



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 321 889**

51 Int. Cl.:  
**H03H 9/205** (2006.01)  
**H03H 9/24** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **96923321 .2**  
96 Fecha de presentación : **20.06.1996**  
97 Número de publicación de la solicitud: **0834218**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **08.04.1998**

54 Título: **Resonadores micromecánicos capacitivos sintonizables.**

30 Prioridad: **23.06.1995 US 494024**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**12.06.2009**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**12.06.2009**

73 Titular/es:  
**CORNELL RESEARCH FOUNDATION, Inc.**  
**20 Thornwood Drive, Suite 105**  
**Ithaca, New York 14850, US**

72 Inventor/es: **Adams, Scott, G.;**  
**Bertsch, Fred, M.;**  
**Shaw, Kevin, A. y**  
**MacDonald, Noel, C.**

74 Agente: **Carpintero López, Mario**

ES 2 321 889 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

Resonadores micromecánicos capacitivos sintonizables.

5 **Antecedentes de la invención**

La presente invención versa acerca, en general, acerca de osciladores y resonadores mecánicos, y más en particular acerca de dispositivos micromecánicos sintonizables en los que la frecuencia resonante de los osciladores y resonadores puede ser aumentada y disminuida de manera selectiva.

10 En el campo de los filtros electromecánicos, se utilizan resonadores mecánicos de alta calidad para pasar frecuencias muy cercanas a la frecuencia resonante de la estructura mecánica. Los filtros pasabanda pueden estar contruidos utilizando resonadores en paralelo, cuando las frecuencias resonantes de dos o más resonadores están muy juntas. Sin embargo, incluso dispositivos micromecánicos aparentemente idénticos como los osciladores o los resonadores tienen 15 variaciones en sus frecuencias resonantes, incluso cuando han sido fabricados en el mismo troquel, debidas a las diferencias en las dimensiones de los materiales, y similares de un dispositivo al siguiente, y debidas al desplazamiento durante un periodo de tiempo. Esto inhibe la reproducibilidad y la calidad de dichos dispositivos, y da como resultado la necesidad de un procedimiento o una estructura para sintonizar sus frecuencias resonantes de manera rápida, fácil y fiable.

20 Se han construido filtros pasabanda que utilizan una serie de resonadores en paralelo, pero las técnicas para ajustar sus frecuencias resonantes requieren del uso de procesos tal como el ajuste fino con láser y la deposición selectiva (véase "Microelectromechanical Filters for Signal Processing", Liwei Lin *et al*, Proceedings IEEE Microelectromechanical Systems (Travemunde, Alemania), Febrero de 1992, páginas 226-231. Véase también Electromechanical Dynamics part III: Elastic and Fluid Media, Herbert H. Woodson *et al*, Robert E. Kreger Publishing Co., 1985, páginas 704-707). 25 Dichas técnicas no han sido del todo satisfactorias. Además, se ha llevado a cabo una labor previa acerca de la teoría de los accionadores electrostáticos de sintonización y sus no linealidades asociadas, pero dicha labor solo aborda la reducción de la frecuencia resonante, no su aumento.

30 En el documento WO 94/28427, se describen condensadores de control que se corresponden en general con un accionador micromecánico como se especifica en el preámbulo de la reivindicación independiente 1. Estos condensadores de control están proporcionados en un acelerómetro de forma que se aumenta la fuerza efectiva restauradora de los resortes.

35 **Resumen de la invención**

La presente invención está dirigida hacia los accionadores electrostáticos que proporcionan un mecanismo para aumentar o disminuir de manera electromecánica la rigidez y de esta manera la frecuencia resonante de los osciladores mecánicos, resonadores, acelerómetros, filtros electromecánicos y similares. El mecanismo se puede incluir fácilmente 40 en un acelerómetro u otro diseño de dispositivo no solo para compensar las variaciones que se pueden dar en el proceso de fabricación, sino también para permitir ajustes en la sensibilidad del dispositivo o para variar de manera selectiva la frecuencia resonante para conseguir un rango de frecuencias de respuesta deseada. Más en particular, la presente invención utiliza accionadores electrostáticos para dispositivos electromecánicos de filtro que incorporan un aumento y reducción selectivos de rigidez para permitir la sintonización selectiva de dichos dispositivos.

45 La presente invención proporciona un accionador micromecánico conforme a la reivindicación independiente 1 y un resonador electromecánico conforme a la reivindicación 9. Las reivindicaciones dependientes definen realizaciones preferidas y ventajosas de la invención.

50 En resumen, el resonador micromecánico sintonizable de la presente invención está dirigido a dispositivos como los osciladores, acelerómetros, filtros o similares que están montados o soportados para un movimiento relativo con respecto a, por ejemplo, un sustrato, y que, cuando están accionados por una fuerza externa, tienen una frecuencia resonante. Dichos dispositivos, conforme a la invención, están sintonizados por medio de accionadores que alteran de manera electromecánica la rigidez del dispositivo resonador y de esta manera alteran su frecuencia resonante.

55 El resonador de la invención incluye una estructura amovible liberada que, en la realización preferida, tiene la forma de una viga alargada fabricada de silicio monocristalino. El resonador está fabricado utilizando un único proceso de enmascaramiento, tal como el descrito e ilustrado en la solicitud de patente U.S. nº 08/312.797, titulada "Microstructures and Single Mask, Single-Crystal Process for Fabrication Thereof", de Kevin A. Shaw, Z. Lisa Zhang y Noel C. MacDonald, presentada el 27 de septiembre de 1994, (Docket CRF D-1307C). Esa solicitud describe un proceso 60 de enmascaramiento simple, de baja temperatura, de alineación automática para la fabricación de estructuras microelectromecánicas (MEM), que puede denominarse proceso SCREAM-I (grabado y metalización reactivos monocristalinos). Es un proceso de micromecanizado sólido seco que utiliza un grabado por iones reactivos tanto para definir y liberar estructuras de forma arbitraria como para proporcionar superficies metálicas definidas en la estructura liberada al igual que en las interconexiones estacionarias, zonas terminales y similares. Las estructuras que tienen anchuras en 65 el rango de 0,5 micrómetros hasta 5 micrómetros, con la profundidad (o altura) estructural de entre aproximadamente 10 y 20 micrómetros pueden estar fabricadas utilizando este proceso, con todos los elementos estructurales, incluyendo los elementos amovibles como las vigas y los elementos estacionarios como las interconexiones, vigas y terminales

de contacto definidos con un enmascaramiento simple de forma que los contactos metálicos pueden ser aplicados a la estructura de una forma alineada automáticamente.

En el proceso SCREAM-I, se forman zanjais aislantes profundas completamente alrededor de las estructuras definidas. A partir de entonces, las estructuras son rebajadas para liberarlas de manera selectiva y para producir cavidades en las bases de las mesas circundantes. A partir de entonces, se metalizan las superficies expuestas. El rebaje y la formación de cavidades en las bases de las mesas circundantes sirven para romper la continuidad del metal depositado, aislando eléctricamente de ese modo el metal en las estructuras liberadas y en las mesas definidas del metal en la parte inferior de las zanjais. Una capa dieléctrica aísla el metal del sustrato subyacente. Los elementos definidos por las zanjais están conectados entre sí mediante una capa metálica de forma que las estructuras liberadas pueden ser conectadas eléctricamente a través de la capa metálica a zonas terminales en las mesas circundantes. Se proporcionan interconexiones en ubicaciones seleccionadas, estando las interconexiones y las zonas terminales también definidas por las zanjais. De esta manera, con solamente un enmascaramiento simple, una definida relación elevada entre dimensiones, se producen estructuras autoestables o liberadas de silicio monocristalino revestidas con dióxido de silicio y aluminio. El revestimiento externo de aluminio forma electrodos que son utilizados en la presente invención como accionadores electrostáticos, como será descrito.

En su forma más sencilla, el resonador de la presente invención consiste en un componente amovible de manera mecánica que está suspendido para un movimiento con respecto a un sustrato. Este componente, que es una viga alargada MEM liberada, fabricada a partir del sustrato, por ejemplo, está suspendida por medio de soportes flexibles adecuados tales como bazos flexibles que se extienden lateralmente que montan el componente amovible sobre el sustrato adyacente y que lo fuerzan para que se mueva a lo largo de un trayecto seleccionado, tal como el eje del componente. Estos brazos flexibles de soporte actúan como resortes, mientras que el componente amovible actúa como una masa que puede ser utilizada para detectar la aceleración, puede ser utilizada como un resonador mecánico, o un oscilador, o para fines similares. El movimiento de este componente puede ser a una frecuencia resonante que depende de la masa del componente y la flexibilidad o rigidez de los brazos de tipo resorte.

