

OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: **2 245 614**

② Número de solicitud: 200501297

⑤ Int. Cl. 7: **G01D 5/14**
G01P 15/125
G01R 1/30

⑫

SOLICITUD DE PATENTE

A1

② Fecha de presentación: **25.05.2005**

④ Fecha de publicación de la solicitud: **01.01.2006**

④ Fecha de publicación del folleto de la solicitud:
01.01.2006

⑦ Solicitante/s: **Universitat Autònoma de Barcelona**
Àrea I+D – Edif. A - Campus Univ. s/n
08193 Bellaterra, Barcelona, ES

⑦ Inventor/es: **Verd Martorell, Jaume;**
Barniol Beumala, Nuria;
Abadal Berini, Gabriel;
Uranga del Monte, Arantxa;
Teva Meroño, Jordi y
Villarroya Gaudó, María

⑦ Agente: **No consta**

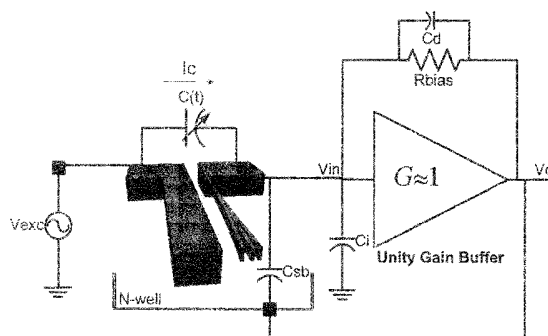
⑤ Título: **Sistema de lectura para un elemento transductor mecánico.**

⑤ Resumen:

Sistema de lectura para un elemento transductor mecánico.

Sistema de lectura para un elemento transductor mecánico que comprende medios de amplificación de tensión que definen un nodo de entrada (V_{in}) y un nodo de salida (V_o), en cuyo nodo de entrada (V_{in}) se conecta la salida del transductor y los medios de amplificación amplifican la tensión en el nodo de entrada (V_{in}) que corresponde a la tensión en la salida del elemento transductor, y medios (R_{bias}) de polarización de dichos medios de amplificación, estando conectados los medios (R_{bias}) de polarización entre el nodo de entrada (V_{in}) y el nodo de salida (V_o) de los medios de amplificación, para polarizar el nodo de entrada (V_{in}) conectándolo al nodo de salida (V_o).

FIG.3



ES 2 245 614 A1

DESCRIPCIÓN

Sistema de lectura para un elemento transductor mecánico.

5 La presente invención se refiere a un sistema de lectura para un elemento transductor mecánico, y más concretamente, a un sistema de lectura de muy alta sensibilidad para resonadores mecánicos monolíticos.

Antecedentes de la invención

10 En la actualidad existe un gran interés en el desarrollo de sistemas de lectura de sensores, de muy alta sensibilidad. Ejemplos de sistemas microelectromecánicos (MEMS) comprenden sensores para detectar diferentes tipos de propiedades físicas o químicas [O. Brand, H. Baltes. *Micromachined resonant sensors. An overview. Sensors, vol.4, Wiley-VCH (1998)*]. Los sensores MEMS “físicos” se basan en un elemento que transduce la magnitud física a detectar (e.g. masa, aceleración, presión, carga eléctrica, etc.) en una señal eléctrica. En los sensores “químicos” o “bioquímicos” el compuesto o la molécula que quiere detectarse es absorbida selectivamente por el elemento transductor, gracias a la previa funcionalización de su superficie mediante una capa de un material que “atrapa” la molécula a medir. Cuando se produce este atrapamiento, la masa de la molécula que se deposita es detectada por el sensor.

20 Una mayor reducción de las dimensiones del elemento transductor mecánico lleva a una nueva generación de sistemas llamados nanoelectromecánicos (NEMS), que representan una mejora en la sensibilidad, la resolución espacial, la eficiencia energética y la respuesta temporal. Dichos sistemas NEMS se encuentran descritos, por ejemplo, en [M.L.Roukes. *Nanoelectromechanical systems. Technical Digest of the 2000 Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Isl., SC, 6/4-8/2000 (ISBN 0- 9640024-3-4)*], [H. G. Craighead, *Nanoelectromechanical Systems. Science, vol. 290, 1532-1535 (2000)*] o [R.Berger, Ch.Gerber, H. P. Lang, J.K.Gimzewski. *Micromechanics: A Toolbox for Femtoscale Science: “Towards a Laboratory on a Tip”. Microelectronic Eng. 35, 373-379 (1997)*].

30 Los sistemas MEMS/NEMS basados en palancas (ver Fig.1), consistentes en una palanca o varias palancas en forma de matriz, se caracterizan por la gran simplicidad del elemento transductor [N.V.Lavrik, M.J.Sepaniak, P.G.Datskos. *Cantilever transducers as a platform for chemical and biological sensors. Review of Scientific Instruments, vol. 75, nº 7, 2229-2253 (2004)*]. Su funcionamiento se basa en la transducción que produce la magnitud que se quiere medir en la actuación mecánica de la palanca de dimensiones micrométricas y sub-micrométricas. El principio de transducción consiste en la deflexión de la palanca (sensores DC o de deflexión continua) o en la alteración de alguna característica de su movimiento vibratorio, producido en este caso por un sistema de excitación (sensores AC o resonantes). La deflexión o variación de la oscilación de la palanca se detecta mediante un sistema de lectura óptico o eléctrico que proporciona una señal eléctrica a la salida del sensor.

