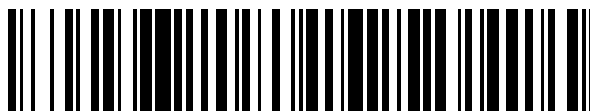


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 538 154**

51 Int. Cl.:

B81B 3/00 (2006.01)

H03H 9/02 (2006.01)

H03H 9/24 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.03.2004 E 04759781 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.05.2015 EP 1618658**

54 Título: **Compensación de temperatura para resonador MEMS de silicio**

30 Prioridad:

16.04.2003 US 414793

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

17.06.2015

73 Titular/es:

**ROBERT BOSCH GMBH (100.0%)
POSTFACH 30 02 20
70442 STUTTGART, DE**

72 Inventor/es:

**LUTZ, MARKUS y
PARTRIDGE, AARON**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 538 154 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

Compensación de temperatura para resonador MEMS de silicio

Antecedentes

5 La presente invención se refiere en general a sistemas microelectromecánicos (MEMS). Los MEMS son dispositivos formados a partir de componentes miniaturizados dispuestos operativamente sobre un sustrato. Estos componentes se construyen a través del uso de tecnologías litográficas y otras de microfabricación para producir, por ejemplo, sensores y actuadores.

10 Muchas estructuras micromecánicas comunes se basan en la reacción (por ejemplo, oscilación, deflexión o torsión) de una estructura de viga a una fuerza aplicada. Tales estructuras de viga tienen habitualmente, o se modelan para tener, una sección transversal rectangular. Sin embargo, el grado en que una viga es realmente "rectangular" depende de la anisotropía del método de grabado usado para formarla. Se usan vigas en la suspensión de placas rígidas, como osciladores laterales, o como dispositivos en voladizo. Son una elección natural para detectores de movimiento sin cojinetes. Cabe señalar que los MEMS usan cada vez más vigas dentro de estructuras de resonador como parte de circuitos de reloj y de filtrado de señales.

15 Los semiconductores monocristalinos, tales como silicio, son el material de elección obvio para la fabricación de vigas de resonador. Tales materiales tienen una excelente resistencia mecánica y un alto factor de calidad intrínseco. Además, la formación y el procesamiento de materiales basados en silicio son campos de actividad bien desarrollados que se fundamentan en décadas de experiencia en la industria de los circuitos integrados.

20 Usando silicio policristalino ("poli-Si"), por ejemplo, pueden diseñarse resonadores que tienen una enorme flexibilidad en su geometría. Sin embargo, las estructuras de viga oscilante lateral y viga de flexión sencillas, pero usadas comúnmente, servirán para ilustrar no sólo algunos de los problemas de rendimiento asociados con los resonadores convencionales, sino también los preceptos de la presente invención a continuación.

25 Examinando la figura 1, se forma una estructura de viga de flexión suspendiendo un tramo de viga 1 que tiene una sección transversal rectangular por encima de un sustrato 3 de semiconductor por medio de anclajes 5 de extremo. Normalmente, un electrodo de accionamiento (no mostrado) está asociado con la viga, es decir, situado en proximidad de campo electrostático a la viga. La viga se excita mediante un campo electrostático inducido por el electrodo y vibra mecánicamente en simpatía con oscilaciones en el campo electrostático.

30 Cuando se aplica una fuerza a la superficie de una viga, esa superficie se dice que está *sometida a tensión*. El valor promedio de esta tensión, σ , puede expresarse como la fuerza de carga, F , dividida entre el área, A , por la que se aplica, σ :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Cuando se someten a una tensión, los materiales literalmente se ven empujados (o se tira de ellos) perdiendo la forma. La *deformación*, ϵ , es una medida de esta variación de forma, dentro de los límites de elasticidad del material, y es igual al cambio de longitud, ΔL , dividido entre la longitud original, L_0 , o:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

35 La mayor parte de los materiales de interés se deforman linealmente con carga. Puesto que la carga es proporcional a la tensión y la variación de forma es proporcional a la deformación, la tensión y la deformación están relacionadas linealmente. La constante de proporcionalidad que relaciona estas dos medidas se conoce como el *módulo de elasticidad* o *módulo de Young* para el material y se le da el símbolo "E". Se conocen los módulos de Young para una enorme gama de materiales.

40 La rigidez mecánica, k_M , de una viga, tal como se calcula con respecto a la dirección de oscilación paralela a la anchura de la viga "w", es proporcional a su módulo de Young, E, y determinadas medidas de su geometría, incluyendo para una viga con una sección transversal rectangular; longitud, "L" y altura, "h".

$$k_M \approx \frac{E \cdot h \cdot w^3}{L^3}$$

ECUACIÓN 1

5 Tal como se entiende bien, el módulo de Young para la mayor parte de los materiales de interés cambia con la temperatura según coeficientes térmicos (α_E) conocidos. Por ejemplo, el poli-Si tiene un coeficiente térmico de 30 ppm/°K. Además, la geometría de una estructura de viga también cambia con la temperatura, generalmente dilatándose con un aumento de temperatura. De nuevo, como ejemplo, el poli-Si tiene un coeficiente de dilatación térmica, α_{exp} , de 2,5 ppm/°K.

Para algunos diseños de viga y fines de modelado relacionados, y dado un material con un coeficiente térmico isotrópico, el efecto de la dilatación térmica sobre la anchura de la viga se ve compensado esencialmente por el efecto de la dilatación térmica sobre la longitud de la viga, dando como resultado por tanto un efecto lineal restante sobre la altura de la viga.

10 Al margen de las fuerzas electrostáticas, la frecuencia de resonancia (f) de una viga puede definirse por tanto con estas suposiciones mediante la ecuación:

$$f \approx \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_M}{m_{eff}}}$$

ECUACIÓN 2

donde m_{eff} es la masa eficaz de la viga, constante con la temperatura.

15 Dada la naturaleza crítica de la frecuencia de resonancia de una viga para el rendimiento global del resonador, debe permanecer relativamente estable a lo largo de un intervalo de temperaturas de funcionamiento. En vista de la relación expuesta en la ecuación 2, la frecuencia permanecerá constante sólo si la rigidez mecánica permanece constante. Sin embargo, normalmente esto no será el caso ya que cambios inducidos térmicamente en el módulo de Young tienden a cambiar la rigidez mecánica de la viga. Por consiguiente, se requiere de cierta influencia externa para "compensar" los cambios inevitables de la frecuencia de resonancia debidos a variaciones de temperatura.

20 Se han realizado intentos previos para abordar el problema de la estabilización de la frecuencia de una viga resonante en presencia de temperatura cambiante. Véase, por ejemplo, Wan-Thai Hsu, Stiffness-Compensated Temperature Insensitive Micromechanical Resonators, MEMS 2002 (-7803-7185-2/02 IEEE). Sin embargo, tales intentos se han centrado en el problema de la compensación de la oscilación vertical y han recomendado el uso corrector de oro o materiales similares que son incompatibles con la integración CMOS.

25 Para otros diseños de viga y fines de modelado relacionados, la frecuencia (f) de una viga con resonancia que tiene una sección transversal rectangular puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$f \approx \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho} \left(1 + \frac{L^2}{7t^2} S \right)}$$

ECUACIÓN 3

donde "p" es la densidad del material que forma la viga, y "S" es una deformación elástica aplicada a la viga.

30 A medida que se eleva la temperatura, tanto L como t aumentan debido a dilatación térmica, pero predomina el efecto de los cambios en L debido al hecho de que L es mucho, mucho mayor que t. Como resultado, la frecuencia tiende a disminuir a medida que aumenta la temperatura, y viceversa. También resulta evidente a partir de la ecuación anterior que la deformación por compresión aplicada a la viga con temperatura creciente potenciará la sensibilidad de la frecuencia en función de la temperatura. A la inversa, la deformación por tracción aplicada a la viga con temperatura creciente retardará la sensibilidad de la frecuencia en función de la temperatura. Tales condiciones pueden entenderse mejor suponiendo en primer lugar una relación deseada en la que el cambio de frecuencia, $d(f)$ en función del cambio de temperatura, $d(T)$ es igual a 0. La sustitución e igualación de las expresiones produce:

35

$$\alpha_{\text{exp}} \left(1 + \frac{L^2}{7l^2} S \right) = \frac{L^2}{7l^2} \frac{dS}{dT} \quad \text{ECUACIÓN 4}$$

Para la mayor parte de situaciones prácticas, la deformación aplicada, S, será mucho, mucho menor de uno. Con tales suposiciones, la relación descrita en la ecuación 4 se convierte en:

$$\frac{dS}{dT} = \frac{7l^2}{L^2} \alpha_{\text{exp}} \quad \text{ECUACIÓN 5}$$

- 5 Resulta de nuevo evidente a partir de esta relación que los cambios inducidos térmicamente en la frecuencia resonante de una viga pueden retardarse (es decir, compensarse) o potenciarse mediante cambios en la deformación elástica, ($d(S)$), aplicada a la viga.