La sintonización de la resonancia de la estructura mecánica es proporcionada, conforme a la presente invención, por uno o más accionadores electrostáticos que consisten en un par de puntas similares a un peine, consistiendo cada par de dos conjuntos de puntas opuestas. Un conjunto de un par está montado en el componente mecánico amovible del resonador para ser movido con respecto al conjunto opuesto, que está montado de forma que es estacionario, y de esta manera está montado en la mesa adyacente. Los conjuntos de puntas en un par no se solapan ni se distribuyen de manera alterna, pero están en una relación separada de extremo a extremo para formar un hueco a lo largo del trayecto paralelo en general al trayecto de movimiento del componente amovible. De esta manera, las puntas están montadas para moverse más allá de la otra en una relación de extremo a extremo sin ningún contacto. Un voltaje aplicado a través de los conjuntos opuestos de puntas produce campos de fuerza electrostática en el hueco entre los extremos de las puntas opuestas, teniendo estas fuerzas forma de campos marginales en los extremos de las puntas opuestas. Los campos marginales producen fuerzas de actuación en los conjuntos opuestos de puntas para ya sea aumentar o reducir el movimiento axial del componente. Estos pares de puntas similares a un peine pueden denominarse accionadores de tipo peine que incorporan puntas de electrodo capaces de ser activadas por voltajes aplicados. Los pares de accionadores de tipo peine pueden estar colocados en distintas ubicaciones en el componente amovible de manera mecánica, estando los accionadores conectados de manera eléctrica a circuitería adecuada, preferiblemente en el sustrato, para una energización controlada independiente. Los accionadores de tipo peine controlan el movimiento del componente para aumentar o para reducir su movimiento para sintonizar la frecuencia resonante. El accionador también puede estar energizado para poner la estructura en movimiento, dependiendo de los voltajes aplicados y sus frecuencias.

Se pueden conseguir resultados comparables con una variedad de geometrías de accionador. Por ejemplo, además de la estructura paralela descrita anteriormente en la que el componente resonador se mueve en una trayectoria paralela al hueco del accionador, los accionadores de tipo peine pueden ser montados para un movimiento de los conjuntos opuestos de electrodos perpendiculares al hueco; o sea, hacia y desde el otro, con un voltaje aplicado a través de los dos conjuntos controlando las características de fuerza contra deflexión. Incluso un único par de electrodos paralelos de placa exhibe respuestas de fuerza contra deflexión que pueden ser utilizadas para sintonizar la frecuencia resonante de un dispositivo oscilante. Sin embargo, el accionador del campo marginal descrito anteriormente contiene un número significativo de ventajas sobre otros, y es el preferido.

### Breve descripción de los dibujos

Se comprenderá con más claridad lo anterior, y objetos, características y ventajas adicionales de la presente invención a partir de la siguiente descripción detallada de las realizaciones preferidas de la presente invención, tomada en conjunto con los dibujos adjuntos, en los que:

La Fig. 1 es una curva que ilustra las características de frecuencia en función de la amplitud de un sistema resonante simple;

la Fig. 2 es una curva que ilustra las características de frecuencia en función de la amplitud de un filtro pasabanda que utiliza resonadores paralelos;

la Fig. 3 es un diagrama de un sistema resonante simple de una masa de resorte;

la Fig. 4 es un diagrama de un sistema de una masa de resorte modificado por un accionador de sintonización;

la Fig. 5 es una curva que ilustra las características de fuerza en función de la amplitud de un accionador de sintonización conforme a la invención;

la Fig. 6 es una ilustración esquemática de un accionador de tipo peine utilizado para la reducción de la rigidez en un resonador electromicromecánico;

la Fig. 7 es una ilustración esquemática de un accionador de tipo peine conforme a un ejemplo comparativo, que puede ser utilizado para el aumento de la rigidez en un resonador electromicromecánico;

la Fig. 8 es una vista esquemática en planta de un resonador electromicromecánico sintonizable conforme a la invención, que utiliza dos accionadores electrostáticos sintonizables;

la Fig. 9 es una vista ampliada parcialmente en perspectiva del resonador de la fig. 8;

la Fig. 10 es una vista de corte transversal parcial tomada en las líneas 10-10 del resonador de la Fig. 8;

la Fig. 11 es una vista esquemática en planta del resonador conforme a un ejemplo comparativo, que incorpora un electrodo de excitación y un electrodo sensor;

la Fig. 12 es una vista esquemática en planta de un resonador sintonizable que utiliza accionadores electrostáticos de sintonización perpendiculares;

la Fig. 13 ilustra una curva de fuerza en función de la deflexión para una estructura del accionador de peine del tipo ilustrado en la Fig. 12;

la Fig. 14 es una vista esquemática en planta de un resonador sintonizable conforme a un ejemplo comparativo, que utiliza accionadores paralelos simétricos de placa;

la Fig. 15 ilustra la relación de la frecuencia resonante con los cambios en el voltaje de sintonización para el accionador de la Fig. 11, basada en datos experimentales;

la Fig. 16 es un nuevo gráfico de los datos de la Fig. 15 para ilustrar la linealidad de la relación entre la frecuencia resonante al cuadrado en función del voltaje de sintonización al cuadrado; y

la Fig. 17 es una serie de curvas que ilustran la energía potencial del sistema en función del desplazamiento para distintos voltajes de polarización.

#### Descripción de las realizaciones preferidas

Según se ilustra en la Fig. 1, un resonador mecánico de alta calidad produce una curva de frecuencia contra amplitud tal como la ilustrada en 10, con una amplitud máxima que se da a una frecuencia resonante  $f_r$ . Si dos o más resonadores están contruidos en paralelo con sus frecuencias resonantes cercanas, como se ilustra mediante los máximos 12 y 14 de la curva 16 en la Fig. 2, la estructura resultante tiene una banda de paso de la forma que se ilustra en 18. Dado que la frecuencia resonante en particular o la banda de paso de una estructura mecánica utilizada como un filtro, por ejemplo, es extremadamente importante, la capacidad para sintonizar dichos dispositivos se vuelve esencial en estructuras micromecánicas en las que las variaciones de procesamiento impedirá de manera significativa la reproducibilidad y de esta manera la calidad de dichos dispositivos.

Como se conoce perfectamente, se puede modelar una estructura resonante mediante un sistema simple de una masa de resorte, tal como el sistema 20 ilustrado en la Fig. 3, en el que la frecuencia de vibración natural  $F_n$  está determinada mediante la fórmula

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{sistema}}{masa}} \quad (Ec.1)$$

donde  $K_{sistema}$  es la rigidez del sistema completo, que en este caso es el resorte mecánico 22 que tiene una rigidez  $K_{mecánica}$ . Se puede ajustar la rigidez del sistema para alterar su frecuencia natural; conforme a la presente invención, la rigidez de un sistema mecánico se altera de manera eléctrica, de la forma ilustrada esquemáticamente en la Fig. 4. De esta manera, el sistema 20' incluye no solo el resorte 22, sino también un accionador variable 26 que tiene una rigidez que puede ser identificada como  $K_{eléctrica}$  de forma que el sistema 20' tiene una rigidez que puede ser identificada como:

$$K_{sistema} = K_{mecánica} + K_{eléctrica} \quad (Ec.2)$$

Para construir un sistema que funcione de la forma ilustrada en la Fig. 4, se proporciona un accionador electrostático que tiene una respuesta lineal de fuerza contra deflexión tal como la ilustrada por la curva 28 en la Fig. 5. El accionador de sintonización tiene grandes regiones en las que las fuerzas son predominantemente lineales con respecto a la deflexión, según se indica en las regiones "a" y "b". La región lineal indicada en "a" puede ser, por ejemplo, representativa de un endurecimiento, o rigidización, lineal, mientras que la región "b" representa un ablandamiento lineal, o una reducción de la rigidez. Esta linealidad significa que la fuerza producida por el accionador electrostático puede ser vista como un resorte eléctrico en el que se puede alterar la magnitud de la constante de resorte al variar el voltaje aplicado al mismo.

En la Fig. 6 se ilustra la estructura básica del accionador electrostático de sintonización de la presente invención. La estructura de la Fig. 6 ilustra un accionador que reducirá la rigidez, y la estructura de la Fig. 7 ilustra un ejemplo comparativo de una estructura que aumentará la rigidez del sistema. El dispositivo de la Fig. 6 ilustra un par de electrodos de tipo peine indicados en conjunto como 30 y que incluyen un conjunto estacionario de electrodos 32 y un conjunto amovible de electrodos 34. El conjunto estacionario de electrodos 32 incluye una pluralidad de puntas separadas paralelas 36 montadas sobre, fijadas a, o formadas integralmente con una base o sustrato estacionario 38, mientras que el conjunto amovible de electrodos 34 incluye una pluralidad de puntas separadas paralelas 40 montadas sobre, fijadas a, o formadas integralmente con una estructura 42 relativamente amovible. Las puntas 36 y 40 están enfrentadas; o sea, están en una relación enfrentada separada, con sus extremos libres separados por un hueco 44 que es paralelo a la dirección de movimiento de la estructura 42. El hueco es lo suficientemente ancho que el conjunto estacionario de electrodos 32 no interferirá con el movimiento del conjunto amovible de electrodos 34. Según se ilustra con la flecha 46, la dirección de movimiento del conjunto amovible de electrodos 34 es longitudinalmente a lo largo del eje 48 de la estructura y perpendicular a la dirección en la que se extienden las puntas 36 y 40.

