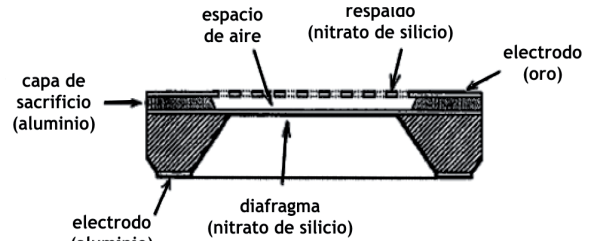


Fig. 12. Micrófono condensador de silicio simple.²⁷

Scheeper *et al.*²⁷ presentaron un micrófono MEMS fabricado sobre una plaqueta de silicio en 1992. El diafragma y el respaldo altamente perforado se formaba con nitrato de silicio depositado en vapor y utilizado una capa de aluminio de sacrificio para formar el vacío entre el diafragma y el respaldo (figura 12). Se reportó una respuesta a la frecuencia-plana entre los 100 Hz y los 14 kHz. Se puede encontrar una descripción detallada de los primeros desarrollos de los micrófonos MEMS de los 80's y principios de los 90's en un artículo de Sessler (1996)²⁴ y otros de Scheeper *et al.* (1994).²⁸

La primera comercialización de los micrófonos MEMS fue en el 2003 cuando Knowles lanzó al mercado el micrófono MEMS de montaje superficial marca SiSonic.²⁹ Knowles empezó el desarrollo de micrófonos MEMS a principios de los 90's. En esa época, su objetivo era aplicarlos en los audífonos para mejorar la capacidad de oír de las personas (ayudas auditivas) pero el enfoque cambió hacia el mercado de consumo en el que pudieron aprovechar las oportunidades en el mercado de los teléfonos móviles. A la fecha, Knowles ha vendido más de 300 millones de micrófonos MEMS para aplicaciones del mercado de consumo general que incluyen teléfonos celulares, cámaras digitales y diademas Bluetooth.³¹ El micrófono Knowles incorpora un elemento MEMS y una matriz (CMOS complementary metal oxide semiconductor) combinados en un paquete acústico para montaje superficial. El sensor consiste de un

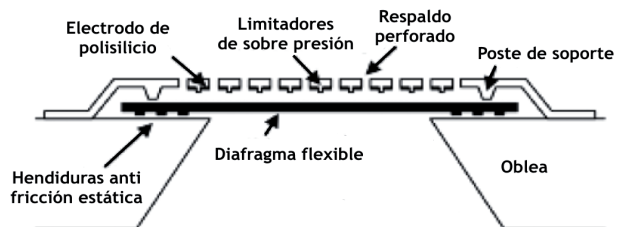


Fig. 13. Micrófono transeccional SiSonic® MEMS de Knowles.

diafragma flexible separado de un respaldo rígido perforado (figura. 13). El diafragma está fabricado de polisilicio de 1 micra de grosor y tiene un diámetro efectivo de 0.5 mm. Se mantiene una separación de 4 micras entre el diafragma y el respaldo con una serie de postes de apoyo.²⁹

En 2005 Sonion, un fabricante Danés de transductores de audio, lanzó al mercado el SiMic[®]³² que consiste de un elemento sensor MEMS y un circuito integrado de aplicación específica (ASIC por sus siglas en inglés) como acondicionador de señal, ambos montados directamente sobre un sustrato de silicio que los carga. El paquete de micrófono, todo de silicio, medía 2.6 mm x 1.6 mm x 0.865 mm.³³ El desarrollo del micrófono MEMS de Sonion empezó en 1993 en una colaboración con el Centro de Micro electrónica de la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU). Pulse es una división de Technitrol que adquirió todo de Sonion, incluyendo micrófono MEMS de Sonion. En Internet se puede encontrar más información sobre Pulse.³⁴

Otro enfoque a los micrófonos MEMS es la integración del elemento sensor MEMS y la electrónica del sensor en un solo “chip” de silicio. Bernstein y Borenstein³⁵ describieron un micrófono MEMS con un diafragma de 1 mm apoyado en soportes elásticos, un respaldo perforado chapado en oro y un amplificador sobre el chip. Pedersen *et al.*³⁶ propusieron un micrófono integrado con una salida digital. El elemento sensor del micrófono era una estructura de poliamida depositada en una plaqueta de circuito CMOS estándar (figura. 14). La ventaja de la poliamida es que puede ser depositada a bajas temperaturas, las que no afectarán a los dispositivos CMOS.