Desafortunadamente, el coeficiente térmico del módulo de Young para silicio es del orden de 30 ppm/K. Esta realidad conduce a una desviación de temperatura considerable en la frecuencia de una viga oscilante en el intervalo de 18 ppm/°C. Dados los requisitos nominales de estabildades de temperatura que oscilan entre 0,1 y 50 ppm, y especificaciones comunes de temperatura de funcionamiento que oscilan entre -40°C y +85°C, el supuesto diseñador de MEMS se enfrenta a un desafío considerable en el diseño de un resonador estable con respecto a la temperatura.

15 Claramente, se requiere un mecanismo de compensación eficaz para la estabilidad de frecuencia de resonadores micromecánicos a lo largo de un intervalo de temperatura de funcionamiento. Un mecanismo de este tipo no debe basarse en la incorporación de materiales incompatibles con integraciones CMOS.

El documento US 5.783.973 A da a conocer un giroscopio de diapasón micromecánico con un patrón de frecuencia y un control de frecuencia. Un bucle de control de frecuencia compara una frecuencia de referencia del patrón de frecuencia con una frecuencia de oscilación de masa efectiva detectada a partir del bucle de oscilador, y se aplica una señal de corrección de CC a la masa efectiva. La señal de corrección de CC se usa externamente como referencia de voltaje.

Los documentos US 2001/022546 A1, US 5 729 075 A, US 6 236 281 B1, S. Y. NO; A. HASHIMURA; S. POURKAMALI; F. AYAZI: "Single-Crystal Silicon HARPSS Capacitive Resonators with Submicron Gap-Spacing", SOLID-STATE SENSOR, ACTUATOR AND MICROSYSTEMS WORKSHOP, 2 - 6 de junio de 2002, págs. 281-284, Hilton Head Island, Carolina del Sur, EE.UU., y PIAZZA G ET AL: "Voltage-tunable piezoelectrically-transduced single-crystal silicon resonators on SOI substrate", PROCEEDINGS OF THE IEEE 16TH. ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICROELECTRO MECHANICAL SYSTEMS. MEMS 2003. KIOTO, JAPÓN, AN. 19 - 23, 2003, IEEE INTERNATIONAL MICRO ELECTRO MECHANICAL SYSTEMS CONFERENCE, NUEVA YORK, NY : IEEE, EE.UU., col. CONF. 16, 19 de enero de 2003, págs. 149-152 dan a conocer más resonadores de viga microelectromecánicos ajustables.

Sumario de la invención

La presente invención aborda los problemas de compensación de temperatura para resonadores micromecánicos. Se presentan soluciones tanto activas como pasivas. En efecto, también se presenta el empleo de técnicas tanto activas como pasivas en la misma solución. Las soluciones activas se caracterizan por la aplicación de una influencia externa sobre el resonador de un circuito o mecanismo externo a la propia estructura del resonador. Las soluciones pasivas se fundamentan en las cualidades de dilatación térmica inherentes y dispares halladas en los materiales semiconductores seleccionados para formar la estructura del resonador.

La presente invención proporciona un método activo de compensación de variaciones de frecuencia inducidas térmicamente en un resonador micromecánico que incluye una viga oscilante y un electrodo. El método incluye determinar la frecuencia de funcionamiento real para la viga en relación con una frecuencia de resonancia deseada, y aplicar después una rigidez compensatoria al resonador para mantener la frecuencia de resonancia deseada. La rigidez compensatoria se proporciona mediante una fuerza electrostática aplicada a la viga por el electrodo.

Se ajusta la distancia de trabajo entre la viga oscilante y el electrodo para variar la rigidez compensatoria aplicada a la viga.

5 Dentro de ciertas soluciones de compensación activa, la frecuencia para un resonador puede determinarse usando un circuito de realimentación que o bien detecta directamente la frecuencia de funcionamiento real, o bien detecta la temperatura de funcionamiento del resonador. En respuesta a una señal de salida correspondiente desde el circuito de realimentación, el voltaje aplicado al electrodo puede variarse para proporcionar una rigidez electrostática compensatoria en la viga oscilante.

Sin embargo, otros aspectos pueden aplicarse fácilmente a enfoques pasivos para la estabilización de frecuencia de un resonador a lo largo de un intervalo de temperatura de funcionamiento.

10 Por ejemplo, un método de fabricación de un resonador micromecánico forma una estructura de viga y/o estructura(s) de soporte relacionada(s) de un primer material, y el electrodo, al menos en parte, de un segundo material. Cuando los materiales primero y segundo se seleccionan apropiadamente con coeficientes de dilatación térmica dispares, la dilatación relativa de estos componentes con la temperatura tenderá a ajustar de manera pasiva la distancia de trabajo entre la viga y el electrodo para variar una rigidez compensatoria aplicada a la viga, de tal manera que la frecuencia del resonador permanece sustancialmente estable a lo largo de un intervalo de temperatura recomendado.

15 Existen múltiples maneras de formar un electrodo que tiene un coeficiente de dilatación térmica eficaz que difiere del sustrato, la viga, y/o las estructuras de soporte para la viga. Pueden usarse brazos de palanca para ampliar los efectos de dilatación térmica dispar. Un electrodo y una viga pueden formarse a partir de una capa activa depositada sobre un sustrato de semiconductor. La capa activa tiene un primer coeficiente de dilatación térmica. Después de eso, el cuerpo del electrodo se modifica para incorporar un segundo material que tiene un coeficiente de dilatación
20 térmica diferente. Los materiales primero y/o segundo pueden seleccionarse de manera conveniente de un grupo de posibles materiales que incluyen; silicio, poli-silicio, epi-poli, LPCVD-poli, dióxido de silicio, germanio, compuestos de silicio y germanio, nitruros de silicio y carburo de silicio.

25 En aún otro conjunto de soluciones de compensación pasiva, un resonador micromecánico se forma sobre un sustrato del primer tipo de material. Una viga oscilante, estructura(s) de soporte relacionada(s) y/o un electrodo se forman después a partir de una capa activa de un segundo tipo de material. Pueden situarse anclajes para la(s) estructura(s) de soporte y el electrodo en diferentes posiciones laterales sobre el sustrato, de tal manera que la dilatación térmica relativa de estos componentes sobre el sustrato tenderán a ajustar la distancia de trabajo entre la viga y el electrodo para compensar de ese modo variaciones de frecuencia en las oscilaciones de la viga con la temperatura.

30 En otro aspecto estrechamente relacionado, se proporciona un resonador micromecánico, suspendido sobre un sustrato por medio de un anclaje. En un punto, el anclaje fija la viga al sustrato, pero el anclaje también incluye una estructura compuesta formada a partir de dos o más materiales que tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica. Cuando los materiales usados para formar el anclaje se seleccionan apropiadamente en relación con el material usado para formar el sustrato, la dilatación térmica relativa entre estos materiales puede usarse para aplicar
35 una deformación por compresión o tracción en la viga. Una deformación apropiada sobre la viga tiende a compensar variaciones de frecuencia inducidas térmicamente. Pueden incorporarse brazos de palanca en un diseño de resonador para ampliar la deformación por compresión o tracción aplicada a la viga.

Breve descripción de los dibujos

40 En el transcurso de la siguiente descripción detallada, se hará referencia a los dibujos adjuntos. Estos dibujos muestran diferentes aspectos de la presente invención y, cuando sea apropiado, los números de referencia que ilustran estructuras, componentes, materiales y/o elementos similares en diferentes figuras se marcan de manera similar. Se entiende que se contemplan diversas combinaciones de las estructuras, los componentes, materiales y/o elementos, distintas de las mostradas específicamente, y están dentro del alcance de la presente invención.

La figura 1 ilustra una estructura de viga de flexión convencional;

45 Las figuras 2A y 2B son vistas desde arriba de resonadores micromecánicos a modo de ejemplo que incluyen una viga oscilante lateral;

La figura 3 ilustra un mecanismo de extensión adaptado para ajustar la distancia de trabajo mostrada en la figura 2 según la presente invención,

Las figuras 4A, 4B, 5 y 6 ilustran electrodos compuestos a modo de ejemplo;

50 La figura 7 ilustra la incorporación adicional y el uso de un brazo de palanca;

Las figuras 8 y 9A-C ilustran el uso de anclajes compuestos y dispuestos lateralmente;

Las figuras 9D y 9E ilustran vistas en sección transversal de la realización de la figura 9C, en sección a lo largo de la línea de puntos a-a;

La figura 10 ilustra un resonador micromecánico adaptado para aplicar deformación por compresión o tracción sobre una estructura de viga; y

- 5 La figura 11 ilustra una realización a modo de ejemplo de la presente invención que incluye técnicas de compensación activa y pasiva de las figuras 3 y 4B.

