

19

OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 597 983**

21 Número de solicitud: 201530896

51 Int. Cl.:

H01L 41/00 (2013.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A2

22 Fecha de presentación:

24.06.2015

43 Fecha de publicación de la solicitud:

24.01.2017

71 Solicitantes:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTIFICAS (CSIC) (100.0%)
C/ Serrano, 117
28006 Madrid ES**

72 Inventor/es:

**MURILLO RODRIGUEZ , Gonzalo;
ESTEVE TINTO, Jaume y
SACRISTAN RIQUELME, Jorge**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

54 Título: **Sistema y dispositivo de recolección de energía piezoeléctrico**

57 Resumen:

Sistema y dispositivo de recolección de energía piezoeléctrico. El dispositivo y sistema se acciona mediante energía mecánica disponible en el entorno. Se forma por una viga en voladizo, basado en nanoestructuras de ZnO e integrado monolíticamente con diodos Schottky y un condensador que cubre enteramente el chip. Se usará ZnO de dos formas diferentes: nanohilos (NW) y nanoláminas (NS). Estas nanoestructuras se harán crecer mediante un proceso hidrotérmico compatible con silicio y usando parte del electrodo de condensador superior como capa semilla. Se propone un flujo de proceso etapa por etapa para la integración monolítica en un mismo dispositivo. Esta integración permitirá una reducción de las pérdidas de potencia y facilitará la combinación de varios generadores sin preocupaciones sobre la polaridad del estrés mecánico o de la carga eléctrica.

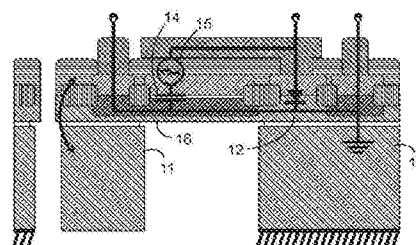


Fig. 3

SISTEMA Y DISPOSITIVO DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICO

DESCRIPCIÓN

Campo de invención

5

La presente invención pertenece al campo de la electrónica y, más específicamente, a dispositivos piezoeléctricos a escala nanométrica para recolectar energía mecánica.

Estado de la técnica

10

Existe una necesidad de generadores eléctricos que puedan proporcionar potencia con alta resistencia a impactos y factor de calidad.

15

Los dispositivos de MEMS anteriores (MEMS significa sistemas microelectromecánicos) usan película delgada de AIN convencional y tienen las desventajas de tener una tensión de rotura crítica limitada y una rigidez significativa que hacen que no sean óptimos para aplicaciones de vibraciones ambientales. Además, hasta ahora, requieren circuitos de gestión de potencia y control externos que hacen difícil su integración y fabricación a gran escala.

20

Recientemente se ha propuesto un enfoque basado en nanofibras piezoeléctricas. No obstante, este dispositivo anterior tiene varias desventajas: baja densidad superficial de fibras, baja capacidad de integración, difícil de obtener un gran número de fibras alineadas, contaminación del sustrato debido a nitración/oxidación de fibras. Además, requiere un complejo desarrollo tecnológico (electrohilado). Además, este dispositivo es menos compatible con tecnologías de silicio de VLSI (integración a muy gran escala).

25

En los últimos años se han estado usando nanohilos de ZnO como material piezoeléctrico, porque pueden hacerse crecer de manera económica y fácil mediante un método hidrotérmico. La principal aplicación ha sido la recolección de energía y sensores, pero los dispositivos han sido principalmente dispositivos macroscópicos voluminosos dedicados a generar la mayor potencia posible. Sin embargo, la tecnología de MEMS no se ha aprovechado para combinar satisfactoriamente estas nanoestructuras con dispositivos móviles a escala micrométrica para seleccionar como objetivo el pequeño nicho de energía que ofrecen las vibraciones ambientales.

30

El documento US20050134149A1 propone un dispositivo de recolección de vibraciones piezoeléctrico que tiene una estructura de pila de platillos con una masa

35

de prueba encima. Esta propuesta es diferente de la presente invención, además de por su disposición, porque la invención propuesta usa nanoestructuras de ZnO como material piezoeléctrico principal en lugar de películas delgadas. Además, los dispositivos según la invención pueden integrar de manera monolítica diodos y condensadores.

Breve descripción de la invención

La invención se dedica a desarrollar una familia de dispositivos nanoestructurados piezoeléctricos compatibles con silicio con condensador de almacenamiento de carga de amortiguación y rectificación integrado que puede recolectar energía a partir de movimientos mecánicos.