40 Existen diversas ventajas de utilizar dicha estructura de palanca como sensor, entre las que destacan la simplicidad del elemento transductor, la posibilidad de configuración en matriz (*arrays*), y la capacidad de transducción de casi cualquier dominio de señal con gran sensibilidad. Aunque los sensores basados en palancas o micropalancas tienen su origen y principal impulso en los microscopios de sonda atómica (principalmente microscopios de fuerza), dichos sensores permiten detectar multitud de propiedades físicas y/o químicas con gran resolución, tales como temperatura, presión, aceleración, masa, o reacciones químicas que produzcan cambios de estrés superficial [H.P.Lang, M.Hegner, E.Meyer, Ch.Gerber. *Nanomechanics from atomic resolution to molecular recognition 30 based on atomic force microscopy technology. Tutorial. Nanotechnology, 13.R29-R36 (2002)*].

45 Los métodos de excitación y detección de la oscilación de la palanca pueden ser ópticos, piezoresistivos o piezoeléctricos, capacitivos, magnéticos o dependientes de la temperatura. Actualmente, los sistemas de detección ópticos (diodo láser y fotodetector) son los que se pueden traducir en una resolución más alta debido al desacople eléctrico entre el sistema mecánico y el electrónico, tal como se describe en [F.M.Battiston, J.P.Ramseyer, H. P.Lang, M. K.Balter, Ch. Gerber, J. K. G imzewski, E. Meyer, H. J. Güntherodt. *A chemical sensor based on a microfabricated cantilever array with simultaneous resonance-frequency and bending readout. Sensors and Actuators (B), 77, 122-131 (2001)*] y [T.Ono, X.Li, H.Miyashita, M.Esashi. *Mass sensing of adsorbed molecules in sub-picogram sample with ultrathin silicon resonator. Rev. Sci.Instrum. 74. 1240-1243. (2003)*]. Pero este tipo de detección no puede ser aplicable en el caso de palancas de dimensiones nanométricas (inferiores a los 100 nm), tal como los sistemas NEMS, debido al límite de difracción, además de suponer una mayor complejidad en el sistema y un menor grado de integrabilidad. Dichos inconvenientes se basan principalmente en el hecho de que es necesario un haz de luz láser que enfoque a la palanca y un fotodetector que la pueda detectar, de modo que, dependiendo de la sombra que haga el láser, se obtenga una señal. Por lo tanto, la complejidad en la realización de sistemas integrados de este tipo es evidente, puesto que es necesario alinear mecánicamente de manera precisa el haz del láser con la parte mecánica (e.g. un sensor basado en palanca) y el fotodetector.

60 La tendencia actual de disminuir las dimensiones del transductor mecánico en la nueva generación de sistemas micro/nanoelectromecánicos (M/NEMS) hace que el sistema de lectura usado para detectar el movimiento de la estructura (e.g. una palanca) sea un tópico de interés, quedando prácticamente excluidos los sistemas ópticos por los inconvenientes citados con anterioridad.

En la Fig.1 se puede ver un ejemplo de sensor basado en palanca según el estado de la técnica, en el que el sensor de masa 10 comprende una palanca 11 que resuena paralelamente a un electrodo 12 estático que permite la excitación

de la palanca. La detección de la oscilación de la palanca se consigue detectando la corriente capacitiva inducida en la interfase entre el electrodo 12 de polarización y la palanca 11, que es proporcional a cambios de la capacidad formada por el electrodo de polarización y la palanca.

5 Este tipo de detección fácilmente permite la integración monolítica del sistema *M/NEMS*, evitando la complejidad y costes de sistemas similares que usan otras técnicas como pueden ser las ópticas [J.Fritz et al. *Translating biomolecular Recognition into Nanomechanics. Science*, vol. 288, 316-318 (2000)]. Dicha transducción electrostática, y debido a las pequeñas 15 dimensiones de los elementos mecánicos, requiere la minimización de la capacidad parásita, ya que la magnitud de la corriente que se va a detectar es proporcional a la capacidad de acoplo entre la palanca y el electrodo-polarizador, que suele estar en el rango de 10^{-16} - 10^{-18} F.

El uso de técnicas conmutadas para los circuitos de lectura está ampliamente extendido para los sensores capacitivos tales como los acelerómetros, ya que son técnicas más insensibles a las capacidades parásitas [N. Yazdi et al., "A generic interface chip for capacitive sensors in low-power multi-parameter Microsystems", *Sensors and Actuators*, vol. 84, pp. 351-361 (2000)]. Ejemplos de uso de dichas técnicas están descritas en [B. E. Boser and R. T. Howe, "Surface Micromachined Accelerometers", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 31, no. 3 (1996)] y [C. Lu, M. Lemkin and B. E. Boser, "A Monolithic Surface Micromachined Accelerometer with Digital Output", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 30, no. 12 (1995)]. Sin embargo, el uso de estas técnicas en sistemas resonantes donde la frecuencia de la señal del sensor está en el rango de los MHz (para incrementar la sensibilidad del sensor), no es 20 directamente extrapolable.

Así, por ejemplo, en la Fig.2 se puede ver un sistema de lectura, según el estado de la técnica, para un sensor de masa 10 basado en palanca 11 excitado mediante una tensión de excitación V_{exc} aplicada al electrodo estático 12 del sensor (ver también Fig.1), para provocar que la palanca resuene paralelamente al electrodo citado. La detección de 25 la oscilación de la palanca se consigue mediante la lectura de la corriente capacitiva inducida en la interfase entre el electrodo y la palanca, siendo dicha corriente capacitiva proporcional a cualquier cambio en la capacidad formada por el electrodo y la palanca. Por lo tanto, cualquier cambio en la capacidad quedará reflejado en la corriente capacitiva.