Descripción detallada

10 La siguiente descripción presenta varias posibilidades de diseño, métodos, y/o estructuras mecánicas en el micromecanizado de superficies, mediante lo cual pueden remediarse cambios de frecuencia inducidos térmicamente en un resonador micromecánico. Según la presente invención, se prefieren enormemente materiales semiconductores compatibles en la fabricación de tales resonadores.

15 En la totalidad de la siguiente descripción, se presumen materiales semiconductores compatibles en los ejemplos de las enseñanzas. Este sesgo en los materiales es comprensible dado el énfasis actual en la integración CMOS de estructuras micromecánicas. Sin embargo, también pueden usarse materiales incompatibles con tales diseños, aunque con menos ventajas de diseño actuales. Los materiales compatibles no se limitan a silicio o composiciones basadas en silicio, sino que incluyen todos los materiales que pueden fabricarse mediante técnicas de circuitos integrados convencionales y/o integrarse sobre un sustrato de semiconductor. Tal como se prefiere actualmente, los resonadores pueden ser diferenciados o integrarse fácilmente en dispositivos MEMS más grandes y/o dispositivos que incluyen circuitos integrados (por ejemplo, conjuntos de circuitos CMOS).

20 En efecto, la presente invención elimina el coeficiente de temperatura del módulo de Young para el/los material(es) a partir del/de los que se forma un resonador. El término "resonador" abarca todas las estructuras que tienen, o que pueden tener, una vibración mecánica o electromecánica deseada. En los siguientes ejemplos, se forman resonadores a partir de estructuras de viga que tienen presuntamente secciones transversales rectangulares. Esta suposición se deriva del hecho obvio de que las explicaciones extraídas con una viga resonante que tiene una
25 sección transversal rectangular se entienden más fácilmente que estructuras de viga no rectangulares. Sin embargo, la presente invención no se limita a vigas resonantes que tienen secciones transversales rectangulares.

30 Tal como se comentó anteriormente, se sabe que la frecuencia de un resonador varía (o se desvía) en relación con la temperatura. Por tanto, se requiere de cierto mecanismo de compensación para mantener el resonador "en frecuencia" bajo la influencia de una temperatura de funcionamiento variable. Se proporciona preferiblemente compensación térmica por medio de la geometría de diseño, más que de parámetros de proceso. Además, se prefiere compensación térmica pasiva (o inherente) con respecto al control activo logrado mediante un circuito externo. Sin embargo, la presente invención puede aplicarse a soluciones de compensación térmica activa.

35 A continuación se describen varias realizaciones preferidas actualmente de la invención. Estas realizaciones son ejemplos que enseñan el uso y la preparación de la invención. Sin embargo, son sólo ejemplos y no determinan completamente los límites de la presente invención que está definida por las siguientes reivindicaciones.

Ha de recordarse a partir de la ecuación 2 anterior que la frecuencia de un resonador, en ausencia del efecto de fuerzas electrostáticas, puede definirse en relación con su rigidez mecánica, k_M . Para mantener una frecuencia constante, independientemente de la temperatura, es necesario compensar las variaciones inevitables en la frecuencia del resonador.

40 En un aspecto de la presente invención, se aplica una rigidez compensatoria al resonador para contrarrestar cambios de frecuencia inducidos térmicamente. El término "rigidez compensatoria" implica ampliamente cualquier fuerza correctora aplicada al resonador. A diferencia de la rigidez mecánica, que se deriva de la composición interna del resonador, la rigidez compensatoria resulta de una fuerza externa aplicada a la forma física del resonador.

45 Por ejemplo, puede usarse una fuerza electrostática como rigidez compensatoria en el resonador. La fuerza electrostática, F_{el} , entre un electrodo y una viga oscilante puede expresarse como:

$$F_{el} = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot \frac{A}{(d-x)^2} U^2 \quad \text{ECUACIÓN 6}$$

donde ϵ es la constante dieléctrica, A es el área entre la viga y el electrodo, d es la distancia entre la viga y el electrodo, x es la deflexión debida a oscilación, y U es el voltaje aplicado.

Cuando la deflexión debida a oscilación es insignificante, la rigidez electrostática compensatoria puede expresarse como:

$$k_{el} = \frac{dF_{el}}{dx} = \epsilon \cdot A \cdot \frac{1}{d^3} U^2 \quad \text{ECUACIÓN 7}$$

5 Expresada en los términos de la ecuación 2 anterior, la frecuencia de un resonador tal como se define mediante su rigidez mecánica y una rigidez electrostática aplicada externamente puede expresarse como:

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k_M - k_{el}}{m}} \quad \text{ECUACIÓN 8}$$

10 Examinando las ecuaciones 7 y 8, resulta evidente que las variaciones inducidas por la temperatura en la rigidez mecánica, y por tanto la frecuencia de resonancia, pueden equilibrarse o compensarse mediante una variación igual en la rigidez electrostática. Dados valores fijos para la constante dieléctrica y el área de campo, pueden efectuarse cambios en la rigidez electrostática compensatoria cambiando el voltaje U aplicado o cambiando la distancia de trabajo entre la viga y el electrodo.

15 Por tanto, caracterizado ampliamente dentro de un método de un compensación activa, un aspecto de la presente invención puede resumirse como (1) determinar una frecuencia de funcionamiento real para el resonador, y (2) aplicar, según sea necesario, una rigidez compensatoria a la viga, de tal manera que se mantenga una frecuencia de resonancia deseada a lo largo de un intervalo de temperatura de funcionamiento. La etapa de determinar la temperatura de funcionamiento real puede lograrse mediante uno cualquiera de varios circuitos de realimentación convencionales midiendo directamente la frecuencia del resonador, o determinando indirectamente la frecuencia de funcionamiento en relación con otro parámetro medido, tal como la temperatura. En muchos casos, tales datos pueden existir ya dentro del uso contemplado del resonador y pueden usarse ventajosamente con un fin de compensación de temperatura de resonador.

25 Este concepto puede entenderse mejor considerando el ejemplo ilustrado en las figuras 2A y 2B. Una viga 1 oscilante está soportada en la figura 2A en extremos opuestos por estructuras 7 y 8 de soporte que se fijan al sustrato 3 y que tienen una altura de L1. Un electrodo 2 que tiene una altura L2 también está formado en el sustrato 3 próximo a la viga 1 y que ejerce una fuerza electrostática sobre la viga 1 a lo largo de la distancia de trabajo d (figuras 2A y 2B).

30 Debe observarse que el término "altura" es una designación arbitraria en relación con el ejemplo rectangular ilustrado por la vista desde arriba mostrada en las figuras 2A y 2B, y sirve meramente para definir un eje de orientación ortogonal diferente de la "longitud" y "anchura" del resonador.

35 Las estructuras 7 y 8 de soporte, el electrodo 2 y el resonador 1 están formados todos preferiblemente a partir de material basado en silicio, compatible con CMOS. Estos componentes pueden formarse a partir de una capa activa depositada sobre un sustrato de semiconductor, o a partir de capas depositadas por separado. El término "depositado" describe meramente la colocación de una capa activa sobre el sustrato. No es específico del procedimiento o la técnica de fabricación.

40 Las estructuras 7 y 8 de soporte, el electrodo 2 y la viga 1 se dilatarán (y contraerán) según el coeficiente de dilatación térmica para el/los material(es) de su composición. Por ejemplo, se supone que las estructuras 7 y 8 de soporte se dilatan alejándose del punto en el que se fijan al sustrato, es decir, en la dirección del vector 10 mostrado en la figura 2. Se supone que el electrodo 2 se dilata en la dirección del vector 11. Aunque se muestra que los vectores 10 y 11 de dilatación térmica coinciden de manera direccional en el ejemplo de la figura 2, no es necesario que esto sea siempre el caso. Sin embargo, incluso cuando los vectores de dilatación para estos componentes tienen la misma dirección, la magnitud de dilatación puede controlarse mediante la selección (o alteración) cuidadosa de los materiales de composición.