Neuman y Gabriel³⁷ describieron en el 2003 un micrófono MEMS CMOS integrado que es la base para el micrófono Akustica MEMS lanzado al mercado en el 2006. El diafragma se forma de las

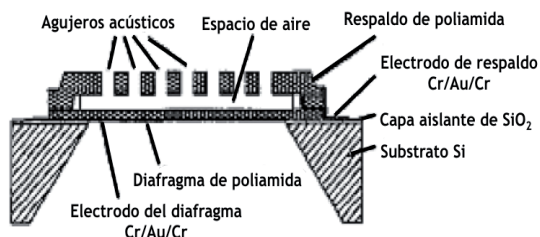


Fig. 14. Micrófono capacitivo de poliamida.³⁶

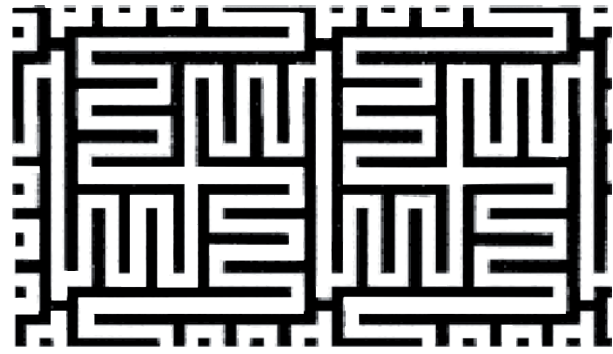


Fig. 15. Diseño del Diafragma de la malla de serpiente acústica.³⁸

capas de metal y óxido del nivel superior de la plaqueta CMOS al terminar la fabricación del circuito. Una malla con un patrón repetido de laberinto de metal y óxido es grabado dentro del área del diafragma y la expulsión de la polisilicio subyacente de la capa de sacrificio forma un diafragma suspendido (figura 15).³⁸ Entonces se deposita un polímero sobre el área de la malla para formar un sello hermético sobre la cavidad.

En el 2006 Weigold *et al.*³⁹ describieron un micrófono MEMS con un diafragma de 0.5 mm montado sobre elementos elásticos para maximizar la sensibilidad usando un voltaje de polarización (bajo). El respaldo se forma de la capa de dispositivo de la plaqueta de SOI (silicio sobre aislante) y el diafragma de 1 micra de grosor se forma utilizando un depósito de polisilicio. La figura 16 corresponde a una micrografía de microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) que muestra la superficie de arriba del diafragma donde se ve el

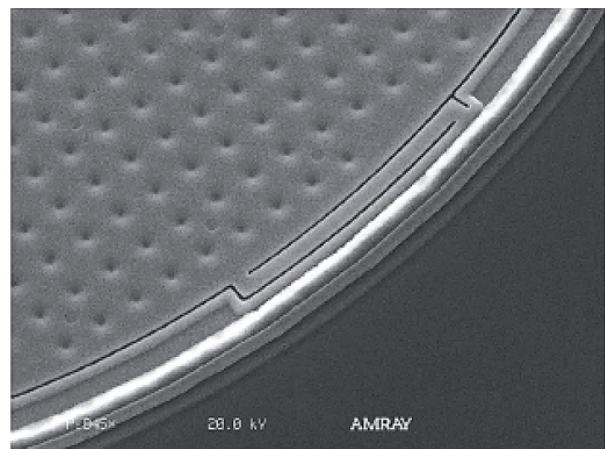


Fig. 16. Micrografía de microscopía electrónica de barrido (SEM) del diafragma del micrófono de la compañía Analog Devices.³⁹



Fig. 17. Ray Stata, Gerhard Sessler y Jim West platican acerca de los micrófonos en aparatos portátiles. (Fuente: Analog Devices).

mecanismo elástico de apoyo. Esta tecnología es la base para los micrófonos MEMS de la compañía Analog Devices (ADI).