El sistema de lectura de la Fig.2, destinado a detectar y amplificar dichos posibles cambios de la capacidad $C(t)$ formada por el electrodo 12 y la palanca 11 resultantes del movimiento resonante de la palanca, se basa en la 30 detección de la tensión en AC (corriente alterna) en el nodo V_{in} , resultante del divisor de tensión capacitivo formado por la capacidad a medir $C(t)$ y la suma de todas las capacidades que cuelgan del nodo V_{in} , cuya suma recibe el nombre de capacidad parásita y corresponde, según la Fig.1, a $C_d+C_{sb}+C_i$. Evidentemente, el sistema de lectura de la Fig.2 requiere una correcta polarización del circuito de detección 20 que actúa a modo de *buffer*, fijando la tensión DC (corriente continua) del nodo V_{in} . Dicha polarización se consigue mediante la utilización de R_{bias} , que es un elemento con una 25 resistencia muy superior a la impedancia de la capacidad C_d (asociada a R_{bias}) a la frecuencia de interés, para que la señal no experimente ninguna atenuación. De este modo se consigue que la corriente capacitiva circule prácticamente sólo por la capacidad y no circule a través del elemento resistivo R_{bias} .

40 Por todo ello, la sensibilidad de los sistemas de lectura para elementos transductores conocidos está muy limitada.

Descripción de la invención

Por lo tanto, es un objetivo de la presente invención proporcionar un sistema de lectura para un elemento transduc- 45 tor, con una muy alta sensibilidad.

Este objetivo se consigue de acuerdo con la reivindicación 1 proporcionando un sistema de lectura para un elemento transductor mecánico en el que los medios de polarización están conectados entre el nodo de entrada y el nodo de salida de los medios de amplificación, para polarizar el nodo de entrada conectándolo al nodo de salida.

De este modo, se consigue un sistema de lectura de muy alta sensibilidad al minimizarse fuertemente la capaci- 50 dad parásita por hacerse prácticamente nula la capacidad del elemento de polarización, es decir, se consigue reducir fuertemente la contribución de la capacidad del elemento de polarización sobre el nodo de entrada de los medios de amplificación de tensión, por efecto Miller, ya que la ganancia de los medios de amplificación es aproximadamente 55 igual a la unidad.

$$C_{d_{vin}} = C_d(1 - G) \approx 0$$

60 Dicha configuración permite la integración de la corriente de desplazamiento usando la capacidad intrínseca de entrada de los medios de amplificación, polarizados a través de una retroalimentación mediante el elemento de polarización, siendo dicho elemento altamente resistivo.

Por otro lado, el elemento transductor puede estar contenido en un sustrato, estando el sustrato conectado a los 65 medios de polarización a través del nodo de salida.

Por lo tanto, la tensión en el nodo de salida también se utiliza para eliminar fuertemente la capacidad parásita entre la estructura mecánica (elemento transductor) y el sustrato que contiene dicha estructura mecánica.

ES 2 245 614 A1

$$C_{sb_{vin}} = C_{sb}(1 - G) \approx 0$$

5 Por consiguiente, se consigue maximizar la sensibilidad del sistema de lectura al reducir todas las capacidades parásitas que cuelgan del nodo de entrada. Así, la tensión de salida del sistema se puede expresar aproximadamente mediante la siguiente ecuación:

$$10 \quad V_o = V_{exc} \frac{C(t)}{C(t) + C_i}$$

Preferentemente, los medios de amplificación, tal como un amplificador de tensión, pueden presentar una ganancia muy próxima a la unidad y una muy alta impedancia de entrada con una capacidad de entrada muy baja. Además, puede ser necesario que en su característica de transferencia estática exista un punto tal que $V_{in}(DC)$ sea igual a V_o (DC).

El hecho de que la ganancia sea unitaria permite, por efecto Miller, reducir fuertemente la contribución de la capacidad entre el sustrato y la estructura mecánica y la capacidad del elemento de polarización sobre el nodo de entrada, según la configuración del sistema de lectura de la invención.

20 De acuerdo con una realización preferida de la invención, los medios de polarización pueden comprender un elemento altamente resistivo, del orden de $10^8 \Omega$ o superior, tal como un dispositivo semiconductor. De entre los dispositivos semiconductores conocidos destacan principalmente los diodos polarizados en cero y los transistores en subumbral. La utilización de dicho elemento altamente resistivo se debe a que la resistencia del elemento de polarización debe ser mucho más elevada que la impedancia de la capacidad de dicho elemento a la frecuencia de interés, para que la señal no experimente ninguna atenuación. La utilización de un dispositivo semiconductor se debe a que tienen una impedancia elevada sin tener que ocupar mucha área.

Preferiblemente, el elemento transductor comprende un resonador mecánico monolítico, tal como una palanca.

30 **Breve descripción de los dibujos**

Para mayor comprensión de cuanto se ha expuesto se acompañan unos dibujos en los cuales, esquemáticamente y sólo a título de ejemplo no limitativo, se representa un caso práctico de realización.

35 En los dibujos:

Fig.1 muestra un diagrama esquemático de un sensor de masa basado en palanca de acuerdo con el estado de la técnica;

40 Fig.2 muestra un diagrama en forma de circuito eléctrico de un sistema de lectura para un resonador mecánico de acuerdo con el estado de la técnica;

45 Fig.3 muestra un diagrama en forma de circuito eléctrico de un sistema de lectura para un resonador mecánico de acuerdo con la presente invención;

Fig.4 muestra un diagrama en forma de circuito eléctrico de un sistema de lectura capacitivo para una palanca que vibra lateralmente excitada electrostáticamente, de acuerdo con la invención;

50 Fig.5 muestra un diagrama en forma de circuito eléctrico de un amplificador de tensión (*buffer*) de ganancia unitaria con etapa de salida (UGB_OS) comprendido en el sistema de lectura de la Fig.3;

Fig.6 y Fig.7 muestran diagramas en forma de gráficos de la respuesta (magnitud y fase) de transmisión medida del MEMS (Fig.6) y las formas de onda en el osciloscopio de los nodos V_o y V_{exc} para diferentes frecuencias (Fig.7).