Dentro del contexto del ejemplo de trabajo, pueden manipularse los siguientes parámetros durante el diseño para

- lograr la compensación de temperatura durante el funcionamiento del resonador: (a) la razón entre la altura de la estructura de soporte L1 y la altura del electrodo L2; (b) la razón entre un (primer) coeficiente de dilatación térmica para el material usado para implementar las estructuras 7 y 8 de soporte, y un (segundo) coeficiente de dilatación térmica para el material usado para implementar el electrodo 2; y, (c) la distancia a través de la distancia de trabajo.
- 5 Adicionalmente, el voltaje U aplicado puede variarse en relación con la temperatura durante el funcionamiento del resonador para compensar cambios de frecuencia inducidos por la temperatura. Naturalmente, diferentes geometrías de resonador producirán diferentes parámetros y relaciones entre componentes que pueden manipularse para efectuar la compensación térmica de frecuencia.
- Además de las soluciones de compensación activa comentadas, pueden ajustarse de manera pasiva los parámetros (a) a (c) anteriores durante el funcionamiento mediante, por ejemplo, una selección cuidadosa de materiales de composición dispar usados para implementar, respectivamente, las estructuras de soporte y el electrodo. El término “pasiva” (o de manera pasiva) tal como se usa en el presente documento se refiere a un procedimiento, método o adaptación en el que se cambian uno o más parámetros bajo la influencia de cambios (por ejemplo, dilatación térmica) en uno o más componentes internos en el diseño. Los ajustes pasivos son distintos de los ajustes “activos” que requieren la aplicación de una influencia o fuerza derivada externamente.
- 10
- 15
- Volviendo a la relación entre frecuencia, rigidez mecánica, k_M , y la rigidez electrostática compensatoria k_{el} descrita en la ecuación 8, queda claro que cualquier aumento de k_M debe hacerse coincidir mediante un aumento equivalente (o casi equivalente) de k_{el} para que la frecuencia f permanezca estable. Tal como se indica en la ecuación 1, la rigidez mecánica, k_M , para un resonador formado a partir de un material basado en silicio aumentará en relación con un aumento de su módulo de Young, E. Para compensar este aumento de k_M , debe derivarse una k_{el} aumentada.
- 20
- Examinando de nuevo la ecuación 7 y suponiendo una constante dieléctrica fija, ϵ , y un área de campo, A, puede aumentarse k_{el} aumentando el voltaje aplicado, U, y/o reduciendo la distancia de trabajo, d, entre el resonador y el electrodo. Aumentar el voltaje U aplicado es una solución activa sencilla. Un circuito de realimentación convencional (no mostrado en la figura 2) puede implementarse en relación con el resonador. Basándose en un circuito de realimentación de temperatura detectada, puede ajustarse el voltaje U aplicado para compensar cualquier variación razonable de temperatura.
- 25
- La figura 2 supone un electrodo 2 fijado al sustrato 3. Sin embargo, si el electrodo puede moverse con respecto a la viga 1, entonces la distancia de trabajo puede reducirse (o aumentarse) de una manera activa, controlada usando un circuito de realimentación que detecta la temperatura o la frecuencia de funcionamiento real del resonador. Tal como se muestra en la figura 3, puede usarse un mecanismo 12 de extensión, tal como un muelle de tensión, un elemento de soporte rígido o un actuador térmico (por ejemplo, un actuador que calienta la viga/estructura de brazo de palanca mediante una corriente aplicada), para conectar el electrodo 2 con el sustrato 3. El mecanismo 12 de extensión puede estimularse eléctrica o mecánicamente mediante un elemento 14 de accionamiento asociado. Usando uno cualquiera de estos mecanismos a modo de ejemplo, o similares, puede ajustarse la distancia de trabajo entre el electrodo 2 y la viga 1 en respuesta a un aumento de la temperatura de funcionamiento, aumentando de ese modo (o disminuyendo según sea apropiado) la rigidez electrostática aplicada a la viga 1 por el electrodo 2. Mediante la comparación cuidadosa de los coeficientes de dilatación térmica y el cálculo de un intervalo de rigidez electrostática a lo largo de un intervalo de temperatura de funcionamiento esperado, pueden paliarse de manera activa los efectos del cambio de temperatura sobre la frecuencia del resonador.
- 30
- 35
- La compensación de temperatura activa es atractiva por su capacidad de adaptarse en tiempo real a variaciones de temperatura. Sin embargo, los esquemas de compensación activa tienen como contrapartida ciertos costes complementarios adicionales significativos en forma de elementos de accionamiento y/o mecanismos de extensión. Por tanto, en muchas aplicaciones es deseable una solución de compensación de temperatura pasiva.
- 40
- La figura 4A ilustra otro ejemplo de una compensación de temperatura pasiva. En la figura 4A, el mecanismo de extensión y/o el elemento de accionamiento de la figura 3 se sustituye(n) por un pedestal 21 que conecta el electrodo 20 al sustrato 3. Mediante la selección cuidadosa del material de composición para el pedestal 21 y el electrodo 20, en relación con el material de composición usado para formar las estructuras 7 y 8 de soporte, puede ajustarse la distancia de trabajo entre la viga y el electrodo mediante el efecto relativo, calculado de la dilatación térmica sobre materiales que tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica.
- 45
- En la misma línea, el ejemplo ilustrado en la figura 4B comprende un electrodo 22 formado a partir de dos (o más) materiales 23 y 24 de composición que tienen coeficientes de dilatación térmica dispares. La variedad real de materiales de composición es bastante amplia, incluyendo, como ejemplos, poli-silicio (LPCVD-poli, epi-poli, etc.), silicio monocristalino usando obleas de SOI, silicio-germanio que tienen múltiples razones Si/Ge, óxidos de silicio (por ejemplo, SiO_2), nitruros de silicio (por ejemplo, Si_3N_4) y carburo de silicio (SiC) de diversos tipos.
- 50
- En el ejemplo mostrado en la figura 4B, el electrodo 22 puede formarse a partir de un cuerpo 23 de epi-poli que se ha vaciado por el centro, relleno con SiO_2 , 24, y rematado de nuevo por epi-poli. Puesto que el SiO_2 tiene un
- 55

coeficiente de dilatación térmica significativamente menor (0,5 ppm frente a 2,5 ppm para epi-poli), la introducción de SiO₂ en el cuerpo del electrodo 22 reducirá el coeficiente de dilatación térmica global del electrodo 22. En este ejemplo, se requiere una cubierta externa de epi-poli puesto que el electrodo debe ser de superficie conductora. Dada la dificultad relativa de la formación de capas gruesas de SiO₂ sin grietas, el electrodo 22 se forma preferiblemente usando surcos vaciados de manera estrecha (por ejemplo, grabados) rellenos posteriormente con SiO₂, o depositando múltiples capas de SiO₂ dentro de una cavidad vaciada en el cuerpo de electrodo de epi-poli.

En el ejemplo relacionado mostrado en la figura 5, una viga 1 oscilante lateral se fija por cualquier extremo mediante soportes 7 y 8 respectivos unidos a anclajes 7A y 8A del sustrato. El electrodo 28 se fija al sustrato mediante el anclaje 28A. En este ejemplo, se supone que la viga 1, los soportes 7 y 8, los anclajes 7A y 8A de soporte se forman a partir de una capa de epi-poli depositada sobre el sustrato. El electrodo 28 también se forma a partir de epi-poli, pero se vacían partes del electrodo (por ejemplo, se eliminan mediante uno o más procesos de grabado convencionales), y se rellenan entonces con un segundo material 28B, por ejemplo SiO₂. Suponiendo que el segundo material es en efecto SiO₂, el electrodo 28 resultante tendrá un coeficiente de dilatación térmica relativamente menor en comparación con los componentes formados a partir de epi-poli (por ejemplo, la viga, los soportes y los anclajes). El electrodo 28 tendrá un coeficiente de dilatación térmica relativamente mayor si se seleccionara el segundo material (relleno) de un grupo de materiales que tienen un coeficiente de dilatación térmica mayor que epi-poli. Por ejemplo, el germanio tiene un coeficiente de dilatación térmica de 4,5 ppm. Las partes vaciadas, en forma de rejilla del electrodo funcionan bien para el relleno con SiO₂, pero son sólo un ejemplo estructural de un electrodo que tiene un coeficiente de dilatación térmica manipulado de manera cuidadosa.

La figura 6 es una vista en sección transversal de la estructura del resonador mostrada en la figura 5. Cuando SiO₂ es el material de relleno deseado, debe protegerse frente a la liberación de HF de la estructura activa por medio de, por ejemplo, una capa 30 de nitruro de silicio.

Los ejemplos anteriores han descrito estructuras de electrodo formadas a partir de al menos un material adicional (secundario) que tiene un coeficiente de dilatación térmica diferente del coeficiente de dilatación térmica de un (primer) material primario que forma los otros componentes asociados en una estructura de resonador. Sin embargo, alteraciones similares de las estructuras de soporte, los anclajes y/o la viga de manera similar también se contemplan. No es necesario que uno cualquiera de estos componentes esté formado a partir de una combinación de materiales, relleno o combinado de otro modo. Más bien, pueden usarse materiales que tienen coeficientes de dilatación térmica dispares para formar componentes respectivos en un resonador. Por ejemplo, la viga, las estructuras de soporte y los anclajes podrían formarse a partir de epi-poli y el electrodo a partir de germanio.