La estructura del dispositivo de la Fig. 7 es similar a la de la Fig. 6, con los componentes similares estando numerados con números primos. La diferencia entre la estructura de la Fig. 6 y la de la Fig. 7 está en el no alineamiento o el alineamiento de las puntas opuestas 36 y 40 o 36' y 40'. De esta manera, en la Fig. 6 el conjunto de electrodos 34 está ubicado de forma que sus puntas 40 se alternan con las puntas 36 del conjunto 32 cuando el accionador 30 se encuentra en descanso. Por otra parte, en la estructura 30' de la Fig. 7, las puntas 40' están alineadas con las puntas 36' en la posición de descanso.

Al aplicar un voltaje seleccionado a través de los electrodos 36 y 40 en el dispositivo de la Fig. 6, se producen campos electrostáticos marginales alrededor de los extremos libres de los electrodos 36 y 40, extendiéndose los campos a través del hueco 44 entre los extremos de los electrodos opuestos. Cuando se encuentra en la posición de descanso, o neutral, ilustrada en la Fig. 6, el conjunto 34 amovible de electrodos no experimenta fuerza neta alguna al aplicarse el voltaje V y permanece en la posición desplazada o alternada mostrada. Si una fuerza mecánica aplicada en la dirección de la flecha 46 desvía el conjunto 34 de electrodos hacia la izquierda o hacia la derecha fuera de su posición de descanso, se producirá una fuerza neta de atracción por el campo electrostático entre los electrodos 40 y sus electrodos opuestos 36 respectivos, que tenderá a traccionar la estructura amovible 34 más hacia la izquierda (o más hacia la derecha) y de esta manera continuará o ayudará al movimiento introducido por la fuerza mecánica. Si se considera al movimiento mecánico del conjunto 34 de electrodos como equivalente de una fuerza de masa de resorte, la fuerza electrostática aplicada por el voltaje V puede ser considerada como equivalente de una fuerza resorte negativa que es aplicada al sistema para reducir la rigidez global del sistema.

Por otra parte, en el dispositivo de la Fig. 7, la aplicación de un voltaje V' entre los electrodos opuestos cuando el dispositivo produce un campo electrostático marginal entre los electrodos opuestos, según se ha descrito anteriormente con respecto a la Fig. 6, pero una vez más no se aplica una fuerza neta a la disposición equilibrada ilustrada. Sin embargo, si la estructura 34' del electrodo se mueve hacia la izquierda o hacia la derecha según se ilustra mediante la flecha 46', el campo electrostático marginal tiende a traccionar el electrodo amovible back a su posición alineada original. Este comportamiento es equivalente a un resorte positivo que tendería a endurecer la estructura. La fuerza aplicada por el campo electrostático es lineal en un pequeño intervalo de desplazamiento, por ejemplo aproximadamente 1 micrómetro, que es más que suficiente para las aplicaciones micromecánicas.

Los principios descritos con respecto a la Fig. 6 son ilustrados adicionalmente en un dispositivo resonador mostrado en una vista en planta en la Fig. 8 y en una vista parcialmente en perspectiva en la Fig. 9. Como se ilustra, el resonador consiste en una viga amovible alargada 52 montada en sus extremos 54 y 56 sobre brazos 58 y 60 de soporte correspondientes. Estos brazos de soporte se extienden de manera lateral desde los extremos respectivos 54 y 56 y están conectados en sus extremos más externos a una base fija, que puede ser un sustrato 62. La viga 52 está soportada para un movimiento con respecto a la base 62 a lo largo de su eje longitudinal 63 en la dirección de las flechas 64, con los brazos 58 y 60 de soporte estando fijados para sujetar la viga 52 en su lugar y para obligarla al trayecto axial deseado. Los brazos 58 y 60 de soporte tienen una elevada relación entre dimensiones de forma que son flexibles en el plano x-y en el que descansa la viga 52, y empuja a la viga 52 hacia una posición neutral de descanso cuando no se aplica ninguna fuerza externa a la viga, para servir de ese modo como resortes antagonistas para el dispositivo. La viga 52 y los brazos 58 y 60 de resorte son una estructura micromecánica que tienen preferiblemente dimensiones de escala micrométrica. La viga 52 también está fabricado para tener una elevada relación entre dimensiones; o sea, con una altura de 10-20  $\mu$  y una anchura de aproximadamente 0,5-3  $\mu$  para proporcionar una rigidez sustancial en la dirección vertical. Según se ilustra en la Fig. 9, la viga puede estar fabricada en una configuración de bloque para tener rigidez, para permitirle que soporte fuerzas axiales que producen un movimiento de la viga con respecto al sustrato.

La estructura amovible tiene una frecuencia resonante natural, que es una función de su masa y de la flexibilidad de los brazos de resorte, cuando se aplica una fuerza impulsora.

La frecuencia resonante del resonador 50 está sintonizada, conforme a la presente invención, por medio de un par de accionadores electrostáticos 66 y del electrodo de tipo peine descrito con respecto a la Fig. 6. Cada par de accionadores incluye un primer conjunto de electrodos amovibles montados sobre la estructura amovible del resonador, y preferiblemente integrales con la misma, y un segundo, opuesto, conjunto de electrodos estacionarios montados sobre la base estacionaria, o el sustrato 62, y preferiblemente integrales con los mismos. De esta manera, la viga 52 tiene un primer conjunto 69 de electrodos de punta 70 que se extienden lateralmente y un segundo conjunto 71 de electrodos 72 que se extienden lateralmente en ambos lados de la viga 52, con las puntas 70 en una disposición paralela separada a lo largo de un lado 74 de la viga y las puntas 72 en una relación paralela separada a lo largo del otro lado 76 de la viga 52. Las puntas son preferiblemente perpendiculares al eje 63 de la viga, están alineadas entre sí en lados opuestos de la viga, y son coplanares en el plano x-y 78 del resonador. Si se desea, los electrodos de punta pueden estar fabricados en la configuración de bloques ilustrada en la Fig. 9 en pro de la rigidez.

Montados sobre el sustrato 62 hay dos conjuntos de electrodos estacionarios 80 y 82, cooperando el conjunto 80 con el conjunto 70 de electrodos para formar el accionador 66, y cooperando el conjunto 82 con el conjunto 72 de electrodos para formar el accionador 68. El conjunto 80 de electrodos incluye una pluralidad de puntas de electrodo 84 paralelas separadas que se extienden hacia las puntas 70 correspondientes en la viga 52. Los electrodos 84 son paralelos a los electrodos 70 y no se solapan; o sea, tienen sus extremos libres separados de los extremos libres correspondientes de los electrodos 70 por un hueco 86 que es paralelo al eje 63 y que tiene una anchura que es suficiente como para permitir un movimiento axial de la viga 52 sin que los extremos libres de los electrodos 70 contacten con los extremos libres opuestos de los electrodos 84. El hueco es lo suficientemente pequeño como para producir un campo marginal entre los electrodos opuestos al aplicar un voltaje de polarización entre el conjunto 80 de electrodos y su conjunto correspondiente 69 de electrodos, y entre el conjunto 82 de electrodos y su conjunto correspondiente 71.

En la realización de la Fig. 8, las puntas 84 del conjunto 80 de electrodos están desplazados del conjunto opuesto 69 de puntas 70 en el accionador 69, y están separados por igual entre sí de la forma descrita con respecto a la Fig. 6. De manera similar, los electrodos del conjunto 82 están desplazados de aquellos del conjunto 71 en el accionador 68.

Según se ilustra, el hueco 86 se extiende la longitud de los conjuntos opuestos 69 y 80 de electrodos y es normalmente paralelo al eje 63 de la viga 52. De manera similar, el conjunto 82 de electrodos incluye una pluralidad de puntas de electrodo 90 paralelas separadas, cuyos extremos libres están separados de los extremos libres de los electrodos correspondientes 72 en el conjunto 71 de electrodos, estando separados estos electrodos por un hueco que tiene una anchura 92 y siendo este no solapante. Los conjuntos 71 y 82 de los electrodos 72 y 90 son similares a los conjuntos 69 y 80 mencionados anteriormente, estando los electrodos 90 desplazados de los electrodos 72 y estando alineados con los electrodos 84 de forma que los accionadores 66 y 68 sean simétricos con respecto al eje 63.

