



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: **2 333 833**

② Número de solicitud: 200802498

⑤ Int. Cl.:

G01H 11/06 (2006.01)

B81B 3/00 (2006.01)

G01R 3/00 (2006.01)

H04R 31/00 (2006.01)

⑫

PATENTE DE INVENCION

B1

⑫ Fecha de presentación: **27.08.2008**

⑬ Fecha de publicación de la solicitud: **01.03.2010**

Fecha de la concesión: **28.01.2011**

⑮ Fecha de anuncio de la concesión: **09.02.2011**

⑯ Fecha de publicación del folleto de la patente:
09.02.2011

⑰ Titular/es: **Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)
c/ Serrano, 117
28006 Madrid, ES**

⑱ Inventor/es:
**Montero de Espinosa Freijo, Francisco y
Octavio Manzanares, Alberto**

⑳ Agente: **Pons Ariño, Ángel**

⑳ Título: **Transductor capacitivo ultrasónico micromecanizado con cavidades resonantes y sus aplicaciones en aire.**

㉑ Resumen:

Transductor capacitivo ultrasónico micromecanizado con cavidades resonantes y sus aplicaciones en aire.

La invención describe un dispositivo ultrasónico útil para la emisión de ondas acústicas en aire en el rango de los ultrasonidos que comprende, entre otros elementos, una cavidad resonante con una o varias aberturas para provocar una amplificación de señal en emisión y un elemento que excite el sistema como puede ser el caso de las membranas. Gracias a la cavidad resonante se puede generar una radiación en las aberturas conjunta y en fase con la producida por el movimiento de la membrana. Este dispositivo ultrasónico puede utilizarse para fabricar un emisor, que comprende una o varias de estas celdas conectadas en paralelo emitiendo así al mismo tiempo, útil para la realización de ensayos no destructivos sin contacto en aire.

ES 2 333 833 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP.

DESCRIPCIÓN

Transductor capacitivo ultrasónico micromecanizado con cavidades resonantes y sus aplicaciones en aire.

5 **Sector de la técnica**

Sistemas de inspección ultrasónicos para aplicaciones de Ensayos No Destructivos (END) teniendo como medio de acople el aire. El campo de aplicación es amplio, destacando tanto el sector aeronáutico como el alimentario.

10 **Estado de la técnica**

Los sistemas de inspección ultrasónicos para aplicaciones de Ensayos No Destructivos (END) están siendo muy utilizados durante las últimas décadas. Gracias a estas técnicas, es posible comprobar el estado de una estructura o del contenido de un cuerpo o recipiente sin necesidad de abrirlo o destruirlo. A su vez, estas técnicas se pueden utilizar en contacto o sin tocar el cuerpo a comprobar teniendo así como medio de acople el aire.

Una de las partes más importantes de estos sistemas son los transductores ultrasónicos. Convencionalmente se han venido utilizando en mayor parte materiales piezoeléctricos para el desarrollo de los mismos. Sin embargo, en los últimos años se ha incorporado una nueva idea basada en el micromecanizado en silicio. Por estos procedimientos se han desarrollado Transductores Capacitivos Ultrasónicos Micromecanizados (cMUTs). Su unidad básica consiste en una capacidad formada por un electrodo fijo dentro de una cavidad y otro soportado sobre una micromembrana. Al aplicar una tensión de polarización y una señal de excitación, la membrana presentará un movimiento correspondiente a la frecuencia de excitación y al modo de resonancia. Esta tecnología presenta un creciente interés debido al reducido tamaño de estos dispositivos. Gracias a esto, se abre la posibilidad de agrupación para así desarrollar complejas aperturas de array mejorando así la resolución del dispositivo en aplicaciones de imagen ultrasónica. Aún así, sectores como el aeronáutico o el alimentario, carecen de sistemas de inspección específicos que utilicen esta tecnología. De aquí la necesidad de desarrollar una nueva idea de transductor ultrasónico acoplado en aire de alta eficiencia en emisión siguiendo esta idea.

Concretamente, desde que apareció la primera generación de este tipo de transductores en el año 1994 (M.I. Haller and B.T. Khuri-Yakub, "A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer". Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium, Cannes Vol. 2 (1994), pp. 1241-1244), varios grupos han dedicado su trabajo en orientar los cMUTs a diferentes aplicaciones en el rango de los ultrasonidos. En los últimos años se han desarrollado sistemas basados en la tecnología cMUT tanto en aire como en medio líquido (David W. Shindel, David A. Hutchins, Lichun Zou and Michael Sayer, "The Design and Characterization of Micromachined Air-Coupled Capacitance Transducers". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 42, n° 1, pp. 42-50, 1995-Soh, H. T., Lada-
baum, I., Atalar, A., Quate, C. F., and Khuri-Yakub, B. T. "Silicon micromachined ultrasonic immersion transducers". Appl. Phys. Lett., vol. 69, 3674-3676, 1996). Pocos grupos se están centrando en aplicaciones para aire donde el más destacado es el grupo de David A. Hutchins de la Universidad de Warwick donde se han realizado con éxito ensayos sin contacto. Las aplicaciones en inmersión han sido el centro de las investigaciones de los grupos que han desarrollado los trabajos más importantes. El grupo de la Universidad de Stanford encabezado por Khuri-Yakub es el más activo en el desarrollo de esta tecnología. Con cuatro generaciones de transductores y complejos diseños de electrónica asociada al transductor han conseguido obtener sistemas bastante mejorados para imagen médica consiguiendo imágenes tridimensionales. Además de esto han conseguido realizar diferentes experiencias en aire para comprobar la viabilidad de esta tecnología en este medio obteniendo buenos resultados así como han buscado nuevas aplicaciones como sistemas para la medida de flujo de un gas. Otro grupo bastante activo se encuentra en la Universidad de Georgia donde han elaborado un array anular para la obtención de un sistema ultrasónico de imagen intravascular (Joshua Knight, Jeff McLean, and F. Levent Degertekin, "Low Temperature Fabrication of Immersion Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers on Silicon and Dielectric Substrates". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 51, n° 10, pp. 1324-1333, 2004). En la Universidad Roma Tre se ha desarrollado un sistema con el cual se han conseguido imágenes ultrasónicas con buena resolución además de estudios bastante avanzados sobre el funcionamiento de cMUTs tanto analíticos como con elementos finitos (Giosué Caliano, Riccardo Carotenuto, Elena Cianci, Vittorio Foglietti, Alessandro Caronti, Antonio Iula and Massimo Pappalardo, "Design, Fabrication and Characterization of a Capacitive Micromachined Ultrasonic Probe for Medical Imaging". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 52, n° 12, pp. 2259-2269, 2005). Los programas de elementos finitos se han convertido en la herramienta más utilizada para el análisis de estos dispositivos (Yongrae Roh and Butrus T. Khuri-Yakub, "Finite Element Analysis of Underwater Capacitor Micromachined Ultrasonic Transducers". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 49, n° 3, pp. 293-298, 2002).