Según la invención, un dispositivo de recolección de energía piezoeléctrico comprende una parte anclada, una masa inercial y una estructura flexible móvil. La estructura flexible comprende una capa piezoeléctrica con una pluralidad de nanoestructuras. Un condensador está formado entre un electrodo inferior de una región altamente dopada y un electrodo superior de una capa metálica y un diodo está formado entre dicha capa metálica y una región ligeramente dopada en la parte anclada, el diodo está en serie con el condensador.

Preferiblemente, la estructura flexible es una viga en voladizo entre la parte anclada y la masa inercial, sin embargo otras estructuras móviles son posibles. Por ejemplo, una viga sujeta en ambos extremos, una suspensión en serpentín, una membrana u otro elemento elástico que puede desempeñar el papel de muelle o resorte.

La viga en voladizo está diseñada para curvarse provocando así que las nanoestructuras piezoeléctricas generen una corriente inducida por potencial piezoeléctrico rectificadas por el diodo y almacenadas por el condensador.

Preferiblemente, se forma una capa semilla que comprende Au bajo la capa piezoeléctrica constituida por ZnO para hacer crecer nanohilos como nanoestructuras. Preferiblemente, la longitud de los nanohilos es de desde 100 nm hasta 10 μ m.

Alternativamente, se forma una capa semilla que comprende AlN bajo la capa piezoeléctrica constituida por ZnO para hacer crecer nanoláminas como nanoestructuras. Preferiblemente, el diámetro de las nanoláminas oscila entre 100 nm y 10 μ m.

Los electrodos del condensador se extienden desde la viga en voladizo hasta la parte anclada pero, preferiblemente, pueden extenderse para cubrir toda la superficie de chip disponible para maximizar el valor de la capacitancia.

Preferiblemente, el material de sustrato es silicio cristalino de tipo n.

Alternativamente, el material de sustrato es silicio cristalino de tipo p.

Según la invención, también se propone un sistema de recolección de energía. El sistema comprende una matriz de dispositivos de recolección de energía piezoeléctricos, en el que dispositivos adyacentes están apilados dejando un hueco
5 entre los mismos para el movimiento de la masa inercial.

Preferiblemente, los dispositivos de recolección de energía se combinan en serie.

Alternativamente, los dispositivos de recolección de energía se combinan en paralelo.

En resumen, se propone un nuevo enfoque para producir dispositivos de recopilación
10 de energía de MEMS piezoeléctricos, también denominados colectores de MEMS. Los dispositivos propuestos se basan en nanohilos (NW) y nanoláminas (NS) como material piezoeléctrico con un diodo y condensador integrados de manera monolítica en una tecnología compatible con silicio.

En algunas realizaciones se elige ZnO como solución de bajo coste para hacer crecer
15 NW y NS mediante un método hidrotérmico. ZnO también proporciona una mayor tensión soportada, flexibilidad potenciada y coste de fabricación reducido. Al mismo tiempo, es mucho más fácil de integrar con silicio que otros enfoques basados en nanoestructuras. El dispositivo permite un movimiento fuera del plano cuando se excita mecánicamente.

20 El dispositivo de recolección de energía propuesto contiene un diodo Schottky y condensador integrados de manera monolítica además del nanogenerador piezoeléctrico lo que permite un almacenamiento de carga de amortiguación y rectificación de señal *in situ*.

De manera positiva, pueden combinarse varios dispositivos de recolección de energía
25 para maximizar la potencia extraída sin preocuparse por las fases de las señales de CA (Corriente Alterna) a la salida. La compensación entre el tamaño y el número de dispositivos de recolección de energía muestra que varios dispositivos más pequeños dirigidos a diferentes frecuencias de resonancia pueden obtener una mayor densidad de potencia generada que una única unidad más grande con el mismo tamaño global.

30 La invención tiene ventajas adicionales: una flexibilidad global superior y menor riesgo de roturas, mejor rendimiento y almacenamiento y rectificación integrados. Esta combinación de producción de potencia con fiabilidad mejora los dispositivos del estado de la técnica conocidos.

Estos y otros aspectos de la invención resultarán evidentes a partir de los dibujos y las
35 realizaciones a modo de ejemplo.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describe muy brevemente una serie de dibujos que ayudan a entender mejor la invención y que están expresamente relacionados con realizaciones de dicha invención, presentadas como ejemplo no limitativo de la misma.

