

## El oído humano

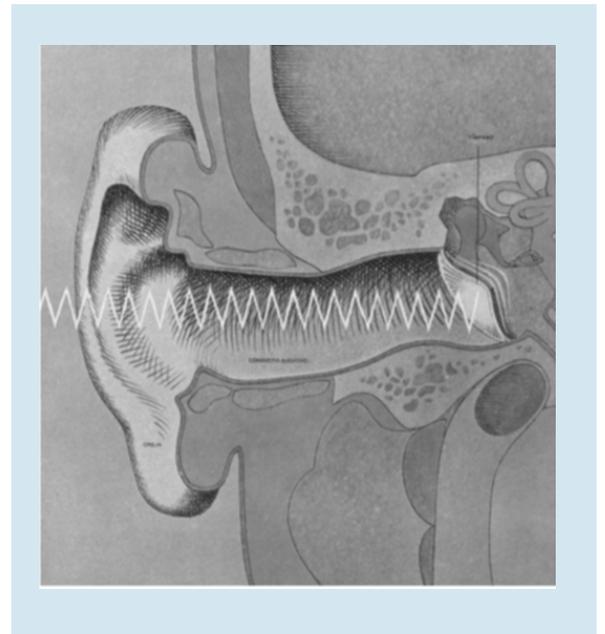
como generador de sonido y su transducción.

En el estudio de los microsensores, la micromecánica del silicio es producto de la tendencia natural de la tecnología de los circuitos integrados, para obtener una mayor cantidad de funciones en un solo microcircuito. Los dispositivos micromecánicos se obtienen con técnicas de micromaquinado, las cuales se llevan a cabo mediante un ataque químico anisotrópico al silicio con solución de KOH en agua. Los dispositivos micromecánicos, sensores de presión en silicio, más desarrollados, son del tipo piezorresistivo y de efecto capacitivo. Los sensores con efecto capacitivo, se basan en la variación de capacitancia debida a cambios en la separación entre dos placas conductoras. Un diafragma corrugado que cuenta con una zona central plana, posee una sensibilidad mayor que los sensores con efecto capacitivo debido a que los esfuerzos internos del cristal son absorbidos por el corrugado en la periferia. Los diafragmas corrugados pueden construirse adecuadamente con micromaquinado al silicio. Una aplicación posible es la detección de las emisiones otoacústicas (EOA). En el registro de la EOA es necesario un micrófono miniatura que pueda colocarse en el canal auditivo, donde el diámetro del diafragma del micrófono debe ser menor que una longitud de 3 mm y con una sensibilidad capaz de registrar presiones de hasta  $0.5 \times 10^{-3}$  Pa. Un micrófono con una sensibilidad de 10 mV/Pa, generaría una señal máxima en voltaje de 5 mV.

### Introducción

¿Qué es exactamente el sonido? Hace muchos años este problema suscitó agudos debates entre intelectuales europeos. “Si cae un árbol en el bosque”, preguntaban los pensadores del siglo XVIII “y no hay alguien ahí que lo oiga”, ¿habrá sonido? El sonido consiste en ciertos fenómenos físicos que ocurren inde-

pendientemente de que alguien los escuche o no. Es un movimiento organizado de las moléculas causado por un cuerpo que vibra en un medio propicio: agua, aire, rocas o cualquier otra cosa. El dispositivo transductor que asocia a nuestro cerebro con el sonido es el oído humano, como la mayor parte de los sentidos somáticos es un sentido mecanorreceptivo, pues el oído humano responde a la vibración mecánica de las ondas sonoras en el aire, figura (1).



**Figura (1).** El proceso de la audición comienza cuando las ondas sonoras penetran por el conducto del oído externo. El conducto condensa las ondas y las lleva al tímpano, como está tensado, vibra, lentamente tratándose de tonos bajos y rápidamente de altos. El pabellón del oído realiza una función meramente secundaria en la audición, pues no hace más que concentrar los sonidos y pasarlos al conducto.

## El oído externo, medio e interno

Tras estas porciones de piel y cartilago se encuentra una estructura muy delicada: el oído externo llega hasta el tímpano, que es una membrana sensible a la presión. El oído medio, en el cual tres huesecillos transmiten y amplifican las vibraciones del tímpano. Más allá y lleno de líquido se encuentra el oído interno, allí se encuentra la cóclea que convierte el sonido en impulsos nerviosos [1], figura (2).