Los problemas a los que más tiempo de investigación se está dedicando son los efectos de acoplamiento acústico (cross-talk) y de integración electrónica. El cross-talk se da en mayor medida en aplicaciones de inmersión donde el medio hace que elementos colindantes a los activos tengan un movimiento no deseado. Esto se traduce en un peor funcionamiento global del transductor provocando peor resolución en el caso de imagen. A lo largo de los años se han presentado trabajos en los que se han presentado varios estudios y mejoras tecnológicas para prevenir este efecto (Eccardt P.-C., Lohfink, A., Garssen H.-G.V. "Analysis of crosstalk between fluid coupled cMUT membranes". Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium, 2005 pp. 593-596 - Alessandro Caronti, Alessandro Savoia, Giosué Caliano and Massimo Pappalardo, "Acoustic Coupling in Capacitive Microfabricated Ultrasonic Transducers: Modeling and

Experiments". IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 52, nº 12, pp. 2220-2234, 2005).

En el caso de integración electrónica se han presentado varios diseños. El primero en desarrollar un cMUT integrado con su electrónica de acondicionamiento fue P. Eccardt de Siemens con un diseño no demasiado complejo con un coste asequible (Peter-Christian Eccardt, K. Niederer, T. Scheite, C. Hierold, "Surface micromachined ultrasound transducers in CMOS technology". Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium, 1996 pp. 959-962). Noble *et al.* de QinetiQ Ltd. Junto al grupo de Hutchins de la Universidad de Warwick desarrollaron un diseño de mayor complejidad y mayor coste (R.A. Noble, R.R. Davies, D.O. King, M.M. Day, A.R.D. Jones, J. S. McIntosh, D.A. Hutchins, and P. Saul, "Low-Temperature Micromachined cMUTs with Fully Integrated Analogue Front-End Electronics". Proceedings IEEE Ultrasonics Symposium, 2002 pp. 1045-1050). La propuesta más novedosa realizada por el grupo de Khuri-Yakub de la Universidad de Standford, se basa en una tecnología donde el transductor está montado sobre la superficie de un segundo chip que contiene la electrónica de acondicionamiento. Esto es posible debido a la implementación de los contactos eléctricos del cMUT en la parte posterior del mismo (Ira O. Wygant, David T. Yeh, Xuefeng Zhuang, Srikant Vaithilingam, Amin Nikoozadeh, Omer Oralkan, A. Sanli Ergun, Goksen G. Yaralioglu, and Butrus T. Khuri-Yakub, "Integrated Ultrasound Imaging Systems Based on Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducer Arrays" Proceedings IEEE Sensors, 2005 pp. 704-707). Es una alternativa que da una gran flexibilidad a la hora de diseñar y un coste más bajo teniendo en cuenta que se utilizan como mínimo dos chips contando el del transductor.

Con el transductor de la presente invención, se pretende dar un paso más hacia las aplicaciones con cMUTs en aire (aplicaciones sin contacto) y más concretamente en los ensayos no destructivos. Debido a que en END en aire se suele trabajar en un rango de frecuencia distinto (menor a 1 MHz) las dimensiones del transductor de la presente invención se verán incrementadas respecto a los diseños convencionales.

25 Descripción de la invención

Descripción breve

Un aspecto de la invención lo constituye un dispositivo ultrasónico útil para la emisión de ondas acústicas en aire en el rango de los ultrasonidos, en adelante dispositivo ultrasónico de la invención, constituido por, al menos, una unidad básica o celda cMUT que comprende:

i.- una membrana flexible acoplada a

ii.- una cavidad resonante con una o varias aberturas para provocar una amplificación la señal en emisión y que está ajustada para que el sistema se comporte como un resonador de Helmholtz, y cuyo volumen ha de ser de tal manera que haga que ésta amplifique la frecuencia correspondiente al primer modo de la membrana para lo cual debe cumplir la siguiente ecuación:

$$fr = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l + \delta)}}$$

donde fr representa la frecuencia de Helmholtz que debe ser igual a la correspondiente al modo fundamental de la membrana, c es la velocidad de propagación de la onda en el medio, A es la superficie que corresponde con las aberturas de la cavidad, V es el volumen de la cavidad, l es la longitud de las aberturas y σ es un factor de corrección de la abertura,

iii.- un electrodo de metal conductor situado en la membrana, y

iv.- otro electrodo inferior fijo situado en un soporte dentro de la cavidad resonante y de forma acorde con la geometría de la membrana y del electrodo de metal conductor.