Adicionalmente, la dirección y magnitud de la dilatación relativa de componentes para realizar un ajuste de la distancia de trabajo pueden ampliarse mediante el uso de uno o más brazos de palanca. La figura 7 ilustra un ejemplo de tal uso. Un brazo 38 de palanca se mueve para ajustar la distancia de trabajo entre el electrodo 40 y la viga 1. La dirección de movimiento del brazo 38 de palanca se controla mediante la diferencia de dilatación térmica (vectores 10 y 11) entre un primer soporte 31 y un segundo soporte 32, en el que el segundo soporte 32 es el punto de apoyo para el brazo 38 de palanca. La magnitud de este movimiento se controla mediante la diferencia de dilatación térmica y mediante la razón de longitud a (una primera longitud) y longitud b (una segunda longitud) a lo largo del brazo de palanca.

También pueden usarse ubicaciones de anclaje relativas sobre un sustrato para ajustar una distancia de separación entre un electrodo y la viga. Puede lograrse este resultado considerando durante el proceso de diseño los diferentes coeficientes de dilatación térmica entre el sustrato y una o más capas activas depositadas sobre el sustrato. Este enfoque se ilustra en la figura 8.

En este caso, un electrodo 29 está separado de la viga 1 por una distancia de trabajo. El electrodo 29 se fija al sustrato en el anclaje 29A. En cambio, los soportes 7 y 8 fijan la viga 1 al sustrato en respectivos anclajes 7A y 8A. Suponiendo, como ejemplos, que el sustrato es silicio sobre zafiro (SOS) y la capa activa es epi-poli, la distancia lateral L3 entre los respectivos anclajes, tal como se mide en la dirección de dilatación térmica para la viga, ajustará la distancia de trabajo a lo largo de un intervalo de temperaturas de funcionamiento.

La composición de anclaje relativa también puede usarse para efectuar la compensación térmica de variaciones de frecuencia de viga con resonancia. Reconociendo que la deformación por compresión tiende a disminuir la frecuencia resonante de una viga y la deformación por tracción tiende a aumentar la frecuencia resonante, pueden usarse anclajes que tienen un coeficiente de dilatación térmica diferente del sustrato para inducir una deformación por compresión o tracción en la viga. Este enfoque se ilustra en las figuras 9A y 9B.

En este caso, una viga 1 de flexión (o suspendida) está soportada sobre el sustrato 3 por anclajes 50 y 52. Formando anclajes a partir de dos o más materiales que tienen en combinación un coeficiente de dilatación térmica diferente del del sustrato, puede ejercerse una deformación por compresión o tracción en la viga 1. Como anteriormente, el sustrato 3 puede formarse a partir de muchos materiales convencionales incluyendo, sin limitación, silicio y germanio.

5 Los anclajes 50 y 52 se fijan respectivamente al sustrato 3 en partes 50A y 52A de anclaje. Los anclajes compuestos pueden formarse, por ejemplo, mediante relleno de SiO₂ en partes vaciadas selectivamente de un cuerpo de anclaje de epi-poli. Esto daría como resultado anclajes 50 y 52 compuestos que tienen un menor coeficiente de dilatación térmica global con respecto a una viga de epi-poli y/o un sustrato basado en silicio. La longitud de los anclajes compuestos, L4, tal como se mide entre un punto de anclaje y la viga, proporciona efecto de palanca para la deformación por compresión o tracción aplicada a la viga 1 mediante la dilatación térmica dispar de los materiales seleccionados.

10 La composición de viga relativa también puede usarse para efectuar la compensación térmica de variaciones de frecuencia de viga con resonancia. A este respecto, con referencia a las figuras 9C y 9D, la viga 1 puede componerse de una pluralidad de materiales 1 a y 1 b (por ejemplo, silicio, germanio, óxido de silicio y/o nitruro de silicio) que tienen diferentes coeficientes de dilatación térmica de dilatación. Por ejemplo, la viga 1 puede componerse de un núcleo interno de silicio y una capa externa de óxido de silicio. Alternativamente, la viga 1 puede componerse de silicio, germanio y dióxido de silicio (1 a, 1 b, 1 c, respectivamente, véase la figura 9E). En efecto, puede emplearse cualquiera de los materiales comentados en el presente documento (u otros materiales) para componer la viga 1.

15 También puede incorporarse lo ilustrado en la figura 9C a las soluciones ilustradas en las figuras 9A y 9B. A este respecto, la viga 1 puede componerse de una pluralidad de materiales, teniendo cada uno diferentes coeficientes térmicos de dilatación y los anclajes 50 y/o 52 se componen de dos o más materiales que tienen en combinación un coeficiente de dilatación térmica diferente del del sustrato.

20 Los anclajes 61 y 62 compuestos se combinan en la figura 10 con brazos 60A y 60B de palanca y la barra 64 de compresión/dilatación para ejercer una fuerza de tracción o compresión en la viga 1 resonante. Es decir, seleccionando materiales de composición que tienen coeficientes de dilatación térmica dispares para los anclajes 61 y 62, la barra 64 de compresión/dilatación, la viga 1 y/o el sustrato 3, puede aplicarse una deformación por compresión o tracción apropiada a la viga 1 para compensar variaciones de frecuencia inducidas por la temperatura.

25 En la totalidad de la divulgación anterior, se han usado estructuras de viga de flexión o viga oscilante lateral seleccionadas como ejemplos. Sin embargo, los esquemas de compensación de frecuencia así ilustrados no se limitan a las estructuras a modo de ejemplo, sino que tienen aplicación en todas las vigas útiles en MEMS. Además, se han sugerido diversos materiales para la composición de los componentes a modo de ejemplo. De nuevo, estos son meramente ejemplos preferidos actualmente. Así, siempre que se diseñen y fabriquen apropiadamente los componentes del resonador con materiales que tienen coeficientes de dilatación térmica suficientemente dispares, pueden lograrse las soluciones de compensación de frecuencia pasiva y/o activa enseñadas en el presente documento.

35 Además, las técnicas pasivas y las técnicas activas descritas e ilustradas en el presente documento también pueden combinarse o integrarse para proporcionar una solución que emplea técnicas de compensación tanto activa como pasiva. Por ejemplo, las realizaciones de la figura 3 y la figura 4A y/o 4B pueden integrarse para proporcionar un enfoque tanto pasivo como activo (véase, por ejemplo, la figura 11).

40 En la totalidad de esta solicitud, los términos “compensación” y “compensar” (o términos similares) se usan para indicar un procedimiento corrector mediante el que se aborda y/o se mejora un factor o componente principal de las condiciones que influyen de manera adversa en la estabilidad del resonador. Otros problemas, e incluso problemas relacionados con la dilatación térmica, tales como cambios en geometrías (por ejemplo, altura y/o anchura) pueden ser menos significativos en el impacto global sobre la compensación. Además, el enfoque en el presente documento puede ser muy adecuado para abordar, compensar y/o mejorar condiciones que influyen de manera adversa en la estabilidad del resonador a lo largo de un intervalo finito de variaciones de temperatura (por ejemplo, un intervalo de temperatura predeterminado).