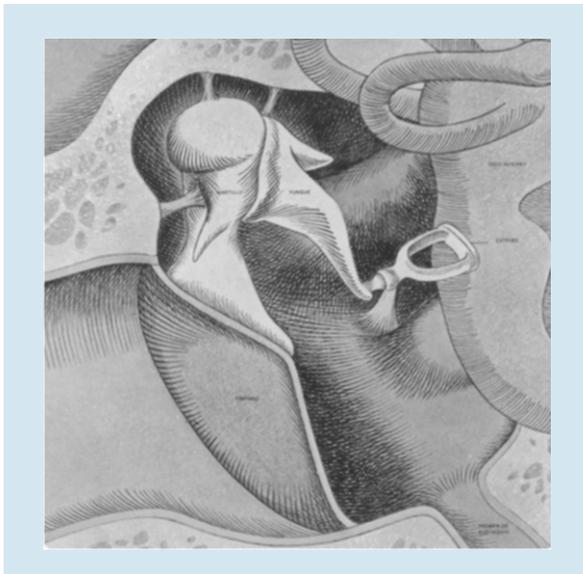


Figura (2). El oído medio: hay tres huesecillos u oscículos llamados el martillo, el yunque y el estribo, que forman un puente móvil. El martillo que está sujeto al tímpano, recoge las vibraciones sonoras, que luego son llevadas al oído interno por el yunque y el estribo. Así pues, las ondas sonoras llegan en forma de energía mecánica amplificada

## Las EOA y los sensores de presión micromecánicos.

Recientemente se ha demostrado que las emisiones otoacústicas (EOA) son señales acústicas que se generan precisamente en el oído interno (cóclea) y pueden registrarse en el canal auditivo [1]. El registro y análisis de las EOA ofrecen además de un método de diagnóstico audiológico, una herramienta invaluable en la investigación del funcionamiento del sistema auditivo periférico. En el registro de la EOA es necesario un micrófono miniatura que pueda colocarse en el canal auditivo, de modo que el diámetro del diafragma del micrófono debe ser menor que una longitud de 3 mm y con una sensibilidad capaz de registrar presiones de

hasta  $0.5 \times 10^{-3}$  Pa [2]. Un micrófono con una sensibilidad de 10 mV/Pa, generaría una señal máxima en voltaje de 5 mV. El empleo de tecnología planar en la fabricación de micrófonos miniatura proporciona mayor grado de control para reducir sus propias dimensiones [3], figura (3).

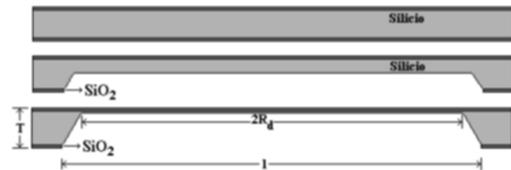


Figura (3). La miniaturización de los micrófonos es factible mediante el uso de la tecnología planar en el silicio. Con ella es posible construir micrófonos del tipo capacitivo, piezorresistivo y piezoeléctrico, entre otros, la obtención de membranas delgadas de silicio constituye el arma fundamental de la sensibilidad de este tipo de microsensors.

Las propiedades en las que los sensores micromecánicos de silicio aventajan a los convencionales son: su fabricación masiva, la posibilidad de integración y la gran cantidad de estructuras micromecánicas-electrónicas que pueden elaborarse. Los dispositivos micromecánicos se obtienen con técnicas de micromaquinado, mismas que se llevan a cabo mediante un ataque químico anisotrópico con una solución de KOH y agua sobre silicio [4], figura (4).

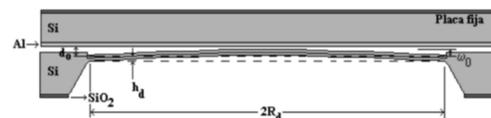
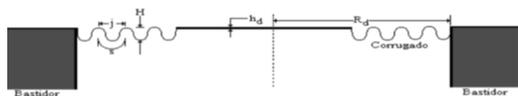


Figura (4). El desplazamiento de una membrana delgada (metalizada con aluminio) de silicio respecto a una segunda placa fija, constituye el principio de funcionamiento de un micrófono del tipo capacitivo.

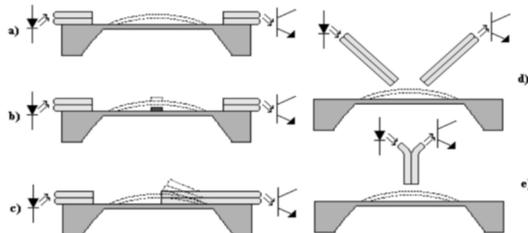
## Los diafragmas corrugados de silicio aportan una sensibilidad mayor a la presión

La aplicación de los diafragmas corrugados en micrófonos o sensores de presión capacitivos u ópticos, ofrecen la posibilidad de incrementar la sensibilidad mecánica del diafragma mediante el control de las dimensiones del corrugado, las cuales se pueden modificar dentro del proceso de fabricación, figura (5).



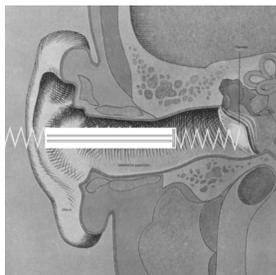
**Figura (5).** Vista de la sección transversal de un diafragma corrugado circular. La suspensión corrugada que sostiene al plano central del diafragma, hace las veces de resortes que sostienen una masa. De esta manera el plano central del diafragma se desplaza como un pistón.