55 **Descripción de realizaciones preferidas**

A continuación se realizará la descripción de una realización preferida de la invención en la que el sistema de lectura es capacitivo y se utiliza para detectar la oscilación de una palanca de escala sub-micrométrica integrada monolíticamente según una tecnología estándar CMOS. La palanca sub-micrométrica constituye el elemento transductor de un sensor ultrasensible de masa con resoluciones en el rango de los attogramos. El sistema de lectura presenta una capacitancia parásita total en el nodo de detección tan baja como 11 fF. Dicha capacitancia parásita se utiliza para integrar la corriente generada por el conjunto palanca-electrodo (driver) que se excita electrostáticamente, dando como resultado un sistema de lectura de alta sensibilidad y con un ancho de banda (BW) de casi 50 MHz (con una capacidad de carga de 30pF).

En la Fig.3 se muestra el sistema de lectura de la realización preferida descrita. El electrodo 12 está excitado por una tensión de excitación V_{exc} , que provoca la resonancia de la palanca 11 paralelamente al electrodo. La detección de la

ES 2 245 614 A1

oscilación de la palanca se consigue detectando la corriente capacitiva I_c inducida en la interfase entre el electrodo 12 y la palanca 11, la cual es proporcional a cualquier cambio de la capacidad $C(t)$ formada por el electrodo y la palanca. Para realizar dicha detección, el sistema de lectura comprende un amplificador de tensión 20 que actúa a modo de *buffer*, cuyo nodo de entrada V_{in} (nodo de detección) está conectado a la salida del sensor 10, y un elemento de polarización R_{bias} del amplificador 20, que está conectado según una configuración de retroalimentación, conectando el elemento de polarización entre la entrada V_{in} y la salida V_o del amplificador 20. Dicho elemento de polarización es necesario para fijar la tensión DC (corriente continua) del nodo V_{in} para que el amplificador 20 esté correctamente polarizado. Esta polarización se realiza mediante cualquier elemento que presente una resistencia mucho más elevada que la impedancia de la capacidad C_p (capacidad parásita del sistema de lectura) a la frecuencia de interés para que la señal no experimente ninguna atenuación. Resulta necesario, por tanto, integrar resistencias del orden o superiores a $10^{18}\Omega$. Para obtener una impedancia elevada sin tener que ocupar mucha área normalmente se utilizan dispositivos semiconductores como diodos en polarización cero, transistores en subumbral, etc. El sensor 10 comprende también un sustrato N-well que contiene la estructura mecánica, es decir, el conjunto palanca-electrodo (driver).

La función del sistema de lectura es detectar y amplificar las pequeñas variaciones de capacidad ($C(t)$) resultantes del movimiento de la palanca 11 (resonador mecánico). Básicamente, se realiza la detección de la tensión en el nodo V_{in} resultante del divisor de tensión capacitivo formado por la capacidad a medir $C(t)$, formada por el electrodo 12 y la palanca 11, y la suma de todas las capacidades que cuelgan del nodo V_{in} (C_p), por lo que C_p corresponde a C_i . Ello se debe a que, con la configuración de retroalimentación del elemento de polarización R_{bias} , la capacidad C_d de dicho elemento de polarización prácticamente se anula por efecto Miller, y lo mismo ocurre para la capacidad C_{sb} formada entre la estructura mecánica y el sustrato al conectarse el nodo de salida V_o a la polarización del sustrato que contiene la estructura mecánica.

A continuación se realizará una descripción más detallada, comparando el sistema de lectura de la invención (Fig.3) y el sistema de lectura de la Fig.2 de acuerdo con el estado de la técnica.

Según el esquema de la Figura 2, la tensión de salida V_o del *buffer* 20 se puede expresar conforme a la ecuación siguiente, referenciada como 1, donde V_{exc} es la tensión de excitación que se aplica al electrodo 12 con el objetivo de inducir la estructura a la resonancia, G es la ganancia del amplificador 20, C_{sb} es la capacidad parásita entre la estructura mecánica y el sustrato, C_i representa la capacidad de entrada del circuito y del conexionado con la estructura mecánica y C_d es la capacidad del elemento de polarización.

$$V_o = V_{exc} \frac{C(t)}{C(t) + C_{sb} + C_i + C_d} G \quad (1)$$

A partir de la ecuación anterior, se observa la necesidad de minimizar la capacidad parásita ($C_p=C_{sb}+C_d+C_i$) si se desea aumentar la sensibilidad del sistema de detección. Del estado de la técnica se puede deducir que el valor de C_d es a veces superior al valor de las demás capacidades y por tanto limita la sensibilidad de este sistema de lectura.

En resumen, el elemento resistivo (R_{bias}) necesario para polarizar el *buffer* limita la sensibilidad del sistema de lectura, ya que su capacidad parásita C_p asociada es del mismo orden de magnitud que la capacidad intrínseca del *buffer*, por lo que se incrementa directamente o bien por efecto Miller.

