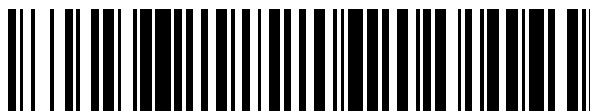


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 416 182**

51 Int. Cl.:

B06B 1/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **26.03.2010 E 10714943 (7)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **15.05.2013 EP 2411163**

54 Título: **Matriz CMUT de unión de ondas con vías conductoras**

30 Prioridad:

26.03.2009 GB 0905255

26.03.2009 GB 0905256

28.05.2009 GB 0909296

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
30.07.2013

73 Titular/es:

**NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND
TECHNOLOGY (NTNU) (100.0%)**

Semsaelandsvei 14

7491 Trondheim, NO

72 Inventor/es:

**BERG, SIGRID;
CHAPAGAIN, KAMAL;
DUE-HANSEN, JON;
INGEBRIGTSEN, KJELL ARNE;
JENSEN, GEIR URI;
MIDTBØ, KJERSTI;
POPPE, ERIK UTNE;
RØNNEKLEIV, ARNE y
WANG, DAG THORSTEIN**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 416 182 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Matriz CMUT de unión de ondas con vías conductoras.

La presente invención se refiere a una matriz de transductor ultrasónico capacitivo micromecanizado (CMUT) y, en particular a cualquier matriz que sea adecuada para su uso en un sistema de imágenes miniaturizado. La invención además se extiende a un procedimiento para fabricar dicha matriz.

Los sistemas ultrasónicos convencionales se basan en el uso de elementos piezoeléctricos. A fin de proporcionar un matriz de elementos un material piezoeléctrico se puede unir a un tablero de circuito impreso y a continuación cortarse en elementos separados. Las conexiones a un circuito integrado se forman indirectamente a través de una estructura de salida en abanico la cual tiene la desventaja de poder degradar la calidad de la señal.

Se apreciará que este tipo de estructura es difícil de escalar, como es necesario con aplicaciones de alta frecuencia donde es necesario reducir enormemente la distancia entre los elementos. La tecnología CMUT es un candidato prometedor para matrices ultrasónicas 2D que pueden ser usadas para producir imágenes 3D a altas frecuencias usando dispositivos en miniatura.

Un único elemento transductor CMUT toma la forma de un capacitor que tiene un primer electrodo rígido (inferior) y un segundo electrodo (superior) formado de una membrana que se desvía en respuesta a la presión de las ondas ultrasónicas cuando se usan en la forma de un receptor. De este modo, la CMUT actúa esencialmente como un micrófono condensador. En una construcción típica, la parte acústica activa y el electrodo superior del capacitor CMUT es una membrana de nitruro de silicio recubierta con metal mientras que un sustrato de silicio impurificado negativamente constituye el electrodo inferior. En uso, la desviación CC se aplica entre los electrodos superiores e inferiores que tiran la membrana hacia el sustrato debido a la atracción electrostática. Si un voltaje de CA se aplica a la membrana desviada, se obtiene el movimiento armónico de la membrana y si una membrana CMUT desviada se somete a un campo de presión ultrasónico incidente, el movimiento de la membrana genera corrientes de detección de CA.

Como su nombre implica, las CMUTs se fabrican usando técnicas de micromecanización, las cuales son bien conocidas e involucran procedimientos tales como el grabado de obleas de silicio y basadas en silicio, por ej., obleas de óxido aislante de silicio (BOX), obleas de silicio con varios recubrimientos, a fin de producir las estructuras mecánicas deseadas. El documento "Surface Micromachined Capacitive Ultrasonic Transducers" by Ladabaum et al, LEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 45, No 3, Mayo 1998, describe una técnica temprana. En esto, la CMUT se forma a partir de una única oblea de silicio. Una capa de óxido se forma sobre la oblea y posteriormente se deposita una capa de nitruro. Las aberturas se forman posteriormente en la capa de nitruro mediante el grabado del plasma y luego las áreas de óxido se remueven usando ácido fluorhídrico inserto a través de las aberturas para formar las cavidades del transductor. Las aberturas luego se cierran depositando una capa más de nitruro ("relleno de la cavidad") y posteriormente una capa metálica conductora se aplica sobre el nitruro para formar una membrana plana de tierra.

Un avance significativo fue la introducción de la unión de ondas por lo que una pluralidad de ondas de silicio se unen a fin de formar una estructura deseada (véase "Fabricating Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers with Wafer-Bonding Technology" by Huang et al JMEMS, 12 (2), 128 (2003)). Esto permitió una variedad de nuevas configuraciones para las estructuras micro-mecanizadas. Este documento muestra que la unión de la oblea da por resultado propiedades mecánicas mejoradas y las membranas de alta calidad producidas de la unión de las obleas son superiores a las que se obtienen por la micromecanización de la superficie. Por ejemplo, la forma de la cavidad es independiente de la de la membrana y el formato de la cavidad no está restringido por el proceso de grabado; hay pocas limitaciones sobre el diseño del dispositivo; la membrana puede fabricarse de un simple cristal y por lo tanto tiene menos defectos internos y menos pérdida mecánica; y mayor uniformidad; y es posible el control de la tensión y la repetición del procedimiento.

Una técnica de unión adecuada (unión por fusión) se describe en "Fabrication and characterisation of CMUTs realised by wafer bonding" by K Midtbp, A Ronnekleiv and D T Wang, 2006 LEE Ultrasonics Symposium, que además describe un dispositivo transductor ultrasónico completo usando las CMUTs que se forman usando una estructura apilada o en capas en la cual la capa superior se forma de una estructura de matriz CMUT, debajo de la cual (tomando la CMUT como la parte superior, con la más alta superficie detectora) se proporcionan las capas de procesamiento tales como amplificadores, convertidores análogos a digitales y etapas de multiplexación. Finalmente, en la parte inferior de la pila, se proporciona una capa de respaldo de epoxi o material similar la cual provee amortiguamiento acústico a la estructura. Este tipo de capa es necesario porque de otro modo las ondas transmitidas y reflejadas dentro del dispositivo proporcionarían señales falsas que serán detectadas por el transductor y de este modo degradarán significativamente el rendimiento.

El objetivo de la tecnología CMUT es permitir transductores ultrasónicos para ser miniaturizados hasta tal punto que permitan la creación de servicios de imágenes que puedan ser insertados en el cuerpo humano con el fin de procesar imágenes. En particular, los sistemas de imágenes ultrasónicos intravenosos basados en catéteres han sido propuestos para su uso en el examen de plagas dentro de las arterias a fin de distinguir si la placa es

vulnerable o estable. (Véase "Self-biased charge sampling amplifier in 90 nm CMOS for medical ultrasound imaging" by L L R Cenkeramaddi, T Singh and T Ytterdal, GLSVLSI '07, Marzo 11-13 2007.

A fin de proporcionar estos tipos de dispositivos de imágenes que tienen una resolución útil y para procesar una imagen en un ángulo en cono deseado de alrededor de 90°, aproximadamente 1000 elementos transductores o más serían necesarios en un dispositivo que debe ser del orden de 1 mm cúbico. Como se observó anteriormente, la construcción usual es una pila de componentes con la matriz CMUT en la parte superior y los elementos electrónicos de procesamiento por debajo de esto. Para proporcionar la resolución deseada el dispositivo debe ser operable a 20 hasta 50 MHz y preferiblemente hasta alrededor de 100 MHz. Estas frecuencias indican que la matriz CMUT debe ser sólo de alrededor de 20 µm de espesor.

Un problema particular que se plantea es proporcionar las interconexiones eléctricas necesarias entre los elementos transductores individuales que comprenden la matriz y los elementos electrónicos asociados en la pila por debajo de la cual se deben procesar las señales de salida. Esta cuestión además se complica por el hecho de que es muy indeseable tener un conductor que transporta una señal expuesta en la superficie superior de la matriz de CMUT. Esta superficie forma el exterior del dispositivo, y en uso, estará en contacto con los tejidos y fluidos corporales. Por lo tanto, esta superficie completa debe estar a tierra-potencial tanto por razones de seguridad como para prevenir interferencia con las señales. Sería indeseable tener que proporcionar capas de aislamiento adicional sobre la parte superior de la estructura de membrana de CMUT para aislar los conductores que transportan la señal dado que esto agregaría complejidad a la fabricación y además degradaría potencialmente el rendimiento. Sin embargo puede ser necesario agregar una capa para asegurar la biocompatibilidad.

El documento US 2008/0048211 ilustra (en su discusión de la técnica anterior) una estructura de CMUT que se formó usando micromecanización y unión de obleas. En esto, una capa de silicio forma el sustrato del dispositivo con las cavidades de CMUT que se formaron en una capa de óxido sobre el mismo. Las cavidades se cierran mediante una capa de membrana formada de óxido de silicio. Una capa de silicio en masa conductora por debajo de las cavidades forma los electrodos traseros, con canales formados en el mismo para proporcionar aislamiento eléctrico entre los elementos. Esto se conoce como una estructura de "aislamiento de canal". Sin embargo, mientras que esta es una técnica efectiva desde una perspectiva eléctrica, los canales debilitan la estructura.

Como se discutió en "Wafer-Bonded 2-D CMUT Arrays Incorporating Through-Wafer Trench-Isolated Interconnects with a Supporting Frame" by Xuefeng Zhuang et al, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 56, No 1, 1 Enero 2009, se ha llevado a cabo un trabajo sobre el uso de agujeros como una alternativa al aislamiento del canal. Aquí, un material conductor, usualmente polisilicio impurificado, se usa para rellenar las vías (pasajes) a través del sustrato debajo de los elementos. Existen problemas particulares en la aplicación de este enfoque para una matriz de CMUT unida a la oblea; las etapas que forman la vía pueden ocasionar problemas con una etapa de unión posterior y se pueden originar tensiones indeseables para la oblea. Este documento concluye que "A la fecha, no se ha demostrado técnica de fabricación de agujeros exitosa alguna que sea compatible con la técnica de unión de obleas para producir las CMUTs". En su lugar, se propone una técnica de construcción mejorada basada en el aislamiento del canal.

El documento US 2008/0048211 (citado anteriormente) además establece que el uso de las agujeros de obleas es limitado a las estructuras de CMUT micromecanizadas de superficie (es decir, no unida a la oblea) La invención que se describe en el mismo recicla la estructura aislada del canal pero las vías (las cuales deben ser aisladas eléctricamente) se forman a través de la membrana misma.

Visto desde un primer aspecto, la presente invención proporciona una matriz de CMUT unida a la oblea que comprende una pluralidad de elementos de CMUT distribuidos a través de un sustrato, cada elemento comprende una cavidad y un electrodo de señal formado en el sustrato, y una membrana conductora que cierra la cavidad y forma un electrodo de masa, en donde las membranas de los elementos individuales forman un plano de tierra intacto a través de la superficie de la matriz y en donde la conexión eléctrica a los electrodos de señal se provee por medio de vías conductoras que dependen de los mismos a través del sustrato desde el electrodo de la señal hacia la parte trasera del sustrato.

De este modo, por medio de la invención se pueden solucionar las desventajas conocidas de las estructuras aisladas por canales. En particular, la eliminación de los canales de aislamiento elimina la causa de debilidad de los diseños de unión a la oblea en la técnica anterior y de este modo las matrices según la invención pueden ser considerablemente más fuertes. Además, la matriz de la invención tiene todas las ventajas asociadas con una estructura de unión a la oblea.

En la discusión de la presente invención, las mismas convenciones con respecto a la orientación de los componentes se usan como en la discusión de la técnica anterior. De este modo, la membrana forma una superficie "superior" o "frontal" desde la cual se emite las ondas ultrasónicas y/o en la cual se recibe y se detectan. El lado opuesto del dispositivo es la "parte inferior" o "trasera" o "lateral trasero". Las vías conductoras por lo tanto pasan hacia abajo del electrodo de la señal (o "caliente") hacia la parte trasera del dispositivo, donde se pueden suministrar los elementos electrónicos de procesamiento del control y/o la señal. El término "unido a la oblea" tiene su

significado usual en esta técnica como se estableció anteriormente. Por lo tanto, la estructura de la matriz de CMUT se forma a partir de una pluralidad de obleas que se unen entre sí.

De este modo, por medio de la presente invención, se provee una estructura de matriz de CMUT que se une a una oblea (por ej., por fusión) que no necesita tener vías de canal y tiene una superficie frontal que está libre de los conductores que transportan los voltajes de la señal, por lo que la superficie frontal de la matriz misma puede mantenerse completamente al potencial de masa.

A fin de proporcionar la estructura más compacta, cada vía depende preferiblemente de forma directa hacia abajo (es decir distante de la superficie plana de tierra del dispositivo) desde un electrodo de señal individual. Sin embargo, se puede combinar una pluralidad de transductores en un grupo, digamos, de cuatro (o preferiblemente más) para formar lo que efectivamente es un elemento único. Los electrodos de esos transductores individuales pueden unirse mediante conductores que pueden estar en el mismo plano que los electrodos y que se forman convenientemente de forma íntegra con los mismos. De este modo, una pluralidad de electrodos puede formar una superficie conductora contigua que puede estar conectada a una única vía conductora.

Preferiblemente los electrodos se proporcionan dentro de las cavidades. Esto es en contraste a la técnica del arte anterior convencional de donde una capa de electrodos se proporciona por debajo de una estructura separada en la cual se forman las cavidades. Por ejemplo, en las estructuras micromecanizadas convencionales, se forma una capa de óxido sobre la estructura del electrodo. Dado que la estructura del electrodo se forma típicamente de polisilicio que tiene una rugosidad superficial significativa, esto da por resultado que la capa de óxido también sea desigual. Mientras que esto puede ser tolerado en un dispositivo micromecanizado superficial, este tipo de superficie desigual no es adecuada para la unión de obleas. Los inventores han reconocido que al formar electrodos dentro de las cavidades, las cavidades pueden formarse en una oblea que forma el sustrato y de este modo la estructura de la membrana puede unirse a la oblea del sustrato, en vez de una capa de óxido desarrollada. Esta es una superficie inherentemente más adecuada a la cual unirse ya que puede ser pulida químicamente para dejar una superficie muy suave.

Aunque hay varios enfoques que pueden ser llevados hacia la micromecanización de la estructura de la invención, el enfoque preferido es crear el sustrato a partir de obleas de silicio o con base de silicio. Se pueden usar obleas de BOX de silicio en algunas realizaciones dado que tiene una capa de óxido que es útil en el procedimiento de fabricación.

Las vías conductoras y la estructura de la cavidad se pueden formar en una única oblea o las vías se pueden formar en una oblea y la estructura de la cavidad y el electrodo de señal se forma en otra oblea. En este último caso, una capa de óxido puede formar una capa aislante entre estas dos obleas.

Las vías se forman de forma más conveniente grabando perforaciones al menos en la capa del dispositivo de silicio de la oblea e insertando un material conductor en la misma. Sin embargo, típicamente, primero se ha creado una capa de óxido dentro de la perforación a fin de aislar la vía. Las perforaciones pueden ser ciegas, en cuyo caso, después de que las partes de la oblea debajo del extremo de la perforación (que se puede usar como un mango) hayan sido eliminadas, las vías proporcionarán comunicación eléctrica desde la parte inferior del sustrato hacia los electrodos de la señal.

Dentro de cada elemento, las cavidades de cada transductor individual se forman, preferiblemente, grabando parcialmente el silicio impurificado hasta una profundidad predeterminada. Esta profundidad (por ej., 50-70 nm, preferiblemente 60 nm) puede ser tal que una parte del silicio impurificado permanece en la parte inferior de la cavidad el cual puede ser usado para formar el electrodo de la señal. De este modo, la matriz puede comprender una pluralidad de electrodos de señal (o grupos de estos electrodos) que comprenden áreas de silicio impurificado aislado por canales grabados dentro del silicio impurificado. .

De forma alternativa, se puede formar una cavidad más profunda y los electrodos de señal se pueden formar de polisilicio el cual se deposita en las cavidades. Está preferiblemente impurificado con fósforo. El espacio de la cavidad puede ser ajustado grabando el polisilicio, que forma la base de la cavidad, hasta la altura deseada especificada anteriormente.

Dado que la estructura está unida a la oblea, la membrana se forma usando una oblea más, típicamente basada en silicio. En las realizaciones que se describen en la presente, la membrana se forma a partir de una oblea de silicio recubierta con nitruro de silicio y opcionalmente además óxido de silicio que se une a la oblea que forma la estructura de la cavidad. La membrana luego se forma grabando hasta una capa única de la capa de nitruro de silicio y de óxido de silicio si fuera apropiado, al menos en la región que reviste los elementos transductores.

Como se observó anteriormente, los elementos se completan con una capa de electrodos plana de tierra que se forma sobre las membranas a través de la superficie de los elementos individuales (esto puede considerarse como la formación de una superficie de membrana plana de tierra conductora simple). Una parte de la oblea de la cual se forma la membrana puede dejarse intacta a fin de formar un reborde alrededor de la periferia del dispositivo.

Más preferiblemente, los electrodos de masa se proporcionan en la periferia a fin de suministrar una conexión eléctrica a la membrana misma. Dado que estos electrodos están a potencial de tierra, no surgen los problemas descritos anteriormente con respecto a los electrodos de señal expuestos. La membrana se fabrica preferiblemente conductora proporcionando una capa/película metálica sobre la misma. Esta puede comprender aluminio, titanio o tungsteno y se forma, por ejemplo, mediante un procedimiento de pulverización iónica.

Si se desea, las vías conductoras como se describió anteriormente pueden ser suministradas además para proporcionar una tercera conexión eléctrica hacia la CMUT. Esta puede usarse para separar el voltaje de la desviación de CC de los voltajes de RF.

Además se puede usar un electrodo adicional para ajustar eléctricamente la frecuencia de resonancia de la CMUT y el factor de acoplamiento. Al liberar la energía almacenada en un electrodo separado en la matriz de CMUT también se puede usar para generar un pulso de transmisión y de este modo separar las señales de transmisión de las señales de recepción.

La invención además se extiende a un procedimiento para crear el tipo de matriz de transductor que se describió en general anteriormente. De este modo visto desde otro aspecto, la presente invención proporciona un procedimiento para fabricar una matriz de CMUT que tiene una pluralidad de elementos de CMUT distribuidos a través de un sustrato, comprendiendo el procedimiento: en el sustrato de silicio, formar una cavidad y un electrodo de señal para cada elemento y vías conductoras que proporcionan conexión a los electrodos, las vías conductoras están dispuestas para depender de los elementos; y proporcionar una membrana conductora para cerrar cada cavidad y forma un electrodo de tierra, por el cual se forma un plano de masa intacto a través de la superficie de la matriz de CMUT, en donde la membrana conductora se forma a partir de una oblea de silicio que se une al sustrato.

De este modo se puede formar la matriz de CMUT unida a la oblea que tiene agujeros. Como se discutió anteriormente, la membrana proporciona un plano de tierra intacto a través de la superficie de los elementos (es decir en uso se conecta al potencial de tierra y la superficie de la membrana está en este potencial común). La conexión eléctrica puede ser suministrada a la membrana proporcionando contactos sobre la misma, preferiblemente en la periferia del dispositivo.

Las cavidades y las vías se forman preferiblemente en un sustrato que comprende una única oblea de silicio (primera) formándose la membrana en una oblea más (segunda) de la manera que se describió anteriormente.

En este procedimiento, preferiblemente las vías se forman antes de las cavidades; de este modo se puede proporcionar la primera oblea de silicio y grabar las perforaciones en la misma las que formarán las vías en la estructura terminada. Posteriormente, las cavidades se pueden formar en la primera oblea. Las cavidades y las perforaciones se pueden aislar desarrollando una capa de óxido sobre sus superficies. El material conductor, tal como el polisilicio se puede usar para formar los conductores dentro de las perforaciones y los electrodos dentro de las cavidades; esto puede hacerse de forma simultánea para formar un componente conductor contiguo (es decir una vía y electrodos conectados).

Como se observó anteriormente, los electrodos se forman preferiblemente dentro de las cavidades, más preferiblemente se extienden para formar las bases de las cavidades, en oposición a estar debajo de una capa en la cual se forman las cavidades. De este modo, el procedimiento comprende preferiblemente formar cavidades en el sustrato antes de formar los electrodos en el mismo (aunque como se observó anteriormente, en una realización la cavidad puede ser grabada hasta silicio el cual luego se usa para formar el electrodo).

Preferiblemente la superficie superior del sustrato es pulida plana antes de unirse con la oblea que forma la membrana.