Hemos rastreado la evolución de la tecnología de los micrófonos MEMS a través de los años desde el trabajo seminal de Sessler hasta el reciente éxito comercial de Knowles. Es aún más fascinante examinar los paralelos entre los primeros días de la comercialización del micrófono condensador electret con lo que está ocurriendo actualmente con los MEMS. Con los antecedentes de Gerhard Sessler y Jim West con los micrófonos electret y los MEMS, y con las contribuciones de Ray Stata a los MEMS, los convertidores y los amplificadores, se entiende entonces porque la reunión en el Jardín Reeves-Reed fue un evento histórico irrepetible.

Los Micrófonos de Condensador Electret (ECM) se encuentran con los micrófonos de Sistema Micro Electro-Mecánico (MEMS)

Es muy interesante reflexionar sobre la evolución de una tecnología desde su fase de desarrollo inicial hasta su éxito comercial final. Más interesante resulta la oportunidad única de ser testigos de una discusión entre veteranos de tal prestigio en la industria que desempeñaron un papel sostenido en la creación y desarrollo de productos exitosos que han logrado la ubicuidad.

Curiosamente, la discusión informal que sostuvieron empezó con algunas observaciones acuciosas sobre el estado de los dispositivos electrónicos para el consumidor en la década de los 60's. En esa época los productos de consumo eran en su mayoría artículos como los aparatos de televisión y de radio. Las audio grabadoras apenas empezaban a surgir para el mercado consumidor y

la mayoría de éstas utilizaban micrófonos externos para minimizar el ruido mecánico del motor de la grabadora el cual era capturado por el micrófono. Sessler y West observaron que el micrófono de condensador electret ofrecía ventajas potenciales muy significativas especialmente por su tamaño pequeño y la sensibilidad a la vibración respecto a los micrófonos dinámicos que se vendían en esa época.

Sessler y West también reflexionaron acerca del rechazo inicial a la tecnología que actualmente fabrica más de dos billones de unidades por año para todos los segmentos del mercado actual. Stata también reflexionó acerca de los primeros esfuerzos por desarrollar los acelerómetros MEMS cuando nadie podía prever que estos se convertirían en una de las tecnologías centrales para los teléfonos celulares y los videojuegos. Compañías como Motorola, con sus sensores de presión, Texas Instruments con los procesadores digitales de luz (DLP) y Analog Devices con los acelerómetros y giróscopos fueron los pioneros de estas tecnologías. Mientras que Knowles creó un mayor furor cuando fabricó los primeros micrófonos MEMS disponibles comercialmente.

Los micrófonos MEMS han tenido un éxito considerable porque solucionan una de las debilidades clave del micrófono condensador electret, específicamente la reducción de sensibilidad producida por las temperaturas en el proceso de soldadura de reflujo. Se continúa trabajando para crear electrets más estables y se han reportado éxitos en los últimos años. Sessler comentó que él piensa que todavía es muy pronto para descartar a los ECM pero admitió que los MEMS ofrecen ventajas potenciales muy importantes. Stata declaró que él siente que una de las ventajas clave que los MEMS ofrecen es que la controlabilidad del proceso fotolitográfico crea un desempeño muy estable de unidad a unidad. Consideró que lo más importante es la habilidad para integrar mejor la electrónica subyacente con el transductor desde fabricación.