Se puede utilizar un voltaje de polarización aplicado entre los electrodos adyacentes 70 y 84 y entre los electrodos adyacentes 72 y 90 para controlar el movimiento relativo de la viga 52 con respecto al sustrato estacionario 62 para sintonizar de ese modo la frecuencia resonante del sistema mecánico incluyendo la viga 52 y los brazos 58 y 60 de soporte. Se puede aplicar una fuerza mecánica sobre la viga 52 para iniciar un movimiento oscilatorio de la viga, movimiento que puede ser suministrado por un accionador, como se describirá a continuación en el presente documento, y se utiliza el voltaje aplicado a los accionadores 69 y 71 para ajustar la frecuencia resonante del sistema. La simetría de los accionadores y sus electrodos de punta garantiza que no se aplica ninguna fuerza neta en el plano x-y sobre la viga mediante el voltaje de polarización cuando el sistema se encuentra en descanso.

El dispositivo micromecánico ilustrado en las Figuras 8 y 9 está fabricado preferiblemente conforme al proceso SCREAM-I descrito en el número de serie 08/312.797 mencionado anteriormente, que produce la estructura liberada 52 de viga con sus electrodos laterales 70 y 72 formados integralmente con la misma y amovibles con la misma. La estructura de la viga está soportada sobre el suelo 110 de una cavidad 112 que está formada en el sustrato 62 durante el proceso de fabricación por las zanjías que definen la estructura 52 de la viga, los electrodos 70 y 72, los brazos 58 y 60 de soporte, y los electrodos estacionarios 84 y 90. Los electrodos 84 y 90 tienen preferiblemente la forma de vigas en ménsula que se extienden desde una pared lateral 114 de la cavidad 112.

Según se ilustra en mayor detalle en la Fig. 10, el electrodo 84 se extiende de forma mensular desde la pared lateral 114 y se extiende sobre el suelo 110 de la cavidad 112. El interior de la viga 84 es del mismo material que el sustrato 62, preferiblemente silicio monocristalino, estando cubierta la viga con una capa dieléctrica 120 y con una capa metálica 122 tal como aluminio. Durante el paso de rebaje utilizado en el proceso SCREAM-I para liberar las vigas y los electrodos, las paredes laterales también son rebajadas para producir una concavidad 124. La capa 122 de aluminio también está proporcionada sobre el suelo 110 de la cavidad, con la viga suspendida y la región rebajada 124 en el borde de la cavidad proporcionando un aislamiento eléctrico entre distintas regiones de la capa metálica.

La capa metálica 122 en la superficie del sustrato 62 puede tener un patrón para proporcionar regiones de contacto eléctrico tal como las ilustradas en 126 hasta 129 en la Fig. 8 para la conexión de los electrodos 70 y 72 a una fuente 130 de voltaje. De manera similar, los terminales 132 y 134 de conexión pueden estar provistos en la superficie del sustrato 62 para proporcionar conexiones eléctricas entre los conjuntos 80 y 82 de electrodos, respectivamente, de

puesta a tierra eléctrica, o a una fuente de voltaje negativo (- V), por lo cual se puede aplicar un voltaje de polarización adecuado a través de los accionadores 66 y 68.

En la Fig. 11, a la que ahora se hace referencia, se ilustra una modificación del resonador de las Figuras 8 y 9. En esta figura, el resonador 140 está fabricado en un sustrato 140 de silicio monocristalino, de la forma descrita con respecto a la Fig. 8. El resonador incluye una viga amovible 144 fabricada dentro de una cavidad 146 en el sustrato, estando liberada la viga 144 del sustrato y montada para un movimiento con respecto al sustrato en brazos 148 y 150 de soporte ubicados en extremos opuestos de la viga. Están proporcionados accionadores electrostáticos 152 y 154 en lados opuestos de la viga 144, de nuevo, como se ha descrito con respecto a las Figuras 8 y 9, teniendo los accionadores conjuntos respectivos de electrodos opuestos separados por huecos 156 y 158. Se puede aplicar un voltaje 160 de polarización a través de los accionadores 152 y 154 por medio de un conector 162 conectado eléctricamente a la viga amovible 144 y los conectores 164 y 166 conectados a los electrodos estacionarios de los accionadores 152 y 154, por ejemplo.

Los electrodos opuestos 170 y 172 del accionador 152 y los electrodos opuestos 174 y 176 del accionador 154 están alineados de la forma descrita anteriormente con respecto a la Fig. 7 en el ejemplo ilustrado, de forma que el voltaje aplicado produce un campo electrostático entre los electrodos opuestos adyacentes que aumenta la rigidez de la viga 144, que es la estructura resonante para este dispositivo. Si se desea, los electrodos pueden estar desplazados, como en la Fig. 8.

Se puede aplicar un movimiento mecánico a la viga 144, en la realización ilustrada, mediante un impulsor 180 de excitación que consiste en dos conjuntos de electrodos de condensadores de tipo peine opuestos distribuidos de manera alterna. De esta manera, el impulsor de excitación incluye un conjunto de electrodos estacionarios 182 fijado en ménsula al sustrato 142 pero que se extiende hacia fuera desde el sustrato en una dirección paralela a la dirección del movimiento de la viga 144, indicada por las flechas 184. Los electrodos amovibles 186 opuestos están montados en la viga 144 para un movimiento con la misma, estando los electrodos 182 y 186 conectados a través de una fuente de tensión tal como la que se ilustra en 188. La aplicación de una tensión excitadora alterna a través del accionador 180 produce un movimiento longitudinal o axial en la viga 144 a una frecuencia cercana a la frecuencia resonante natural de la viga según se determina por la masa de la viga y sus electrodos y la rigidez de los brazos 148 y 150 de soporte. La aplicación de un voltaje a través de los accionadores 152 y 154, de la manera descrita anteriormente, sintonizará la resonancia de la viga 144, aumentando o disminuyendo la constante de resorte efectiva del sistema, de la forma que se ha descrito anteriormente.

El movimiento de la viga 144 puede estar detectado por medio de un condensador sensor 190 que tiene electrodos amovibles 192 montados en la viga 144 para un movimiento con la misma y que tiene electrodos estacionarios 194 montados de manera fija sobre el sustrato 142. El accionador 190 consiste en dos estructuras de electrodo de tipo peine que tienen sus puntas de electrodo 192 y 194 respectivas alternadas, por lo cual, el movimiento de la viga 144, y de esta manera de los electrodos 192 con respecto a los electrodos 194, cambia la capacitancia entre los electrodos adyacentes. Este cambio en capacitancia puede ser detectado por cualquier sensor 196 adecuado para proporcionar una señal de salida que es una medición del movimiento de la viga 144, siendo la frecuencia de la señal de salida la frecuencia resonante del sistema según se ha sintonizado por medio de los accionadores 152 y 154. La estructura mecánica puede actuar de esta manera como un filtro mecánico entre la señal 188 de entrada y la de salida 196.

En las estructuras anteriores, el movimiento de la viga amovible y de sus electrodos es en una dirección perpendicular a la anchura del hueco entre los conjuntos opuestos de electrodos en cada accionador y los accionadores son simétricos a lo largo de líneas paralelas a la dirección de movimiento. En consecuencia, los accionadores de sintonización no producen una fuerza neta ni en la dirección x ni en la y cuando están centrados, y se prefiere esta relación paralela. No obstante, se pueden obtener resultados favorables con otras geometrías de los accionadores. De esta manera, por ejemplo, según se ilustra de manera esquemática en la Fig. 12, un resonador 200 incluye una viga microelectromecánica amovible 202 montada en sus extremos opuestos sobre los brazos 204 y 206 de soporte que se extienden lateralmente que sirven como brazos de resorte para forzar el movimiento de la viga en una dirección a lo largo de su eje, como se ha descrito anteriormente. Sin embargo, en este caso, se proporcionan cuatro accionadores de sintonización como se indica en 208, 210, 212 y 214. Todos estos accionadores son estructuras de tipo peine que tienen electrodos opuestos, tal como los electrodos 216 y 218 del accionador 208 que están separados por un hueco 220 que se extiende en una dirección perpendicular al eje de la viga 202.

La aplicación de un voltaje a través de los dos conjuntos de electrodos opuestos 216 y 218 produce un campo electrostático en la región en la que las puntas llegan casi a solaparse. En la Fig. 13 se ilustra un gráfico de fuerza contra deflexión para esta región del accionador mediante la curva 222, en la que la región de sintonización está indicada en 224 y la región de uso típico está indicada en 226. Las mitades correspondientes del accionador de la Fig. 12 colisionarán si la deflexión alcanza la cantidad indicada por la línea 228 de puntos. Los voltajes aplicados a través de los conjuntos de electrodos en cada uno de los accionadores se utilizan para reducir la rigidez de la estructura resonante 200.