REIVINDICACIONES

- 5 1. Método de compensación de variaciones de frecuencia inducidas térmicamente en un resonador microelectromecánico que tiene una frecuencia de resonancia deseada, en el que el resonador microelectromecánico comprende una viga (1) oscilante y un contraelectrodo (2), y en el que la viga (1) oscilante está separada del contraelectrodo (2) por una distancia de trabajo (d), comprendiendo el método: determinar la frecuencia de funcionamiento real del resonador micromecánico; y aplicar una rigidez compensatoria a la viga (1) oscilante en relación con la frecuencia de funcionamiento real y la frecuencia de resonancia deseada de modo que el resonador proporciona la frecuencia de resonancia deseada a lo largo de un intervalo de temperaturas, en el que aplicar una rigidez compensatoria incluye aplicar una fuerza electrostática a la viga (1) oscilante mediante el
 10 contraelectrodo (2), y en el que aplicar la fuerza electrostática a la viga (1) comprende además: mover el contraelectrodo (2) en relación con la viga (1) oscilante para ajustar la distancia de trabajo en relación con la frecuencia de funcionamiento real del resonador,
- caracterizado porque mover el contraelectrodo comprende además: mover físicamente el contraelectrodo (2) en relación con la viga (1) oscilante usando un mecanismo de extensión mecánico.
- 15 2. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque aplicar una rigidez compensatoria incluye además aumentar la distancia de trabajo (d) entre la viga (1) oscilante y el contraelectrodo (2).
3. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque aplicar una rigidez compensatoria incluye además disminuir la distancia de trabajo (d) entre la viga (1) oscilante y el contraelectrodo (2).
- 20 4. Método según la reivindicación 1, caracterizado porque aplicar la fuerza electrostática comprende además cambiar el voltaje aplicado al contraelectrodo (2).
5. Método según la reivindicación 4, caracterizado porque determinar la frecuencia de funcionamiento real comprende además: medir al menos una de la frecuencia del resonador y la temperatura de funcionamiento del resonador; y en el que cambiar el voltaje aplicado al contraelectrodo (2) va en relación con la al menos una de la frecuencia del resonador y la temperatura de funcionamiento.
- 25 6. Método según la reivindicación 4, caracterizado porque aplicar la fuerza electrostática incluye además aumentar el voltaje aplicado al contraelectrodo (2).
7. Método según la reivindicación 4, caracterizado porque aplicar la fuerza electrostática incluye además disminuir el voltaje aplicado al contraelectrodo (2).
- 30 8. Método según la reivindicación 4, caracterizado porque determinar la frecuencia de funcionamiento real comprende además medir la frecuencia del resonador y en el que cambiar el voltaje aplicado al contraelectrodo (2) va en relación con la frecuencia del resonador.
9. Método según la reivindicación 4, caracterizado porque determinar la frecuencia de funcionamiento real comprende además medir la temperatura de funcionamiento del resonador y en el que cambiar el voltaje aplicado al contraelectrodo (2) va en relación con la temperatura de funcionamiento del resonador.

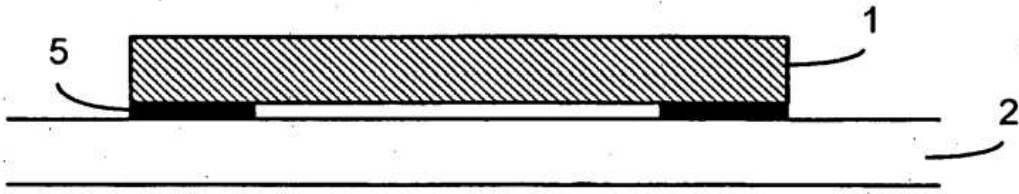


FIGURA 1
(Técnica anterior).