Por ejemplo, la integración de un convertidor analógico-digital y un amplificador programable abre las oportunidades para minimizar aún más el tamaño del producto para el usuario final al mismo tiempo que se mejora el desempeño relacionado con el rechazo del ruido de la fuente de energía, la interferencia de radio-frecuencias (RFI), y la

inmunidad a la interferencia electromagnética (EMI) de las señales de salida digital. Todos estuvieron de acuerdo en que un reto mayúsculo en los dispositivos para el consumidor es la continua búsqueda por dispositivos cada vez más pequeños con cada vez mejor desempeño. Jim West comentó sobre la necesidad de micrófonos que tengan mejor desempeño y más funcionalidad y que sean capaces de caber dentro de productos cada vez más pequeños, y que estaba interesado especialmente en el uso de micrófonos múltiples para reducir el ruido de fondo y mejorar la calidad del audio en teléfonos celulares y dispositivos móviles.

Después de más de 50 años de la invención del micrófono electret dicho producto sigue siendo el micrófono de más bajo costo y más alto volumen de ventas en uso. Los micrófonos MEMS empiezan a ganar presencia en el mercado solucionando algunos de los nuevos requerimientos del mercado que el micrófono condensador electret no satisface. Será interesante reflexionar sobre el pasado dentro de 50 años para observar lo que ha ocurrido para entonces.

REFERENCIAS

1. G. M. Sessler and J. E. West. Self-biased Condenser Microphone with High Capacitance. *J. Acoust. Soc. Am.* 34, 1787–1788 (1962).
2. Alexander Graham Bell, U.S. Patent 174465. Improvement in Telephony. (1876).
3. A. J. Campanella. Antonio Meucci, The speaking telegraph, and the first telephone. *Acoustics Today* 3(2), 37–45 (2007).
4. Thomas A. Edison, U.S. Patent 474230. Speaking Telegraph. (1877).
5. E. W. Siemens, U.S. Patent 149797. Improvement in magnetoelectric apparatus. (1874).
6. Edward C. Wente, U.S. Patent 1333744. Telephone-Transmitter. (1920).
7. E. Gerlach, U.S. Patent 1557336. Electrodynamical Loud Speaking Apparatus. (1925).
8. Harry F. Olson. A History of High-Quality Studio Microphones. *J. Audio Eng. Soc.* 24(10), 798–807 (1976).
9. Benjamin Bauer. Uniphase Unidirectional Microphones. *J. Acoust. Soc. Am.* 13, 41–45 (1941).
10. W. Kuhl, G. R. Schodder, F. K. Schroeder. Condenser transmitters and microphones with solid dielectric for airborne ultrasonics. *Acustica* 4, 519–532 (1954).
11. H. Sell. Eine neue Methode zur Umwandlung mechanischer Schwingungen in elektrische und umgekehrt. (A new method for converting mechanical vibrations into electrical and viceversa), *Z. Tech. Phys.* 18, 3 (1937).
12. Handbook of Chemistry and Physics, 38th Edition (Chemical Rubber Publishing Company, Cleveland, 1957).
13. Gerhard M. Sessler and James E. West. Second-order gradient unidirectional microphones utilizing an electret transducer. *J. Acoust. Soc. Am.* 58(1), 273–278 (1975).
14. D. Hohm and G. M. Sessler. An integrated silicon-electret-condenser microphone in Proc. 11th International Congress on Acoustics 6, 29–32 (1983).
15. F. Goodenough. Airbags Boom When IC Accelerometer Sees 50 G. *Electronic Design*, 45–56 (August 8, 1991).
16. M. Madou, Fundamentals of Microfabrication, 2nd Edition (CRC Press, Boca Raton, FL, 2002).
17. V. Govindarajan and C. Trimble. Building Breakthrough Businesses Within Established Organizations. *Harvard Business Review*, 60–62 (May 2005).
18. C. Trimble. Analog Devices Incorporated: Microelectromechanical Systems (MEMS). Tuck School of Business at Dartmouth case study (2002).
19. K. Peterson. Silicon as a Mechanical Material. *Proc. IEEE* 70(5), 450–457 (May 1982).
20. M. Royer, J. O. Holmen, M. A. Wurm, O. S. Aadland, and M. Glenn. ZnO on Si integrated acoustic sensor. *Sensors and Actuators* 4, 357–363 (1983).