La Fig. 14 ilustra otra estructura resonante 230 en la que la viga amovible 232 está soportada por medio de brazos laterales 234 y 236, como se ha descrito anteriormente. En este ejemplo, se proporcionan pares simétricos de placas paralelas en cada lado de la estructura para reducir la rigidez de manera electrostática. De esta manera, las placas 238 y 243 de electrodos que se extienden lateralmente están montados sobre el brazo 232 para un movimiento conjunto

con el mismo. Los extremos de estas placas de electrodo se extienden entre las placas fijas 246 y 253 adyacentes de electrodo. Las placas fijas son vigas en ménsula que se extienden desde la pared lateral 255 del sustrato circundante 256, como se ha mencionado anteriormente con respecto a las Figuras 8 y 9. Al aplicar un primer voltaje a las placas 246 a 253 y un segundo voltaje a las placas 238 a 243, los voltajes en cada lado de las placas amovibles se anulan entre sí y la viga 232 no experimenta una fuerza neta a no ser que sea desplazado del equilibrio. Si es desplazado, la fuerza es proporcional al desplazamiento en un pequeño rango de desplazamientos del orden de décimas de un micrómetro. Estos voltajes reducen la rigidez del sistema. Si el desplazamiento excede un valor crítico, los electrodos provocarán que la estructura amovible se mueva demasiado lejos, haciendo que los electrodos amovibles golpeen los electrodos estacionarios. Sin embargo, el aspecto positivo de esta estructura es que es muy eficiente en términos de espacio.

La estructura de la Fig. 14 es un interruptor limitador de aceleración muy efectivo, pues la aceleración en cualquier dirección axial provocará que la estructura amovible 232 con sus electrodos 238-243 se mueva hacia los electrodos fijos 246-253. Si los electrodos amovibles y fijos llegan a estar demasiado cerca, los electrodos amovibles serán atraídos hacia los electrodos fijos por el voltaje de polarización aplicado y, entonces, pueden ser utilizados para activar un interruptor tal como uno de los microinterruptores 260, 261 ilustrados en la Fig. 14. La magnitud del voltaje aplicado a través de los electrodos determina la magnitud de la aceleración necesaria para activar el interruptor.

Se comprenderá que el número de electrodos mostrado en cada uno de los dibujos es únicamente para fines ilustrativos. Se prefiere que se utilicen grandes números de electrodos en cada accionador para proporcionar la sensibilidad requerida. Además, se pueden construir conjuntos densos con un rango lineal elevado de funcionamiento estando los electrodos opuestos fabricados ya sea alineado o desalineado para proporcionar un aumento o reducción de la rigidez, respectivamente.

La ecuación gobernante del movimiento para un resonador con todos los componentes del sistema mecánico en el lado izquierdo, y todos los componentes del accionador electrostático en el lado derecho es la siguiente:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(x, V')(Ec.3)$$

La función forzada,  $F(x(t), V'(t))$ , con tiempo  $t$ , desplazamiento  $x$ , y voltaje  $V$  consiste en una fuerza de excitación y una fuerza pasiva del accionador de sintonización, suministrada cada una por un accionador aparte:

$$F(x, V_e, V) = F_{excitar}(x, V_e) + F_{sintonización}(x, V)(Ec.4)$$

Mediante el diseño apropiado de un accionador de sintonización, es posible obtener una fuerza pasiva de sintonización,  $F_{sintonización}$ , que sea proporcional al desplazamiento,  $x$ , donde la constante de proporcionalidad está designada como  $-k_{elec}$ . Mediante una reorganización sencilla de términos llegamos a la siguiente ecuación:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + (k_{mec} + k_{elec})x = F_{excitar}(x, V_e)(Ec.5)$$

que puede ser utilizada para determinar la frecuencia resonante efectiva del sistema electromecánico.

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{mec} + k_{elec}^0 V^2}{m}}(Ec.6)$$

en la que se utiliza la relación  $k_{elec} = k_{elec}^0 V^2$ , para mostrar explícitamente la dependencia de voltaje de la función forzada del accionador.

Se llevaron a cabo experimentos en un microscopio electrónico de exploración para probar el funcionamiento de un resonador tal como el ilustrado en la Fig. 11. En este dispositivo, se varió el voltaje de polarización suministrado al accionador de sintonización en un rango de 0 a 75 voltios, y en cada paso se aplicó un voltaje de excitación de aproximadamente 1,5 voltios a un accionador tal como el accionador 180 en la Fig. 11, barriendo el voltaje un rango adecuado de frecuencias. Se determinó la resonancia de la viga; por ejemplo, la viga 144 de la Fig. 11, seleccionando la frecuencia a la que la amplitud de vibración se encontraba en un máximo. Se tuvo cuidado para asegurar que la amplitud de la vibración fuese lo suficientemente baja como para evitar la histéresis de frecuencia contra amplitud que se asocia con componentes no lineales de rigidez. La Figura 15 ilustra los resultados de dos osciladores sintonizables que solo difieren en sus geometrías del accionador de sintonización. Mecánicamente, se diseñaron ambos osciladores para tener una rigidez y una masa idénticas. Sin embargo, en ausencia de potencial aplicado, la diferencia entre las frecuencias resonantes era del orden del 10%. Como supone la ecuación 6, presentar el gráfico del cuadrado de la frecuencia natural como una función del voltaje al cuadrado daría como resultado, idealmente, una línea recta.



La Fig. 16, que es un nuevo gráfico de los datos mostrados en la Fig. 6, verifica esta predicción. También se calcularon los gráficos de fuerza contra deflexión para las estructuras de peine de campo marginal utilizando un paquete CAD llamado "High Aspect Ratio Simulation Package". Estos gráficos se calcularon para accionadores de aumento de la rigidez y de disminución de la rigidez, y los resultados calculados se comparan con los determinados a partir de los datos experimentales en la siguiente: 1:

TABLA 1

[N/(mV <sup>2</sup> )]	Reducción	
<b>Aumento</b>		
Simulación	$9,8 \times 10^{-4}$	-
$9,0 \times 10^{-4}$		
Experimento	$8,3 \times 10^{-4}$	-
$1,20 \times 10^{-3}$		
Comparación	18%	10%

La diferencia entre la simulación y los resultados experimentales se atribuye principalmente a la sensibilidad del accionador electrostático al hueco, a las suposiciones inherentes en los cálculos, y a la incertidumbre acerca de la masa total de la estructura.

En aras de la simplicidad, el resonador sintonizable ha sido considerado un sistema de masa simple de resorte en el que se ignoraron las no linealidades en un sistema mecánico y los accionadores pasivos de sintonización. Sin embargo, un repaso cuidadoso de la Fig. 5 revela que las dos regiones lineales "a" y "b" son de distintas longitudes. Esto significa que tienen un distinto término cúbico  $k_3$  en la ecuación:

$$F = k_1x + k_3x^3 + \dots (Ec.7)$$

Al aplicar un voltaje a un accionador de aumento de la rigidez o a un accionador de disminución de la rigidez, el término lineal no se ve afectado, mientras que se sintoniza el término cúbico. En la mayoría de los sistemas mecánicos, existe una fuerza restauradora cúbica positiva, y en muchos casos esto no es deseable. Utilizando el accionador de sintonización de la presente invención, es posible reducir el término cúbico e incluso hacer que se vuelva negativo. Más específicamente, los accionadores de reducción de la rigidez y de aumento de la rigidez supondrán aportaciones de rigidez cúbica negativa y positiva, respectivamente. En la Tabla 2 se muestra un conjunto teórico de valores de rigidez para el accionador de reducción de la rigidez y en la Ecuación 8 se ilustran sus lugares respectivos en la ecuación gobernante del movimiento:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + (k_{mec} + k_{elec}^0 V^2)x + (\pi_{mec} + \eta_{elec}^0 V^2)x^3 = F_{excitar}(x, V_e) (Ec.8)$$

TABLA 2

$k_{mec}$	2,6 N/m
$\eta_{mec_0}$	$9,2 \cdot 10^{11}$ N/m <sup>3</sup>
$K_{elec_0}$	$9,8 \cdot 10^{-4}$ N/(mV)
$\eta_{elec}$	$1,2 \cdot 10^8$ N/m (m <sup>3</sup> v <sup>2</sup> )
$m$	$2,4 \cdot 10^{-10}$ kg
$c$	200 s <sup>-1</sup>

Los gráficos de energía potencial del sistema electromecánico descritos anteriormente en el presente documento proporcionan una herramienta visual para describir el comportamiento del sistema. La Figura 17 es un diagrama de energía potencial del accionador de reducción de frecuencia mostrado en la Fig. 11. Bajo condiciones de un voltaje

de polarización cero a través de los electrodos del accionador, el gráfico de la energía potencial de la curva 270 exhibe un único “pozo” que contiene términos cuadráticos y cuárticos del sistema mecánico. Según se aumenta el voltaje de polarización, se disminuye la concavidad del pozo. Esto da como resultado la reducción de la frecuencia de sintonización descrita anteriormente. Según se aumenta adicionalmente el voltaje de polarización, la concavidad del pozo cambia finalmente de signo, como se ilustra por medio de las curvas 272 y 274, y el único punto de equilibrio se bifurca en un par de equilibrios 276 y 278. En este rango de voltajes de polarización, el sistema tiene una estructura potencial de doble pozo que se asemeja localmente a la de un oscilador de Duffing. De esta manera, al reducir la rigidez de la estructura, la rigidez neta del sistema se vuelve negativa y el punto original de equilibrio se vuelve inestable de forma que la estructura se desviará a la izquierda o a la derecha hasta uno de los dos puntos 276 o 278 de equilibrio. Cuando se excita un sistema con un potencial de doble pozo por medio de una fuerza externa, el sistema puede presentar un comportamiento aparentemente caótico o aleatorio.