Un aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana es de un material flexible perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: silicio, nitruro de silicio o polisilicio.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana presenta una forma perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: cuadrada, rectangular, circular o con cualquier otra forma regular o no regular.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde el electrodo de metal conductor es de un metal conductor perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: Aluminio u oro.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana puede funcionar a su vez como el electrodo de metal conductor si la membrana es de un material conductor perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: silicio o polisilicio.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana puede estar sujeta por todo su contorno con una abertura a la cavidad fuera de la superficie de la membrana o con parte de su contorno libre proporcionando las aberturas por donde se emite la radiación acústica debido a la cavidad resonante.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde el electrodo inferior fijo, de forma alternativa, en lugar de estar sujeto en el soporte dentro de la cavidad, está constituido por el mismo soporte al tratarse de un material conductor o de un material dopado. Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde el sustrato a partir del que se construye el dispositivo es de un material perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: silicio, vidrio o cuarzo.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana puede estar soportada por un tipo de estructura construida en el sustrato o pueden incluirse unos soportes de un material perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: nitruro de silicio, óxido de silicio o polisilicio.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde cada uno de los elementos conductores se pueden pasivar para prevenir problemas eléctricos añadiendo donde sea conveniente un aislante de un material perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: nitruro de silicio u óxido de silicio.

Por otro lado, el dispositivo ultrasónico de la invención puede utilizarse para fabricar un emisor que comprende varias de estas celdas conectadas en paralelo emitiendo así al mismo tiempo. De esta manera se pueden agrupar formando un único elemento o se pueden agrupar formando elementos de un array tanto unidimensional como bidimensional para conseguir una mayor resolución en imagen.

Otro aspecto de la invención lo constituye el uso del dispositivo ultrasónico de la invención para la realización de ensayos no destructivos sin contacto en aire.

Descripción detallada

Como se ha indicado anteriormente, el dispositivo que se presenta, pretende cubrir la necesidad de un sistema de alta eficiencia para ensayos no destructivos en aire.

Para estudiar cómo proporcionar mayor eficiencia a un transductor cMUT se debe tener especial cuidado en factores como la forma de la membrana, condiciones de contorno o la cavidad. Convencionalmente se han utilizado membranas circulares, cuadradas o hexagonales sujetas por todos sus lados debido a que su modo principal es el que más energía emite al medio. Además, se busca que la cavidad que existe entre electrodos sea de vacío y de pequeñas dimensiones para incrementar la sensibilidad.

Los investigadores han observado que es posible mejorar la eficiencia en emisión en aire al utilizar un sistema resonante compuesto por una cavidad, una o varias aberturas (o puertos acústicos) y un elemento que excite el sistema como puede ser el caso de las membranas. Gracias a la cavidad resonante se puede generar una radiación en las aberturas conjunta y en fase con la producida por el movimiento de la membrana. Estos resultados se deben principalmente a que la superficie de radiación se ha incrementado considerablemente con el nuevo diseño. Cuando en el cMUT convencional sólo se aprovecha la superficie central de la membrana, el nuevo diseño aporta una superficie cilíndrica en conjunto con la presión que tiene lugar en las aberturas y que se genera en fase gracias al resonador (Figura 4). Este concepto se basa en los resonadores de Helmholtz utilizados en el campo de la acústica tanto en la elaboración de instrumentos musicales como en el desarrollo de altavoces con tecnología bass reflex. Tanto Beranek (Leo L. Beranek, Acoustics, Ed. McGraw-Hill book company, Inc., (1954)) como Marshall Leach (W. Marshall Leach, Jr., Introduction to Electroacoustics & Audio Amplifier Design, Third Ed. Kendall/Hunt publishing company, (2003)) describen el funcionamiento y el diseño de sistemas de estas características. Sin embargo, nadie había demostrado su aplicación en el campo de los cMUTs, con el objeto de desarrollar transductores de alta eficiencia en emisión y de mayor ancho de banda en aire.

En la Figura 1 se muestra la tipología que se correspondería a uno de estos emisores. La celda se compondría de una membrana cuadrada con dos de sus lados libres. Al dejar la membrana parcialmente con condiciones de contorno libres, se le proporciona a la cavidad las aberturas necesarias. En este caso, la longitud de la abertura se correspondería con el espesor de la membrana. En estas condiciones, el cMUT con cavidad resonante de la invención presenta un máximo de presión mayor que el máximo de presión del diseño convencional y tiene un mayor ancho de banda (Q de aproximadamente 4), lo que implica que el abanico de aplicaciones es más amplio pudiendo utilizarlo tanto excitando con señales de banda ancha como para emisión en una determinada frecuencia. La mejora en ancho de banda se

ES 2 333 833 B1

debe básicamente a la reactancia que se añade al diseño al incluir la cavidad resonante. Ésta provoca además una disminución en el desplazamiento de la membrana.

5 El dispositivo ultrasónico de la invención puede ser utilizado en toda experiencia de ensayos no destructivos teniendo como medio de acople el aire, sin contacto, y sin necesidad de abrir o destruir la muestra para conocer su estado.