Como se discutió anteriormente, la membrana conductora puede comprender una oblea de silicio separada, la cual está preferiblemente recubierta con nitruro. Preferiblemente se une al sustrato después de que se han formado los electrodos pero antes de que se completen las vías. Las perforaciones forman las vías preferiblemente no están grabada junto a través de la oblea, en cuyo caso las vías se completan preferiblemente eliminando una parte del lateral trasero del sustrato para exponer el conductor dentro de las perforaciones.

Por medio de las características preferidas del procedimiento, la etapa de unión se lleva a cabo tan tarde como sea posible para evitar las tensiones a la membrana. Más preferiblemente, la etapa de unión tiene lugar después de que se hayan formado las vías y después de que la superficie del sustrato a la cual se unirá la membrana sea pulida plana. La membrana entonces puede formarse desde la segunda oblea grabando el material para dejar la capa de la membrana de la manera conocida. El plano de tierra conductor puede ser aplicado posteriormente, según puedan los contactos eléctricos necesarios.

Las realizaciones de la invención se describirán posteriormente y el procedimiento preferiblemente incluye además las características apropiadas del mismo.

El concepto de formar los electrodos dentro de las cavidades de una matriz de CMUT también se cree que es inventivo y por lo tanto, visto desde un aspecto más, se proporciona una matriz de CMUT que comprende: un

sustrato con cavidades formadas en el mismo, las cavidades que contienen electrodos; y una membrana conductora dispuesta sobre las cavidades que están dispuestas para cerrar las cavidades. Además preferiblemente se proveen vías que dependen de los electrodos aunque del sustrato para proporcionar conexiones de señal, formando la membrana un electrodo común. La matriz preferiblemente comprende las características preferidas de otros aspectos de la invención. .

Visto todavía desde un aspecto más, la invención proporciona un procedimiento para fabricar una matriz de CMUT que comprende: formar una matriz de vías conductoras y una matriz de estructuras de cavidad en una primera oblea basada en silicio; proporcionar una oblea de silicio más y formar a partir de la misma una membrana conductora; en donde las obleas son cada una de ellas micromecanizadas para formar sus respectivas estructuras y están unidas entre sí para formar la matriz de modo que la membrana se extienda a través de las cavidades, se provee un electrodo de señal en cada cavidad, y cada vía proporciona conexión eléctrica a un electrodo de señal formado en una estructura de la cavidad.

En un enfoque alternativo, el sustrato se puede formar a partir de una pluralidad de obleas. Se puede usar una oblea para formar las cavidades y otra para las vías. Preferiblemente éstas se unen antes de que se una la oblea de la membrana. De este modo, visto desde otro aspecto se provee un procedimiento para fabricar una matriz de CMUT que comprende proporcionar: una primera oblea de silicio y formar en la misma una matriz de vías conductoras; una segunda matriz de silicio y formar en la misma una matriz de estructuras de cavidad; y una tercera oblea de silicio y formar a partir de la misma una membrana conductora; en donde las obleas son cada una de ellas micromecanizadas para formar sus respectivas estructuras y están unidas entre sí para formar la matriz de modo que la membrana se extienda a través de las cavidades, se provee un electrodo de señal en cada cavidad, y cada vía proporciona conexión eléctrica a un electrodo de señal formado en una estructura de la cavidad.

En este enfoque, se prefiere que la estructura de la cavidad y la oblea y la oblea de la matriz de la vía se formen a partir de obleas de silicio y la membrana se forme preferiblemente a partir de la oblea recubierta con nitruro.

Usualmente la estructura de la vía se creará primero grabando una pluralidad de perforaciones a través de la capa del dispositivo de la oblea respectiva. La (segunda) oblea que forma la estructura de la cavidad luego puede ser colocada sobre la primera oblea en una configuración "invertida" de modo que las capas del dispositivo de las dos obleas sean adyacentes. Sin embargo, se prefiere que antes de hacer esto se provea una capa de óxido sobre la capa del dispositivo de la primera oblea. Después de que se hayan unido las dos obleas, la capa "mango" de silicio puede ser removida de la segunda oblea.

Preferiblemente, una vez que se haya hecho esto la capa del dispositivo de silicio de la segunda oblea puede ser impurificada y la estructura de la cavidad puede ser grabada en la misma. Esto formará preferiblemente un gran número de tierras aisladas. Más preferiblemente el procedimiento además involucra grabar una parte de cada estructura aislada a fin de proporcionar una cavidad que tenga debajo de la misma una parte del silicio impurificado que forma el electrodo de señal. Típicamente alrededor de 60 nm de silicio impurificado será grabado a fin de proporcionar una cavidad de esta profundidad.

La próxima etapa preferentemente involucra colocar la tercer oblea (que forma la membrana) sobre la parte superior de la estructura de modo que una capa de nitruro de silicio esté colocada por encima de las cavidades como se describió previamente. Entonces es posible formar una membrana grabando silicio de la oblea para dejar atrás la capa de nitruro que forma la base de la membrana. Mientras el silicio debe ser grabado por encima de la matriz de los transductores, una parte de la matriz puede ser dejada en el lugar alrededor de la periferia del dispositivo para proporcionar un reborde. La membrana puede completarse como se discutió anteriormente.

En algún punto en el procedimiento, la capa de silicio mango de la primera oblea se elimina. Esto se hace preferiblemente después de que la tercera oblea (membrana) haya sido aplicada porque proporciona una resistencia mecánica significativa a la estructura. Luego es posible insertar material conductor en las perforaciones a fin de formar las vías.

De este modo, se observará que se proporciona un procedimiento muy conveniente para formar una matriz de CMUT la cual esté libre de conductores eléctricos no a tierra sobre su superficie frontal.

Aunque la invención ha sido descrita en el contexto de una estructura unida a una oblea, se cree que los conceptos de la invención descritos en la presente pueden ser aplicados a estructuras que no están unidas a la oblea. De este modo, visto todavía desde un aspecto más, la presente invención proporciona una matriz de CMUT que comprende una pluralidad de elementos de CMUT distribuidos a través de un sustrato, cada elemento comprende una cavidad y un electrodo de señal formado en el sustrato, y una membrana conductora que cierra la cavidad y forma un electrodo de masa, en donde las membranas de los elementos individuales forman un plano de tierra intacto a través de la superficie de la matriz y en donde la conexión eléctrica a los electrodos de señal se provee por medio de vías conductoras que dependen de los mismos a través del sustrato desde el electrodo de la señal hacia la parte trasera del sustrato. Más preferiblemente, los electrodos se forman dentro de las cavidades como se describió anteriormente.

Como se discutió previamente, la matriz de CMUT de la invención está destinada al uso como parte de un paquete de transductores ultrasónicos integrados que comprenden las capas de procesamiento de la señal debajo de la capa de la matriz de CMUT. En este tipo de estructura, las señales eléctricas de cada transductor pasan preferentemente de forma vertical a través del dispositivo en paralelo una con otra (y se procesan en paralelo) a través de varias etapas tales como convertidores análogos a digitales, amplificadores, etc. al menos hasta que alcancen una etapa de procesadores de señal donde pueden ser multiplexados. Normalmente, se provee una capa de respaldo acústico que proporciona amortiguamiento, como es bien sabido en la técnica, en la cara trasera del dispositivo.

Sin embargo, los inventores han descubierto que las propiedades acústicas del dispositivo pueden ser mejoradas si una capa más de amortiguamiento acústico se provee entre la matriz de CMUT y la estructura de procesamiento. Se prefiere particular que esta capa se proporcione directamente adyacente a la matriz de CMUT, por lo que las conexiones eléctricas se proporcionan a través de esta otra capa acústica hacia el conjunto de circuitos de procesamiento de la señal.

Se cree que esta disposición en sí misma representa una invención más y por lo tanto, visto desde un aspecto más, la presente invención provee una estructura de CMUT integrada que comprende una matriz de CMUT, un conjunto de circuitos de procesamiento de señal y una primera capa acústica, en donde el conjunto de circuitos de procesamiento de la señal se provee entre la capa de CMUT y la primera capa acústica y en donde una capa acústica más se provee entre la matriz de CMUT y la estructura de procesamiento de la señal. Preferiblemente, como se describió anteriormente, la segunda capa acústica se provee directamente adyacente a la capa de la matriz de CMUT. La invención además se extiende a un procedimiento para producir dicha matriz.

Otra invención descrita en la presente se refiere a la capa de respaldo acústica para un dispositivo de CMUT, tal como el que se discutió anteriormente. Como se observó anteriormente, se proporciona una capa de respaldo acústica en los dispositivos de CMUT. Esto asegura que cualquier señal acústica que se propaga desde el transductor en el respaldo es absorbida en el respaldo de modo que no excite al transductor de manera que de un eco falso en la señal recibida por el transductor (en recepción), o transmitida desde el transductor (en transmisión). Si no es absorbida podría además ser modificada de tal manera que no interfiera con las señales que el transductor establece para recibir o transmitir en el momento. En la mayoría de los casos esto significará que las ondas se mueven en la dirección de propagación.

Dada la necesidad de producir estos dispositivos en paquetes pequeños, en muchos casos, hay poco espacio disponible bajo el transductor de modo que es difícil acomodar una capa lo suficientemente espesa de material con pérdidas de propagación altas, para asegurar que ninguna señal se refleje hacia atrás al transductor.

El enfoque convencional a este problema ha sido proporcionar estructuras irregulares de la superficie inferior las cuales dispersan las ondas, pero además toman algo de espacio y no son una solución óptima a este problema.

En el documento US 7231181 se propone una capa de respaldo en la cual se forman surcos profundos de forma regular, de un cuarto de longitud de onda sobre la base o la superficie superior de la capa. Esto da por resultado lo que es efectivamente la formación de una rejilla de difracción. La mitad de las ondas que pasan a través de la capa se reflejan desde la superficie inferior de la capa de respaldo y la mitad se reflejan desde las partes en surco, con el efecto de que las ondas se convierten 180 grados fuera de la fase una con otra y experimentan interferencia destructiva. Este principio se describe en detalle a continuación con relación a la figura 39.

Mientras este enfoque es efectivo, es inherentemente mejorado hacia una longitud de onda específica y por lo tanto su efectividad es de algún modo limitada.

Según la invención, se provee una capa de respaldo acústica para su uso en un transductor ultrasónico, la capa está dispuesta para dispersar las ondas ultrasónicas de una pluralidad de distintas frecuencias, en la presente la capa de respaldo comprende una pluralidad de estructuras de dispersión que actúan de forma independiente una de otra de modo que cada una crea un coeficiente nulo de reflexión de onda regular a una frecuencia dada.

La frase "capa de respaldo acústica" tal como se usa en la presente significa una capa que se proporciona a fin de suprimir ondas ultrasónicas, por ejemplo evitar que se propaguen las ondas en volumen, o al menos atenuarlas.

De este modo, por medio de la presente invención se proporciona una capa de respaldo que puede ser compacta en tamaño mientras que a la vez puede dispersar un intervalo de frecuencias de ondas ultrasónicas.

Típicamente, las estructuras de dispersión están dispuestas de modo que agregan una longitud de propagación $2h$ a las señales que se reflejan desde la mitad del área total de cualquiera de los tipos posibles de longitudes de propagación adicionales debido a los otros retardos de propagación usados. (Una cavidad de profundidad h en la base de la capa dará por resultado una onda reflejada que tiene una trayectoria de propagación que es $2h$ más corta que la trayectoria de la onda reflejada fuera de la base de la capa, de modo que si h es un cuarto de una longitud de onda, las ondas que se han desplazado en la trayectoria más corta interferirán de forma destructiva con aquéllas que se han desplazado en la trayectoria más larga). Este equilibrio en los retardos de propagación debe mantenerse preferiblemente no sólo de forma global, sobre la estructura completa, sino además de forma local, para las áreas más pequeñas en todas partes en la estructura.

Una estructura que es capaz de hacer esto comprende cuadrados grabados de diferentes tamaños, donde los cuadrados de cada tamaño se organizan como sobre un tablero controlador, y, digamos que los cuadrados del tablero controlador negro se graban a una cierta altura h_i para el tablero controlador i-t. Para acomodar tres alturas en la forma equilibrada descrita anteriormente el tamaño de los cuadrados en los tableros controladores puede ser en escala de modo que hay un factor lineal de al menos dos en tamaño entre ellos (dos para una potencia íntegra). De este modo, se pueden colocar cuatro cuadrados del patrón más pequeño en uno de los siguientes cuadrados más grandes, etc. Los cuadrados más grandes deben dar preferiblemente cancelación a las frecuencias más bajas a través de la elección de la diferencia de altura.

Por lo tanto la presente invención proporciona una forma sistemática de hacer que la superficie trasera disperse las ondas en ondas con direcciones de propagación significativamente cambiadas; a menudo dando trayectorias de propagación largas atrás hacia el transductor. Por lo tanto sólo afectarán hasta un pequeño grado la imagen realizada con el transductor, si éstas deben ir hacia atrás hacia el transductor. Además puede convertir las ondas a ondas de cizalladura en el respaldo, las que normalmente tienen pérdidas de propagación mucho más altas en el material de respaldo que la onda longitudinal entrante y por lo tanto además reduce la posibilidad de que la nueva energía alcance al transductor con una resistencia significativa. La estructura toma poco espacio, ya que su profundidad total en la parte inferior del material de respaldo está en el orden de una longitud de onda.

La disposición del tablero controlador es una de las muchas formas de hacer una estructura de dispersión para su uso en la invención. Además es posible usar surcos paralelos los cuales tienen la misma distancia entre los surcos que el ancho del surco. Varias estructuras en surco pueden estar superpuestas sobre la parte superior una con otra de modo que estén todas activas en el mismo momento, y equilibradas como se describió anteriormente. Además es posible usar diferentes direcciones para los surcos con diferente profundidad y posiblemente además diferente ancho las cuales están designadas para hacerlas activas a frecuencias deseadas. Tres estructuras de surcos podrían tener direcciones de asiento que difieren en 45 grados y 90 grados internamente. Otro enfoque es proporcionar conjuntos de surcos periódicos en la misma dirección con diferentes profundidades y anchos, los cuales están superpuestos entre sí. Esto puede hacerse de modo que la profundidad total en un punto dado es la que sigue de la suma de todas las estructuras de surco superpuestas. En este caso debe haber una relación íntegra entre los períodos de las diferentes estructuras de surco, para cumplir con el principio de equilibrio total.

Otra estructura posible tiene un patrón básico de dos triángulos que juntos forman un cuadrado o un rectángulo. Una estructura que forma un patrón de profundidad balanceado combinado con ésta podría ser la estructura que se obtiene si el cuadrado o el rectángulo se divide en triángulos por la otra de las dos diagonales posibles. Para incluir más patrones uno podría repetir la misma estructura con rectángulos donde las dimensiones en el plano se escalan hacia arriba o abajo un factor o dos.

En la discusión anterior, se han considerado los casos donde los bordes de topografía de la estructura de la superficie son agudos. Sin embargo, las estructuras con más bordes graduales también servirán, y puede ser más fácil para fabricarlas por colado. La capa acústica puede formarse de cualquier material adecuado, por ejemplo epoxi y tungsteno el cual es adecuado para moldear.

Aunque la invención está esencialmente concebida como una capa de respaldo, en otros aspectos de la invención una capa del tipo descrito se puede proporcionar en otra parte en la estructura de un transductor ultrasónico (especialmente un CMUT). Por ejemplo, puede ser necesario proporcionar de forma deseable una capa de respaldo entre la matriz de CMUT y su conjunto de circuitos electrónicos de control y procesamiento de la señal asociado. Las estructuras de la presente invención se pueden usar en cualquiera o ambas capas de respaldo de este tipo. En verdad, la provisión de un aparato transductor ultrasónico integrado que tiene una primera capa de amortiguamiento entre la matriz de CMUT y el conjunto de circuitos electrónicos de control y procesamiento de la señal asociado dentro del aparato proporciona un aspecto más de esta invención. Las estructuras de la invención además se pueden aplicar a otros campos donde las ondas sónicas o ultrasónicas deben ser absorbidas o atenuadas.

La invención es útil con cualquier tipo de transductor ultrasónico que emplea una capa de respaldo acústica, pero es particularmente útil para las estructuras de CMUT. De este modo, visto desde otro aspecto la invención proporciona un dispositivo de CMUT que comprende una capa acústica según se describió anteriormente.

La invención además se extiende a un procedimiento para fabricar una capa de respaldo acústica que comprende formar este tipo de estructura sobre la misma, por ej., por moldeo, micromecanización (incluyendo grabado, fotolitografía), etc. y a un procedimiento para construir un dispositivo de CMUT que comprende este tipo de capa.

Como se observó anteriormente, la provisión de una capa de respaldo que comprende material de amortiguamiento acústico es bien conocida en los dispositivos de CMUT. Además se ha establecido anteriormente que los inventores han descubierto que las propiedades acústicas pueden ser mejoradas si se provee otra capa de amortiguamiento entre la capa de CMUT y la estructura de procesamiento de señal, particularmente si se proporciona directamente adyacente a la capa de CMUT.

Sin embargo, es inherente en el uso de este tipo de capa de amortiguamiento en el tipo de matriz descrito que las conexiones eléctricas (conocidas en este campo como "vías") deben ser proporcionadas a través de la misma, desde

la capa de CMUT por encima hacia la estructura de procesamiento de señal por debajo y este es el asunto de una invención más. Los inventores han reconocido que las técnicas conocidas para fabricar este tipo de vías dan por resultado una estructura que es demasiado rígida para funcionar de forma óptima como una capa de amortiguamiento. Por ejemplo, las vías se pueden crear grabando la oblea del semiconductor para dejar un conjunto de conductores ("polos") rodeados por vacíos que son rellenados posteriormente con material de amortiguamiento. Sin embargo, las técnicas de grabado conocidas, tal como el grabado iónico reactivo profundo (DRIE), colocan un límite inferior sobre el diámetro del polo de 10 micrones para una capa de amortiguamiento de un espesor de 100 micrones. Si los polos se localizan, digamos, en un paso de 25 micrones en ambas direcciones transversales, los polos dominarán la rigidez de la placa en términos de compresión vertical, reduciendo de este modo de forma significativa las propiedades de amortiguamiento de la capa.

Según la presente invención se proporciona una estructura de amortiguamiento acústico para su uso en un transductor ultrasónico, la estructura de amortiguamiento comprende una capa de material de amortiguamiento acústico que tiene una superficie superior y una superficie inferior y una pluralidad de conductores eléctricos que se extienden desde la superficie superior a través de la capa de material de amortiguamiento acústico hacia la superficie inferior, en donde cada uno de los conductores encuentran la superficie inferior de la estructura de amortiguamiento en las posiciones que se compensan de forma lateral desde las posiciones en las cuales encuentran la superficie superior.

De este modo, por medio de la invención los conductores (vías) no forman trayectorias verticales directas (como columnas) desde la superficie superior hacia la inferior y por lo tanto proporcionan una rigidez significativamente menos vertical hacia la estructura.

La invención puede ser provista por el uso de conductores sustancialmente rectos dispuestos en un ángulo significativo con relación a las superficies superior e inferior (es decir no perpendicular a la misma), en otras palabras, los conductores pueden correr en diagonal. Sin embargo, este tipo de estructura no es sencilla de construir y no proporciona las propiedades acústicas óptimas. Por lo tanto se prefiere que los conductores no sean rectos sino que sigan las trayectorias con inclinaciones. Una disposición particularmente preferida es que los conductores sean maniobrados. De este modo, los conductores pueden tener una primera parte que se extiende desde la superficie superior dentro de la capa de amortiguamiento acústica, una segunda parte compensada desde allí y que se extiende desde la superficie inferior dentro de la capa de amortiguamiento acústico, y una tercera parte que se extiende dentro de la capa de amortiguamiento acústico desde la primera parte hacia la segunda parte.

Aunque son posibles otras formas, la capa de amortiguamiento es típicamente de forma generalmente plana, con las superficies superior e inferior sustancialmente paralelas. Es más conveniente que la primera y la segunda parte de los conductores sean sustancialmente perpendiculares a las superficies superior e inferior, es decir que sean en general verticales si las superficies superior e inferior se toman como una referencia horizontal. Además, las terceras partes son preferiblemente paralelas en general a las superficies superior e inferior (es decir horizontales). Esto permite que las terceras partes sean depositadas como una capa horizontal durante la construcción de la estructura de amortiguamiento.

Las partes verticales de los conductores se forman preferiblemente, como se describió anteriormente, grabando una oblea semiconductor (por ej., silicio) para que abandone los polos. Más preferiblemente, la capa de amortiguamiento se forma a partir de una pluralidad de capas, más simplemente de dos capas de la mitad del espesor final. Esto provee la ventaja adicional de que el diámetro de los polos puede ser reducido a la mitad del espesor, por ej., 5 micrones en comparación con 10 micrones en el ejemplo anterior.