En la Figura 3 se detalla el esquema eléctrico propuesto para minimizar la capacidad parásita (C_p) y por lo tanto maximizar la sensibilidad del sistema de detección. Este esquema tiene las siguientes características:

- Se utiliza el amplificador de tensión 20, que realiza las funciones de *buffer* y que tiene las siguientes características: ganancia muy próxima a la unidad, muy alta impedancia de entrada con una capacidad de entrada (C_i) muy baja y que en la característica de transferencia estática existe un punto tal que $V_{in}(DC)$ es igual a $V_o(DC)$.
- El nodo de entrada (V_{in}) se polariza conectándolo a la salida del amplificador (V_o) mediante el elemento polarizador R_{bias} , más concretamente un dispositivo semiconductor (diodo polarizado en cero, transistores en subumbral, etc.) que ofrece una resistencia muy elevada pero que a la vez tiene asociada una capacidad parásita (C_d). Con este esquema se consigue reducir fuertemente la contribución de la capacidad (C_d) sobre el nodo de entrada (V_{in}) por efecto Miller (ecuación 2), ya que la ganancia, G , es aproximadamente igual a la unidad.

$$C_{d_{vin}} = C_d(1 - G) \approx 0 \quad (2)$$

- La tensión de salida del amplificador (V_o) también se utiliza para eliminar fuertemente la capacidad parásita (C_{sb}) mediante su conexión a la polarización del sustrato que contiene la estructura mecánica (ecuación 3).

$$C_{sb_{vin}} = C_{sb}(1 - G) \approx 0 \quad (3)$$

ES 2 245 614 A1

Por lo tanto, con el sistema de lectura de la Fig.3 se consigue maximizar su sensibilidad mediante la reducción de todas las capacidades parásitas que cuelgan del nodo de entrada Vin. En este caso, la tensión de salida Vo se puede expresar aproximadamente mediante la ecuación 4:

$$V_o = V_{exc} \frac{C(t)}{C(t) + C_i} \quad (4)$$

Así, el sistema de lectura de la Fig.3 tiene el siguiente funcionamiento. La palanca 11 es excitada aplicando una tensión al electrodo 12 (Vexc), la cual tiene una componente AC (corriente alterna), para excitar armónicamente a la palanca, y un componente DC (corriente continua) para evitar que la palanca tenga que moverse a dos veces la frecuencia de la señal AC aplicada, así como para maximizar la corriente generada por el movimiento de la palanca. La corriente capacitiva Ic generada puede expresarse aproximadamente como:

$$I_c(t) = \frac{\partial}{\partial t}(C.V) \cong C_p \frac{\partial V_{AC}}{\partial t} + V_{DC} \frac{\partial C(t)}{\partial t} \quad (5)$$

donde C es la capacidad formada por el electrodo y la palanca compuesta por un componente estático Cp más un componente variable C(t) que refleja las variaciones de la capacidad debidas al movimiento de la palanca. El primer término de la ecuación (4) es una corriente parásita generada por la tensión AC y el segundo término es la corriente de movimiento (Im) que refleja la oscilación de la palanca.

Utilizando una aproximación uni-dimensional en la que el desplazamiento de la palanca es el mismo en la totalidad de la longitud de la palanca, se obtiene, para pequeños desplazamientos de la palanca, la siguiente ecuación, bajo excitación armónica:

$$I_M = V_{DC} \frac{\partial C}{\partial t} = V_{DC} \frac{\partial C}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial t} \cong V_{DC} C_p \omega \frac{A}{s_o} \cos(\omega t) \quad (6)$$

donde A es la amplitud de la deflexión de la punta de la palanca, Cp y so son la capacitancia estática y la distancia entre la palanca y el electrodo, VDC es la caída de tensión DC en Cp y ω es la frecuencia de oscilación.

Si Ic es integrada usando Ci según el circuito mostrado en la Fig.4, la salida del sistema de lectura Vo puede aproximarse por:

$$V \cong \frac{V_{DC} A}{s_o} \frac{C_p}{C_p + C_i} G \quad (7)$$

A partir de la última ecuación es posible deducir que un valor bajo de la capacitancia total en el nodo de detección (Ci) es preceptivo para maximizar la sensibilidad del sistema de lectura puesto que la tensión Vin es proporcional a 1/Ci. Se ha conseguido un valor muy bajo de Ci=1 fF diseñando el sistema con las siguientes características:

- La capacitancia intrínseca en el nodo Vin (capacitancia de entrada del circuito, capacitancia del conjunto palanca-sustrato y conexión al circuito) se utiliza como el condensador Ci integrado en lugar de un condensador explícito.
- El amplificador de tensión se polariza mediante un diodo de polarización DC (DBias) conectado entre el nodo de detección Vin y el nodo Vo1, tal como se puede ver en la Fig.4. Puesto que no hay corriente DC a través del diodo, este actúa como una impedancia de valor extremadamente elevado (10¹⁵ ohmios). Dicho diodo se diseña de tal manera que la capacidad parásita formada entre el pozo y el sustrato no esté en paralelo con Ci.
- El diodo de polarización, u otro elemento de polarización, puede limitar la sensibilidad del sistema de lectura puesto que su capacitancia parásita, del mismo orden de magnitud que Ci, puede incrementar Ci directamente o por efecto Miller. En dicho diseño, la capacidad parásita se reduce considerablemente utilizando una configuración de retroalimentación que conecta el diodo entre los nodos Vo1 y Vin. Puesto que el circuito de lectura es el buffer 20 de ganancia unitaria (Vin/Vo1 ≈ 1), el incremento de Ci por el efecto Miller es muy pequeño.