Figura 1: Configuración de dispositivo funcional. (Izquierda) Una estructura en voladizo para movimientos mecánicos fuera del plano, con las dos nanoestructuras de ZnO diferentes para la transducción piezoeléctrica: nanohilos (derecha-parte inferior) y nanoláminas (derecha-parte superior)

Figura 2: Varias vistas de nanohilos de ZnO. La figura 2a es una vista global. La figura 2b es una vista detallada. La figura 2c muestra una vista desde arriba de nanoláminas. La figura 2d muestra una vista inclinada.

La **figura 3** es una sección transversal del dispositivo final construido sobre un sustrato de SOI.

La **figura 4** es una medición por difracción de rayos X (XRD) de nanoláminas de ZnO que se hacen crecer sobre una capa semilla de AlN.

Descripción detallada

20

Se comentarán varias realizaciones para entender mejor la invención.

Tal como se indicó anteriormente, uno de los objetivos de esta invención es hacer que el dispositivo de recopilación de energía sea lo suficientemente robusto, que pueda funcionar de una manera fiable en las condiciones impuestas. Con este fin, se adoptan nanoestructuras piezoeléctricas, también conocidas en general como nanogeneradores (NG), en lugar de películas delgadas.

El enfoque aprovecha ZnO como material de transducción para convertir la energía mecánica procedente de las aceleraciones de entrada presentes en el entorno para dos casos diferentes. Se integrarán dos tipos de nanoestructuras de ZnO para obtener dispositivos utilizables: nanohilos (NW) y nanoláminas (NS).

Tanto los NW como las NS pueden generarse compartiendo prácticamente el mismo proceso de fabricación: Estas nanoestructuras de ZnO tienen las particularidades de usar:

- toda la superficie del chip para fabricar el condensador de almacenamiento,
- el electrodo superior de este condensador como capa semilla para hacer crecer las nanoestructuras de ZnO encima del voladizo que va a curvarse, y

- una pequeña región de chip de silicio sin dopar para integrar de manera monolítica diodos de Schottky.

Disposición del dispositivo

5 La **figura 1** muestra la configuración de uno de los dispositivos finales. La configuración común de las diferentes versiones de diseño se basa en una arquitectura en voladizo, porque los dispositivos de recopilación piezoeléctricos basados en silicio actuales muestran el mejor rendimiento con un sistema de masa-
muelle. Sin embargo, pueden usarse otras suspensiones, tales como vigas sujetas en
10 ambos extremos, flexiones en serpentín, membranas u otros elementos elásticos en lugar de la viga en voladizo.

Una masa **11** inercial está conectada a través de una viga **16** en voladizo al resto del chip **13**. Encima de este voladizo hay una capa **15** piezoeléctrica compuesta por nanoestructuras de ZnO. Integrado de manera monolítica en el mismo chip **13**, hay un
15 diodo Schottky **12** y un condensador **14**.

Se generarán varios tamaños para obtener diferentes frecuencias de resonancia, y se combinarán para obtener matrices de múltiples frecuencias de dispositivos de recopilación de energía. Las dimensiones laterales típicas de los voladizos y la masa inercial oscilarán entre 0,5 y 5 mm, y el grosor objetivo de la capa piezoeléctrica será
20 de aproximadamente 1 μm para el primer prototipo. Los dispositivos de recopilación pueden combinarse para producir una matriz según una combinación en serie o en paralelo de los mismos. Dependiendo de esta combinación eléctrica, se obtendrá un incremento de los niveles de corriente o de voltaje de salida para combinaciones en serie y en paralelo, respectivamente. Con el fin de combinar físicamente los
25 dispositivos, pueden apilarse dejando suficiente espacio entre ellos para el movimiento resonante de la masa inercial.

Tal como se ilustra en la **figura 3**, el resorte se construye por medio de vigas de silicio microestructuradas sobre la capa de dispositivo de SOI y se cubre por el diferente material piezoeléctrico que desempeña el papel de resorte mecánico y transductor. La
30 masa **11** inercial se crea mediante grabado de la capa de silicio tanto superior como inferior de la oblea de SOI (silicio sobre aislante) mediante RIE (grabado iónico reactivo) y DRIE (grabado iónico reactivo profundo), respectivamente. La parte no grabada que corresponde al marco del chip que formará la parte **17** anclada.