10 Así, un aspecto de la invención lo constituye un dispositivo ultrasónico útil para la emisión de ondas acústicas en aire en el rango de los ultrasonidos, en adelante dispositivo ultrasónico de la invención, constituido por, al menos, una unidad básica o celda cMUT que comprende:

i.- una membrana flexible acoplada a

15 ii.- una cavidad resonante con una o varias aberturas para provocar una amplificación la señal en emisión y que está ajustada para que el sistema se comporte como un resonador de Helmholtz, y cuyo volumen ha de ser de tal manera que haga que ésta amplifique la frecuencia correspondiente al primer modo de la membrana para lo cual debe cumplir la siguiente ecuación:

$$20 \quad fr = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l + \delta)}}$$

25 donde fr representa la frecuencia de Helmholtz que debe ser igual a la correspondiente al modo fundamental de la membrana, c es la velocidad de propagación de la onda en el medio, A es la superficie que corresponde con las aberturas de la cavidad, V es el volumen de la cavidad, l es la longitud de las aberturas y δ es un factor de corrección de la abertura,

30 iii.- un electrodo de metal conductor situado en la membrana, y

iv.- otro electrodo inferior fijo situado en un soporte dentro de la cavidad resonante y de forma acorde con la geometría de la membrana y del electrodo de metal conductor.

35 Un aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana es de un material flexible perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: silicio, nitruro de silicio o polisilicio.

40 Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana presenta una forma perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: cuadrada, rectangular, circular o con cualquier otra forma regular o no regular.

45 Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde el electrodo de metal conductor es de un metal conductor perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: Aluminio u oro.

50 Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana puede funcionar a su vez como el electrodo de metal conductor si la membrana es de un material conductor perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: silicio o polisilicio.

55 Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana puede estar sujeta por todo su contorno con una abertura a la cavidad fuera de la superficie de la membrana o con parte de su contorno libre proporcionando las aberturas por donde se emite la radiación acústica debido a la cavidad resonante.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde el electrodo inferior fijo, de forma alternativa, en lugar de estar sujeto en el soporte dentro de la cavidad, está constituido por el mismo soporte al tratarse de un material conductor o de un material dopado.

60 Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde el sustrato a partir del que se construye el dispositivo es de un material perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: silicio, vidrio o cuarzo.

65 Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde la membrana puede estar soportada por un tipo de estructura construida en el sustrato o pueden incluirse unos soportes de un material perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: nitruro de silicio, óxido de silicio o polisilicio.

Otro aspecto particular de la invención lo constituye el dispositivo ultrasónico de la invención donde cada uno de los elementos conductores se pueden pasivar para prevenir problemas eléctricos añadiendo donde sea conveniente un aislante de un material perteneciente, a título ilustrativo y sin que limite el alcance de la invención, a uno de los siguientes grupos: nitruro de silicio u óxido de silicio.

Por otro lado, el dispositivo ultrasónico de la invención puede utilizarse para fabricar un emisor que comprende varias de estas celdas conectadas en paralelo emitiendo así al mismo tiempo. De esta manera se pueden agrupar formando un único elemento o se pueden agrupar formando elementos de un array tanto unidimensional como bidimensional para conseguir una mayor resolución en imagen.

Otro aspecto de la invención lo constituye el uso del dispositivo ultrasónico de la invención para la realización de ensayos no destructivos sin contacto en aire.

Descripción de las figuras

Figura 1.- *Diseño del emisor ultrasónico.* a) Vista completa del emisor con membrana cuadrada (3), electrodo superior (1) rectangular para favorecer el movimiento del primer modo de resonancia de la membrana, electrodo inferior (2) con la misma forma que el superior, aberturas y cavidad (5) ajustada para su funcionamiento como resonador de Helmholtz y el sustrato sobre el que se procede a la fabricación del dispositivo (6). b) corte transversal del diseño en el que se percibe con mayor claridad la forma del electrodo inferior soportado en una estructura tipo tabique (4).

Figura 2.- *Diseño de una celda cMUT convencional.* Celda cMUT convencional con forma cuadrada utilizada para comparar el funcionamiento entre esta tipología y la celda de la invención. Se compone de membrana cuadrada (2) sujeta por todos sus lados, electrodo superior (1) rectangular y sustrato de silicio (3) que funciona como electrodo inferior. Aunque no se refleje en la figura, existe una pequeña cavidad entre membrana y sustrato.

Figura 3.- *Uso comparativo de un cMUT convencional y el cMUT de la invención.* Amplitud en función de la frecuencia de la presión a 200 micras emitida por un cMUT convencional (rojo) y por un cMUT de la invención con cavidad resonante (azul) en dB referidos al máximo de presión emitida por la tipología que se presenta.

Figura 4.- *Presión en función del tiempo para un barrido de izquierda a derecha sobre la superficie de la membrana.* Se demuestra que las presiones en las aberturas de la membrana se presentan en fase con la presión correspondiente a la superficie de la misma.