21. D. Hohm, G. Sessler. Kapazitive Wandler auf Siliziumbasis mit Siliziumdioxid-Electret. (Silicon-based capacitive transducer with silicon dioxide electret), German Patent DE 3325961 A1, Application (1983).
22. D. Hohm and R. Gerhard-Multhaupt. Silicon-dioxide electret transducer. *J. Acoust. Soc. Am.* 75(4), 1297–1298 (1984).
23. P. Murphy, K. Hubschi, N. De. Rooik, and C. Racine. Subminiature Silicon Integrated Electret Capacitor Microphone. *IEEE Trans. on Electrical Insulation* 24(3), 495–498 (1989).
24. D. Hohm and G. Hess. A subminiature condenser microphone with silicon nitride membrane and silicon back plate. *J. Acoust. Soc. Am.* 85(1), 476–480 (1989).
25. G. Sessler. Silicon Microphones. *J. Audio Eng. Soc.* 44(1/2), 16–21 (1996).
26. J. Bergqvist and F. Rudolf. A new condenser microphone in silicon. *Sensors and Actuators A21-23*, 123–125 (1990).
27. P. R. Scheeper, A. G. H. van der Donk, W. Olthuis, and P. Bergveld, “Fabrication of silicon condenser microphones using single wafer technology,” *J. of Microelectromechanical Sys.* 1(3), 147–154 (1992).
28. P. R. Scheeper, A. G. H. van der Donk, W. Olthuis, and P. Bergveld. A review of silicon microphones. *Sensors and Actuators A44*, 1–11 (1994).
29. P. Loeppert and Sung B. Lee. SiSonic™—The first commercialized MEMS microphone. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop*, Hilton Head, June 4–8, 2006.
30. Talking Point—Making Money in MEMS, *epon-line* <http://www.epon-line.com/page/new59003/talking-pointmaking-money-in-mems.html> (2009). Last viewed 5/1/2009.
31. Knowles ships 300 millionth MEMS microphone. *Small Times*, *Smalltimes.com* http://www.smalltimes.com/articles/article_display.cfm?Section=ARCHI&C=Elect&ARTICLE_ID=277301&p=109 (2006). Last viewed 5/1/2009.
32. J. Philipsen. MEMS microphones for high-volume applications. *1st Euripides Forum*, June 28–29 (2007).
33. J. Citakovic, F. Hovesteen, G. Rocca, A. Van Halteren, P. Rombach, L. Stenberg, P. Andreani, and E. Bruun. A compact CMOS MEMS Microphone with 66dB SNR. *IEEE Intl. Solid-State Circuits Conf.*, 350–351 (2009).
34. *www.pulseeng.com*. Last viewed 5/1/2009.
35. J. J. Bernstein, J. T. Borenstein. A micromachined silicon condenser microphone with on-chip amplifier. *Proceedings of the Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head, 239–243 (1996).
36. M. Pedersen, W. Olthuis, and P. Bergveld. An integrated silicon capacitive microphone with frequency-modulated digital output. *Sensors and Actuators A69*, 267–275 (1998).
37. J. J. Neumann and K. J. Gabriel. A fully-integrated CMOSMEMS audio microphone. *12th Intl. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators and Microsystems*, June 8–12, 2003.
38. J. J. Neumann and K. J. Gabriel. CMOS-MEMS membrane for audio frequency acoustic actuation. *14th Intl. Conf. on Micro-Electro-Mechanical-Systems*, 236–239, January 21–25 2001.
39. J. W. Weigold, T. J. Brosnihan, J. Bergeron, and X. Zhang. A MEMS condenser microphone for consumer applications. *Proc. IEEE MEMS '06*, Istanbul, Turkey, 86–89 (2006).