Las dos capas pueden entonces conectarse entre sí de modo que las posiciones de los polos en cada parte se compensan. Por ejemplo, si los polos forman las esquinas de una grilla en la primera capa, los de la segunda capa estarían localizados en el centro de la misma grilla en la segunda capa. En el ejemplo anterior el espaciado de una grilla de 25 micrones es adecuado. Esta disposición se considera como un concepto inventivo más y así, visto desde un aspecto más se provee una estructura de amortiguamiento acústico para su uso en un transductor ultrasónico, la capa de amortiguamiento comprende al menos dos partes de capa de amortiguamiento adyacentes con conductores eléctricos que pasan a través de las mismas, en donde los conductores eléctricos de una parte de la capa se conectan entre sí a un conector eléctrico en la otra parte de la capa mediante el conductor transversal dispuesto en el límite entre las capas.

Las dos capas podrían ser conectadas mediante el uso (preferiblemente delgado) de una capa de engomado anisotrópicamente conductor. Este engomado tiene una densidad bastante baja de esferas conductoras que brinda conducción entre dos superficies conductoras a medida que las superficies se retuercen en el procedimiento de engomado, pero no brinda conducción de forma transversal en la capa de engomado.

Se apreciará que se pueden usar más capas si se requiere. De este modo, se pueden usar tres capas juntas con dos conjuntos de partes conductoras horizontales, etc. En estas disposiciones, sólo los polos de las partes de la capa adyacente necesitan ser compensados uno con otro. En verdad, la invención además puede ser vista como una estructura de amortiguamiento acústico para su uso en un transductor ultrasónico, en donde las vías se forman

a través de una capa de amortiguamiento, las vías que siguen las trayectorias con inclinaciones y preferiblemente comprenden partes que son perpendiculares a la dirección del resto de la vía.

Una forma conveniente de construir cada capa es usando obleas de silicio BOX (capa de óxido aislante) creando los polos en la capa del dispositivo, que se extiende preferiblemente desde la superficie hacia el BOX. El lateral trasero de la oblea se usa posteriormente como un mango durante el procesamiento.

Luego los polos pueden ser rodeados con material de amortiguamiento acústico, tal como partículas de tungsteno que contiene epoxi y luego las partes conductoras horizontales pueden ser creadas sobre la superficie epoxi de una de las obleas antes de que las dos obleas se unan de modo que las partes conductoras horizontales formen conexiones eléctricas entre los dos conjuntos de polos compensados.

Una de las capas mango puede ser removida para permitir que un conjunto de polos se conecte a otros componentes en una estructura de transductor ultrasónico, por ejemplo la matriz de CMUT. Una vez que esto se haya hecho, es posible remover la capa mango restante, exponiendo de esta forma el otro conjunto de polos para la conexión, por ejemplo, a las capas de procesamiento de señal para formar una estructura del transductor ultrasónico. De este modo, la capa de amortiguamiento de la invención está destinada al uso como parte de un paquete de transductores ultrasónicos integrados que comprenden las capas de procesamiento de la señal debajo de la capa de la matriz de CMUT. En este tipo de estructura, las señales eléctricas de cada transductor pasan preferentemente de forma vertical a través del dispositivo en paralelo una con otra (y se procesan en paralelo) a través de varias etapas tales como convertidores análogos a digitales, amplificadores, etc. al menos hasta que alcancen una etapa de procesadores de señal donde pueden ser multiplexados. Normalmente, se provee una capa de respaldo acústico que proporciona amortiguamiento, como es bien sabido en la técnica, en la cara trasera del dispositivo. Esa capa además puede formarse según la presente invención si se requieren vías eléctricas en las mismas.

Aunque la invención ha sido descrita en el contexto de dispositivos de CMUT, es aplicable a otros transductores ultrasónicos. En verdad, se puede usar en otros campos donde se requiera una estructura de amortiguamiento acústico similar.

La invención además se extiende a los procedimientos correspondientes para producir capas de amortiguamiento acústico, de este modo, visto todavía desde otro aspecto la invención proporciona un procedimiento para construir una estructura de amortiguamiento acústico para su uso en un transductor ultrasónico, que comprende formar una pluralidad de polos eléctricamente conductores rodeados por un vacío sobre primeras y segundas obleas, que rodean los polos conductores con material de amortiguamiento acústico, aportando trayectorias eléctricamente conductoras en conexión eléctrica con los polos sobre la superficie de una de las obleas y uniendo las obleas de modo que cada uno de los polos de una oblea se compense lateralmente con los polos de la otra oblea y de modo que cada polo de la primera oblea se conecte a un polo de la segunda oblea mediante una de las trayectorias conductoras.

La invención además se extiende a un sistema de imágenes ultrasónico (preferiblemente invasivo) que comprende un transductor como se describió previamente que incorpora esta o estas capas de amortiguamiento acústico y a un procedimiento de imágenes que usa un transductor según la invención. En un sistema práctico, las señales de este tipo de transductor, que preferiblemente han sido multiplexadas, se transmiten mediante una señal que conduce a un sistema de procesamiento hacia un dispositivo de visualización de imagen. El conjunto de circuitos de control también se puede proporcionar a fin de controlar el haz, etc. como se conoce generalmente en el campo del ultrasonido.

Las matrices de CMUT de la invención se pueden producir en la forma de una "píldora de robot", es decir en una forma autocontenida que puede ser tragada por un paciente. De este modo, visto desde un aspecto más la invención proporciona un transductor ultrasónico que puede tragarse que comprende una matriz de CMUT según cualquier otro aspecto de la invención. La píldora de robot preferiblemente incluye una fuente de energía y preferiblemente se proporciona con un cierre cerrado para proteger la matriz contra los fluidos corporales (ácido estomacal, etc.). Puede comprender un sistema de registro de datos, tal como un procesador y una unidad de memoria, pero en una forma particularmente preferida comprende un transmisor (por ej., radio transmisor) para transmitir imágenes a un receptor externo.

Cada una de las invención discutidas anteriormente además se extiende a un sistema de imágenes ultrasónico (preferiblemente invasivo) que comprende un transductor como se describió previamente y a un procedimiento de imágenes que usa un transductor según la o las invenciones En un sistema práctico, las señales de este tipo de transductor, que preferiblemente han sido multiplexadas, se transmiten mediante una señal que conduce a un sistema de procesamiento hacia un dispositivo de visualización de imagen. El conjunto de circuitos de control también se puede proporcionar a fin de controlar el haz, etc. como se conoce generalmente en el campo del ultrasonido.

La realización de las invenciones se describirá a continuación, por medio de un ejemplo únicamente, con referencia a los dibujos adjuntos:

La figura 1 es una vista en perspectiva esquemática de un conjunto transductor ultrasónico que incorpora una matriz de CMUT la cual es una realización de la invención;

La figura 2 es una sección transversal esquemática de tres obleas de silicio usadas en la construcción de la matriz;

5 La figura 3 es una vista en sección esquemática de una primera de las obleas de silicio que ilustra la formación de una perforación en la misma;

La figura 4 es una vista que corresponde a la figura 3 que muestra el resultado de otras etapas de procesamiento;

La figura 5 es una vista en sección esquemática que corresponde a la figura 4 que muestra la adición de una segunda de las obleas a la estructura;

10 Las figuras 6 y 7 son vistas en sección esquemática que corresponden a la figura 5 que muestra el resultado de otras etapas de procesamiento secuencial;

La figura 8 es una vista en sección esquemática que corresponde a la figura 7 que muestra la adición de una tercera de las obleas a la estructura;

Las figuras 9 y 10 son vistas en sección esquemática que corresponden a la figura 8 que muestra el resultado de otras etapas de procesamiento;

15 La figura 11 es una vista en sección del CMUT completado;

La figura 12A es una vista en sección parcial a través de una matriz de los CMUTs y la figura 12B es una vista en plano parcial que corresponde a la figura 12A que ilustra la línea de sección usada;

Las figuras 13A y 13B corresponden a las figuras 12A y 12B pero emplean una línea de sección diferente;

La figura 14 es una vista en sección transversal de una matriz de CMUT según otra realización de la invención;

20 Las figuras 15 y 16 son vistas de la matriz de la figura 14 que corresponden las figuras 12B Y 13B que muestran las líneas en sección transversal en las figuras 17 y 18,

Las figuras 17 y 18 son vistas en sección de la matriz de la figura 15 a lo largo de las líneas A-A y B-B de las figuras 15 y 16, respectivamente.

Las figuras 19 y 20 corresponden a las figuras 15 y 16 pero muestran una estructura levemente modificada;

25 La figura 21 muestra vistas en sección transversal esquemáticas de obleas de silicio usadas en la producción de la realización de la figura 14;

Las figuras 22(a) y (b) a 35(a) y (b) y la figura 37 (a) y (b) son vistas en sección transversal a lo largo de las líneas A-A y B-B definidas por las figuras 19 y 20 que muestran etapas consecutivas en la fabricación de la matriz según la realización de la figura 14;

30 Las figuras 36 y 38 son vistas esquemáticas que corresponden a la figura 14 que muestra las etapas finales en la fabricación de la matriz según la realización de la figura 14;

. La figura 39 es un diagrama esquemático de una capa de respaldo de la técnica anterior;

La figura 40 es un gráfico de contorno (en vista plana) de la base de una capa de respaldo según una realización de la presente invención;

35 La figura 41 es un gráfico que ilustra la pérdida de reflexión de la capa de respaldo de la figura 40 como una función de frecuencia;

La figura 42 es una vista en sección esquemática de una oblea BOX usada en la construcción de una capa de amortiguamiento según una realización más en la cual el silicio ha sido grabado para dejar polos conductores;

40 La figura 43 es una vista de la oblea de la figura 42 donde una capa de material de amortiguamiento ha sido agregada para rodear los polos;

La figura 44 es una vista en plano esquemático de pistas conductoras formadas sobre la superficie superior de la oblea de la figura 43; y

45 La figura 45 es una vista en sección esquemática de la realización completada. Con referencia a la figura 1, se ilustra un conjunto de transductor ultrasónico. Es adecuado para su uso en procedimientos ultrasónicos invasivos, es decir, se puede usar en una "cámara" ultrasónica que puede montarse sobre la punta del catéter o aguja para su inserción en los vasos sanguíneos, etc. Este dispositivo necesita poder explorar un amplio campo de vista de modo

que un gran número de elementos debe ser proporcionado en la matriz. La realización se puede usar para realizar la imagen de un cono con un ángulo de 90 grados, y así alrededor de 1000 elementos se proporcionan en paquetes hasta aproximadamente 1 mm cúbico.

El conjunto 1 se forma a partir de un número de capas formas por separado que constituyen una pila. En la parte superior (como se muestra) está la capa de CMUT 2 que comprende una matriz de elementos transductores 3. Cada uno de estos elementos comprende realmente cuatro transductores individuales 3a-3d, como se describirá a continuación. (En otras realizaciones este número podría ser diferente, en muchos casos más alto). Para proporcionar la resolución necesaria, la realización opera a frecuencias ultrasónicas de 20-50 MHz; la capa es una estructura de silicio micromecanizada de un espesor de 20 micrones. Su construcción se discutirá en detalle a continuación.

Las capas restantes están dispuestas debajo de la capa de CMUT 2. En general, estas capas comprenden múltiples elementos que corresponden a los elementos de CMUT de modo que las trayectorias de señal hacia y desde cada CMUT son paralelas y verticales (como se ilustra) a través de la estructura.

Debajo de la capa de CMUT 2 se encuentra una capa acústica 4 que sirve para proporcionar aislamiento acústico de los transductores desde el resto del dispositivo. Dado que la capa superior del dispositivo es casi silicio puro, esta capa se proporciona para prevenir la propagación de las ondas de superficie. Una onda de superficie es una onda que se propaga a través de la superficie del transductor. Si las ondas de superficie se dejaran propagar entonces destruirían el funcionamiento del dispositivo, al menos dentro de un cierto intervalo de ángulos. (En dispositivos de la técnica anterior, los canales de aislamiento se proporcionan para reducir la propagación de ondas, pero éstos no se emplean en la presente realización). La capa acústica 2 se forma de resina epoxi y perlas de tungsteno y tiene un espesor de 100 micrones.

La siguiente capa es la capa de transmisión de alto voltaje 5. Esto proporciona las tensiones de mando necesarias a cada uno de los transductores a fin de hacerlos emitir las ondas ultrasónicas. Esta capa proporciona tensiones de mando en el intervalo de +/- 10 - 15 voltios (estas son "tensiones altas" en el presente contexto). Además permite que el pulso transmitido sea direccionado en una dirección deseada, lo cual se hace excitando cada uno de los diferentes elementos en una secuencia predeterminada, como se conoce generalmente en el campo de los transductores ultrasónicos. Esta capa además puede ser controlada de modo que sólo una parte de la matriz se use cuando se transmite.

En la realización descrita, los mismos elementos se usan para transmisión y recepción, sin embargo, en otras realizaciones (que no se ilustran), se proporcionan elementos de transmisión y recepción separados.

La capa receptora 6 recibe señales desde los transductores y las preprocesa antes de ser transmitidas a la capa de procesamiento y comunicación de la señal 7. En particular, la capa 6 contiene convertidores análogos-a-digital dispuestos para convertir la salida de cada transductor en forma digital. La capa 7 luego procesa y multiplexa las señales digitales de modo que puedan ser transmitidas junto con un pequeño número de conductores hacia un dispositivo de visualización. De este modo, tiene entradas que corresponden a cada elemento de CMUT, pero tiene un número mucho más pequeño de salidas para proporcionar una señal de imagen desde el dispositivo.

De este modo, en la realización, como también los elementos de CMUT que se usan en ambos modos de recepción y transmisión, se proporcionan elementos electrónicos de recepción y transmisión dentro de una estructura unificada. Sin embargo, en realizaciones más simples (que no se ilustran) el transmisor puede ser colocado sobre un chip separado del receptor y no necesariamente coalineado con la pila formador del haz y de recepción.

La capa final 8 es una capa más de amortiguamiento acústico que evita que las ondas de volumen se propaguen. Estas capas son convencionales en los transductores convencionales basados en materiales piezoeléctricos. Sin embargo, el uso de dos capas acústicas (4 y 8) es original en este diseño. En los dispositivos ultrasónicos piezoeléctricos convencionales la parte transductora es mucho más gruesa y no hay sándwich de silicio entre dos capas de amortiguamiento y así la capa simple de la capa de amortiguamiento en la base de la estructura (es decir la capa 8) fue suficiente para amortiguar las ondas de superficie. Sin embargo, se ha hallado que esto es ineficaz cuando hay capas de silicio entre ella y el transductor, como en la realización descrita.

Una característica importante del dispositivo es que no hay conexiones eléctricas sin tierra hacia o a través del frente (parte superior como se muestra) del dispositivo; las conexiones en tensión se proporcionan únicamente a través de la parte trasera (inferior como se muestra) de los elementos de CMUT, como se describirá en detalle a continuación. Esto permite que el frente del dispositivo esté a tierra y así ninguna señal "en tensión" que transporta conductores está expuesta sobre el exterior del dispositivo. Esto tiene consideraciones de seguridad donde están involucradas altas tensiones de mando y plantea problemas en el aislamiento eléctrico de los conductores que transportan la señal.

El procedimiento para fabricar la capa de CMUT 2 del dispositivo se describirá a continuación, con referencia a las figuras restantes. Debe observarse que mientras que la figura 2 muestra obleas de silicio desde las cuales se forma una matriz de elementos transductores de CMUT, y las figuras 12A a 13B muestran (partes de) matrices completas, por razones de claridad, las figuras 2 a 11 ilustran la formación de sólo un único elemento de CMUT de cuatro

transductores 3a-3d. Las figuras son puramente esquemáticas y no a escala, además, las figuras 3 a 11 son de algún modo escurzadas en la dirección horizontal en comparación con las figuras 2 y 12A-13B a fin de permitir que los detalles se vean claramente.

La capa de CMUT 2 se forma a partir de tres obleas separadas 9, 10 y 11 como se muestra en la figura 2. La primera oblea 9 es una oblea de silicio recubierta con una capa de óxido 12 (SiO_2) y, sobre la parte superior de la capa de óxido, una capa de nitruro (Si_3N_4) de 100 nm 13. Esto se usará en la construcción de la membrana de CMUT. La segunda y tercera capa 10, 11 son obleas de Si BOX regulares, es decir cada una tiene una capa de óxido 14, 15 en sándwich dentro de ellas. (La capa de óxido se usa normalmente para reducir la capacitancia entre los circuitos vecinos sobre la superficie de un circuito integrado). La oblea 10 tiene una capa de dispositivo de 8 micrones 21 y una capa de BOX de 0,3 micrones 14; para la oblea 11, estos espesores son 10 micrones y 2 micrones respectivamente. Las capas mango 23 y 17 (y además la capa 22 de la oblea 11, la cual es además un mango son significativamente más gruesas, aunque esta dimensión no es crítica. Como se describirá, la mayoría de cada una de estas obleas será grabada durante el procedimiento de micromecanización.

En la matriz de CMUT completada, la oblea inferior 11 forma la estructura de silicio principal sobre la cual se transportan los elementos transductores y en la cual se forman las vías que forman las conexiones eléctricas. La capa media 10 forma la estructura de la cavidad de CMUT y la capa superior 9 se usa para crear la membrana. Las obleas se muestran en su forma "normal" hacia arriba -con sus capas de dispositivo de las obleas 10 y 11, donde se forma el conjunto de circuitos electrónicos- sobre la parte superior. Sírvase observar que la oblea media 10 será invertida en el siguiente procedimiento.

La primera etapa de micromecanización se muestra en la figura 3. Esto muestra la oblea 11 que se ha sometido a un procedimiento de oxidación para proporcionar una capa de óxido 15' alrededor de sus laterales. Después de eso, se graba una perforación 18 de un diámetro de 4 micrones a través de la capa de silicio superior 16 y a través del óxido 15. Esta perforación eventualmente se usará para formar una vía de conducción. El grabado de la parte superior de la capa de óxido 15' recientemente creada y a través del silicio 16 se realiza por grabado iónico reactivo (RIE) (capa de óxido 15') y grabado iónico reactivo profundo (DRIE) (capa de silicio 16), haciendo la perforación a través de la capa de óxido 15 usando grabado. En este procedimiento, el material fotoresistente 19 se aplica a la superficie superior para formar una máscara, aunque la capa de óxido superior 15' actúa como parte del enmascaramiento en el procedimiento DRIE. No es importante si la capa de silicio inferior 17 se graba hasta cierto grado porque esto va a ser removido más tarde.

Además, los marcadores de registro R1 y R2 se forman en la capa de óxido 15' para alinear esta oblea con los marcadores correspondientes sobre las otras obleas en procedimientos de unión subsiguientes. Aunque no se discutió más en la siguiente discusión, estos marcadores se graban como parte de la primera etapa de procesamiento para cada una de las obleas para facilitar la alineación de las obleas en el procedimiento de unión. Es importante que la orientación cristalina de las obleas corresponda bien para obtener una buena unión. Posteriormente, se remueve la fotoresistencia que controlaba el grabado que tuvo lugar y se aplica una capa de óxido 20 de 1 micrón al interior de la perforación 18, véase la figura 4. Esto forma una capa aislante para la vía.

En la próxima etapa, se emplea la oblea media 10. Como puede verse a partir de la figura 5, se invierte (en comparación con la vista de la figura 2) y se coloca sobre la parte superior de la oblea inferior 11. A fin de formar una unión firme, las superficies de las obleas se limpian y se hidrofilizan, se alinean, se presionan, y posteriormente se calientan, de forma convencional.

La próxima etapa (véase la figura 6) es grabar desde la oblea 10 la capa superior (como se muestra ahora) 23 que ha actuado como "mango" para la estructura. (Su única función fue proporcionar un soporte para la capa de óxido restante y las capas de Si que son muy delgadas).

Una vez hecho esto, la capa de óxido se elimina y la capa de silicio 21 se impurifica con POCl_3 para darle una concentración elevada de fósforo en la superficie. Esto deja un residuo sobre la superficie denominado vidrio con fósforo, el cual debe ser removido, por lo tanto se llevan a cabo las siguientes etapas: grabar el vidrio con fósforo; desarrollar una capa de óxido delgada; alta temperatura para el tratamiento a largo plazo de la oblea para permitir al fósforo que se difunda en la capa del dispositivo para obtener concentraciones de fósforo en el orden de $10^{16}/\text{cm}^3$ a $10^{19}/\text{cm}^3$; desarrollar un nuevo óxido, de un espesor de 500 nm.