Ejemplo de realización de la invención

Ejemplo 1

Fabricación y uso del dispositivo de la invención

1.1.- *Fabricación del dispositivo de la invención*

En la Figura 1 se muestra la tipología que se corresponde con la realización particular de los posibles dispositivos de la invención. Concretamente, la unidad básica o celda MUT de un transductor de la invención se compone de una membrana flexible emisora cuadrada de nitruro de silicio con dos de sus lados libres (para proporcionar las aberturas necesarias a la cavidad) y así conseguir un mayor desplazamiento de la misma provocando una mayor excitación al sistema resonante, y de dimensiones 150 por 150 micras. Al dejar la membrana parcialmente con condiciones de contorno libres, se le proporciona a la cavidad las aberturas necesarias. En este caso, la longitud de la abertura se corresponde con el espesor de la membrana. El soporte del electrodo inferior dentro de la cavidad se corresponde con una estructura tipo muro o tabique sobre el cual puede existir una metalización o el mismo soporte puede ser de un material conductor o estar tratado para comportarse como tal. Este caso particular se corresponde con un soporte de silicio dopado para que funcione como conductor al que se le ha añadido una capa de material aislante (nitruro de silicio) por encima para evitar problemas eléctricos, de tal forma que se comporta como electrodo inferior.

Su forma se corresponde con la geometría del electrodo superior situado sobre la membrana para favorecer el movimiento del primer modo de resonancia de la membrana y cavidad ajustada para su funcionamiento como resonador de Helmholtz.

La unidad se ha fabricado, tal como se ha comentado anteriormente, de tal forma que la cavidad permita que ésta amplifique la frecuencia correspondiente al primer modo de la membrana de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l + \delta)}}$$

donde fr representa la frecuencia de Helmholtz que debe ser igual a la correspondiente al modo fundamental de la membrana, c es la velocidad de propagación de la onda en el medio, A es la superficie que corresponde con las aberturas de la cavidad, V es el volumen de la cavidad, l es la longitud de las aberturas y δ es un factor de corrección de la abertura.

Así, el volumen de la cavidad resonante de esta realización particular es de $298800 \mu\text{m}^3$, superficie de una abertura $375 \mu\text{m}^2$ con $A = 750 \mu\text{m}^2$ debido a la existencia de dos aberturas, $l = 2 \mu\text{m}$ y factor de corrección correspondiente a dos aberturas rectangulares. Uno Ingard (Uno Ingard, "On the Theory and Design of Acoustic Resonators", The Journal of the Acoustical Society of America, November 1953, Vol. 25, N° 6) presentó un estudio del efecto de diferentes factores de corrección correspondientes a varias aperturas. Considerando un factor de corrección comúnmente utilizado para una apertura arbitraria ($\delta = 0.96 \cdot (A)^{1/2}$), se obtiene un valor de fr en aire ($c = 340 \text{ m/s}$) de aproximadamente 500 kHz. Considerando que se trata de varias aberturas en el resonador, el cálculo de este factor se complica. Haciendo una estimación más exacta de este parámetro, se puede hacer un cálculo más preciso de la frecuencia de resonancia que resulta.

Un elemento del emisor final se compone de un gran número de estas celdas conectadas en paralelo emitiendo así al mismo tiempo. De esta manera se pueden agrupar formando un único elemento o se pueden agrupar formando elementos de un array tanto unidimensional como bidimensional para conseguir una mayor resolución en imagen. En los estudios realizados siguientes se ha utilizado una única celda de la invención.

1.2.- Comparación con un cMUT convencional

En la Figura 3 se muestra la presión emitida por cada una de las tipologías (celda cMUT con cavidad resonante de la invención descrito en 1.1. y celda cMUT convencional, Figura 2). La presión que se dibuja en la figura está calculada a la misma distancia para cada una (200 micras). Como el cMUT convencional presenta diferentes condiciones de contorno, su frecuencia de resonancia varía. Debido a esto, se ha diseñado una membrana de mayores dimensiones para que presente su modo principal aproximadamente en el mismo valor que la tipología con cavidad resonante (membrana de dimensiones 195 por 195 micras y distancia entre membrana y electrodo inferior de 2 micras). Para mayor igualdad, se ha alimentado el cMUT convencional para que presente el mismo desplazamiento máximo de la membrana. En estas condiciones, se demuestra que el cMUT con cavidad resonante de la invención presenta un máximo de presión 11 dB mayor que el máximo de presión del diseño convencional. Además, el nuevo diseño tiene un mayor ancho de banda. Presenta un Q de aproximadamente 4 mientras que el convencional tiene un valor de 7, lo que implica que el abanico de aplicaciones es más amplio pudiendo utilizarlo tanto excitando con señales de banda ancha como para emisión en una determinada frecuencia.

Estos resultados se deben principalmente a que la superficie de radiación se ha incrementado considerablemente con el nuevo diseño. Cuando en el cMUT convencional sólo se aprovecha la superficie central de la membrana, el nuevo diseño aporta una superficie cilíndrica en conjunto con la presión que tiene lugar en las aberturas y que se genera en fase gracias al resonador. En la Figura 4 se puede comprobar como la presión en las aberturas está en fase con la producida por la membrana.

La mejora en ancho de banda se debe básicamente a la reactancia que se añade al diseño al incluir la cavidad resonante. Ésta provoca además una disminución en el desplazamiento de la membrana. Debido a esto la tensión de excitación debe ser mayor en el caso del nuevo diseño para conseguir el mismo desplazamiento máximo.