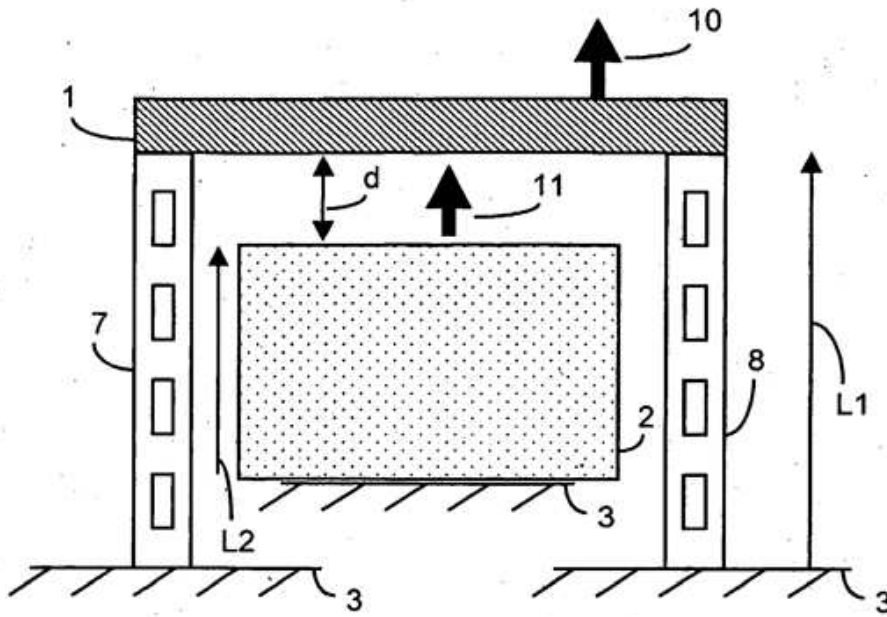


FIGURA 2A

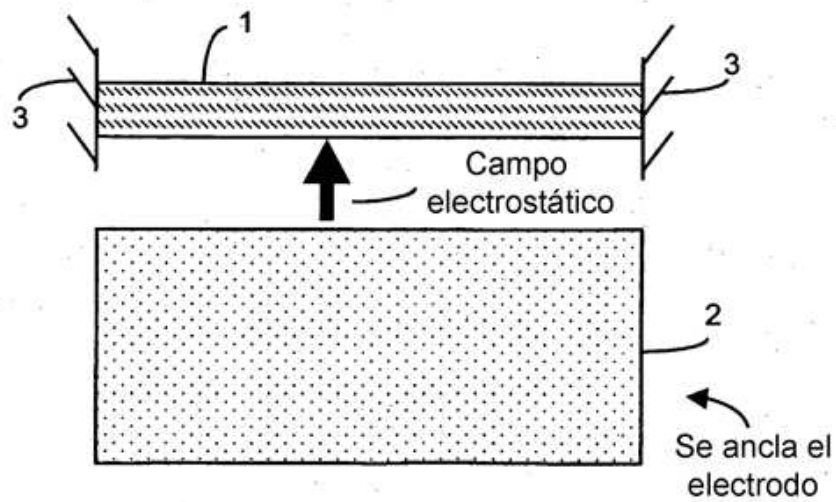


FIGURA 2B

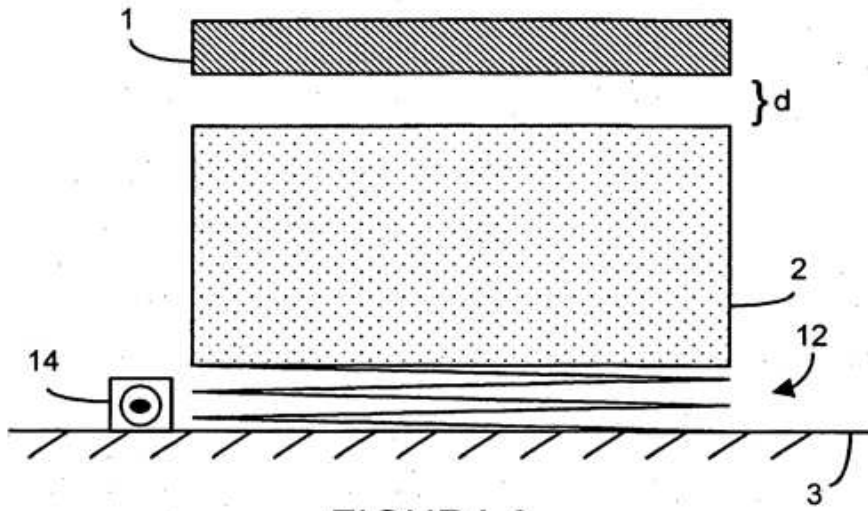


FIGURA 3

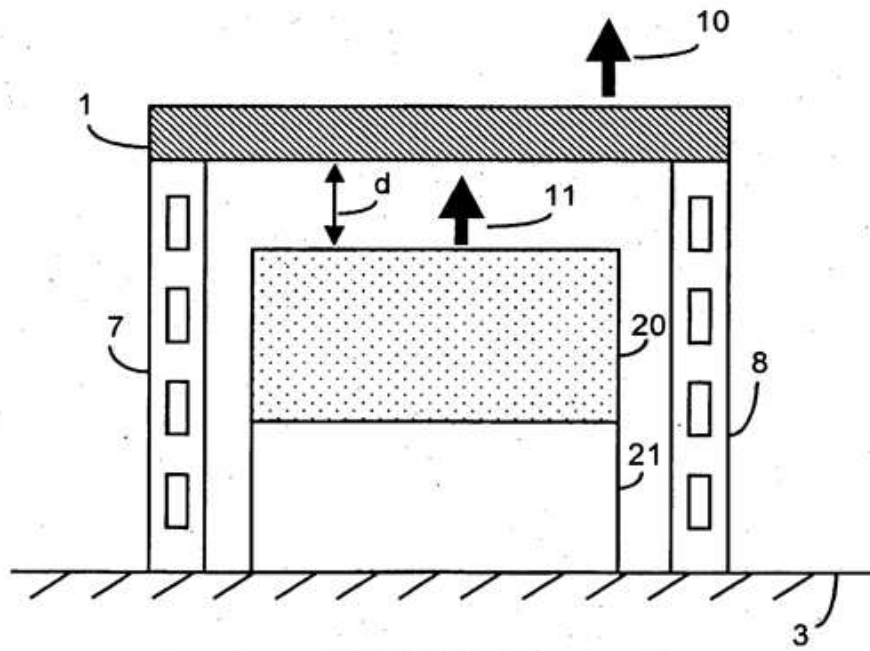


FIGURA 4A

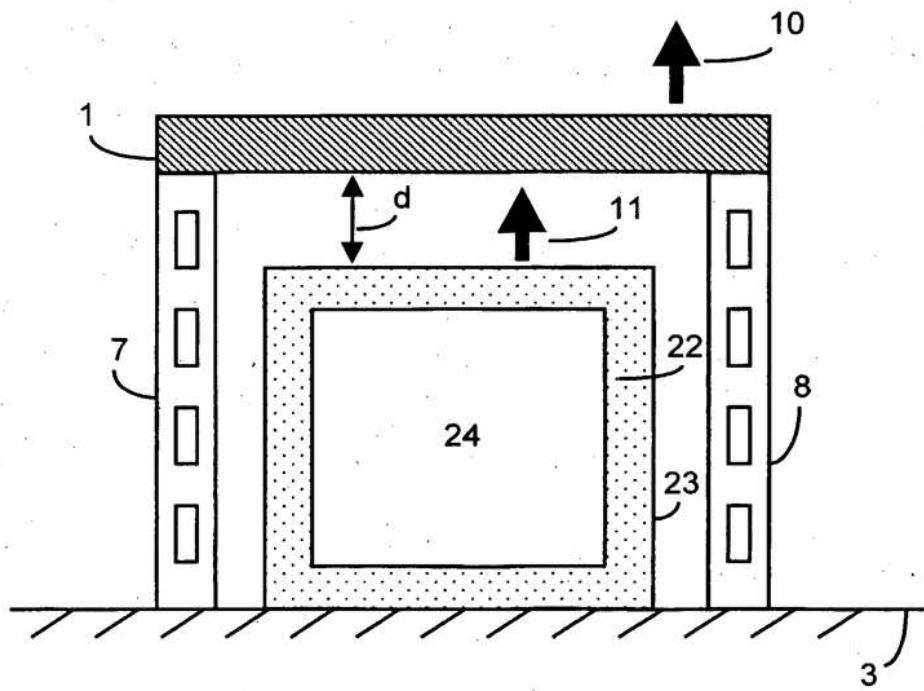
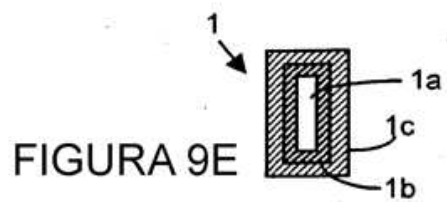
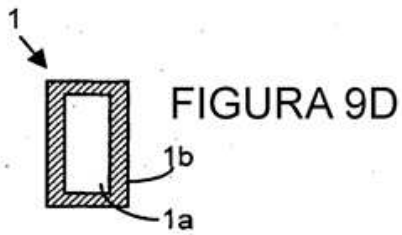
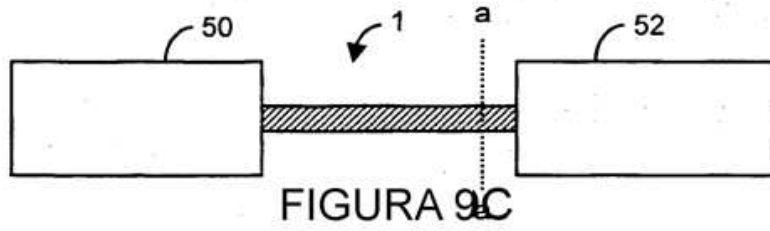
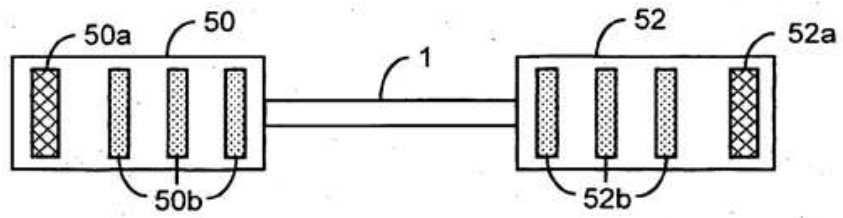
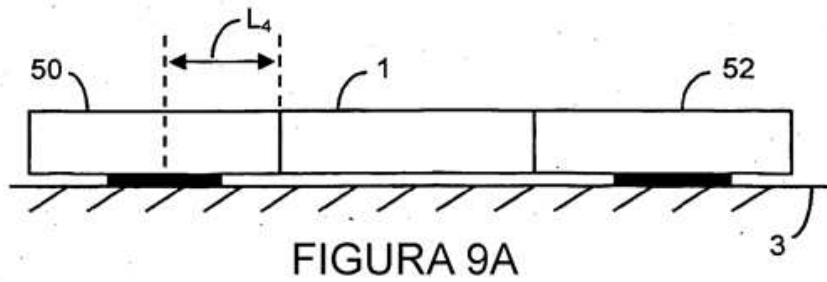