La Fig.5 muestra el circuito de lectura basado en una topología de desplazador de nivel independiente de los valores umbrales (M1...M5) con una etapa de salida en configuración de seguidor por fuente (M8, M9). Es importante destacar que las dimensiones de los transistores están en micrómetros. Dicho circuito tiene una capacitancia de entrada baja (7,37fF) que se consigue utilizando la etapa de entrada en configuración de seguidor por fuente. El circuito tiene dos salidas: Vo1 que tiene una ganancia de 0,974 con respecto a Vin y se utiliza para polarizar Vin a través de un diodo y

ES 2 245 614 A1

Vo que tiene la capacidad de cargar capacitancias elevadas (30pF) con un BW relativamente elevado que permite las medidas de test del circuito.

5 La palanca tiene una longitud de 10 μm , un ancho de 600nm, un grosor de 925nm y la separación entre la palanca y el electrodo es de 750nm. Con dichos valores, el valor teórico de C_p es tan bajo como 0.1 fF.

10 El sistema se ha implementado en una tecnología estándar CMOS. La estructura mecánica está definida utilizando el proceso CMOS convencional. Al final se obtiene un chip encapsulado al que únicamente es necesario conectar la alimentación y leer su salida. Para integrarlo, como la palanca 11 tiene que presentar dimensiones muy reducidas y no se desea utilizar tensiones elevadas, es necesario, tal como se ha descrito anteriormente, minimizar todas las capacidades parásitas eléctricas que se generan por el propio sistema de integración.

15 La capa estructural es una capa de Metal (capa superior) y la capa de sacrificio es el SiO_2 existente bajo la estructura. Después del proceso CMOS estándar es necesario un post-proceso para liberar la palanca.

20 En resumen, el sistema de lectura de la palanca resonante de escala de submicrómetro se ha fabricado e integrado monolíticamente con la estructura mecánica en una tecnología estándar CMOS. Dicho sistema de lectura está basado en un circuito de detección capacitivo y presenta una capacitancia parásita total en el nodo de detección tan baja como 11fF, que da lugar a un sistema de lectura de alta sensibilidad, que es el mejor resultado obtenido en la actualidad para una palanca capacitiva y comparable con los mejores resultados obtenidos por los sistemas ópticos. Todo ello demuestra la posibilidad del sistema de lectura de acuerdo con la invención de detectar la oscilación de una palanca de escala sub-micrométrica con una frecuencia de resonancia de alrededor de 6MHz.

25 Tanto en la Fig.6 como en la Fig.7 se presentan los resultados correspondientes a las medidas de la respuesta de transmisión (V_o/V_{exc}) del 10 sistema electromecánico. La palanca ha sido excitada con una tensión alterna de 1,6 Vpp y una tensión de polarización en continua de 18V.

30 Dichas medidas han sido realizadas en condiciones de vacío (alrededor de 10^{-7} bars), bajo las cuales el resonador presenta un factor Q de 351 y una frecuencia de resonancia de 6,631 MHz. El gran desplazamiento de fase cerca de la resonancia hace posible la auto-excitación del resonador y usa dicho sistema como un oscilador.

35 A pesar de que se han descrito y representado realizaciones concretas de la presente invención, es evidente que el experto en la materia podrá introducir variantes y modificaciones, o sustituir los detalles por otros técnicamente equivalentes, sin apartarse del ámbito de protección definido por las reivindicaciones adjuntas.

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

5 1. Sistema de lectura para un elemento transductor mecánico (11) que comprende medios (20) de amplificación de
tensión que definen un nodo de entrada (V_{in}) y un nodo de salida (V_o), en cuyo nodo de entrada (V_{in}) se conecta la
salida del transductor (11) y los medios de amplificación (20) amplifican la tensión en el nodo de entrada (V_{in}) que
corresponde a la tensión en la salida del elemento transductor (11), y medios (Rbias) de polarización de dichos medios
10 (20) de amplificación, **caracterizado** por el hecho de que los medios (Rbias) de polarización están conectados entre el
nodo de entrada (V_{in}) y el nodo de salida (V_o) de los medios (20) de amplificación, para polarizar el nodo de entrada
(V_{in}) conectándolo al nodo de salida (V_o).

2. Sistema según la reivindicación 1, **caracterizado** por el hecho de los medios (20) de amplificación presentan
una ganancia (G) muy próxima a la unidad.

15 3. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 ó 2, **caracterizado** por el hecho de que los medios de
amplificación comprenden un amplificador de tensión (20).

4. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, **caracterizado** por el hecho de tos medios de polarización
comprenden un elemento (Rbias) altamente resistivo, del orden de $10^8 \Omega$ o superior.

20 5. Sistema según la reivindicación 4, **caracterizado** por el hecho de que el elemento altamente resistivo es un
dispositivo semiconductor (Rbias).

6. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado** por el hecho de que los medios de
25 polarización tienen asociada una capacidad parásita (Cd).

7. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado** por el hecho de que el elemento transduc-
tor (11) está contenido en un sustrato (N-well), y por el hecho de que el sustrato está conectado a los medios (Rbias)
de polarización a través del nodo de salida (V_o).

30 8. Sistema según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, **caracterizado** por el hecho de que el elemento trans-
ductor comprende un resonador mecánico monolítico (11).