REIVINDICACIONES

5 1. Dispositivo ultrasónico útil para la emisión de ondas acústicas en aire en el rango de los ultrasonidos **caracterizado** porque está constituido por, al menos, una unidad básica o celda cMUT que comprende:

i.- una membrana flexible acoplada a

10 ii.- una cavidad resonante con una o varias aberturas para provocar una amplificación la señal en emisión y que está ajustada para que el sistema se comporte como un resonador de Helmholtz, y cuyo volumen ha de ser de tal manera que haga que ésta amplifique la frecuencia correspondiente al primer modo de la membrana para lo cual debe cumplir la siguiente ecuación:

$$15 \quad f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V(l + \delta)}}$$

20 donde f_r representa la frecuencia de Helmholtz que debe ser igual a la correspondiente al modo fundamental de la membrana, c es la velocidad de propagación de la onda en el medio, A es la superficie que corresponde con las aberturas de la cavidad, V es el volumen de la cavidad, l es la longitud de las aberturas y δ es un factor de corrección de la abertura,

25 iii.- un electrodo de metal conductor situado en la membrana, y

iv.- otro electrodo inferior fijo situado en un soporte dentro de la cavidad resonante y de forma acorde con la geometría de la membrana y del electrodo de metal conductor.

30 2. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la membrana es de un material flexible perteneciente a uno de los siguientes grupos: silicio, nitruro de silicio o polisilicio.

35 3. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la membrana presenta una forma perteneciente a uno de los siguientes grupos: cuadrada, rectangular, circular o con cualquier otra forma regular o no regular.

4. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque el electrodo de metal conductor. es de un metal conductor perteneciente a uno de los siguientes grupos: Aluminio u oro.

40 5. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la membrana puede funcionar a su vez como el electrodo de metal conductor siendo la membrana de un material conductor perteneciente a uno de los siguientes grupos: silicio o polisilicio.

45 6. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la membrana puede estar sujeta por todo su contorno con una abertura a la cavidad fuera de la superficie de la membrana o con parte de su contorno libre proporcionando las aberturas por donde se emite la radiación acústica debido a la cavidad resonante.

50 7. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque el electrodo inferior fijo, de forma alternativa, en lugar de estar sujeto en el soporte dentro de la cavidad, está constituido por el mismo soporte al tratarse de un material conductor o de un material dopado.

8. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque el sustrato a partir del que se construye el dispositivo es de un material perteneciente a uno de los siguientes grupos: silicio, vidrio o cuarzo.

55 9. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque la membrana puede estar soportada por un tipo de estructura construida en el sustrato o pueden incluirse unos soportes de un material perteneciente a uno de los siguientes grupos: nitruro de silicio, óxido de silicio o polisilicio.

60 10. Dispositivo ultrasónico según la reivindicación 1 **caracterizado** porque cada uno de los elementos conductores se pueden pasivar para prevenir problemas eléctricos añadiendo donde sea conveniente un aislante de un material perteneciente a uno de los siguientes grupos: nitruro de silicio u óxido de silicio.

11. Uso del dispositivo ultrasónico según las reivindicaciones 1 a la 10 para la realización de ensayos no destructivos sin contacto en aire.