El uso de una oblea de SOI facilita la definición de la viga **16** en voladizo y la masa **11**
35 inercial. Esta oblea será de tipo n con el fin de poder integrar un diodo Schottky **12** y un condensador **14** junto con la estructura móvil. El diodo **12** tendrá el papel de rectificar, con pocas pérdidas, la señal de CA generada por los NG que al mismo

tiempo se harán crecer justo encima de la gran superficie del condensador **14** para ahorrar espacio.

Esta configuración crea una red de un diodo **12**, capa **15** de CA piezoeléctrica como generador y un condensador **14** en serie, por tanto para cada estimulación mecánica sobre los NG, se almacenarán cargas negativas en el condensador **14**. Debido a la rectificación *in situ*, pueden conectarse entre sí diferentes diseños con diferentes tamaños y la producción de voltaje siempre se sumará. Por ejemplo, voladizos **13** más largos y/o masas **11** inerciales más grandes darán como resultado frecuencias de resonancia inferiores y vigas más gruesas y/o materiales más rígidos aumentarán las frecuencias de resonancia.

Materiales

Estos dispositivos usan una oblea de SOI como parte estructural principal. El sustrato se elige con el fin de facilitar las definiciones de la masa inercial y la viga. Entonces se usan dos materiales piezoeléctricos diferentes:

AlN: Este material piezoeléctrico se ha usado durante varios años para fabricar FBAR (resonador de ondas acústicas de volumen de película) y colectores de energía. AlN se usa como capa semilla para hacer crecer NS de ZnO que se adaptarán a una capa piezoeléctrica nanoestructurada funcional. AlN se procesa mediante pulverización catódica por RF sobre una capa delgada de Ti/Pt que confiere una buena orientación cristalina. Pueden depositarse capas delgadas de menos de 100 nm y el análisis de XRD de la **figura 4** muestra que la estructura y orientación cristalinas son estables. El grosor final usado en este tipo de dispositivos puede ser de entre 10 nm y 1 μ m.

ZnO: Este material piezoeléctrico y semiconductor se usará para hacer crecer nanoestructuras, específicamente sobre nanohilos (NW) y nanoláminas (NS) de ZnO piezoeléctricos. En los últimos años se han usado NG de ZnO para la recolección de energía. Estas nanoestructuras tienen las ventajas de ser más flexibles, menos sensibles a la rotura, y puede actuarse sobre las mismas más fácilmente que sobre películas delgadas. El método de crecimiento se basa en una reacción química hidrotérmica a baja temperatura (< 80°C) directamente sobre el sustrato de silicio cubierto por una capa semilla. Este método de crecimiento es especialmente rápido, fácil, económico y completamente compatible con tecnologías microelectrónicas basadas en silicio a nivel de oblea.

La **figura 2** muestra los dos tipos de nanoestructuras de ZnO que se usarán para fabricar los dispositivos.

Para el caso de NS, se usa una capa delgada de AlN (el grosor puede ser menor de <100 nm) como capa semilla, barrera portadora antiapantallamiento y material

piezoeléctrico adicional. De esta manera, la capa delgada de AlN no debe afectar a las propiedades mecánicas del dispositivo porque la tensión creada disminuye con el grosor. El método de crecimiento para NS de ZnO es el mismo que para los NW, pero se usa una capa semilla diferente que afecta totalmente a la forma de la nanoestructura que se hace crecer. El punto principal que hace que esta nanoestructura sea una solución prometedora para NG es la alta uniformidad, reproducibilidad y rapidez del crecimiento de NS.

Se han llevado a cabo varios estudios con el fin de verificar que NS de ZnO que se hacen crecer sobre AlN tienen una buena cristalinidad y por tanto propiedades piezoeléctricas.

La **figura 2** muestra el resultado de una difracción de electrones en el área seleccionada (SAED) generada en un TEM de una única capa de NS en la que puede observarse una alta cristalinidad del material. También puede observarse en la **figura 2** que la dirección de crecimiento es perpendicular al eje c, al contrario que un NW de ZnO típico que crece a lo largo del eje c. En el caso de NS, puede observarse un plano de crecimiento preferible (0001) a costa de la inhibición del plano de crecimiento {1010}, lo cual se invierte completamente en el caso de NW. Además, queda claro el tamaño hexagonal de los cristales de ZnO, típico de una red cristalina de wurtzita. El cristal hexagonal puede tener un diámetro de más de 1-5 μm y un grosor de menos de 20 nm lo cual significa una enorme relación de aspecto superior a 100.