A continuación, se aplica una máscara de fotoresistencia 25 a la capa de óxido 14 y los canales 26 se graban usando grabado iónico reactivo (RIE) y grabado iónico reactivo profundo (DRIE) dentro de la capa de óxido 14 y la capa de silicio impurificado 21. Estos canales formarán los bocetos de los elementos transductores individuales 3a-3d.

A continuación, (véase la figura 7), la fotoresistencia 25 se elimina junto con la capa de óxido 22. Posteriormente, se aplica una nueva capa de fotoresistencia (para definir una nueva área para el grabado) y la parte central 27 (véase las figuras 6 y 7) de la parte superior de la estructura se graba en 60 nm para formar lo que será el interior de la cavidad de CMUT. Es necesario grabar esta parte de una manera muy controlada. Esto se hace conociendo que el silicio oxida con diferente velocidad dependiendo del espesor del óxido, y que el silicio necesario para formar el

óxido se toma de la superficie oxidada. El procedimiento luego es el siguiente: oxidar la superficie completa de forma uniforme (500 nm); proteger la superficie que se levantará con foto resistencia; grabar el óxido en las áreas que va a ser cavidades; remover la fotoresistencia, oxidar nuevamente durante un tiempo adecuado; remover todo el óxido. Esto deja la estructura que se muestra en la figura 7.

- 5 Volviendo ahora a la figura 8, la tercera oblea y final 9 se coloca sobre la parte superior de la estructura después de haber sido limpiada, hidrofiliada y posteriormente las obleas se alinean usando los marcadores de registro R1, R2, etc., y se unen. La parte inferior de la capa de nitruro 26 de esta oblea formará parte de la membrana que dosifica las cavidades de la CMUT.

- 10 Ahora que hay una oblea fuerte 9 sobre la parte superior de la estructura que proporciona resistencia mecánica, es posible remover la capa "mango" inferior de silicio 17, usando primero RIE para remover el óxido. Luego la capa 15 se graba mediante hidróxido de tetrametil amonio TMAH. Además, parte del óxido junto con el óxido formado en la base de la perforación 18 se graba mediante RIE para formar la estructura que se muestra en la figura 9 en la cual la parte inferior de la perforación 18 ha sido abierta.

- 15 La próxima etapa es formar una vía inyectando material no conductor en la perforación 18. Como se muestra en la figura 10, se proporciona primero una capa de polisilicio (polisilicio cristalino amorfo) 30 para alinear la perforación. Luego esto se impurifica pesadamente y se usa más polisilicio 31 para rellenar la perforación 18. El exceso de polisilicio restante en la parte inferior de la estructura se remueve y se aplica un contacto de aluminio 32 mediante pulverización iónica. Se aplica un contacto de aluminio 33 más (en una perforación grabada) para proporcionar conexión al volumen del silicio.

- 20 Volviendo a la figura 11 la próxima etapa es grabar con TMAH la capa de silicio 22 (y sus capas protectoras) sobre el elemento de CMUT abajo hacia la capa de nitruro 28. Sírvase observar que las regiones externas de la capa 22 se mantiene para proporcionar un reborde alrededor de la parte superior de la estructura para permitir un fácil manejo en la prueba. Aunque la presente descripción muestra un único elemento, como se muestra en las figuras siguientes, la capa de silicio 22 se graba sobre toda la matriz de los CMUTS con el reborde restante alrededor de la periferia del dispositivo completo. En otra realización de la invención una capa de amortiguamiento inferior 8 proporciona la resistencia de manipulación para la estructura de la matriz y así no se requiere reborde.

- 30 A continuación, se depositan 100 nm de película conductora, por ej., aluminio o titanio o tungsteno o una película con una combinación de los mismos 39 y una capa de nitruro de silicio 34 de 150 nm se forma sobre la parte superior de la misma usando deposición de vapor mejorada con plasma. Esto crea la membrana del CMUT. La capa de nitruro proporciona resistencia a las membranas y protege la película conductora, la cual a su vez proporciona una "placa capacitadora" conductora. Finalmente, los orificios se graban en la periferia del dispositivo y los contactos de oro 35 se insertan para proporcionar conexiones de tierra. La película de aluminio forma un plano de tierra común así que sólo unos pocos de estos electrodos son necesarios alrededor de la periferia de la matriz completa.

- 35 De este modo, en el CMUT terminado, la membrana que contiene aluminio (39, etc.) forma una placa (de masa) del elemento capacitivo, y la parte 36 de la capa de silicio impurificado 21 forma placa en tensión/señal. Estas dos placas son paralelas entre sí y están separadas por una cavidad 38. La conexión eléctrica a la membrana de tierra es por medio de contactos 35 y la conexión a la placa en tensión 36 es por medio de la vía 32 que se extiende hacia abajo a través de la capa de silicio directamente debajo de ella.

- 40 Como se observó anteriormente, la realización completa contiene alrededor de 1000 elementos que comprenden cada uno de ellos 4 transductores individuales 3a-3d como se muestra en las figuras 12A a 13B. Las figuras 12B y 13B muestran de forma más clara el plano de los elementos 3 que contiene cada uno de ellos cuatro transductores individuales 3a-3d. Las figuras 12A y 13A muestran cómo los elementos adyacentes y sus respectivas vías 31 están dispuestos relacionados unos con otros. Se observará que cada elemento de cuatro transductores tiene sólo una vía y que los electrodos de señal de cada uno de los cuatro transductores individuales están conectados. Esto puede verse mejor en las figuras 12B y 13B. Las partes centrales de cada transductor son, como se describió previamente, grabadas en 60 nm para formar la cavidad inferior en los CMUTs, y además los 0,85 micrómetros externos de las "líneas" angostas que conectan los círculos. Los vacíos restantes 40 que pueden verse en las figuras 12A y 13A son los marcadores de registro.

- 50 Una realización más de la invención, junto con su procedimiento de producción se describirá a continuación con referencia a las figuras 14 a 38. La realización es similar en su estructura general a la descrita anteriormente, pero las cavidades se forman en la misma pieza de oblea de silicio como las vías.

- 55 La figura 14 muestra una sección transversal de la realización que muestra una matriz de cavidades o celdas de CMUT 102 cerradas al vacío con electrodos superiores de tierra uniformes 106 y conexiones de vías eléctricas 111 ("vías") hacia el lateral trasero donde se proporciona contactos eléctricos 108. El sustrato de silicio de volumen tiene un contacto eléctrico separado 109. La pila de membrana sobre las celdas de CMUT consiste de nitruro de silicio de LPCVD (103), óxido de silicio 104, una capa metálica 105 y una capa de nitruro de silicio de PECVD (deposición de vapor químico mejorado con plasma) 106. El contacto de oro 110 se deposita para proporcionar conexión eléctrica a la capa metálica de pila de membrana 105 que constituye el electrodo superior.

La matriz de CMUT, parte de la cual se muestra en la figura 14 consiste de miles de elementos donde cada elemento consiste de cuatro celdas de CMUT circulares 102. Las figuras 15 y 16 muestran bocetos de vista superior de dos elementos de CMUT antes de unión por fusión de la pila de membrana. La superficie de la oblea de silicio de volumen 201 constituye el área para la unión por fusión del nitruro de silicio 103 al silicio 201, como se discutirá de forma más completa a continuación. Los pequeños círculos 211 en una de las celdas en cada elemento en las figuras 15 y 16 ilustran donde se localiza la conexión de la vía eléctrica 11 de la figura 1. El polisilicio impurificado 21 forma los electrodos inferiores y las líneas de interconexión entre las celdas de CMUT que conectan las cuatro celdas de CMUT eléctricamente para formar un elemento. La superficie de polisilicio 213 define la parte inferior de la cavidad. Los canales de óxido de silicio 212 proporcionan aislamiento entre los elementos y definen el diámetro del área de electrodo inferior y las membranas circulares.

Las figuras 15 y 16 se proporcionan con líneas de sección transversal que definen las vistas en sección usada en las dos figuras siguientes. La figura 15 muestra la sección transversal A-A' a través de un elemento usado en la figura 17. De manera similar B-B' en la figura 16 muestra la sección transversal en diagonal a través de un elemento usado en la figura 18.

Como puede verse a partir de las figuras 17 y 18, el nitruro de silicio de LPCVD (deposición de vapor químico de baja presión) 303 con óxido de silicio 304 sobre la parte superior del mismo se une por fusión a la superficie de silicio de volumen 301. La pila de membrana suspendida sobre la celda de CMUT cerrada al vacío 302 se completa mediante una capa metálica delgada 305 y una capa de nitruro de silicio de PECVD 306. El polisilicio impurificado 313 constituye el electrodo inferior y las conexiones de vía eléctrica hacia el lateral trasero del componente. El óxido de silicio 312 proporciona aislamientos entre las conexiones de la vía y define el diámetro del área de electrodo inferior y las membranas circulares.

El procedimiento para fabricar esta realización se describirá ahora de una manera paso por paso con referencia a las figuras 19 a 38. Las figuras 19 y 20 corresponden a las figuras 15 y 16, pero por una cuestión de claridad muestran una interconexión simplificada (trayectoria simple) entre las celdas 400 que forman cada elemento 401; las figuras subsiguientes corresponden a esta disposición y muestran las secciones transversales A-A (izquierda a derecha) y B-B (diagonal) definidas por estas figuras.

Como se mencionó anteriormente, el pequeño círculo 402 en una de las celdas en cada elemento muestra la parte superior de la conexión de la vía eléctrica. Las áreas con puntos grises 403 son los electrodos inferiores de polisilicio impurificado con las líneas de interconexión 404 entre las celdas de CMUT que conectan las cuatro celdas de CMUT eléctricamente a un elemento. La superficie de polisilicio define la parte inferior de la cavidad. Las áreas circundantes 405 indican los canales de óxido de silicio. Estos canales se aíslan entre los elementos y definen el diámetro del área del electrodo inferior y las membranas circulares. El área externa 405 muestra la oblea de silicio desnudo. Esta es la superficie unión para la unión por fusión a la oblea formadora de la membrana.

La figura 21 muestra las obleas usadas en el procedimiento. A la izquierda muestra una oblea de silicio estándar 407 en la cual se formarán los elementos de CMUT y las conexiones de vías. A la derecha muestra una oblea de silicio estándar 408 con una capa delgada de óxido de silicio 409 que la rodea. El nitruro de silicio de deposición de vapor químico de baja presión (LPCVD) 410 se deposita en la parte superior para formar la capa externa. Esta oblea se unirá por fusión a la oblea de silicio desnudo.

En las siguientes figuras, la parte izquierda "(a)" muestra la sección transversal A-A de la figura 15; la figura de la derecha "(b)" muestra la sección transversal B-B de la figura 16. Los pares de figuras se describirán mediante el uso del número solo; de esto modo la "figura 22" se refiere tanto a la figura 22(a) como a la figura 22(b).

La secuencia del procedimiento comienza con la oblea de silicio estándar. La figura 22 muestra que la oblea 407 es oxidada por humedad para aplicar una capa de óxido de silicio 411 antes de que se estampe una capa de fotoresistencia 412. Después de estampar la fotoresistencia, el óxido de silicio 411 se graba por grabado iónico reactivo (RIE), cuyo resultado se muestra en la figura 23 donde las partes 414 de la superficie superior del silicio están expuestas. La capa de óxido restante se usará posteriormente como una máscara de óxido para definir las áreas de los elementos, véase la figura 26. La figura 24 muestra una segunda máscara protectora 414 para definir la ubicación 415 de las conexiones de la vía.

Posteriormente se graban orificios 416 de 20 μm de profundidad en las locaciones 415 dentro de la oblea mediante el grabado iónico reactivo profundo (DRIE) como se muestra en la figura 25. El diámetro de las vías es aproximadamente 4 μm .

La próxima etapa es la eliminación de la fotoresistencia 414 y las áreas para los elementos 417 se definen mediante RIE, véase la figura 26.

La oblea se oxida en húmedo mediante óxido de silicio grueso 418, véase la figura 27. Esto proporciona una capa aislante que servirá para aislar las vías una de otra. Además, el óxido de silicio constituirá canales de aislamiento entre los elementos y define el diámetro de ambos el electrodo inferior y la membrana (véase la figura 31 a continuación).

Las vías se rellenan con polisilicio 419 (figura 28 que es impurificado por fósforo. Esto forma conductores 420 a través de las vías que son contiguas con el material que formará los electrodos de señal del elemento. Como se muestra en la figura 29, la próxima etapa es para la parte superior de la oblea que va a ser removida y pulida mediante pulido mecánico químico (CMP), que define los electrodos 421.

- 5 La oblea se estampa mediante fotoresistencia 422 y el espacio de la cavidad 423 es mejorado por grabado aproximadamente 60 nm del polisilicio por RIE (figura 30). Los canales de aislamiento 424 se crean posteriormente mediante grabado 200-300 nm del óxido de silicio usando BuHF (figura 31). Esto completa la formación de la parte inferior de las celdas y así la oblea que se muestra en la parte derecha de la figura 21 puede ser unida por fusión a la parte superior, como se muestra en la figura 32, para cerrar las celdas.
- 10 Cuando esto se ha hecho, el lateral trasero (parte inferior como se muestra) de la oblea inferior es disminuido usando hidróxido de tetrametil amonio (TMAH) y RIE para exponer la parte inferior 426 de las vías 420 (figura 33). Una capa del óxido térmico se oxida para aislamiento de la superficie de silicio inferior (figura 34), con aberturas que se proporcionan en el óxido para formar contactos hacia las vías y para separar el contacto hacia la oblea de silicio. Posteriormente se el aluminio se somete a pulverización iónica, se estampa y se sinteriza para formar contactos laterales traseros 428, 429 hacia la vía de polisilicio 420 y el electrodo inferior (figura 35).
- 15

- Volviendo ahora a la figura 36, puede verse que el nitruro de silicio 410 y las capas de óxido de silicio 409 de la superficie superior de la oblea de silicio superior se estampan y graban mediante RIE. Se graba la oblea de silicio superior 408 sobre las áreas de la matriz mediante TMAH con detención del grabado sobre el óxido de silicio. Por lo tanto, el óxido de silicio y el nitruro de silicio sobre la superficie inferior de la oblea superior, que constituyen ambos parte de la pila de membrana, finalmente se exponen. Como se muestra en la figura 37, una delgada capa de metal uniforme 430 es estampada sobre la parte superior del óxido de silicio 409, el cual fue útil como una parada del grabado durante el grabado por TMAH del silicio superior. Esta capa metálica de la pila de membrana podría consistir típicamente de una única capa de aluminio, titanio o tungsteno o incluso combinaciones de dos o más metales para la capa única. La pila de membrana se termina mediante una capa uniforme de aislamiento de la capa de pasivado mediante depósito de vapor químico mejorado con plasma (PECVD) 431, típicamente nitruro de silicio, que se deposita sobre la parte superior de la capa metálica 430.
- 20
- 25

La etapa final (figura 38) es para la capa de pasivado de PECVD que va a ser abierta hacia el metal de la pila de membrana en el borde del chip. Se deposita oro 432 para el contacto eléctrico del metal de la pila de membrana, véase la figura 38.

- 30 A continuación se discute la capa de respaldo 8 (véase la figura 1). Para proporcionar la resolución necesaria, cuando la realización opera a frecuencias ultrasónicas de 20-50 MHz; la capa 2 es una estructura de silicio micromecanizada de un espesor de 20 micrones.

- Como se discutió anteriormente, debajo de la capa de CMUT 2 se encuentra una capa acústica 4 que sirve para proporcionar aislamiento acústico de los transductores desde el resto del dispositivo. Dado que la capa superior del dispositivo es casi silicio puro, esta capa se proporciona para prevenir la propagación de las ondas de superficie. Una onda de superficie es una onda que se propaga a través de la superficie del transductor. Si las ondas de superficie se dejan propagar entonces destruirían el funcionamiento del dispositivo, al menos dentro de un cierto intervalo de ángulos. (En dispositivos de la técnica anterior, los canales de aislamiento se proporcionan para reducir la propagación de ondas, pero éstos no se emplean en la presente realización). La capa acústica 4 se forma de resina epoxi y tiene un espesor de 100 micrones.
- 35
- 40

- La capa final, que ahora se discutirá en detalle, es una capa más de amortiguamiento acústico 8 que evita que las ondas de volumen se propaguen. Estas capas son convencionales en los transductores convencionales basados en materiales piezoeléctricos. Sin embargo, el uso de dos capas acústicas (4 y 8) es original en este diseño. En los dispositivos ultrasónicos piezoeléctricos convencionales la parte transductora es mucho más gruesa y no hay sándwich de silicio entre dos capas de amortiguamiento y así la capa simple de la capa de amortiguamiento en la base de la estructura (es decir la capa 8) fue suficiente para amortiguar las ondas de superficie y las ondas de volumen. Sin embargo, se ha hallado que esto es ineficaz especialmente para las ondas de superficie, cuando hay capas de silicio entre ella y el transductor, como en la realización descrita.
- 45

- La capa de respaldo de la técnica anterior de la figura 39 corresponde a la capa 8 de la figura 1. Se proporciona su superficie libre inferior con una superficie "corrugada" que comprende surcos rectangulares regulares un cuarto de longitud de onda (específica) en profundidad.
- 50

- Una onda longitudinal plana se muestra propagándose hacia la superficie corrugada. Los surcos tienen el mismo ancho que la distancia entre los surcos, d , y la altura del surco es h . En la línea punteada, justo por encima de la parte superior de los surcos, allí, como una primera aproximación, se reflejarán las ondas con amplitudes uniformes a lo largo de la línea, pero con diferencias de fase de $2h2\pi\lambda$ entre las regiones con y sin surcos. Aquí λ es la longitud de onda de la onda. A una frecuencia $4h = \lambda$ la diferencia de fase es π y la amplitud de la reflexión especular, la onda reflejada como si hubiera sido de una superficie inferior plana es cero. En su lugar la onda es
- 55

convertida en ondas longitudinales y de cizalladura con vectores k en la dirección transversal de los múltiplos de $\pm 2\pi/(2d)$.

Sin embargo, esta conversión sólo será efectiva sobre una banda bastante angosta en frecuencia. La realización de la invención que se describirá ahora puede cubrir una banda más grande y usa estructuras que agregan efectivamente varias de estas periodicidades de dispersión con diferentes alturas h efectivas.

Para hacer que varias de estas estructuras de dispersión trabajen de forma independiente de modo que cada una de ellas cree un vacío en el coeficiente de reflexión de onda especular a su frecuencia designada, es necesario disponerlas de modo que adicionen longitud de propagación $2hi$ hacia las señales reflejadas desde la mitad del área total de cualquiera de los posibles tipos de longitudes de propagación adicionadas debido a los otros retardos de propagación usados. Este equilibrio en los retardos de propagación debe mantenerse preferiblemente no sólo de forma global, sobre la estructura completa, sino además de forma local, para las áreas más pequeñas en todas partes en la estructura.

La realización que se ilustra en la figura 40 es un ejemplo de este tipo de estructura que es capaz de hacer esto. Comprende cuadrados grabados de diferentes tamaños, donde los cuadrados de cada tamaño se organizan como un tablero controlador. La figura es un gráfico de contorno de las alturas para una parte de los patrones del tablero controlador alternados. Las escalas a lo largo de los ejes están en el intervalo de 1 a 1,5 mm, y la altura en micrones.

Para tomar el caso general (sin limitarse a la realización de la figura 40), se asume que los cuadrados del tablero controlador "negro" se graban a una cierta altura h_i para el tablero controlador i . Para acomodar tres alturas en la forma equilibrada descrita anteriormente debemos escalar el tamaño de los cuadrados en los tableros controladores de modo que haya un factor lineal de al menos dos en tamaño entre ellos (dos para una potencia íntegra). Cuatro cuadrados del patrón más pequeño deben ser colocados en uno de los próximos cuadrados más grandes, etc. Los cuadrados más grandes deben dar cancelación a las frecuencias más bajas a través de la elección de la diferencia de altura.

La realización ilustrada usa este tipo de estructura con tres tableros controladores alternados. En la figura 40, se muestra levemente más que cuatro por cuatro de los cuadrados más grandes (dos por dos del período más grande).

Un diagrama de un coeficiente de reflexión especular obtenido versus la frecuencia para la realización se muestra en la figura 41. Las alturas se eligen para dar cancelación de la reflexión a 15,2 MHz, 24,7 MHz y 36,1 MHz. La cancelación de aproximadamente 46 MHz se debe a una diferencia de retardo de 1,5 para la estructura de 15,2 MHz. Por lo tanto localmente menos equilibrado que lo que podría haber sido a esta frecuencia.