A partir de lo anterior, será evidente que los accionadores de sintonización proporcionan un mecanismo para alterar de manera electromecánica la rigidez y de esta manera la frecuencia resonante de un resonador. Esta tecnología puede incluirse fácilmente en un acelerómetro para compensar las variaciones que se dan en el proceso de fabricación. Se puede sintonizar la sensibilidad del acelerómetro a un valor en particular, o se puede desplazar la frecuencia resonante para conseguir un rango deseado de frecuencia de respuesta. En el área de los osciladores no lineales, el comportamiento del resonador no está limitado al de un oscilador de Duffing, pues al variar de manera sinusoidal el voltaje de polarización, el oscilador puede estar provisto de una rigidez periódica.

De esta manera, la presente invención describe accionadores que sintonizan la frecuencia resonante de un dispositivo micromecánico para proporcionar una fuerza resorte negativa que varía conforme al cuadrado del voltaje aplicado. En los experimentos, la frecuencia resonante ha sido sintonizada desde el 7,7% hasta el 146% del valor original o natural del sistema mecánico, siendo los límites de la sintonización la estabilidad electromecánica del dispositivo y las rigideces dieléctricas entre la metalización del electrodo y el sustrato. Al aplicar un voltaje de polarización mayor que un cierto voltaje crítico de polarización, un resonador con un accionador de reducción de la rigidez exhibe un potencial de doble pozo. Se puede utilizar esta tecnología para sintonizar el rendimiento de los sensores de resonancia, los filtros electromecánicos, los acelerómetros, los osciladores no lineales, y similares.

Aunque se ha descrito la invención en términos de las realizaciones preferidas, se comprenderá que el alcance de la invención está limitado únicamente por las siguientes reivindicaciones.

# REIVINDICACIONES

1. Un accionador micromecánico, que comprende

una estructura micromecánica que tiene un primer componente estacionario y un segundo componente relativamente amovible con respecto a dicho primer componente;

un primer conjunto de puntas de electrodo (36; 84, 90; 216) de tipo peine paralelas separadas montado sobre dicho primer componente;

un segundo conjunto de puntas de electrodo (40; 70, 72; 218) de tipo peine paralelas separadas montado sobre dicho segundo componente, siendo coplanares dichas puntas de dichos conjunto primero y segundo, y teniendo una relación opuesta no solapante con un hueco (44; 86, 92; 220) entre los mismos; y

una fuente (130) de voltaje de polarización conectada a través de dichos conjuntos primero y segundo de electrodos de punta para producir un campo electrostático entre los mismos;

**caracterizado** porque

dichas puntas de electrodo (36; 84, 90; 216) de dicho primer conjunto no están alineadas con dichas puntas de electrodo (40; 70, 72; 218) de dicho segundo conjunto.

2. El accionador de la reivindicación 1, en el que dicha fuente (130) de voltaje es variable.

3. El accionador de la reivindicación 2, en el que dicho segundo componente es amovible a lo largo de un eje (48; 63), y en el que dicho hueco (44; 86, 92) se extiende paralelo a dicho eje (48; 63).

4. El accionador de la reivindicación 3, en el que dicho segundo componente es una estructura amovible (52; 202) de viga montada dentro de una cavidad (112) en un sustrato (62) de silicio monocristalino, siendo integral dicho primer conjunto de puntas de electrodo (84, 90; 216) con dicho sustrato (62) y siendo integral dicho segundo conjunto de puntas de electrodo (70, 72; 218) con dicha estructura amovible (52; 202) de viga.

5. El accionador de la reivindicación 4, en el que dicho segundo componente tiene una rigidez mecánica natural, siendo variable dicha fuente (130) de voltaje para ajustar dicha rigidez.

6. El accionador de la reivindicación 4, en el que dicha estructura (52; 202) de viga está montada para su movimiento por medio de al menos un brazo (58, 60; 204, 206) de resorte fijado a dicho sustrato (62), siendo amovibles dicha viga amovible (62), dicho brazo (58, 60; 204, 206) de resorte y dicho segundo conjunto de electrodos (70, 72; 218) a una frecuencia natural de resonancia, siendo ajustable dicha fuente (130) de voltaje para ajustar dicha frecuencia de resonancia.

7. El accionador de la reivindicación 6, en el que dicha fuente (130) de voltaje es variable para reducir dicha frecuencia resonante.

8. El accionador de la reivindicación 7, en el que dicha fuente (130) de voltaje proporciona una polarización lo suficientemente elevada a dicho accionador para producir un potencial de energía de doble pozo.

9. Un resonador electromicromecánico, que comprende:

un sustrato (62);

una estructura micromecánica (52, 202) de viga que tiene dimensiones de escala micrométrica amovible con respecto a dicho sustrato (62) por un eje (63);

brazos (58, 60; 204, 206) de resorte conectados entre dicha viga (52; 202) y dicho sustrato (62), teniendo dichos brazos (58, 60; 204, 206) de resorte y viga amovible (52; 202) una posición de descanso y teniendo una frecuencia resonante natural;

accionadores electrostáticos primero y segundo (66, 68; 208, 210, 212, 214), en el que cada uno de los accionadores (66, 68; 208, 210, 212, 214) está configurado conforme a la reivindicación 1, estando montado el primer conjunto de puntas de electrodo (70, 72; 218) sobre dicho sustrato (62) y estando el segundo conjunto de puntas de electrodo (84, 90; 216) montado sobre dicha estructura (52; 202) de viga,

en el que la fuente (130) de voltaje de polarización es ajustable para ajustar dicha frecuencia resonante.

10. El resonador de la reivindicación 9, en el que dichos accionadores primero y segundo (66, 68; 208, 210, 212, 214) son coplanares y simétricos, por lo cual dichos accionadores (66, 68; 208, 210, 212, 214) no proporcionan ninguna fuerza neta sobre dicha estructura (52; 202) de viga en la posición de descanso.

## ES 2 321 889 T3

11. El resonador de la reivindicación 10, que incluye además medios de accionamiento para mover dicha viga a una frecuencia a dicha frecuencia natural.

12. El resonador de la reivindicación 9, en el que dicho hueco (86) se extiende paralelo a dicho eje (63).

13. El resonador de la reivindicación 9, en el que dicho hueco (220) se extiende perpendicular a dicho eje.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

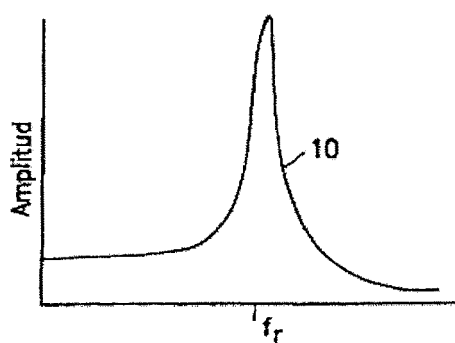


FIG. 1

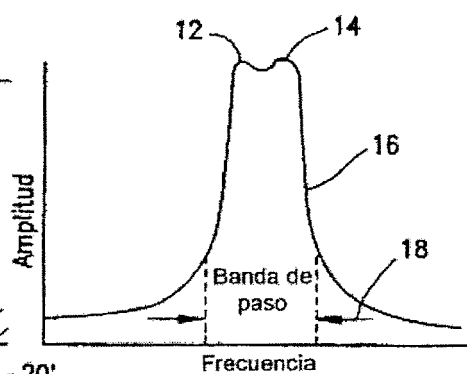


FIG. 2

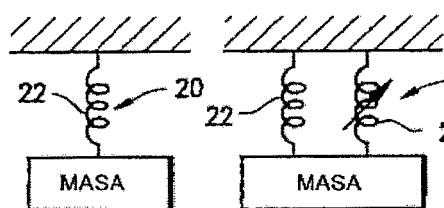


FIG. 3

FIG. 4

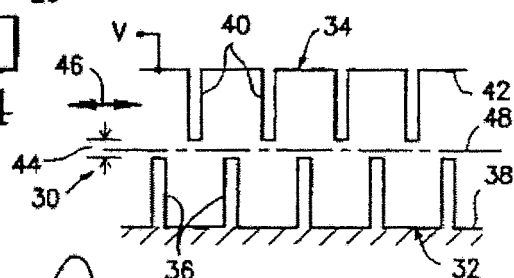


FIG. 6

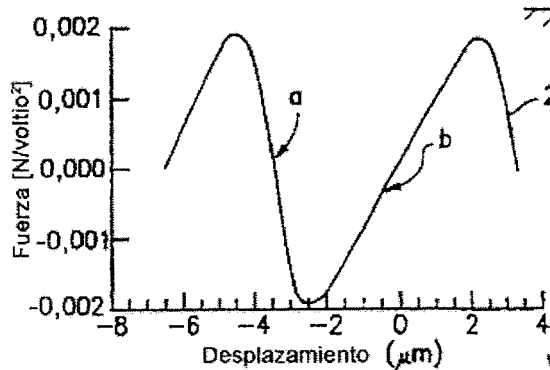
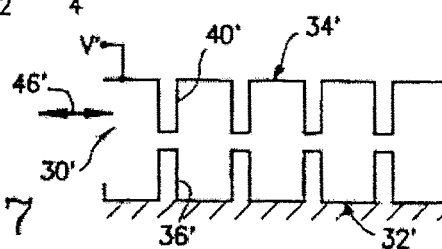