También se realizó un estudio de XRD para observar otras orientaciones cristalinas presentes en una matriz de NS. El resultado puede observarse en la **figura 4**. Puede observarse un pico destacado para la orientación (002) deseada del ZnO, también puede verse claramente la contribución de la película delgada de AlN.

Flujo de proceso

Tal como ya se mencionó, se integrarán un condensador y un diodo junto con el dispositivo de recopilación de energía con el fin de tener un sistema compacto que puede obtener un voltaje de CC (Corriente Continua) a partir de una aceleración de entrada variable. El proceso de fabricación va dirigido a ser compatible con tecnologías de CMOS poco exigentes.

A continuación se indican las etapas del proceso que deben seguirse para llevar a cabo la fabricación tecnológica, incluyendo siete etapas fotolitográficas:

1. Se realiza una implantación de n+ en áreas seleccionadas de la capa de dispositivo de SOI dopada con n mediante un óxido de protección que se hizo crecer anteriormente. Esta implantación definirá el contacto óhmico con silicio y el electrodo inferior del condensador. (Máscara N+)

2. Se lleva a cabo una oxidación de campo de 1060 nm con el fin de pasivar los diferentes dispositivos. Por medio de grabado iónico reactivo (RIE) y grabado en húmedo este óxido puede retirarse selectivamente para definir regiones activas. (Máscara de áreas activas)
- 5 3. Realizar una oxidación de compuerta de 365 Å a 950°C para crear la capa de óxido delgada necesaria para producir el condensador.
4. Retirar este óxido delgado mediante grabados en seco y en húmedo a partir de áreas de contacto para permitir el acceso eléctrico a los diferentes contactos. (Máscara de contacto)
- 10 5. Encima de estas áreas de contacto, se pulverizará una multicapa de Cr/Ni/Au para crear el electrodo superior del condensador, la superficie de contacto metal-semiconductor del diodo Schottky y los contactos metálicos. El electrodo del condensador puede diseñarse para cubrir toda la superficie del chip disponible para maximizar su capacidad de carga lo cual es una gran mejora en comparación con
- 15 dispositivos del estado de la técnica. La última capa de Au expuesta también se usará como capa semilla para hacer crecer NW de ZnO.
6. Con el fin de fabricar la versión de este dispositivo basado en NS de ZnO, se depositará una capa de Ti/Pt seguida por una capa de AlN de 100 nm mediante pulverización catódica por RF para generar la capa semilla para estas
- 20 nanoestructuras.
7. La multicapa metálica total y capa semilla, cuando sea aplicable, se graban posteriormente en áreas seleccionadas. (Máscara de metal 1)
8. Se harán crecer nanohilos y nanoláminas de ZnO mediante un proceso hidrotérmico sobre las respectivas capas semilla depositadas sobre el electrodo superior del condensador, lo que hace que este dispositivo sea único.
- 25 9. Se recubrirá por centrifugación (Spin-coating) una capa de polímero (por ejemplo PMMA, PDMS o SU8) sobre la superficie y se revelará para incrustar los NW/NS para evitar cortocircuitos entre electrodos de NG, si es necesario.
10. Se depositará una capa gruesa de aluminio (también pueden usarse otros
- 30 metales tales como titanio y platino), se litografiará y se grabará para cubrir los NW/NS incrustados, creando el electrodo superior de NG. (Máscara de metal 2).
11. Se fotolitografía el contorno de las estructuras móviles sobre el lado del dispositivo (máscara delantera de RIE) y se graba la capa del dispositivo de SOI mediante RIE.
- 35 12. En el lado trasero, se deposita aluminio, se fotolitografía y se graba para crear una máscara dura para DRIE. (Máscara trasera de DRIE).

13. Se graba completamente mediante DRIE la oblea de manipulación de SOI hasta el óxido enterrado. Antes de realizar esta etapa se recubre una capa resistente protectora sobre el lado delantero.

14. Se desprenden cuidadosamente las estructuras mediante grabado en húmedo del SiO₂ y se disuelve el recubrimiento de capa resistente mediante inmersión en acetona.

El dispositivo final es una viga en voladizo piezoeléctrica cargada en la punta desprendida con condensador y diodo integrados tal como se muestra en la **figura 3**. Esta integración permite reducir las pérdidas de potencia y facilita la combinación de varios generadores sin necesidad de controlar las diferencias de fase de los potenciales piezoeléctricos generados (es decir no se necesita ninguna sincronización de movimientos resonantes).