En una realización alternativa uno de los paneles del tablero controlador en esta estructura está en escala en dimensión de modo que se rompe la regla del factor de dos. En este caso, el equilibrio requerido sobre una escala macroscópica puede mantenerse todavía, de modo que el resultado en la figura 41, casi no cambia. Pero una investigación cuidadosa de lo que sucede con la reflexión de áreas más pequeñas mostrará que la eficiencia se reduce.

En otra realización (que no se ilustra) varias estructuras en surco se superponen sobre la parte superior una con otra de modo que están todas activas en el mismo tiempo, y equilibradas como se describió anteriormente. Se usan diferentes direcciones para los surcos con diferente profundidad y además diferente ancho las cuales están designadas para hacerlas activas a frecuencias deseadas. Tres estructuras de surcos podrían tener direcciones de asiento que difieren en 45 grados y 90 grados internamente.

Otra realización (que no se ilustra) tiene un patrón básico de dos triángulos que juntos forman un cuadrado o un rectángulo. Una estructura que forma un patrón de profundidad balanceado combinado con ésta podría ser la estructura que se obtiene si el cuadrado o el rectángulo se divide en triángulos por la otra de las dos diagonales posibles.

Para incluir más patrones uno podría repetir la misma estructura con rectángulos donde las dimensiones en el plano se escalan hacia arriba o abajo un factor o dos. Como se discutió anteriormente, debajo de la capa de CMUT 2 (véase la figura 1) se encuentra una capa acústica 4 que sirve para proporcionar aislamiento acústico de los transductores desde el resto del dispositivo. El procedimiento de fabricación para la capa de amortiguamiento 4 se describirá ahora en detalle con referencia a las figuras restantes.

Volviendo primero a la figura 42, el procedimiento se inicia con dos obleas de box similares 509, 510 con un espesor de la capa del dispositivo 511 de 55 micrones y un espesor de la capa de óxido 512 de 100 nm. Sobre estas obleas definimos las marcas 513 sobre los laterales traseros 514 (los laterales sin capas del dispositivo), y posteriormente las capas del dispositivo 511 sobre los laterales frontales de ambas obleas se estampan con fotoresistencia y se graban usando grabado iónico reactivo profundo, DRIE, para formar polos de silicio 515 con un diámetro de 5 micrones en un patrón rectangular con un paso en ambas direcciones de 25 micrones. Como puede verse, el grabado va todo el trayecto a través de las capas del dispositivo 11 y se detiene en las capas de óxido 512.

La próxima etapa es para las obleas 509 y 510 para ser impurificadas y tratadas con calor de modo que se obtenga alta conductividad en el material del polo.

Como puede verse a partir de la figura 43, la próxima etapa es para que una mezcla de epoxi fluido y polvo de tungsteno 516 se disperse cuidadosamente sobre la parte superior de las obleas (con el lateral con polos señalando hacia arriba) de modo que los polos 515 estén rodeados por este material. Al vacío las obleas 509, 510 reciben un tratamiento con calor adecuado para permitir que el epoxi fluya fácilmente y desgasifique. Además permite que el polvo de tungsteno se hunda en la parte inferior de la capa epoxi, próxima a la superficie de silicio, y posteriormente endurezca. Después que el epoxi ha solidificado, las superficies con epoxi sobre las obleas 509, 510 se colocan a tierra y se pulen cuidadosamente hasta que las superficies superiores de los polos 515 estén libres. Posteriormente, como puede observarse en la vista plana en la figura 44, sobre una de las obleas se fabrican líneas metálicas eléctricamente conductoras 17 usando deposición de metal (amortiguamiento o pulverización iónica), estampado fotoresistente y grabado.

Las capas epoxi de las dos obleas 9, 10 se alinean, usando las marcas de alineamiento 13 sobre el lateral trasero de las obleas, de modo que los polos en una de las obleas están posicionados en el medio de cuatro polos sobre la otra oblea. Una vez alineadas de forma apropiada, las obleas se engoman usando engomado anisotrópicamente conductor. Las líneas metálicas 517 sobre una de las obleas harán ahora contacto eléctrico entre los polos conductores 15 en las dos obleas, como se muestra en la figura 45. (Sírvase observar que esta figura muestra la capa de amortiguamiento completada 4 después de que las capas traseras 514, etc. han sido removidas, véase a continuación).

La próxima etapa es entonces grabar una de las dos capas traseras 514 (que han actuado como mangos) hacia la capa de óxido 512 usando un grabado apropiado. Las regiones donde se sitúan los polos estarán visibles entonces a través del óxido 512 porque el óxido es delgado (100 nm). El óxido luego se estampa con fotoresistencia y se graba al menos sobre los polos, y opcionalmente sobre la superficie completa. Se forma una película metálica (que no se muestra) sobre la superficie, y se estampa usando grabado y fotoresistencia que producen contactos adecuados para la conexión a la superficie inferior de la oblea de CMUT 2. (De forma alternativa podría ser la superficie inferior de una o más obleas electrónicas ya conectadas a la oblea de CMUT). Una vez más se usa engomado anisotrópicamente conductor para conectar la capa de amortiguamiento 4 a la capa de CMUT 2.

Con esto hecho, la estructura combinada puede transportarse mediante una capa mango (que no se muestra) sobre el lateral opuesto de la capa de CMUT 2. Esto permite que la capa mango restante 514 de la segunda oblea 510 sea grabada y la superficie preparada para la conexión usando engomado anisotrópicamente conductor para otras obleas electrónicas (específicamente la capa 5) como se describió anteriormente.

REIVINDICACIONES

1. Una matriz de CMUT unida a la oblea que comprende una pluralidad de elementos de CMUT distribuidos a través de un sustrato, cada elemento comprende una cavidad (38) y un electrodo de señal (36) formado en el sustrato, y una membrana conductora (39) que cierra la cavidad y forma un electrodo de masa, en donde las membranas de los elementos individuales forman un plano de tierra intacto a través de la superficie de la matriz y en donde la conexión eléctrica a los electrodos de señal se provee por medio de vías conductoras que dependen de los mismos a través del sustrato desde el electrodo de la señal hacia la parte trasera del sustrato.
2. Una matriz de CMUT según la reivindicación 1, la matriz tiene una superficie frontal que está libre de conductores que transportan tensiones de señal, por lo que la superficie frontal de la matriz misma puede ser mantenida completamente a potencial de tierra.
3. Una matriz de CMUT según la reivindicación 1 o 2, en donde el sustrato se forma a partir de una de o una pluralidad de obleas de silicio o basadas en silicio, opcionalmente obleas de BOX de silicio, y preferiblemente en donde las vías conductoras y la estructura de la cavidad se forman en una única oblea.
4. Una matriz de CMUT según cualquier reivindicación precedente, en donde las vías comprenden perforaciones grabadas a través de al menos una capa del dispositivo de silicio de una oblea, y tienen una capa de óxido aislante y material conductor sobre la misma.
5. Una matriz de CMUT según cualquier reivindicación precedente, en donde los electrodos se forman dentro de las respectivas cavidades, y/o los electrodos de señal comprenden polisilicio.
6. Una matriz de CMUT según cualquier reivindicación precedente, en donde las cavidades de cada transductor individual se graban hasta una profundidad determinada en silicio impurificado.
7. Una matriz de CMUT según cualquier reivindicación precedente, en donde la membrana se forma separada del sustrato usando una oblea basada en silicio más, y/o la membrana comprende una capa de nitruro de silicio, y preferiblemente en donde la membrana además comprende una capa de película metálica.
8. Una matriz de CMUT según cualquier reivindicación precedente, en donde los elementos se proporcionan en grupos de elementos asociados que comparten una conexión común hacia una vía.
9. Un procedimiento para fabricar una matriz de CMUT que tiene una pluralidad de elementos de CMUT distribuidos a través de un sustrato, comprendiendo el procedimiento:

en el sustrato de silicio, formar una cavidad y un electrodo de señal para cada elemento y vías conductoras que proporcionan conexión a los electrodos, las vías conductoras están dispuestas para depender de los elementos; y

proporcionar una membrana conductora para cerrar cada cavidad y formar un electrodo de tierra, por el cual se forma un plano de masa intacto a través de la superficie de la matriz de CMUT;

en donde la membrana conductora se forma a partir de una oblea de silicio que se une al sustrato.
10. Un procedimiento según la reivindicación 9, en donde las cavidades y las vías conductoras se forman en una primera oblea con base de silicio y la membrana se forma a partir de una segunda oblea con base de silicio.
11. Un procedimiento según la reivindicación 9 o 10, en donde los electrodos se forman dentro de las cavidades.
12. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 11, en donde los electrodos se forman depositando polisilicio en las cavidades, comprendiendo preferiblemente el procedimiento grabar el polisilicio para ajustar la cavidad.
13. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 10 a 12, en donde la primera oblea se une directamente a la segunda oblea.
14. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 13, en donde las vía se forman depositando polisilicio en las perforaciones formadas en el sustrato.
15. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 14, en donde la membrana se forma para proporcionar un plano de masa intacto a través de la superficie de los elementos.
16. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 15, en donde las conexiones del electrodo de señal se forman completamente a través del sustrato del dispositivo.

17. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 16, que comprende una etapa de grabar una pluralidad de perforaciones a través de la capa del dispositivo de la primera oblea.

5 18. Un procedimiento según cualquiera de las reivindicaciones 9 a 17, que comprende colocar una oblea formadora de la membrana sobre la parte superior del sustrato de modo que una capa de nitruro de silicio se localiza por encima de las cavidades, y preferiblemente graba silicio a partir de la oblea para dejar detrás la capa de nitruro, y más preferiblemente proporcionar un recubrimiento metálico sobre la capa de nitruro para formar el electrodo de masa.