FIG. 5

FIG. 7



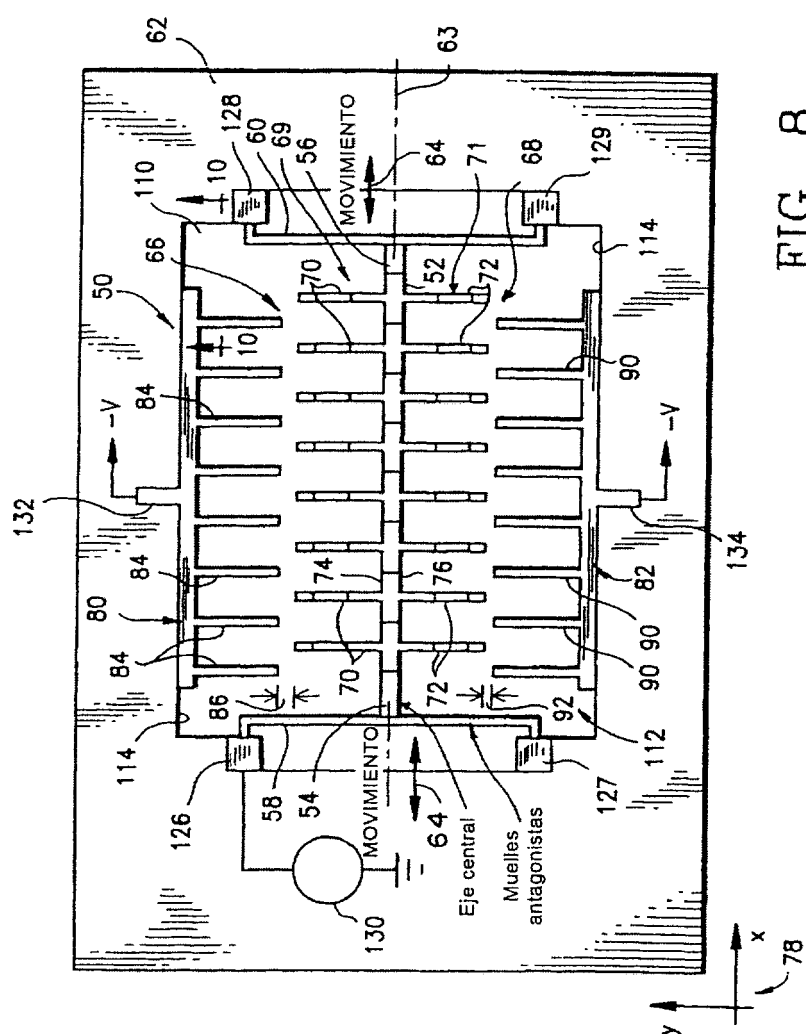
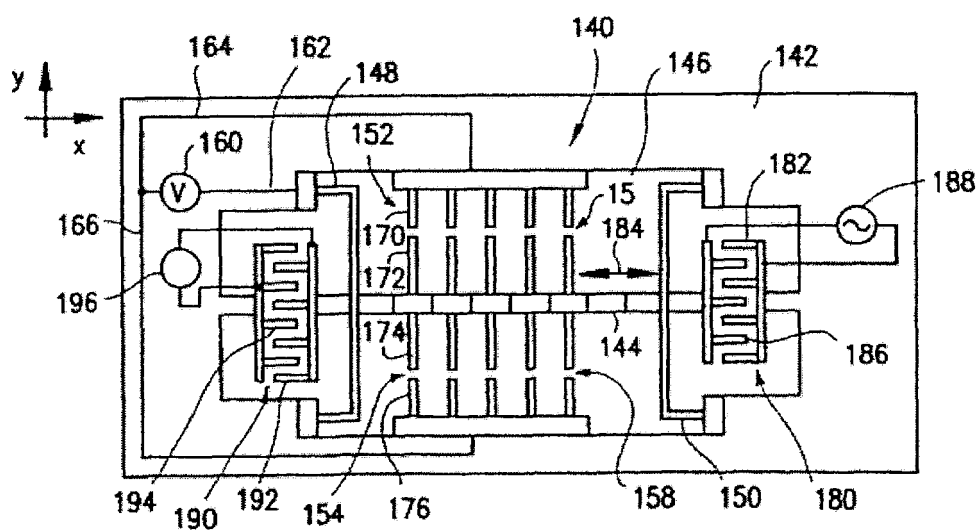
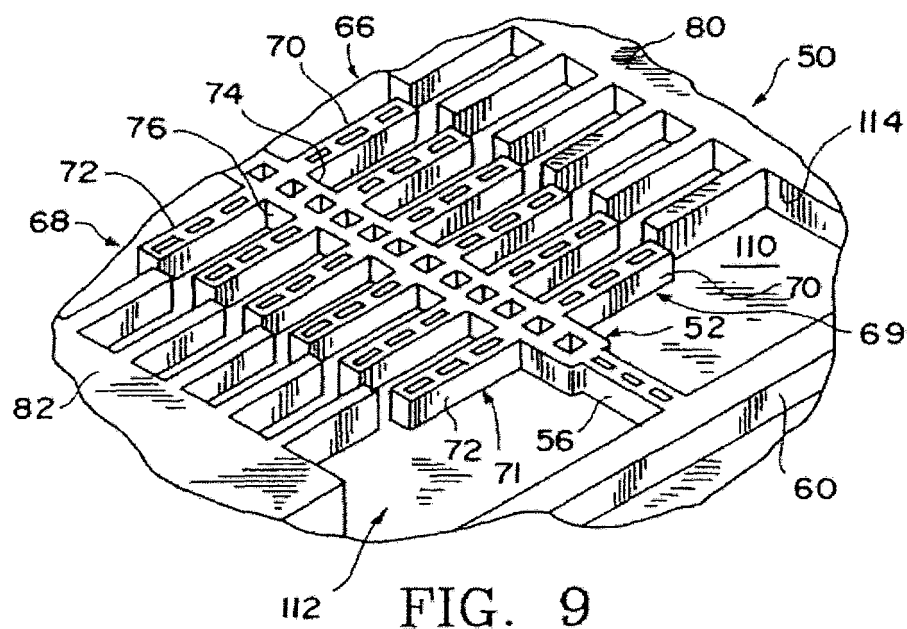
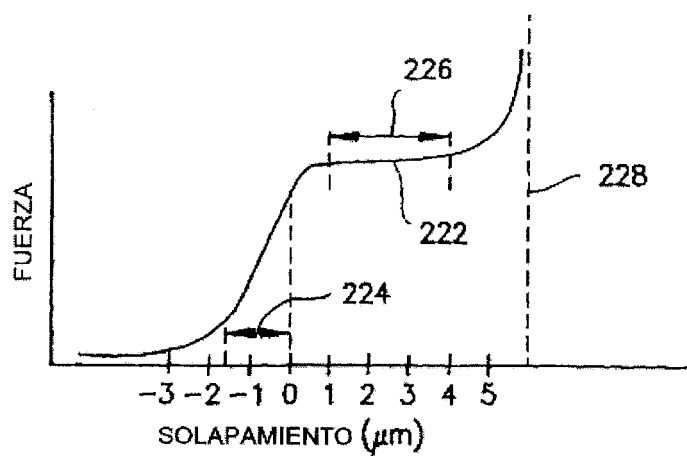
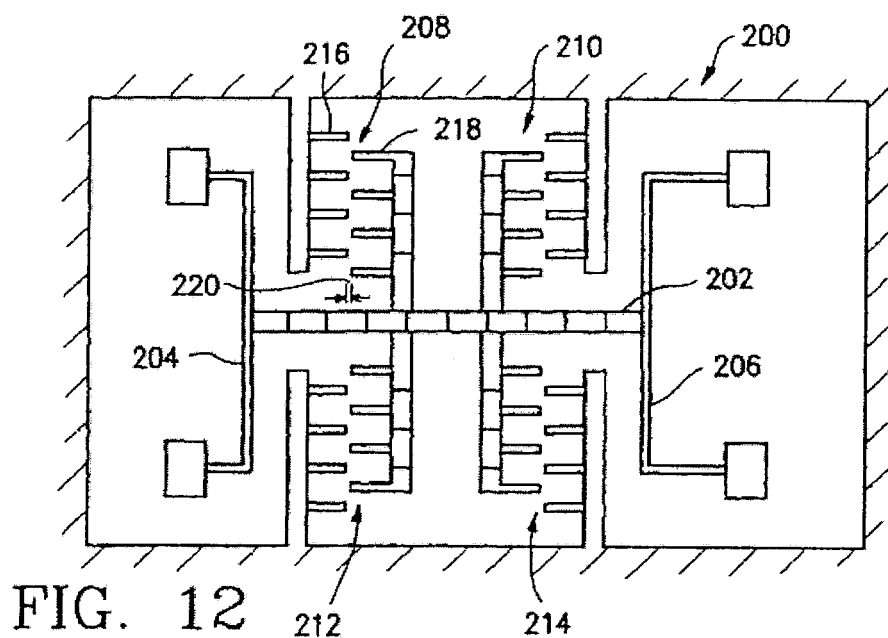
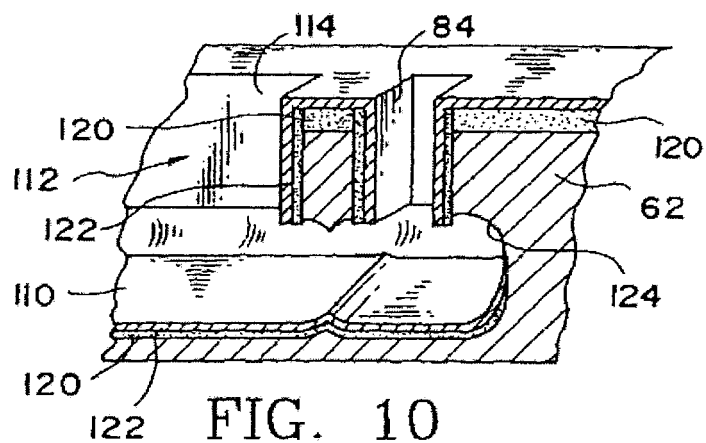