El diafragma de silicio con corrugado en la periferia construido mediante el micromaquinado es perfectamente compatible con la tecnología microelectrónica [5], además las excelentes propiedades elásticas del silicio monocristalino combinadas con las bondades de un sistema óptico electrónico como el acoplamiento de dos fibras ópticas con un diafragma corrugado ultra delgado se explotan para obtener un transductor de presión sonora de alta sensibilidad para una sonda otoacústica, figura (6). Una de las ventajas más importantes que se obtienen, en este tipo de sensores, es la inmunidad a diferentes fuentes de ruido tales como: electromagnético, térmico, eléctrico, etc. El acoplamiento de la sonda otoacústica para su caracterización se muestra en la figura (7).



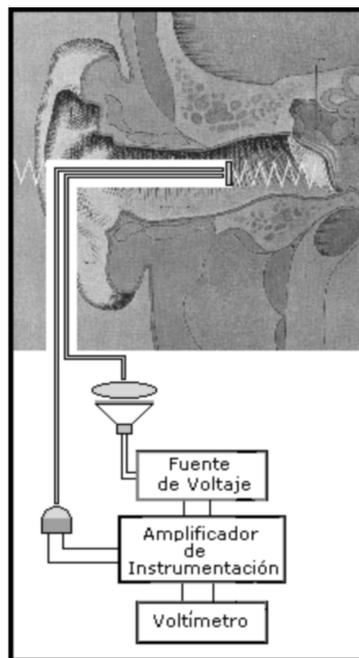
**Figura (6).** El principio de funcionamiento de un micrófono del tipo óptico, es el de modulación de la luz reflejada que proviene de una fibra óptica en una membrana delgada de silicio. La deformación de la membrana, provocada por la presión, constituye el medio de transducción en este tipo de sensores.

**Figura (7).** Las EOA emergiendo del oído son capturadas por la sonda otoacústica.



## Construcción de una sonda otoacústica

En la figura (7) se muestra sólo la parte fundamental de la sonda otoacústica, el complemento esta constituido por: una fuente de luz dirigida hacia una de las fibras, un dispositivo optoelectrónico acoplado en el extremo de la segunda fibra y éste a su vez conectado a un amplificador de instrumentación. La salida del amplificador de instrumentación se conecta a un dispositivo de medida tal como un voltímetro. En estado de equilibrio, cuando las EOA no emergen a través del canal auditivo, el haz de luz baña el plano central del diafragma y parte de esta intensidad luminosa reflejada es capturada por la segunda fibra óptica llevándola al dispositivo optoelectrónico y la lectura en el voltímetro es constante. En cuanto las EOA se presentan, estas producen variaciones en la intensidad de luz reflejada por el diafragma a la misma frecuencia de oscilación que las EOA, de esta manera la transducción de presión sonora en señal eléctrica se lleva a cabo [6], figura (8).



**Figura (8).** Sonda otoacústica completa para la detección de las EOA insertada en el canal auditivo.

## Conclusiones

Puesto que la frecuencia de oscilación de las EOA es de 1 kHz, es conveniente que la velocidad de res-

puesta del dispositivo optoelectrónico empleado sea de al menos 1 ms.

Dadas las características de la señal de voltaje proporcionada por el dispositivo optoelectrónico, la fuente de voltaje empleada debe contener un voltaje de rizo despreciable o en su defecto reemplazarla por baterías de CD.

Una manera de incrementar la cantidad de luz reflejada por el plano central del diafragma es mediante su metalizado con oro 

## Bibliografía

- [1] S. J. PÉREZ RUÍZ.  
1995 El oído humano, ¿genera sonido?. *Ciencia y Desarrollo*. Mayo-junio, No. 122: pp 52-59.
- [2] SALVADOR ALCÁNTARA  
1993 “Sensor de Presión Semiconductor”. *Tesis que para obtener el grado de maestro en ciencias*. Cinvestav, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Sección de Bioelectrónica. México D.F.
- [3] SAMUEL K. CLARK AND KENSALL D. WISE.  
1979 Pressure Sensitivity in Anisotropically Etched Thin-Diaphragm Pressure Sensors. *Transactions on Electron Devices*. Vol. ED. 26, No. 12, December, pp. 1887-1896.
- [4] H. SEIDEL, L. CSEPREGI, A. HEUBERGER, H. BAUMGÄRTEL.  
1990 “Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions”. *Journal Electrochemical Society Inc*. Vol 137. No. 11. November, pp. 3626-3632.
- [5] PATRICK R. SCHEEPER, WOUTER OLTUIS, AND PIET BERGVELD.  
1994 “The Design, Fabrication, and Testing of Corrugated Silicon Nitride Diaphragms”, *Journal of Microelectromechanical Systems*. Vol. 3. No. 1. March, pp. 36-42.
- [6] DIETMAR GARTHE.  
1993 Fiber and integrated-optical microphones based on intensity modulation by beam deflection at a moving membrane. *Sensors and Actuators A*, 37-38 pp. 484-488.

**Enrique Espinosa Justo**  
*Universidad Tecnológica de la Mixteca*