FIGURA 4B



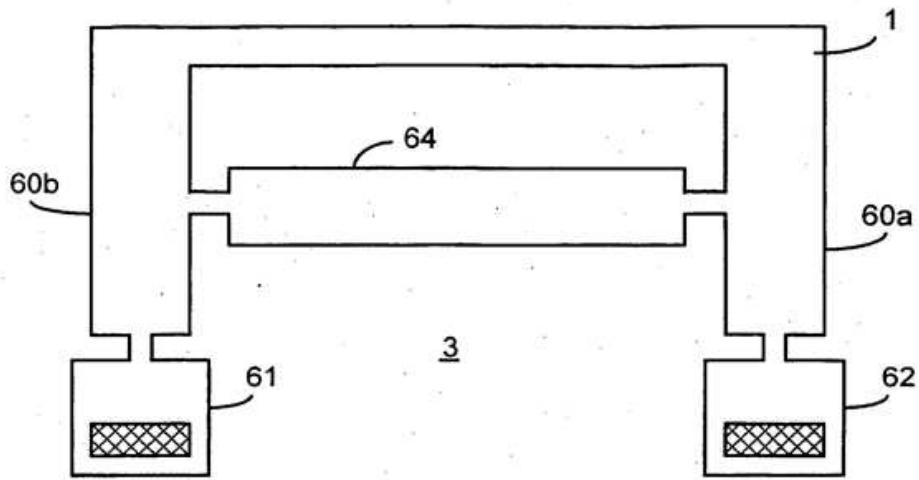


FIGURA 10

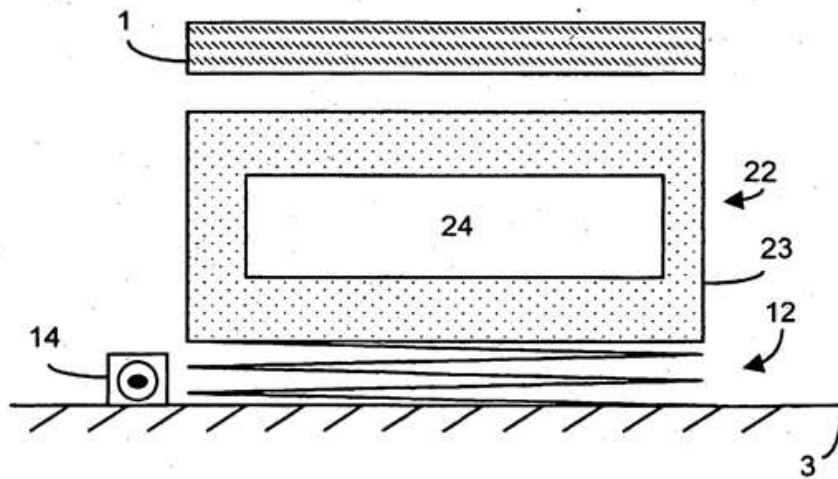


FIGURA 11

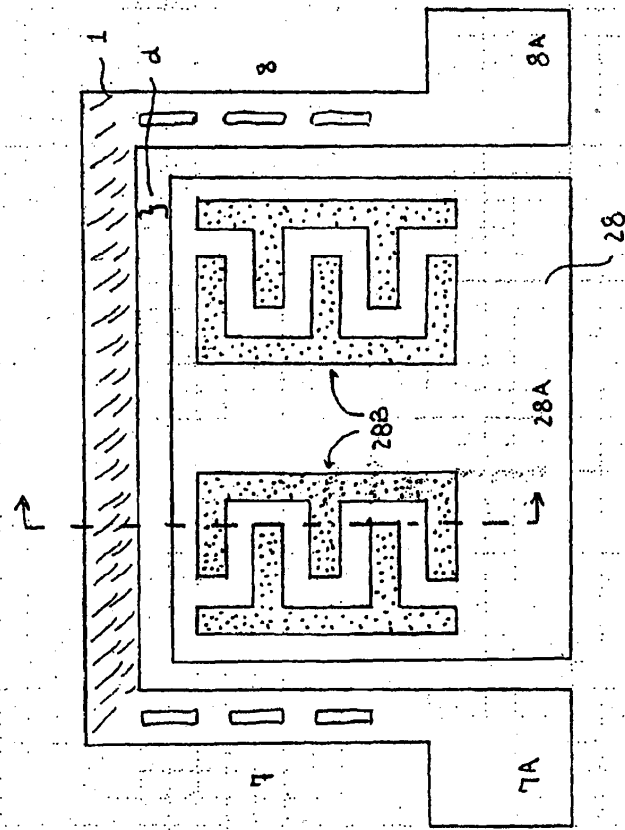


FIGURA 5

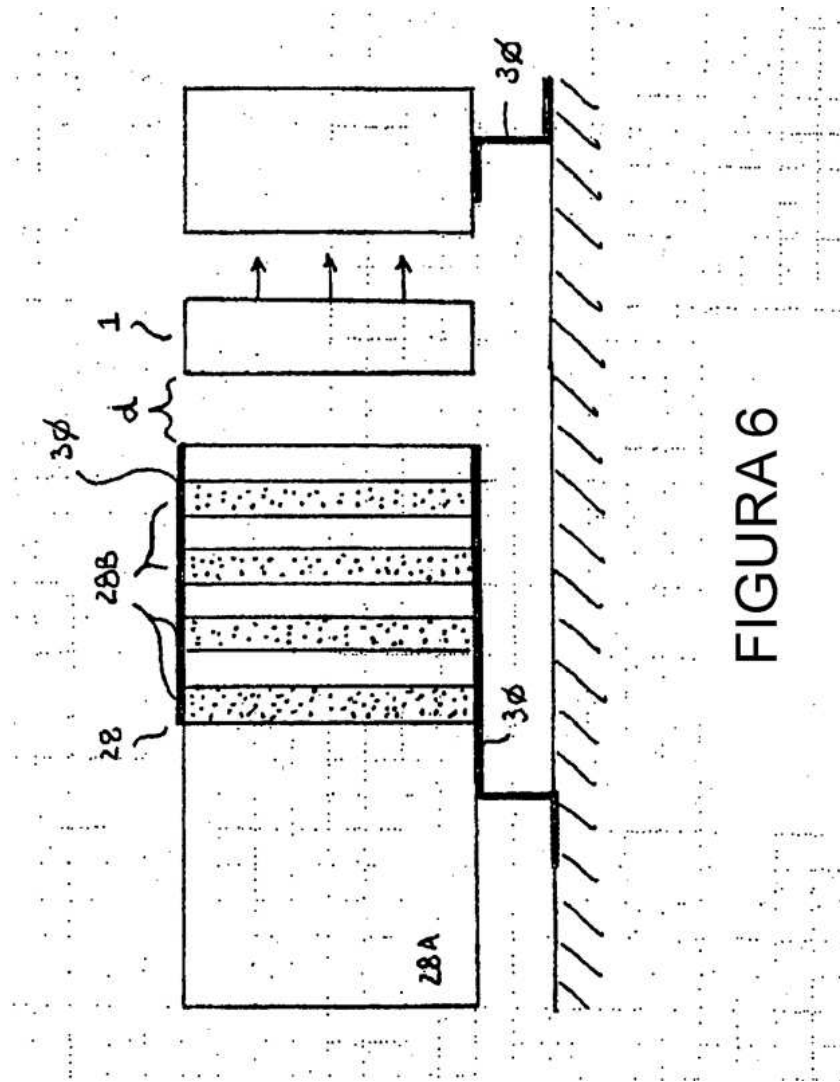


FIGURA 6

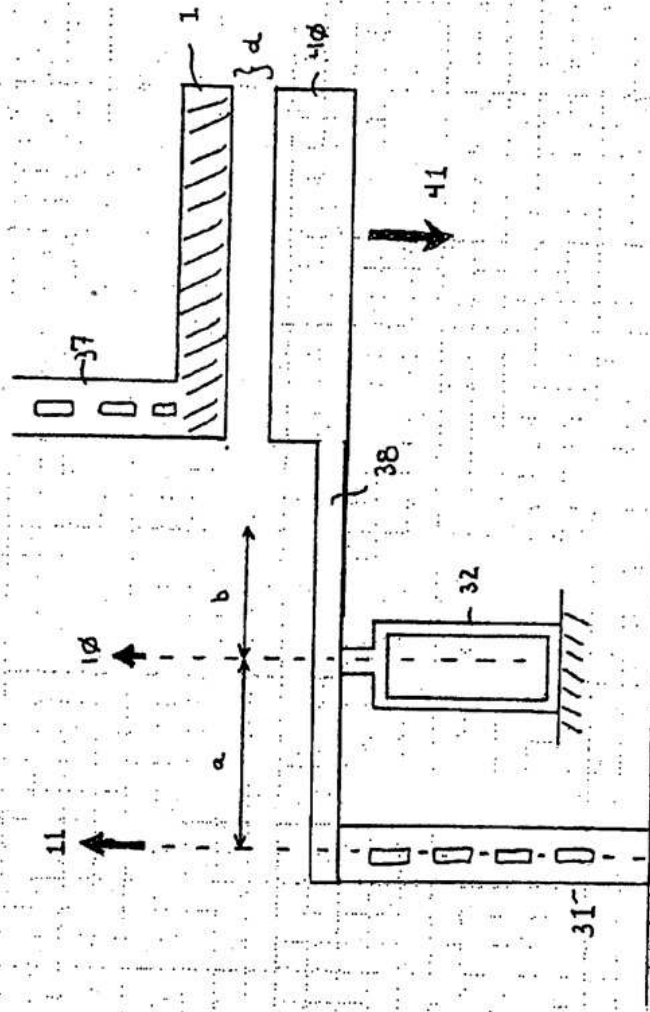


FIGURA 7

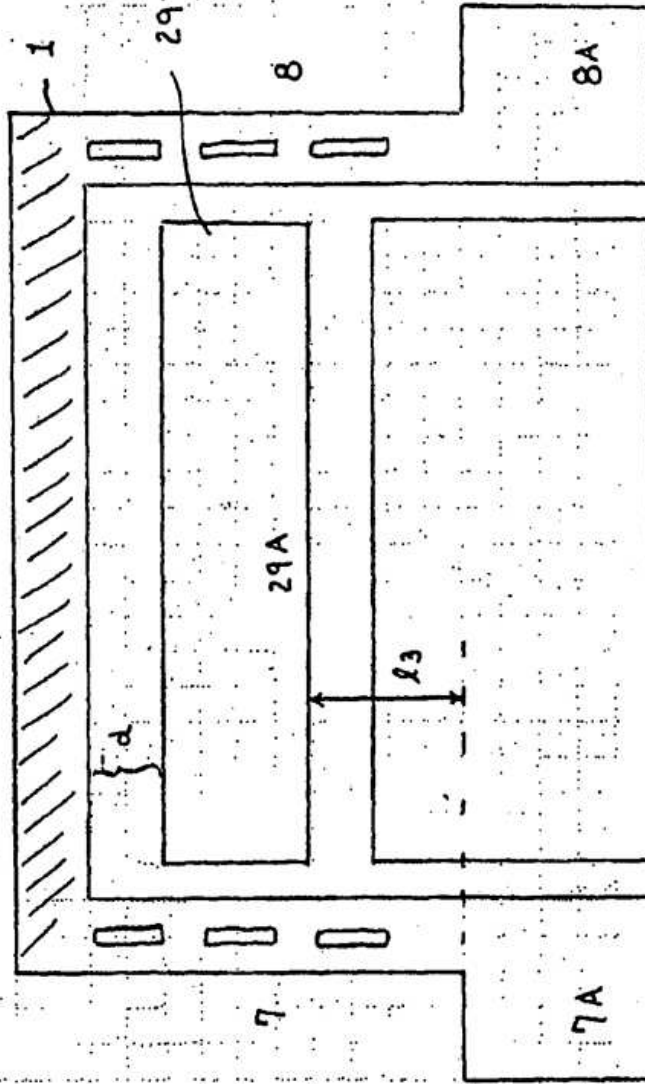


FIGURA 8