35

40

45

50

55

60

65

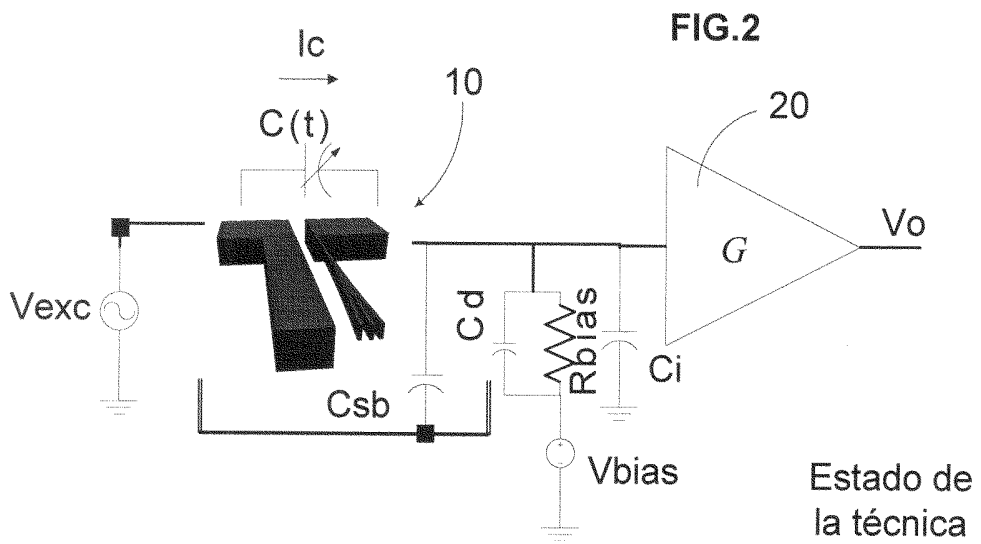
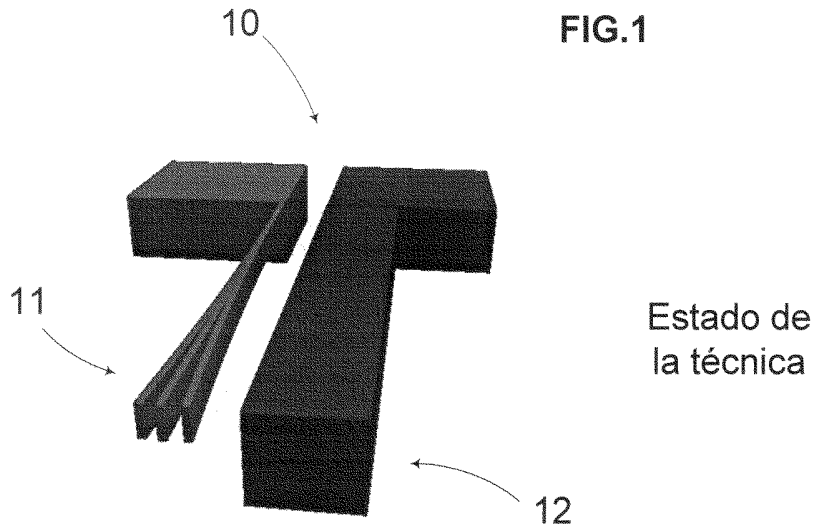