65

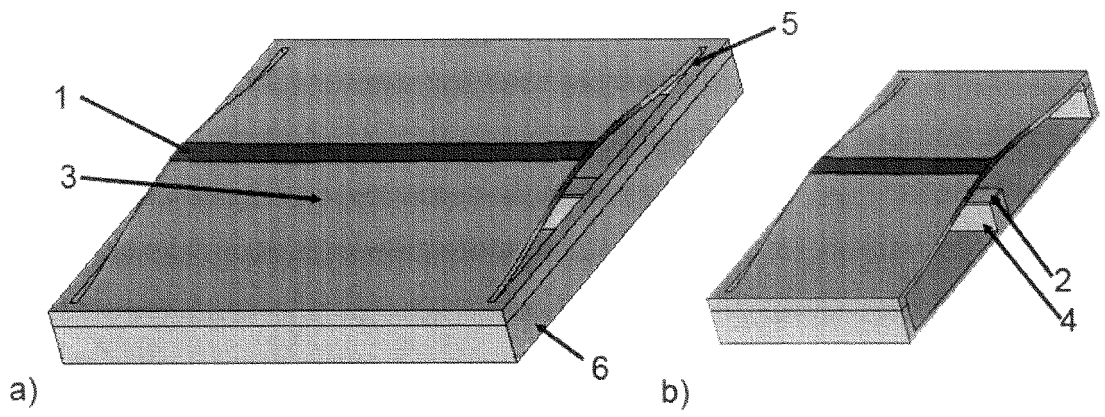


Fig 1

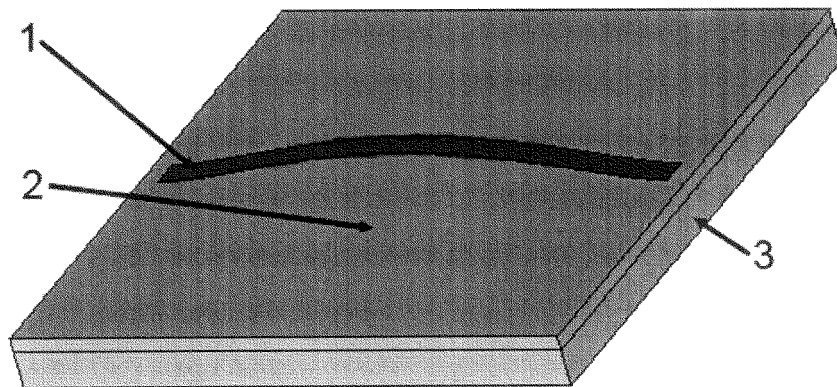


Fig 2

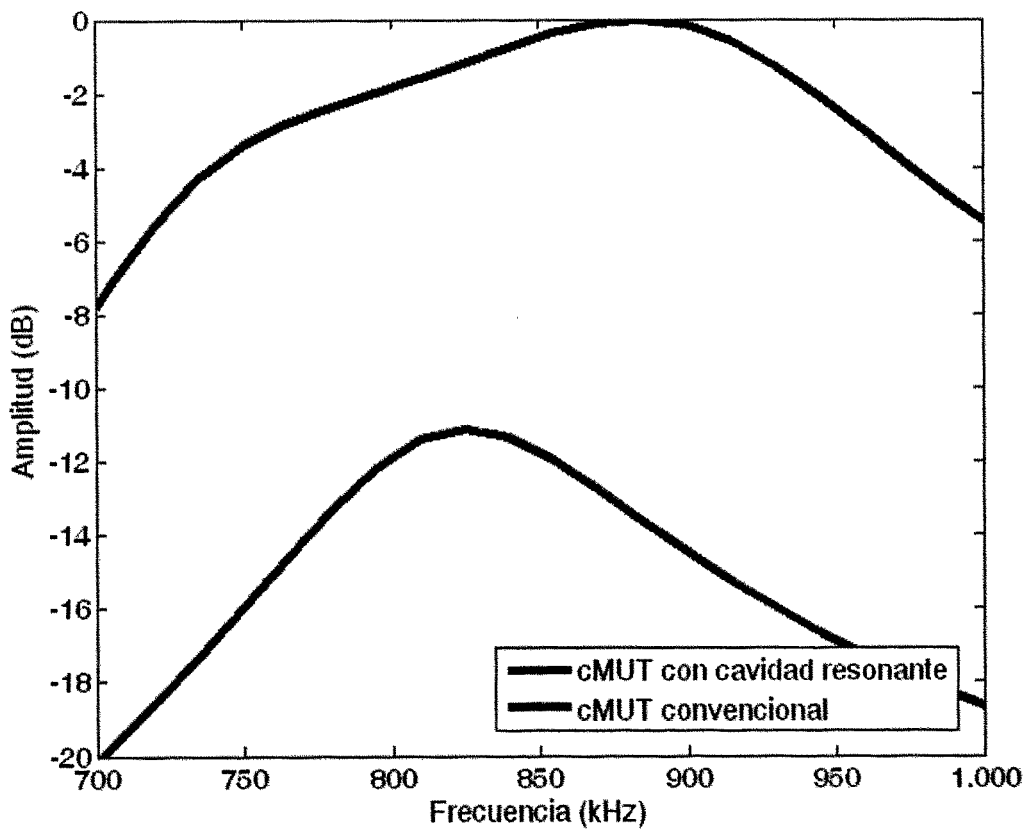


Fig 3

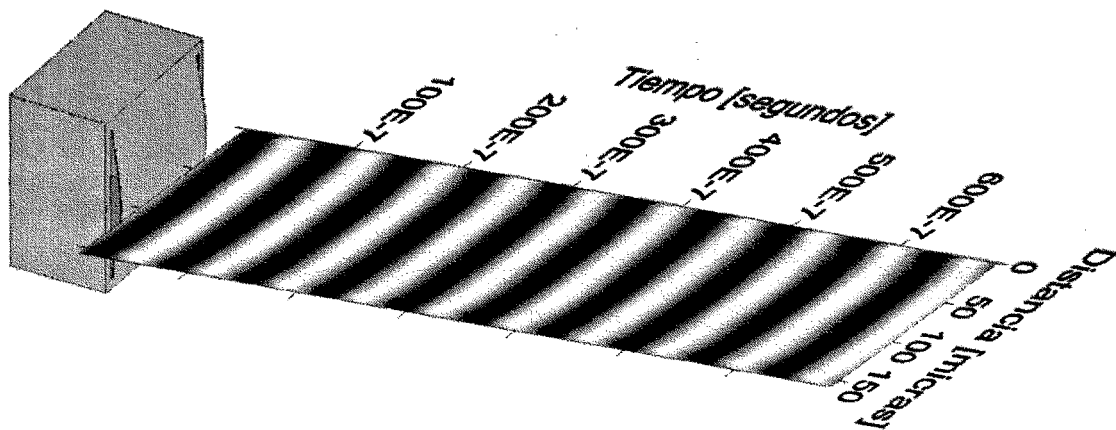


Fig 4



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 333 833

② Nº de solicitud: 200802498

③ Fecha de presentación de la solicitud: 27.08.2008

④ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: Ver hoja adicional

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	US 20070180916 A1 (TIAN et al.) 09.08.2007, párrafos [0003],[0005]-[0009],[0022]-[0030],[0032],[0035],[0038],[0045],[0048],[0050],[0061],[0065]; reivindicaciones 12,21; figuras.	1-11
A	J. HIETANEN et al. "A Helmholtz resonator model for an electrostatic ultrasonic air transducer with a V-grooved backplate". Sensors and Actuators A, 39 (1993) 129-132. XP026482351 A 19931101 (recuperado de EPOQUE).	1,4
A	I. LEON et al. "Evaluation of MUMPS polysilicon structures for thermal flows sensors". Microelectronics Reliability 44 (2004) 651-655. (recuperado de internet).	1

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe

03.02.2010

Examinador

B. Tejedor Miralles

Página

1/5

CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

G01H 11/06 (2006.01)

B81B 3/00 (2006.01)

G01R 3/00 (2006.01)

H04R 31/00 (2006.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01H 11/06, B81B 3/00, G01R 3/00, H04R 31/00

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, NPL, internet

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 03.02.2010

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-11	SÍ
	Reivindicaciones	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-11	SÍ
	Reivindicaciones	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de **aplicación industrial**. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión:

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como ha sido publicada.