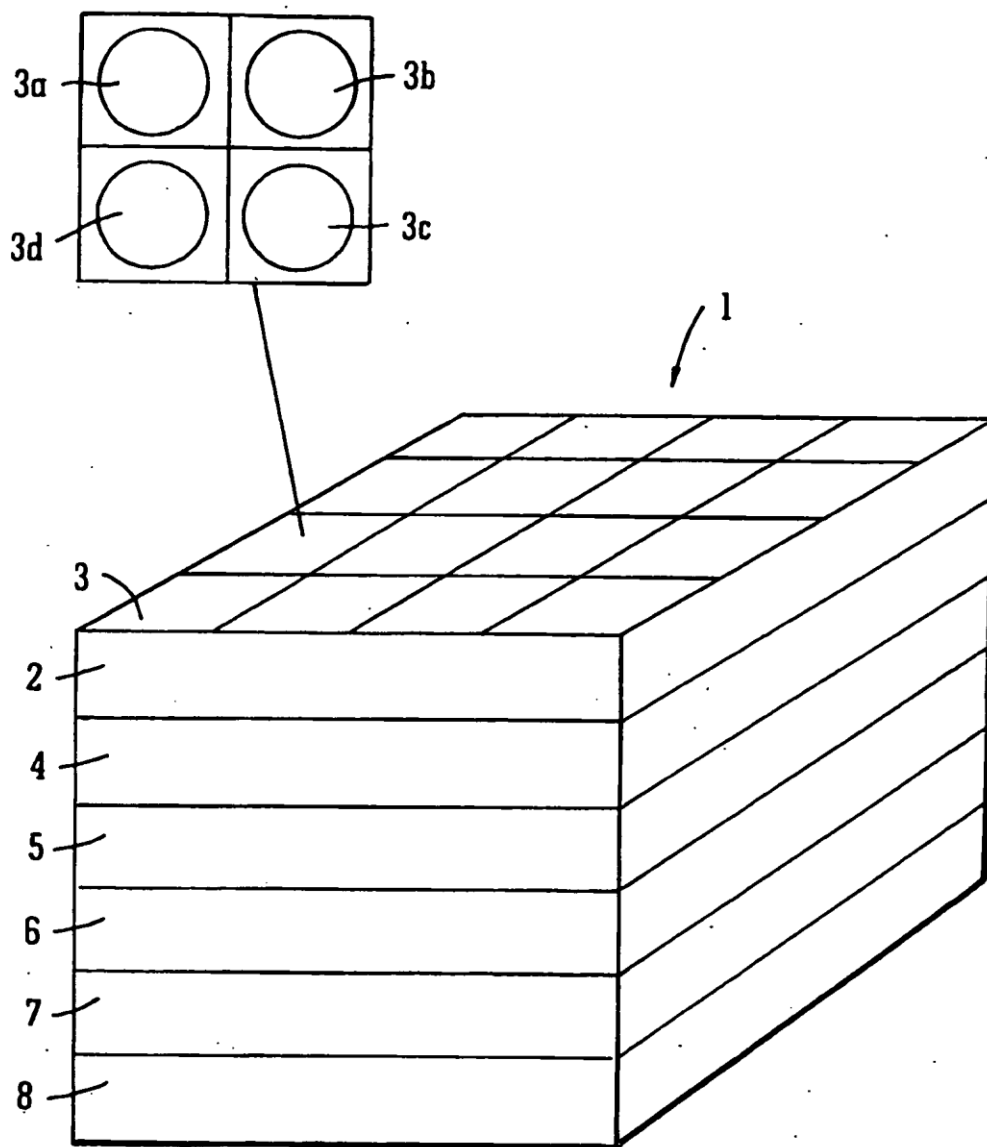


FIG. 1

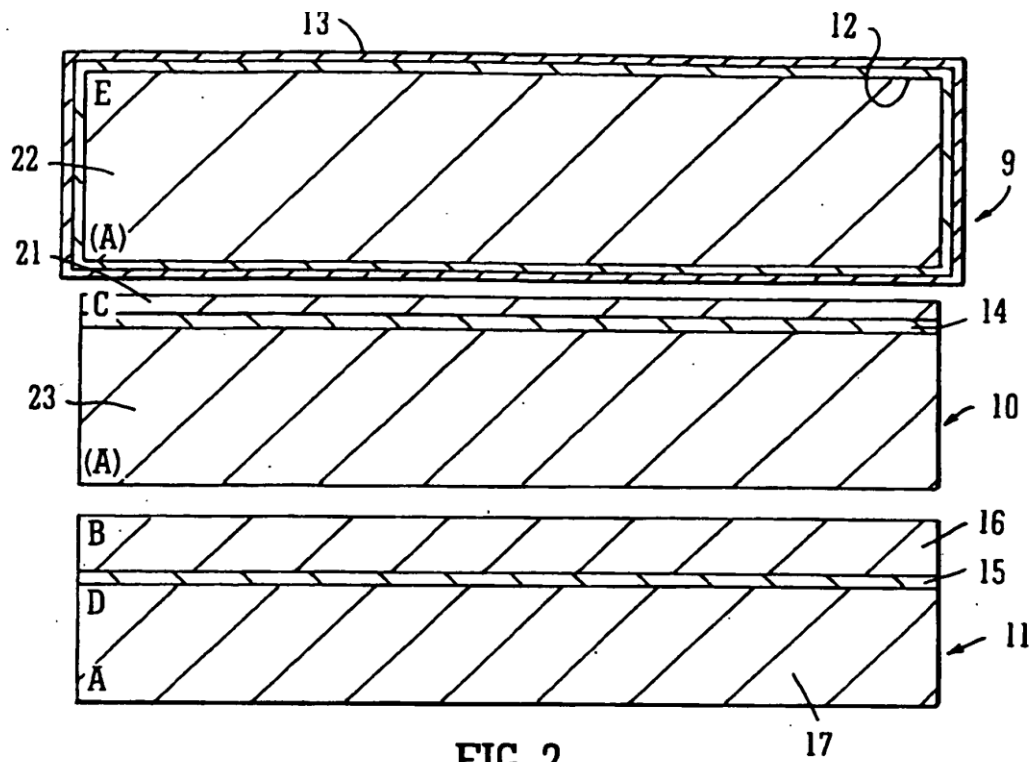


FIG. 2

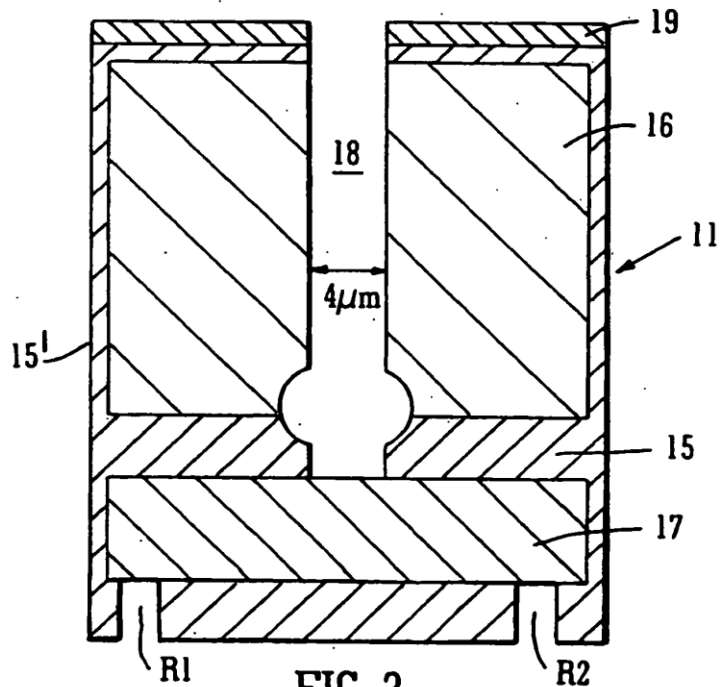


FIG. 3

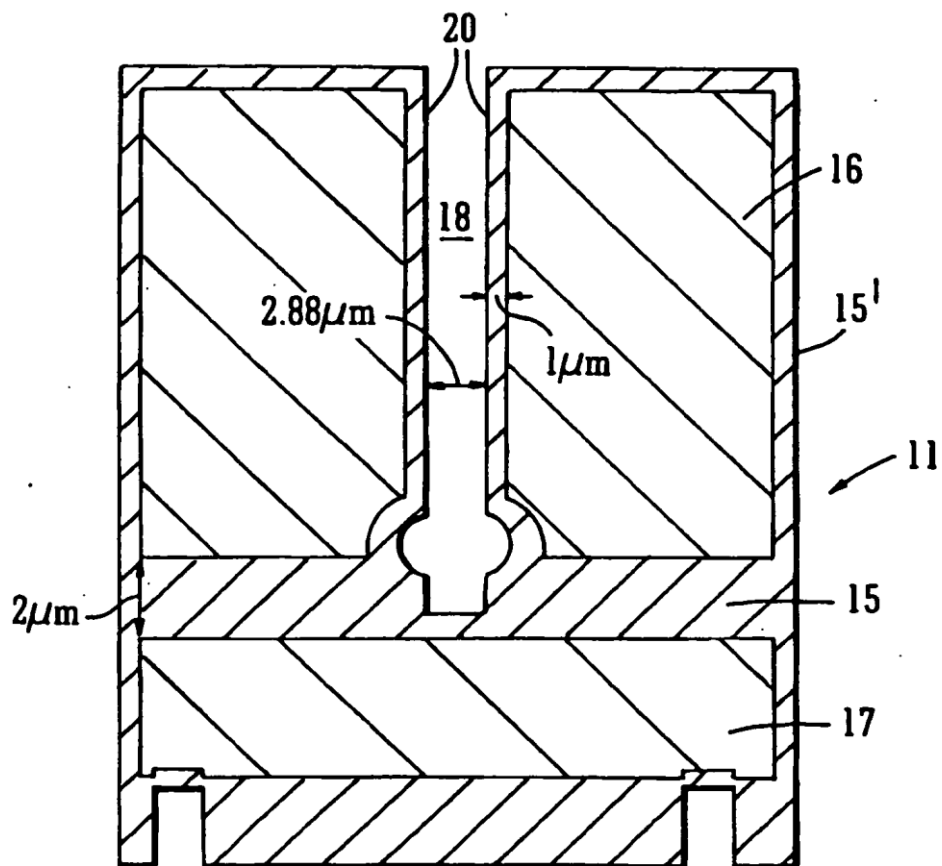


FIG. 4

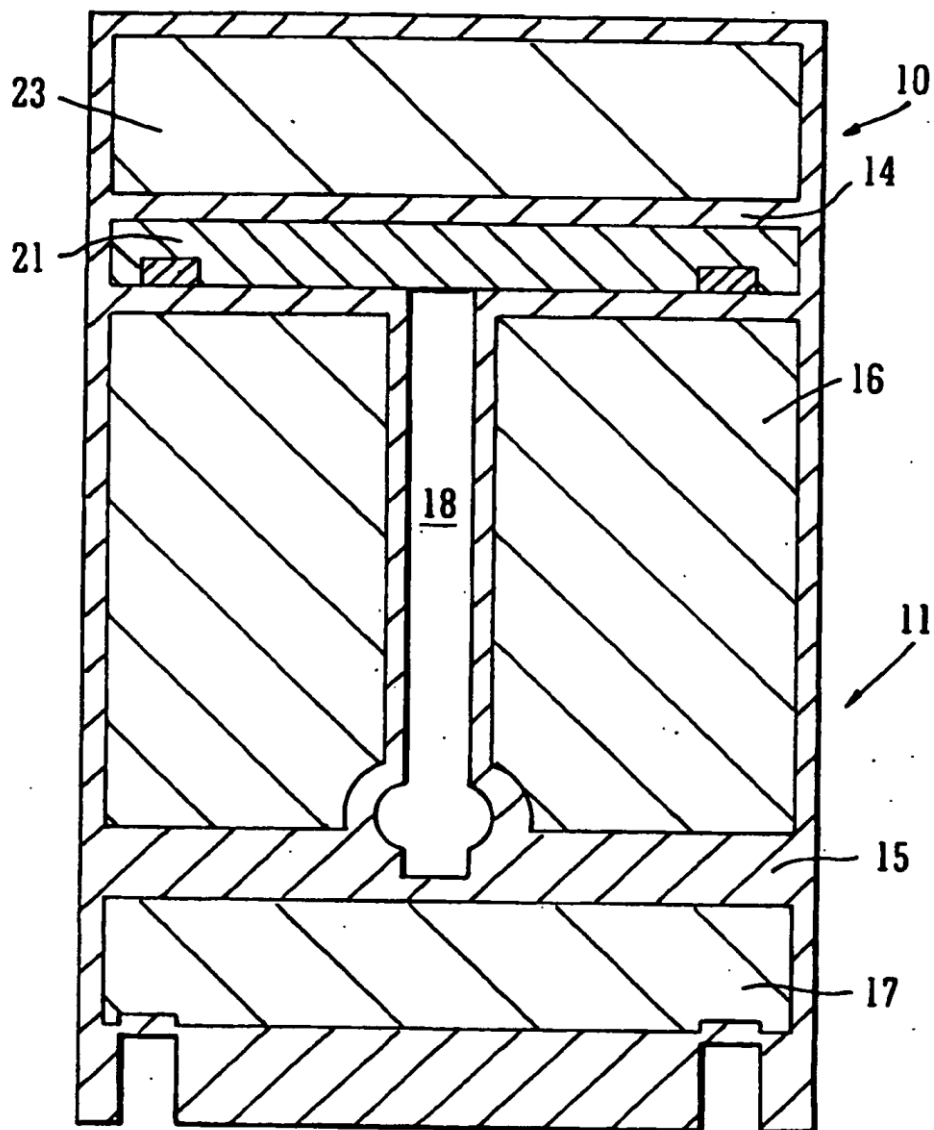


FIG. 5

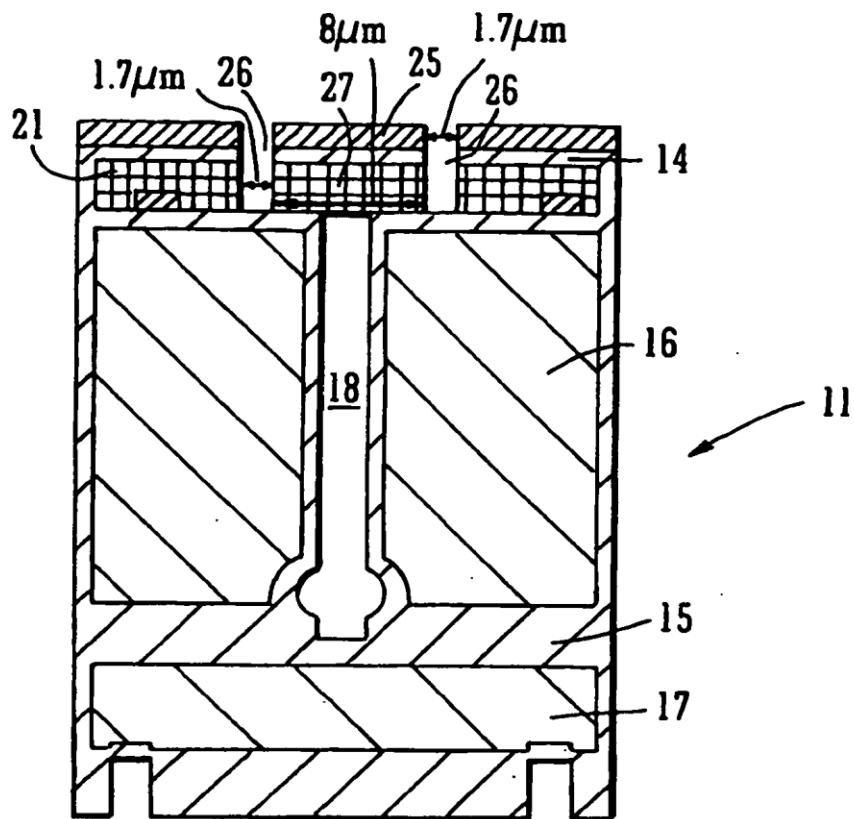


FIG. 6

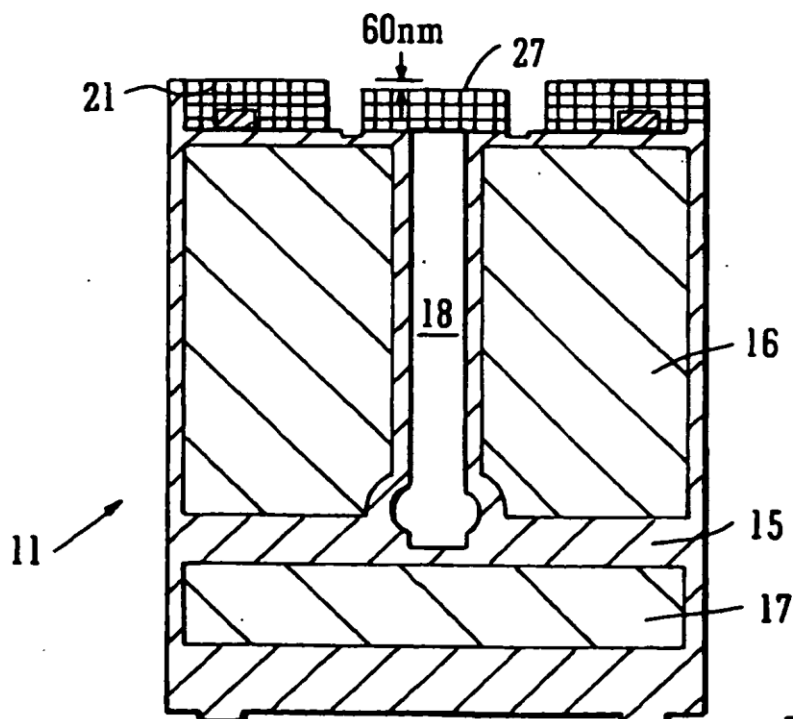


FIG. 7

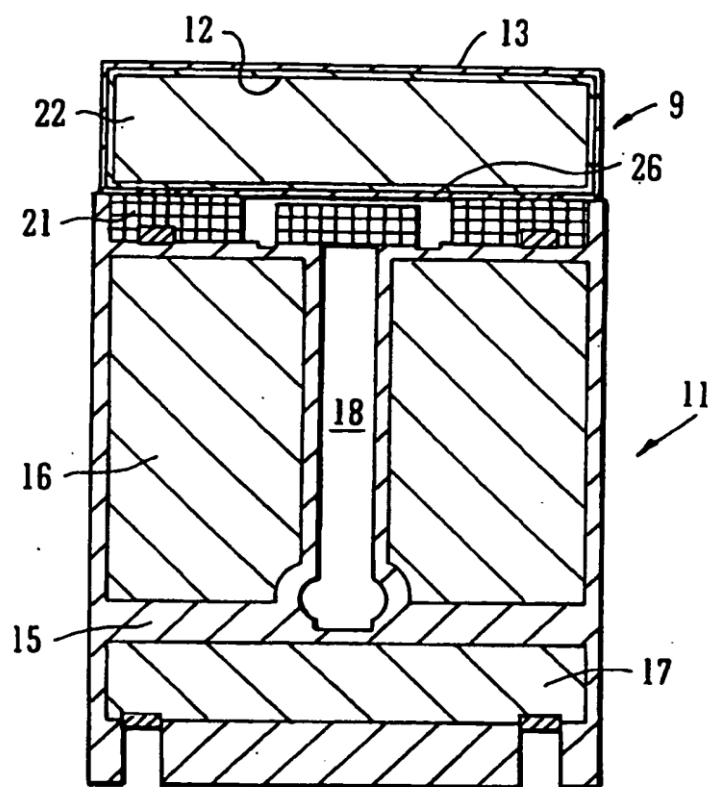


FIG. 8

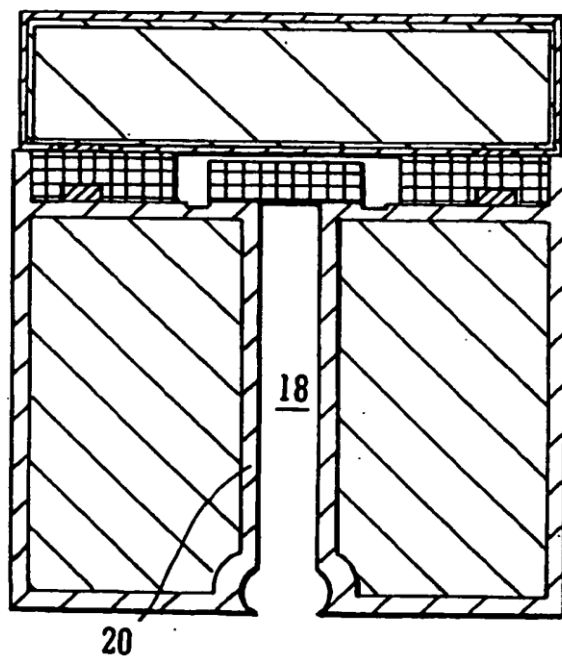


FIG. 9

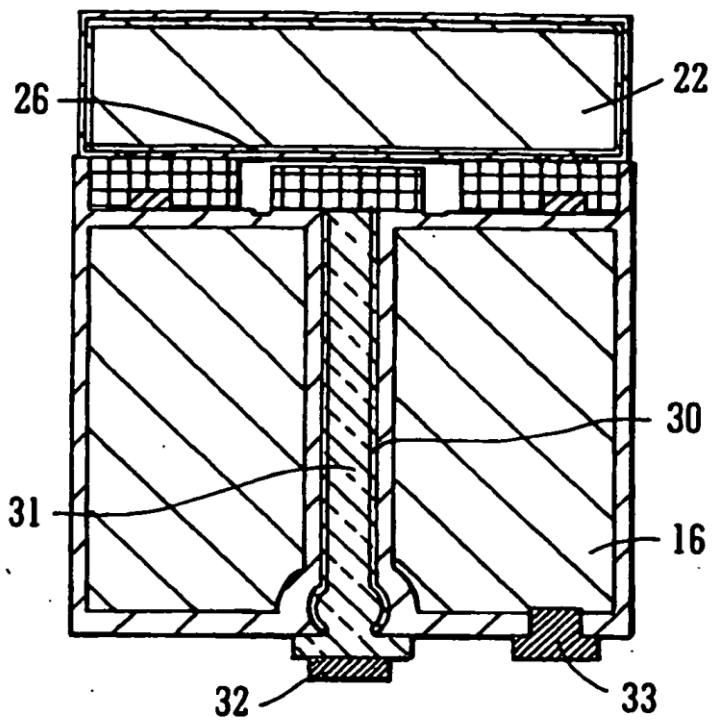


FIG. 10

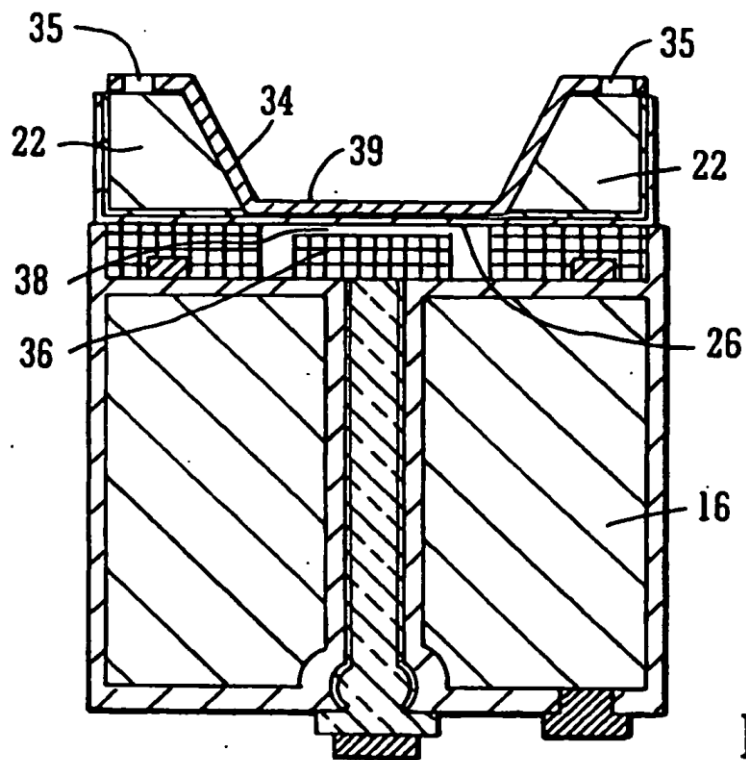


FIG. 11