FIG. 8







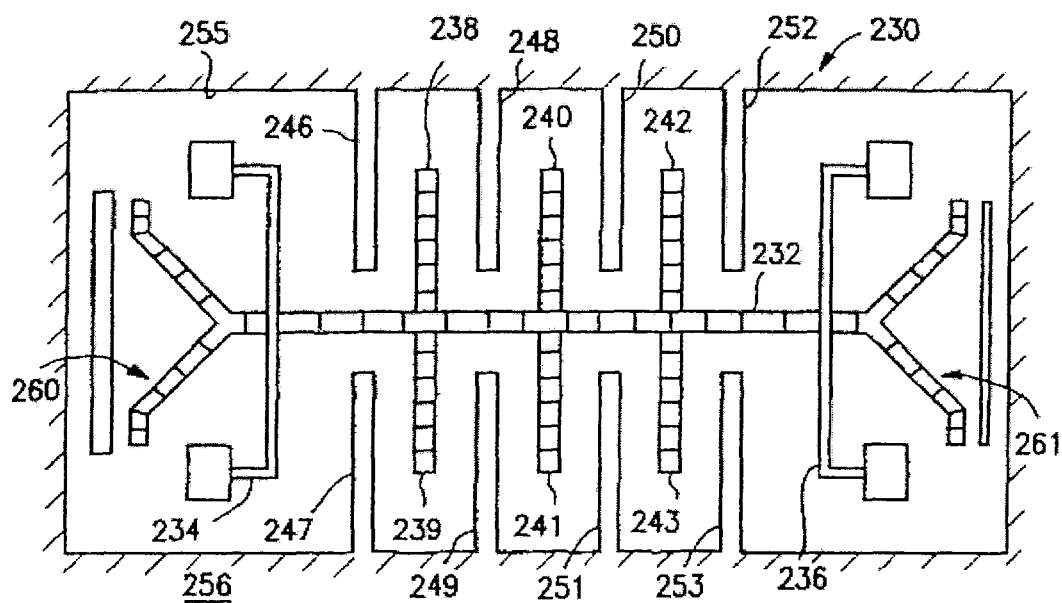


FIG. 14

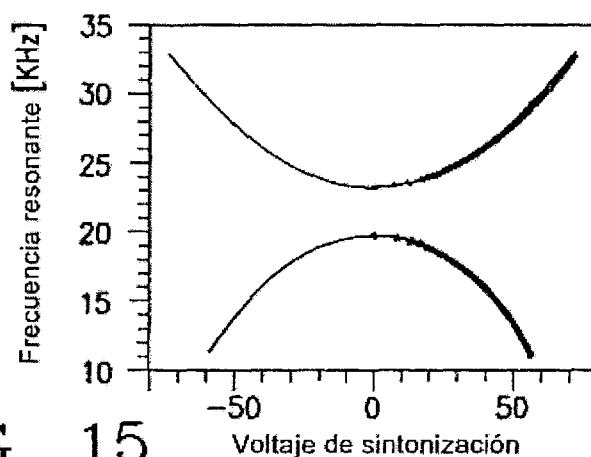


FIG. 15

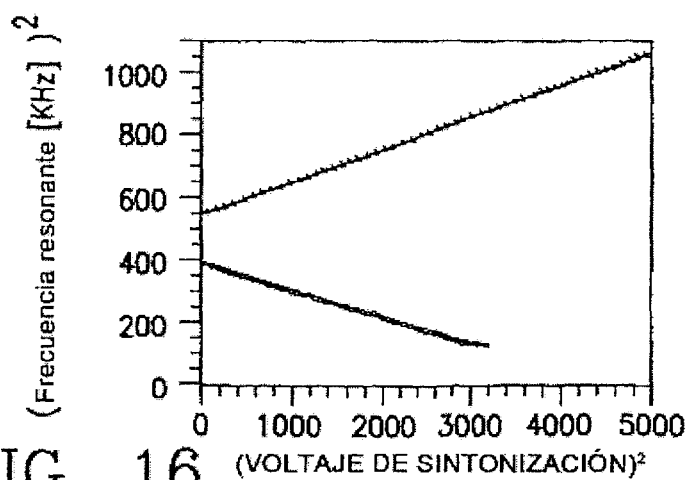


FIG. 16

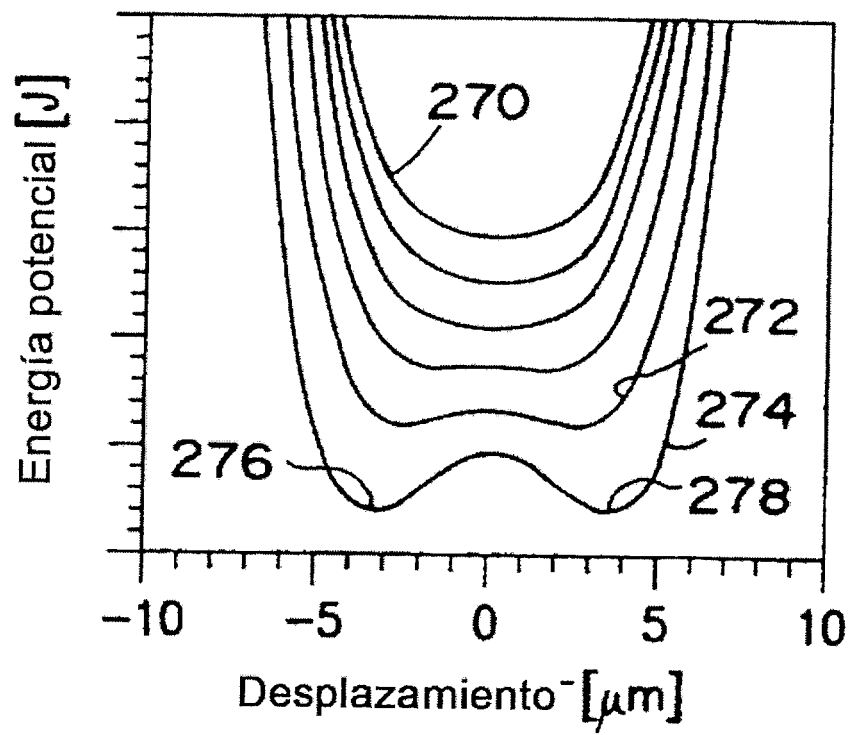


FIG. 17