1. Documentos considerados:

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	US 2007/0180916 A1 (TIAN et al.)	09-08-2007
D02	J. HIETANEN et al.	11-01-1993
D03	I. LEON et al.	2004

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Reivindicación 1.

Se considera como el estado de la técnica más cercano, el documento D01. Divulga un método de construcción de cMUT. El cMUT que divulgan posee una membrana flexible (14) acoplada a la cavidad resonante, una cavidad resonante (11), un electrodo superior (34) situado en la membrana flexible, y un electrodo inferior (22) situado dentro de la cavidad (11) (párrafos [0026], [0028]). Se diferencia del documento base en que:

o la membrana, a pesar de que esté acoplada a la cavidad, no es de tal forma que defina una o varias aberturas. El efecto técnico que se consigue es dejar la membrana en condiciones de contorne libres, aumentando con ello la presión en la cavidad resonante.

o no tiene en cuenta que el volumen de la cavidad debe ser tal que dicha cavidad resonante amplifique la frecuencia correspondiente al primer modo de la membrana según la relación de Helmholtz. El efecto técnico que se consigue es controlar el volumen de la cavidad resonante con objeto de conocer la frecuencia de resonancia correspondiente al primer modo de la membrana.

El problema técnico a resolver es como mejorar la eficiencia en emisión en aire. Lo que se hace a partir de la geometría del transductor. Para ello, por un lado se definen unas aberturas y por otro lado se diseña la cavidad para que funcione como un resonador Helmholtz. El documento D02 divulga que los principios del resonador Helmholtz pueden ser aplicados a resonadores con distintas formas si la longitud de onda del sonido es mayor que todas las dimensiones individuales del resonador.

El documento D03 divulga una estructura de polisilicio en forma de membrana flotante sobre un sustrato de nitruro de silicio que se apoya por su cuatro esquinas (forma cuadrada) definiendo una serie de aberturas con las que se logra, no solo estabilidad y disminución de las posibilidades de rotura por flexión, sino también una mayor sensibilidad al movimiento del aire.

No sería obvio para una persona experta en la materia aplicar las características de los documentos citados y llegar a la invención como se revela en la reivindicación 1. Por lo tanto, el objeto de dicha reivindicación cumple los requisitos de novedad, actividad inventiva y aplicación industrial de acuerdo con los artículos 6 y 8 de la ley de patentes 11/1986.

Reivindicaciones dependientes 2- 10.

La reivindicación 2 hace referencia al material del que se fabrica la membrana: silicio, nitruro de silicio o polisilicio. El documento D01, expone que la membrana se puede fabricar en nitruro de silicio, óxido de silicio, silicio policristalino, entre otros (párrafo [0025], página 3).

La reivindicación 3 hace referencia a que la forma de la membrana puede ser cuadrada, rectangular o circular. El documento D01 muestra una forma rectangular (figuras).

La reivindicación 4 divulga que el electrodo superior es de aluminio u oro. El documento D01 expone que dicho electrodo es de metal. Entre los materiales que utiliza en la deposición de capas conductoras está el aluminio (párrafo [0028]) y el oro (reivindicación 12, párrafo [0038]), así como en el párrafo [0061]. El documento D02 expone que una de las caras de la membrana es de aluminio (página 130, columna 2).

La reivindicación 5 divulga que el electrodo superior es la propia membrana flexible siendo la membrana de silicio o polisilicio. El documento D01 expone que la membrana puede realizarse en polisilicio (párrafo [0025]).

Hoja adicional

La reivindicación 6 parece ser una opción de diseño o alternativa para resolver el mismo problema técnico planteado y resuelto en la primera reivindicación.

La reivindicación 7 expone que el electrodo inferior es el mismo soporte cuando este sea de un material conductor. El documento D01 contempla este caso en el párrafo [0028].

La reivindicación 8 se refiere a que el dispositivo comprenda un sustrato de un material seleccionado entre silicio, vidrio y cuarzo. El documento D01 divulga que el sustrato en el que se localiza la cavidad resonante puede ser de vidrio, y que a su vez puede estar realizarse por sputtering sobre un sustrato de vidrio, o de cerámica o de plástico o de polímero o sobre un sustrato semiconductor como por ejemplo de silicio (párrafo [0022]; [0006]; [0065]; reivindicación 18).

La reivindicación 9 hace referencia a que la membrana flexible está soportada por una estructura construida en el sustrato o que puedan incluirse unos soportes de un material seleccionado entre nitruro de silicio, óxido de silicio o polisilicio. El documento D01 describe esta formación, ya que la membrana (14) está soportada por unos postes (12) que pueden estar fabricados en nitruro de silicio, óxido de silicio o polisilicio (párrafo [0024]).

La reivindicación 10 reivindica la pasivación de los electrodos incorporando un material aislante seleccionado entre nitruro de silicio u óxido de silicio. El documento D01 expone que se incorporan capas aislantes con dicho objetivo (párrafos [0029] reivindicaciones 5, 22).

La reivindicación 11 hace referencia al uso del dispositivo ultrasónico reivindicado.

El objeto de las reivindicaciones dependientes es bien conocido del estado de la técnica para un experto en la materia. No obstante, al ser la primera reivindicación nueva y tener actividad inventiva, se considera que las reivindicaciones dependientes también cumplen con los requisitos de los artículos 6 y 8 de la ley de patentes 11/1986.