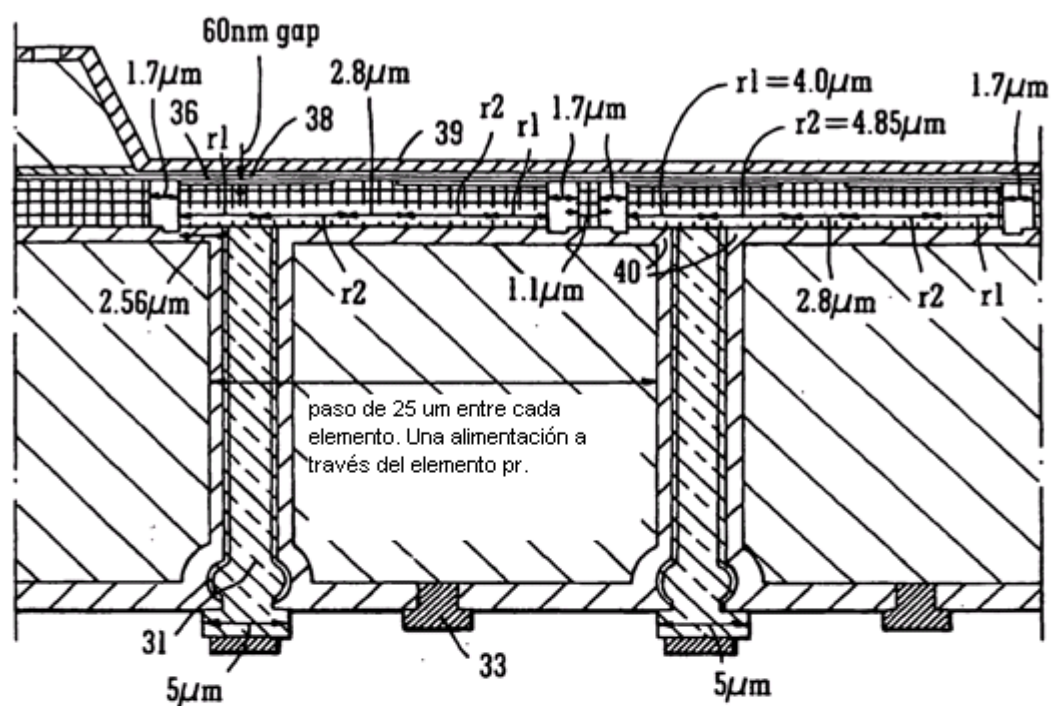


FIG. 12A

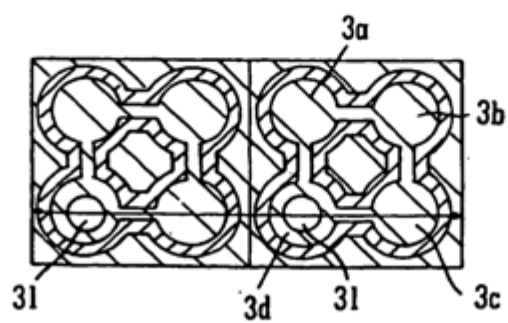


FIG. 12B

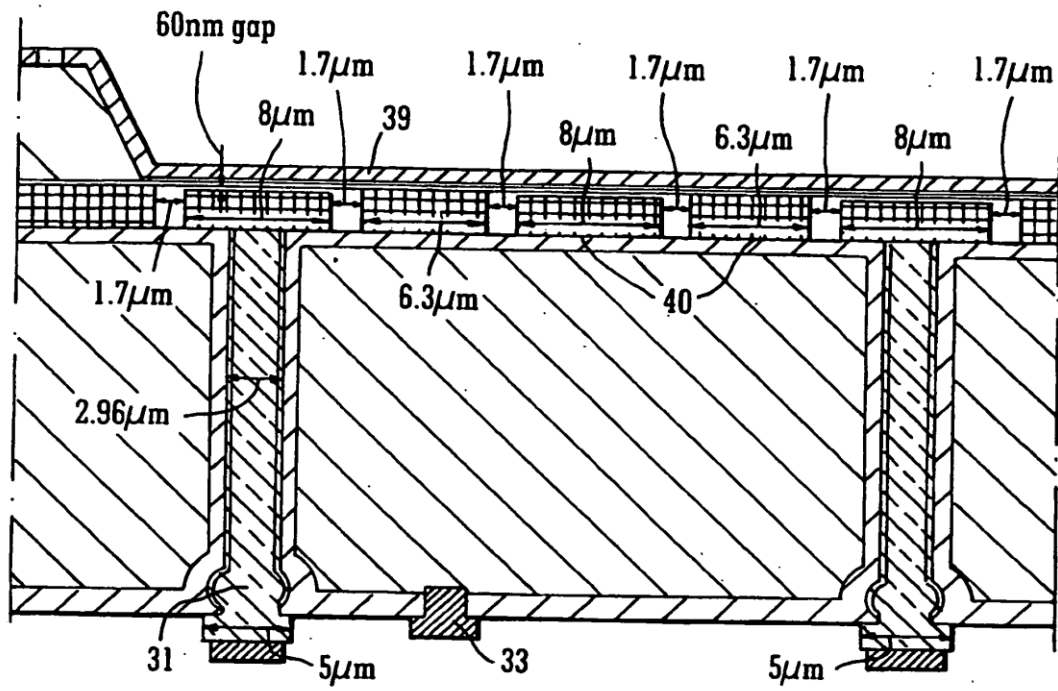


FIG. 13A

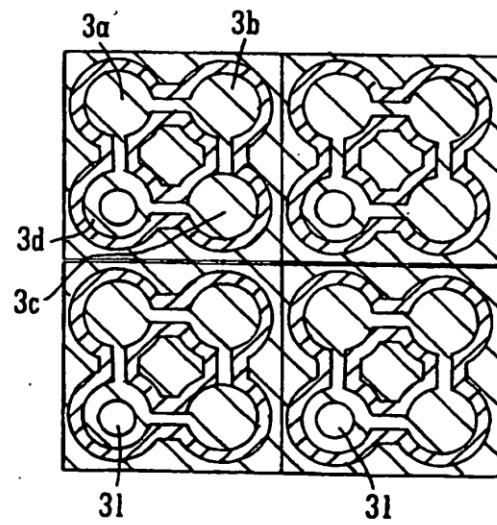


FIG. 13B

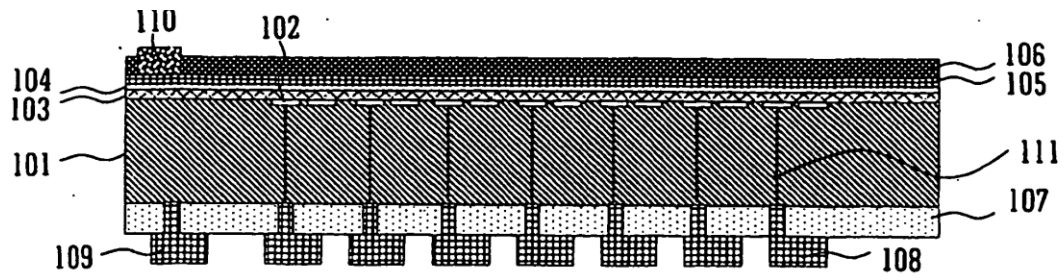


FIG. 14

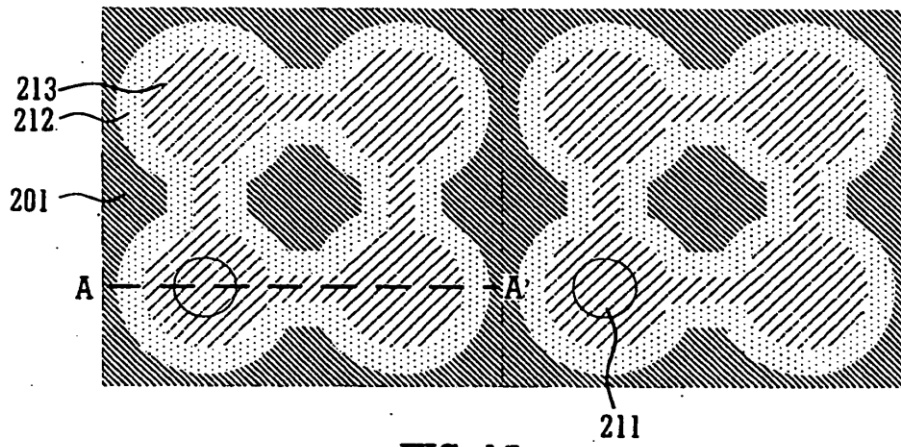


FIG. 15

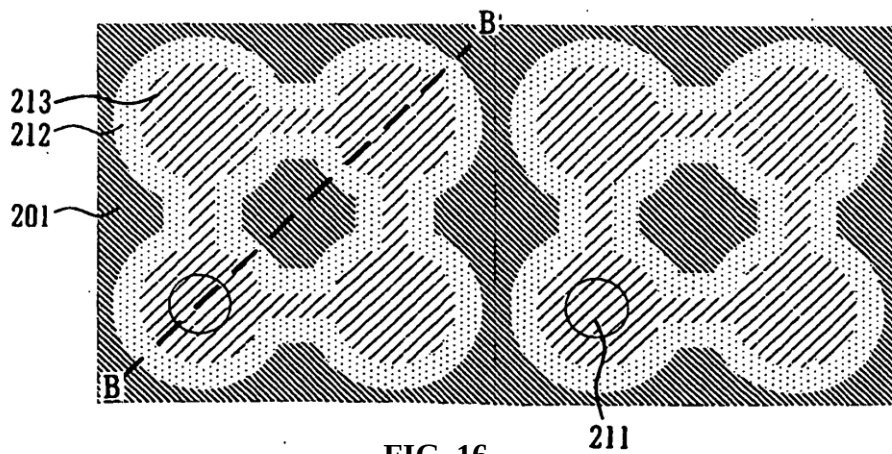


FIG. 16

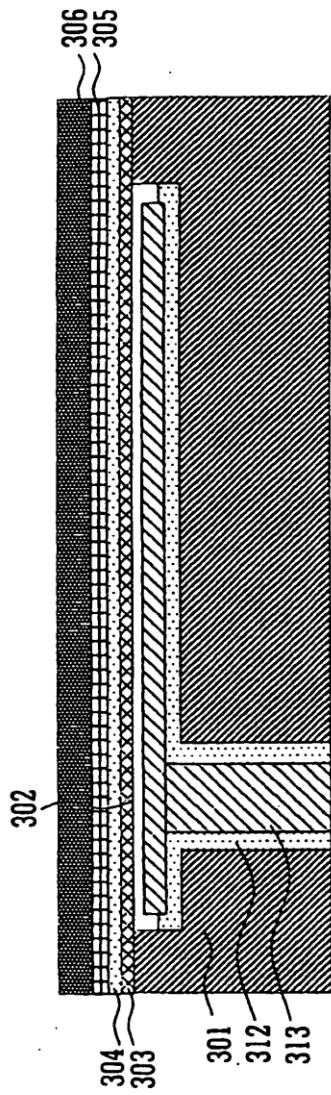


FIG. 17

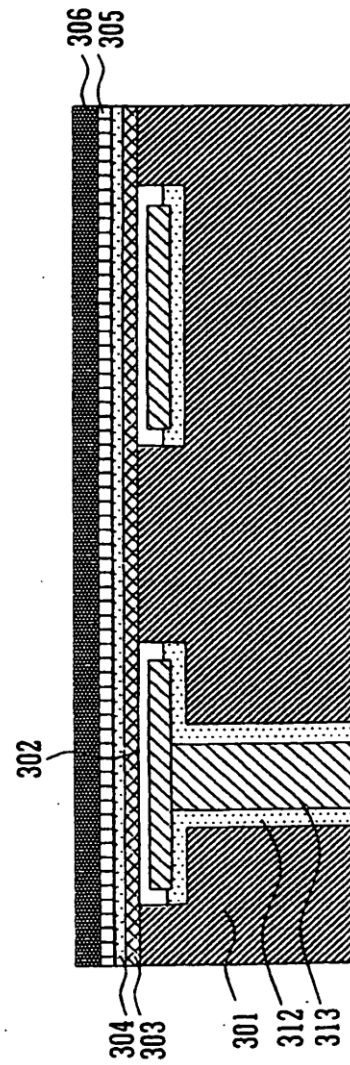
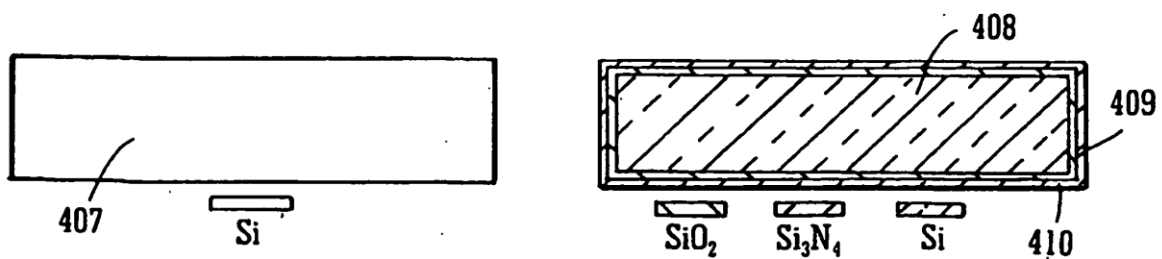
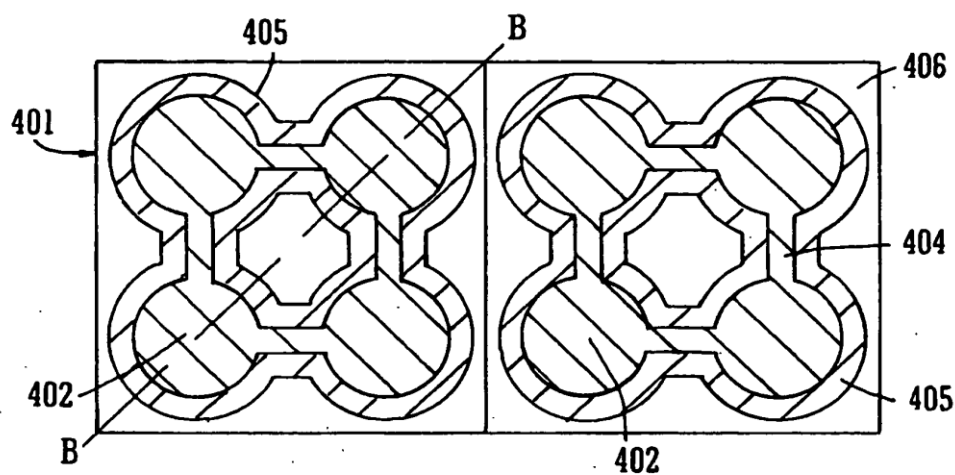
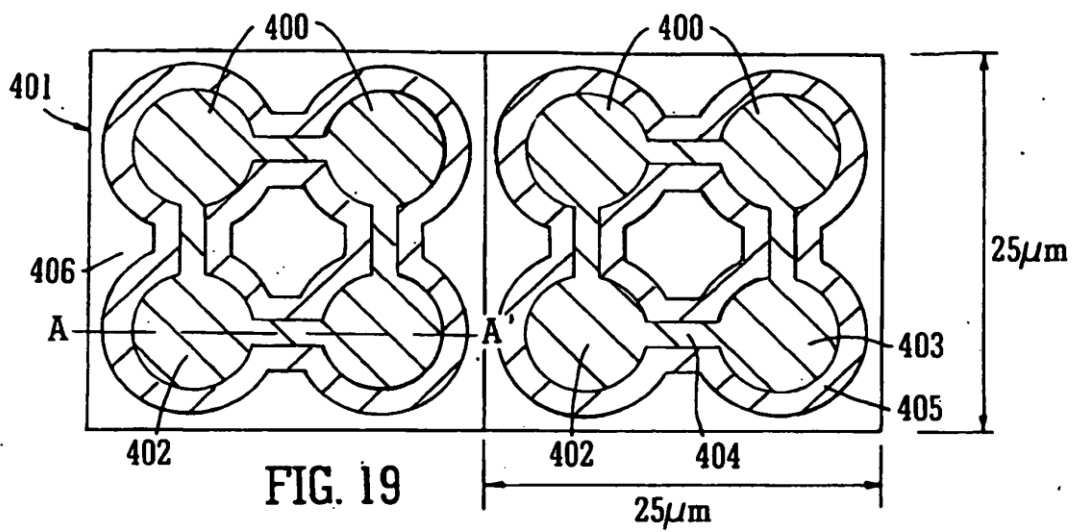