FIG.3

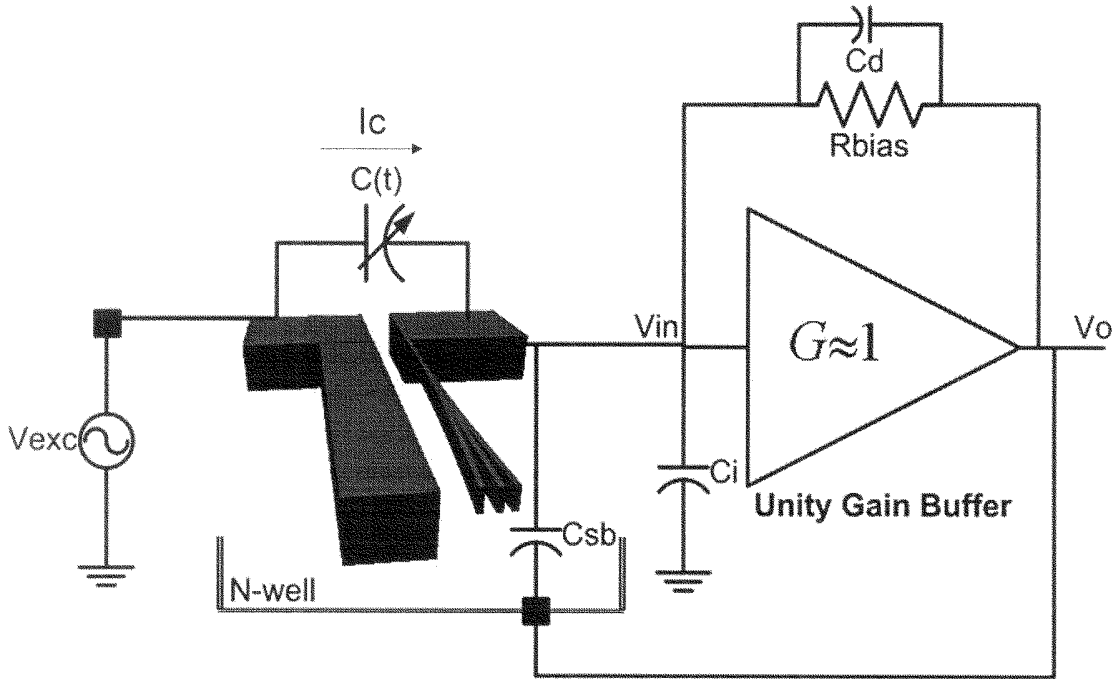


FIG.4

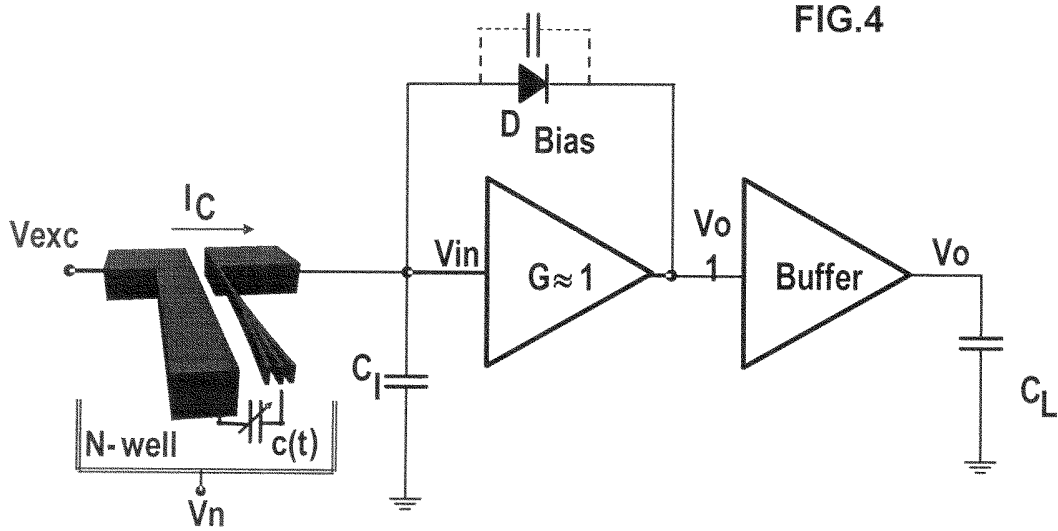


FIG.5

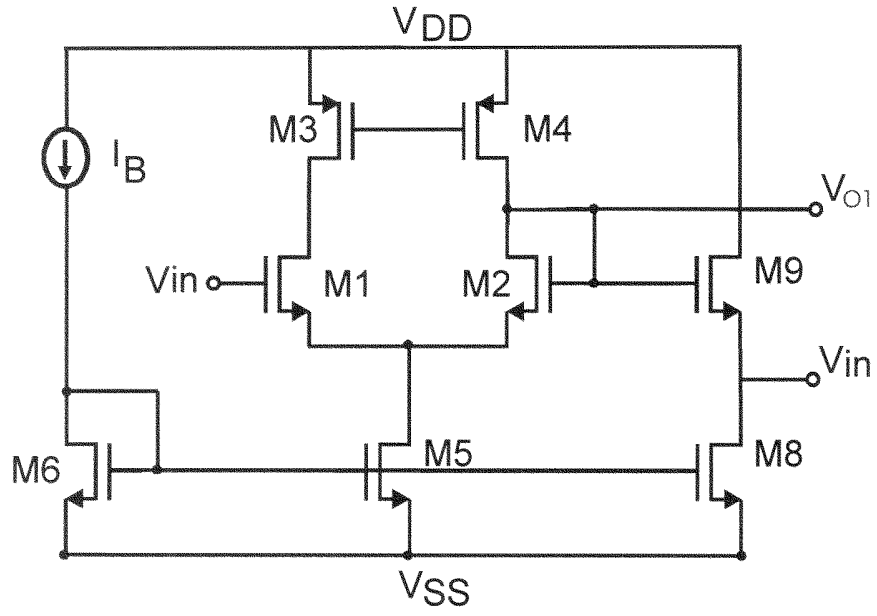


FIG.6

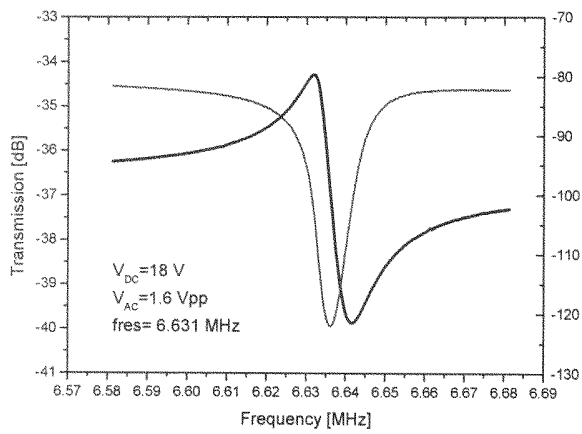
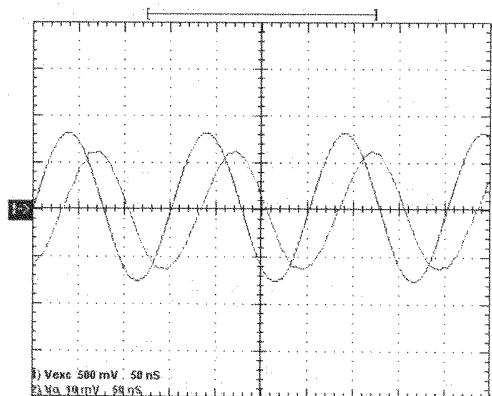


FIG.7





OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 245 614

② Nº de solicitud: 200501297

③ Fecha de presentación de la solicitud: 25.05.2005

④ Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.⁷: G01D 5/14, G01P 15/125, G01R 1/30

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	JP 54068658 A (YOKOGAWA HOKUSHIN ELECTRIC CORP.) 01.06.1979, todo el documento.	1
Y		2
A		3,4
Y	US 4447780 A (YOUNG, B. et al.) 08.05.1984, resumen; columna 2, línea 39 - columna 3, línea 9; figura 1.	2
A		1,3
A	EP 0677921 A2 (SSI TECHNOLOGIES, INC.) 18.10.1995, todo el documento.	1,3,4
A	JP 06130084 A (NIPPONDENSO CO. LTD.) 13.05.1994	
A	US 20030167843 A1 (HOLLOCHER, D. et al.) 11.09.2003	
A	US 5540095 A (SHERMAN, S. et al.) 30.07.1996	

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

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

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

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

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

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
28.11.2005

Examinador
O. González Peñalba

Página
1/1