FIG. 18



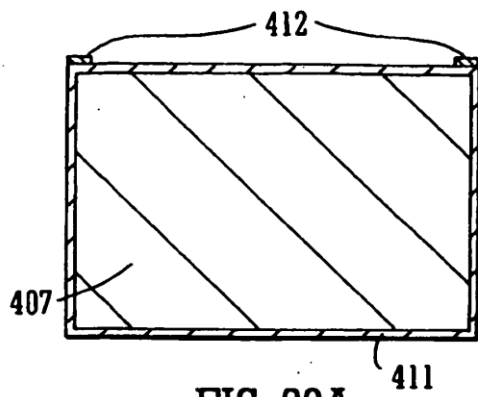


FIG. 22A

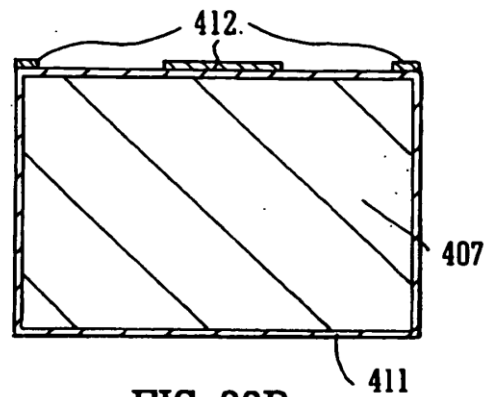


FIG. 22B

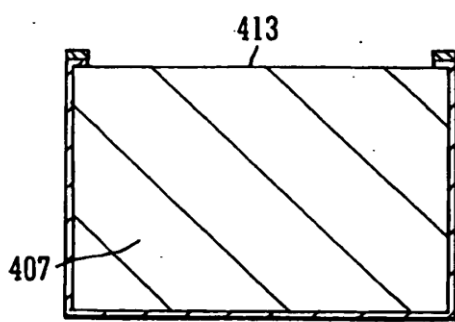


FIG. 23A

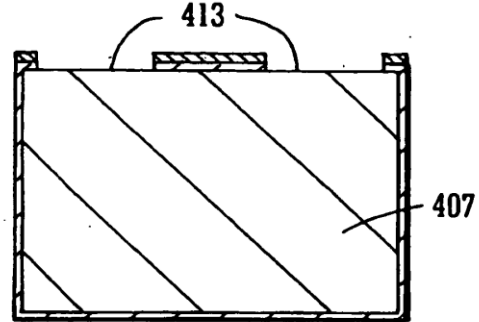


FIG. 23B

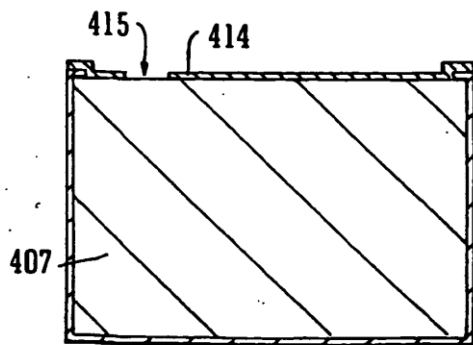


FIG. 24A

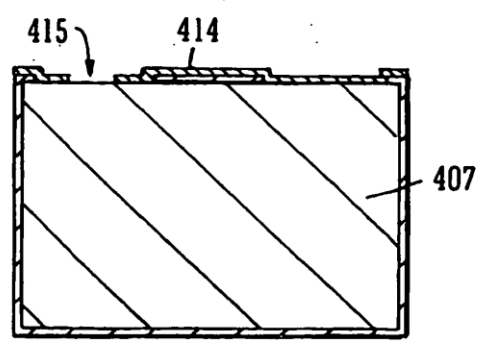


FIG. 24B

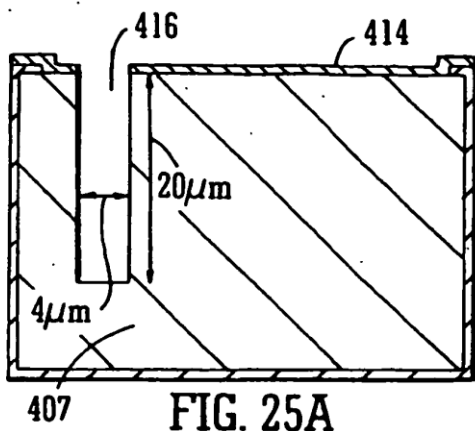


FIG. 25A

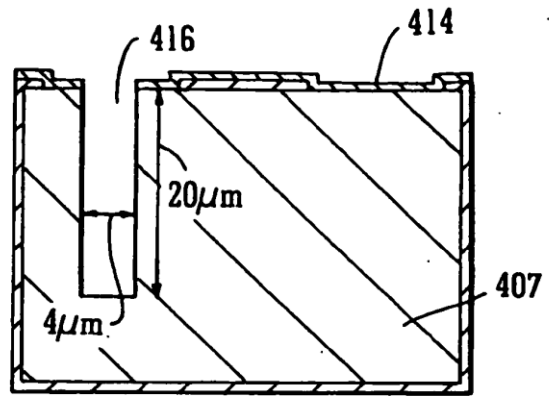


FIG. 25B

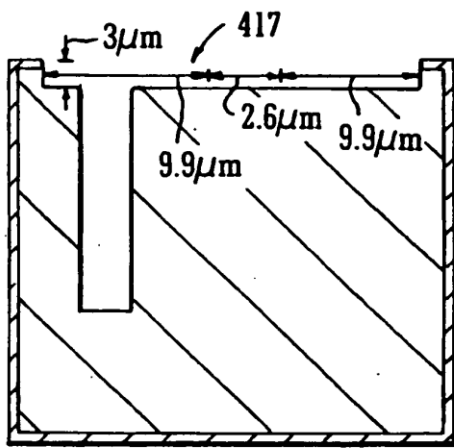


FIG. 26A

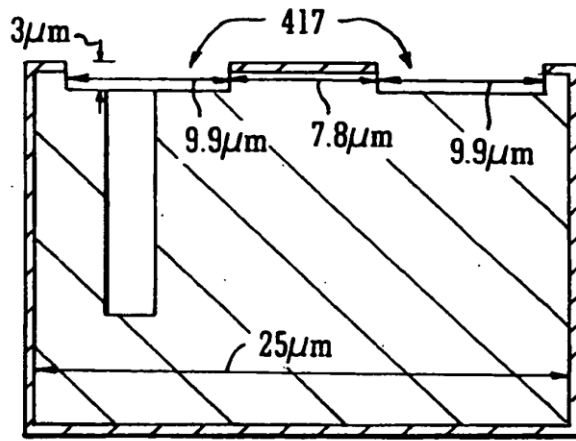


FIG. 26B

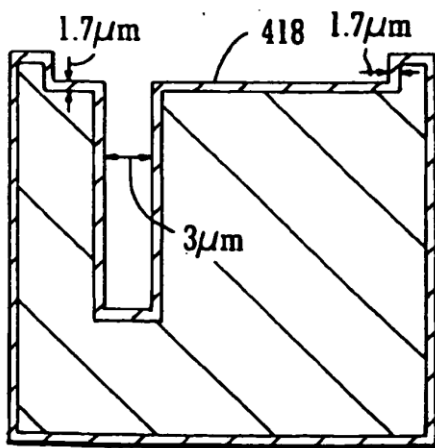


FIG. 27A

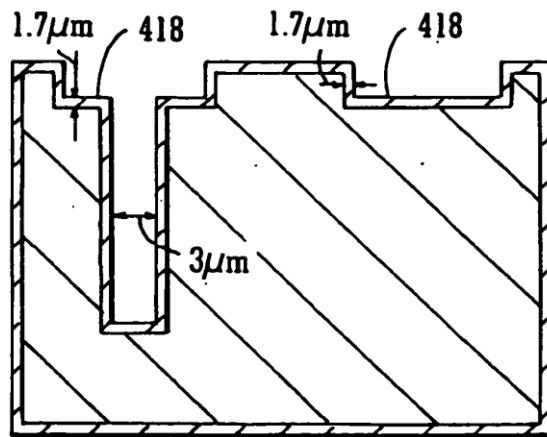


FIG. 27B

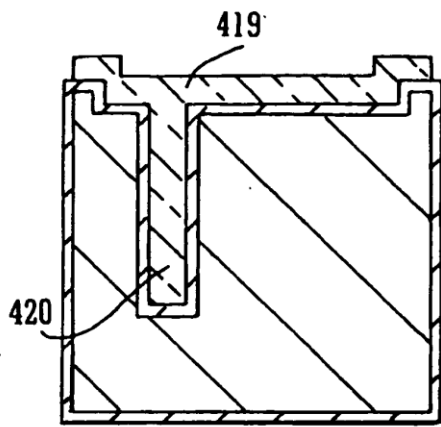


FIG. 28A

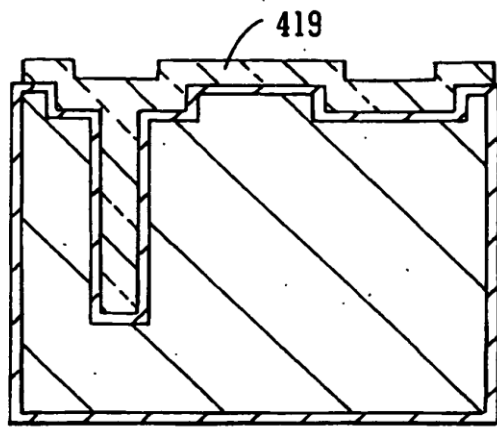


FIG. 28B

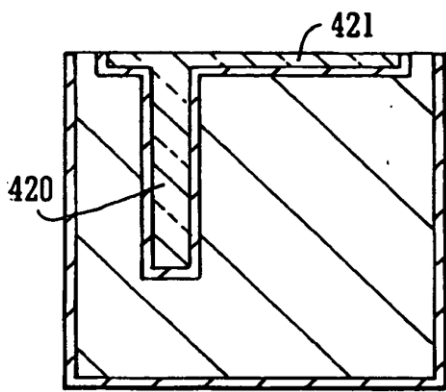


FIG. 29A

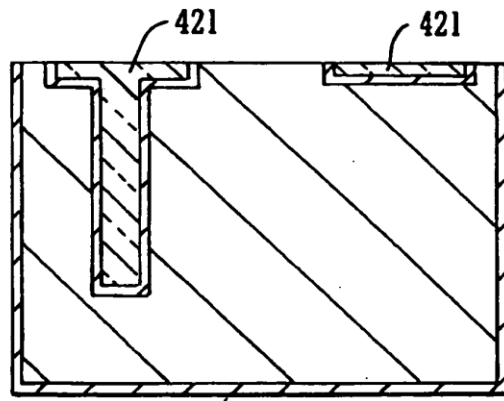


FIG. 29B

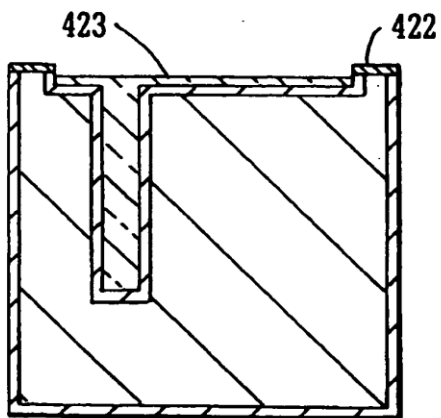


FIG. 30A

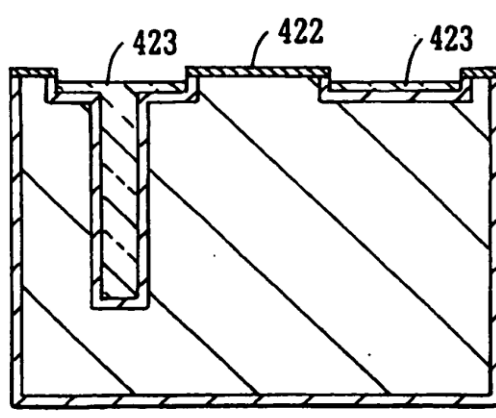


FIG. 30B

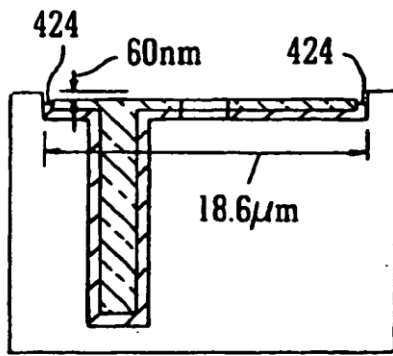


FIG. 31A

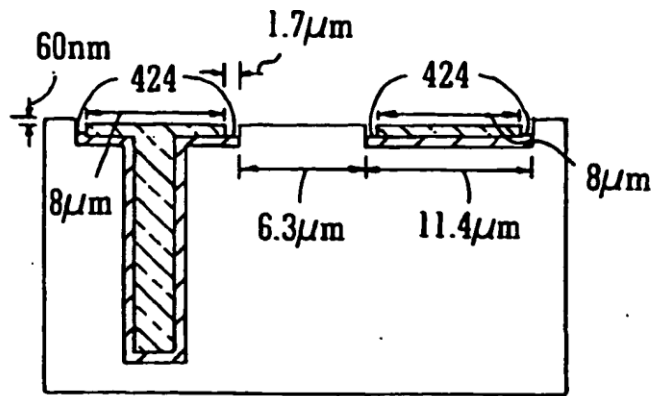


FIG. 31B

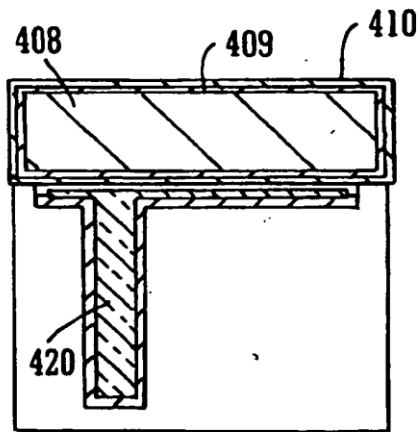


FIG. 32A

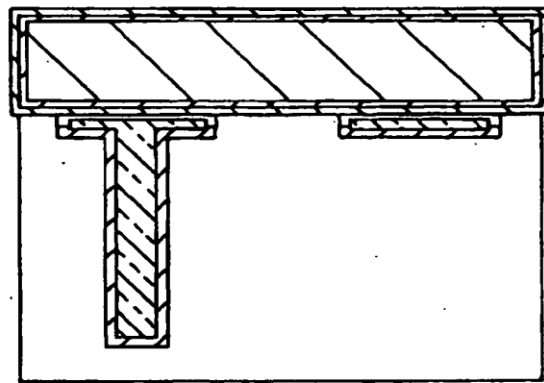


FIG. 32B

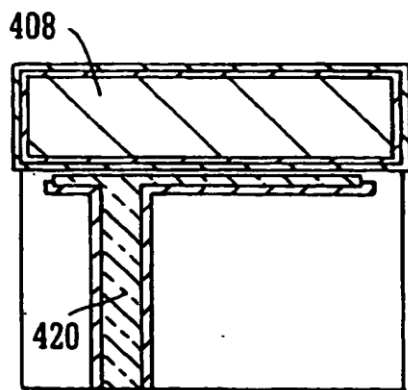


FIG. 33A

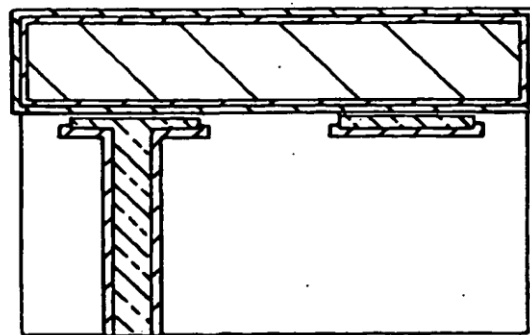


FIG. 33B

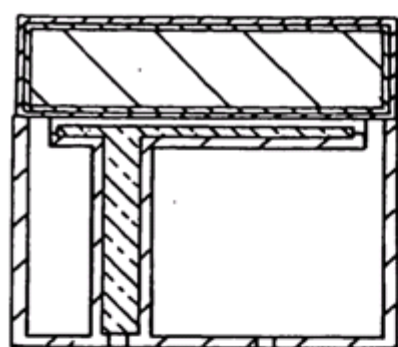


FIG. 34A

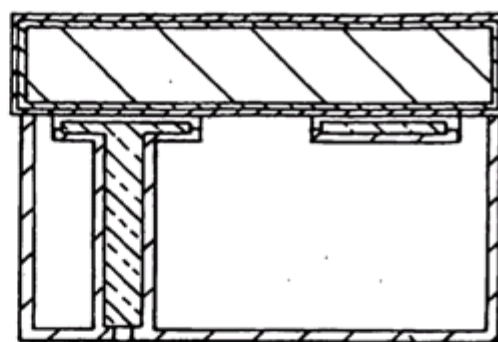


FIG. 34B

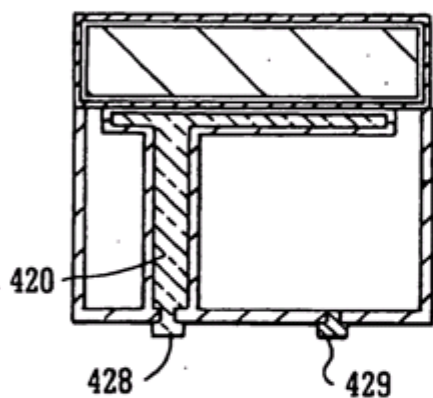


FIG. 35A

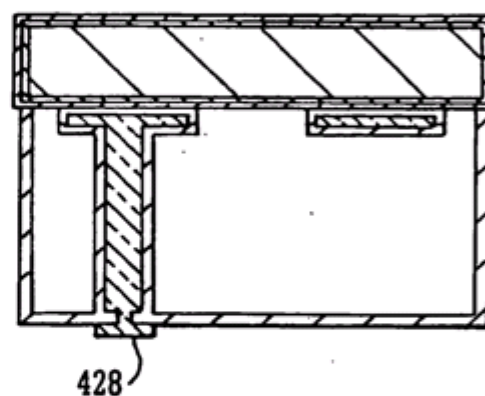


FIG. 35B

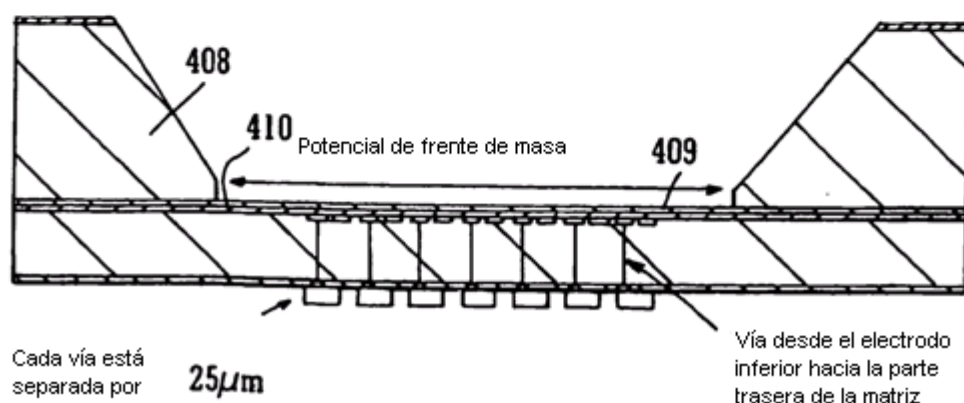


FIG. 36

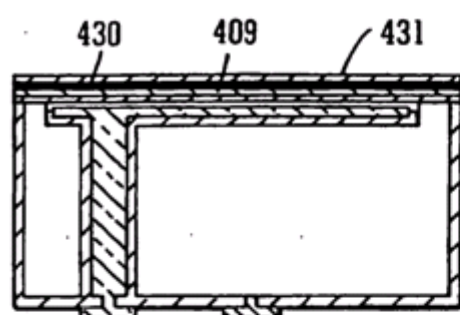


FIG. 37A

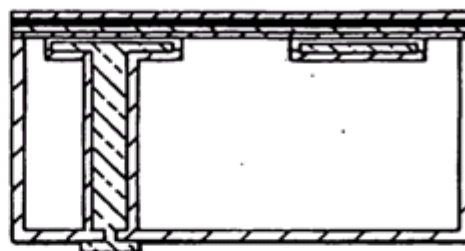


FIG. 37B

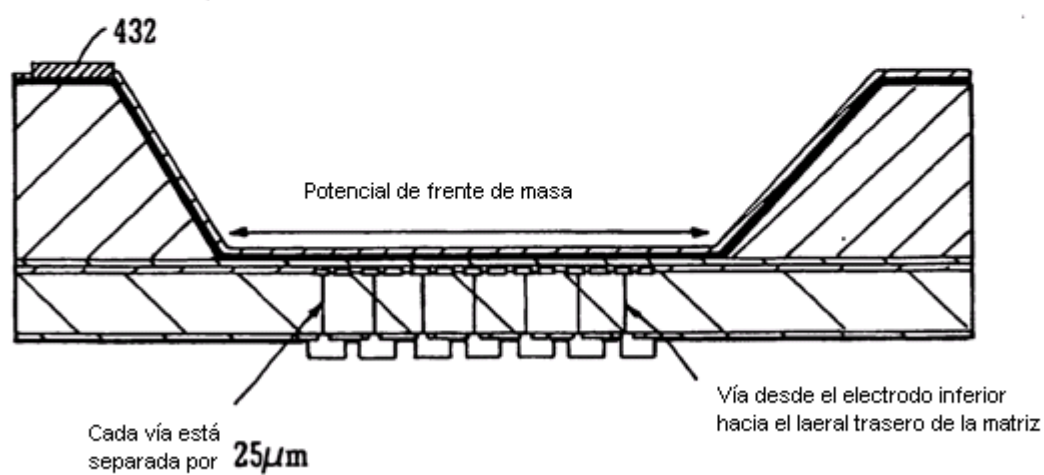


FIG. 38

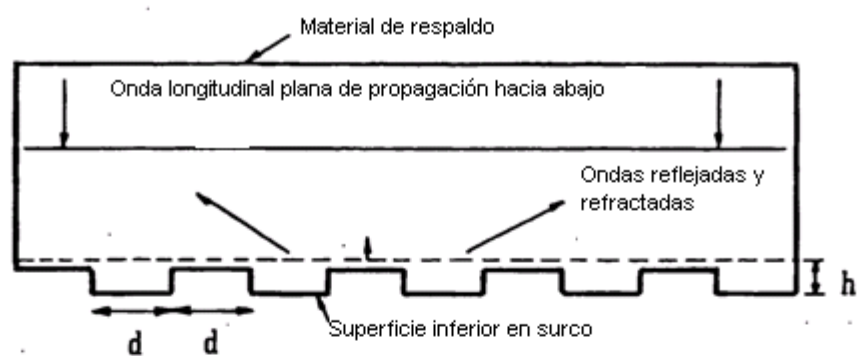


FIG. 39

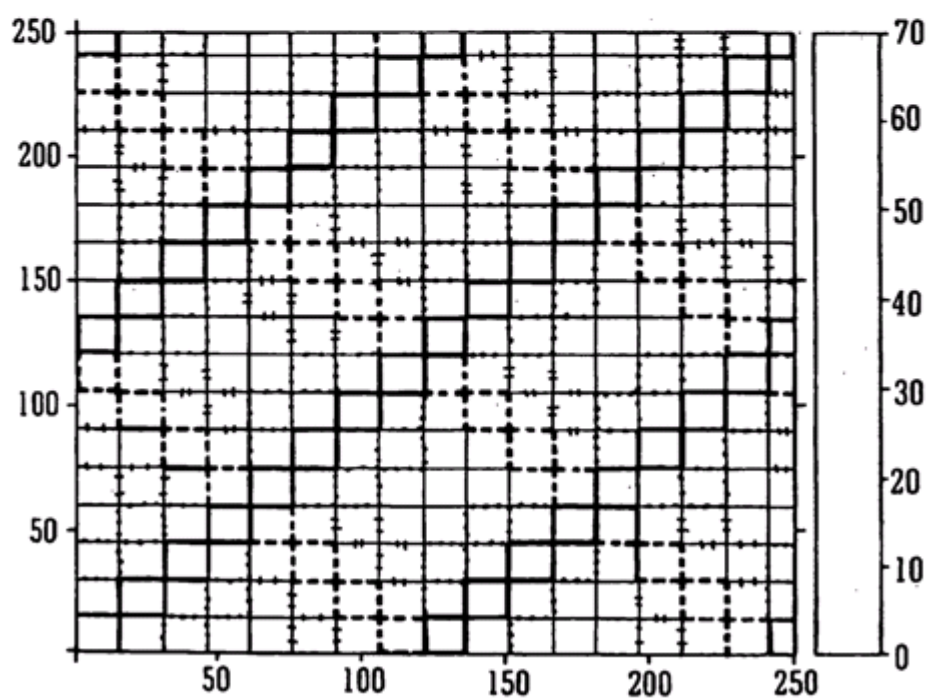


FIG. 40

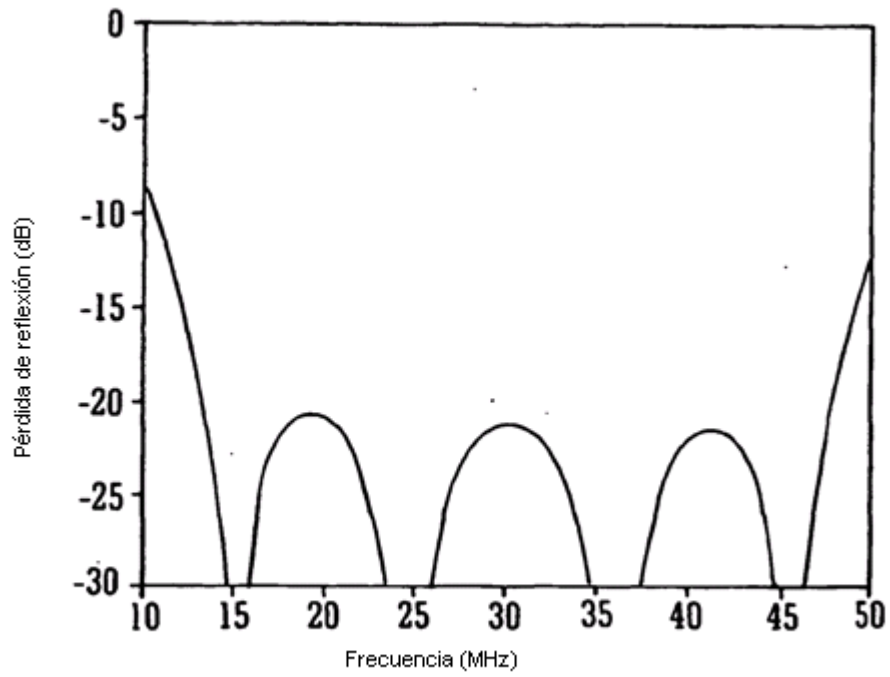


FIG. 41

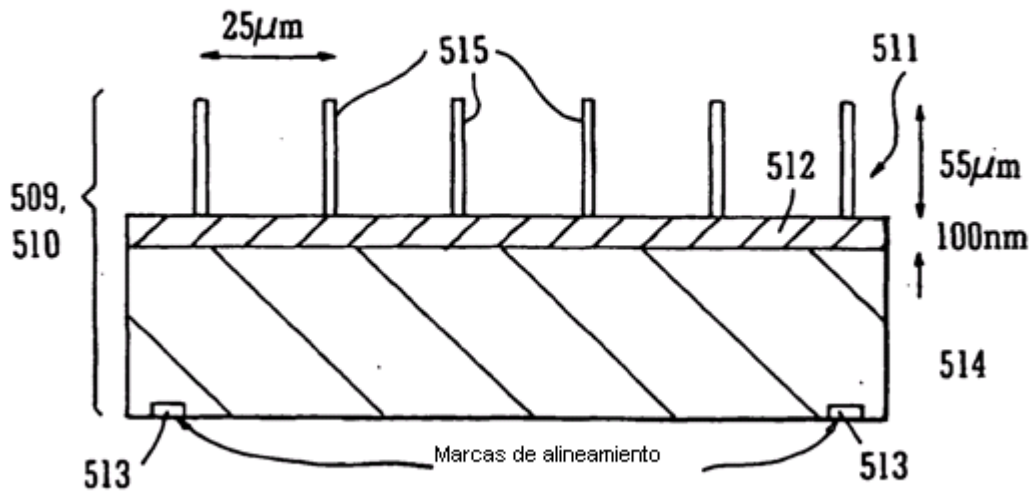


FIG. 42

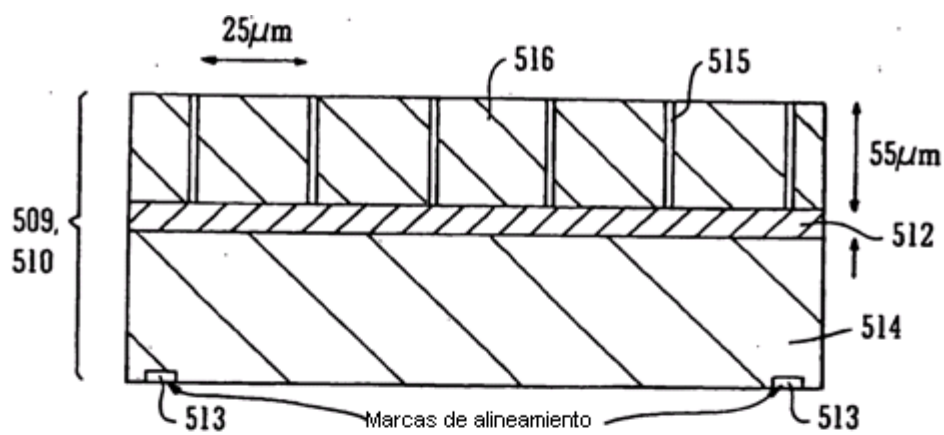


FIG. 43

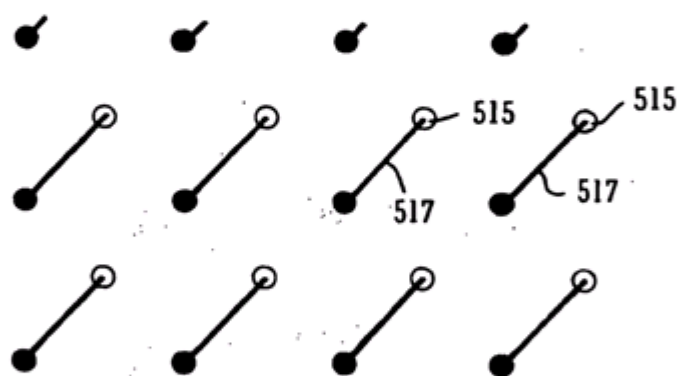


FIG. 44

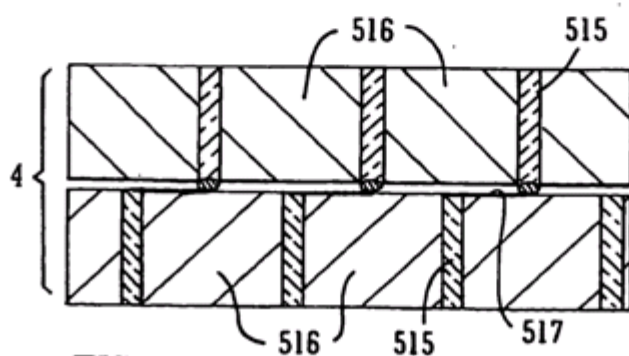


FIG. 45