Rendimiento

Para el dispositivo basado en NW de ZnO, se supone que la densidad de NW será de ~4 NW/μm². Si cada NW toma una parte activa en la generación de carga, y a partir de un valor de 4 pW/NW medido cuando se curva un NW mediante una punta de AFM [4], puede estimarse una potencia generada de ~1,6 mW/cm². Sin embargo, en el presente caso la estimulación mecánica se producirá mediante la compresión de las matrices de NW derivada del curvado de la viga y una superficie de transducción típica de 1 mm². Se ha notificado una producción de potencia de 1,45 mW/cm² (para un área de transducción de ~4 mm²) para una estructura similar a la que se colocará encima del condensador integrado para niveles de presión similares a los logrados con el curvado de la viga en voladizo. Teniendo en cuenta la presente configuración de dispositivo (área de transducción de ~1 mm², aceleración de 1-10 g, tensión principal de 1-10 MPa), una potencia de salida objetivo de 500 μW/cm² es un valor razonable. Para el caso de NS, no se dispone de datos anteriores, pero se esperan densidades de potencia comparables debido a las dimensiones y configuración de cristales similares tanto de NW como de NS.

A partir de resultados anteriores, obtenidos usando estructuras similares pero con un enfoque de película delgada, puede estimarse un valor límite inferior para los presentes prototipos.

Para el primer prototipo, las dimensiones de los dispositivos finales serán de 0,5x0,5x0,05 cm³, y se basarán en una oblea de SOI de tipo n. Se espera que se use un marco o soporte de vidrio o silicio con el fin de permitir que la masa inercial se

mueva arriba y abajo. Este marco de soporte puede aumentar el grosor del dispositivo final en 0,05 cm.

NÚMEROS DE REFERENCIA

- 5 11 Masa inercial.
- 12 Diodo de Schottky.
- 13 Chip que forma el dispositivo.
- 14 Condensador.
- 15 Capa piezoeléctrica.
- 10 16 Viga en voladizo.
- 17 Parte anclada.

REIVINDICACIONES

1. Dispositivo de recolección de energía piezoeléctrico, que comprende:

- una parte (17) anclada;

5 - una masa (11) inercial;

- una estructura flexible;

caracterizado por que:

- la estructura flexible comprende una capa (15) piezoeléctrica con una pluralidad de nanoestructuras;

10 - un condensador (14) está formado entre un electrodo inferior de una región altamente dopada y un electrodo superior de una capa metálica; y

- un diodo (12) está formado entre dicha capa metálica y una región ligeramente dopada en la parte (17) anclada, estando el diodo (12) en serie con el condensador (14),

15 en el que la estructura flexible está configurada para curvarse provocando así que las nanoestructuras piezoeléctricas generen una corriente inducida por potencial piezoeléctrico rectificadas por el diodo (12) y almacenadas por el condensador (14).

2. Dispositivo según la reivindicación 1, en el que la estructura móvil es una viga (16)

20 en voladizo entre la parte (17) anclada y la masa (11) inercial.

3. Dispositivo según la reivindicación 1 ó 2, en el que una capa semilla que comprende Au está formada bajo la capa (15) piezoeléctrica constituida por ZnO y las nanoestructuras son nanohilos.

25

4. Dispositivo según la reivindicación 3, en el que la longitud de los nanohilos es de desde 100 nm hasta 10 μ m.

5. Dispositivo según la reivindicación 1 ó 2, en el que una capa semilla que comprende AlN está formada bajo la capa (15) piezoeléctrica constituida por ZnO y las nanoestructuras son nanoláminas.

30

6. Dispositivo según la reivindicación 5, en el que el diámetro de las nanoláminas oscila entre 100 nm y 10 μ m.

35

7. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones, en el que los electrodos del condensador (14) se extienden desde la estructura flexible hasta la parte (17) anclada.

8. Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones, en el que el material de sustrato es silicio cristalino de tipo n.

5 **9.** Dispositivo según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, en el que el material de sustrato es silicio cristalino de tipo p.

10. Sistema de recolección de energía que comprende una matriz de dispositivos de recolección de energía piezoeléctricos según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9,
10 en el que dispositivos adyacentes están apilados dejando un hueco entre los mismos para el movimiento de la masa (11) inercial.

11. Sistema según la reivindicación 10, en el que los dispositivos de recolección de energía se combinan en serie.
15

12. El sistema según la reivindicación 10, en el que los dispositivos de recolección de energía se combinan en paralelo.

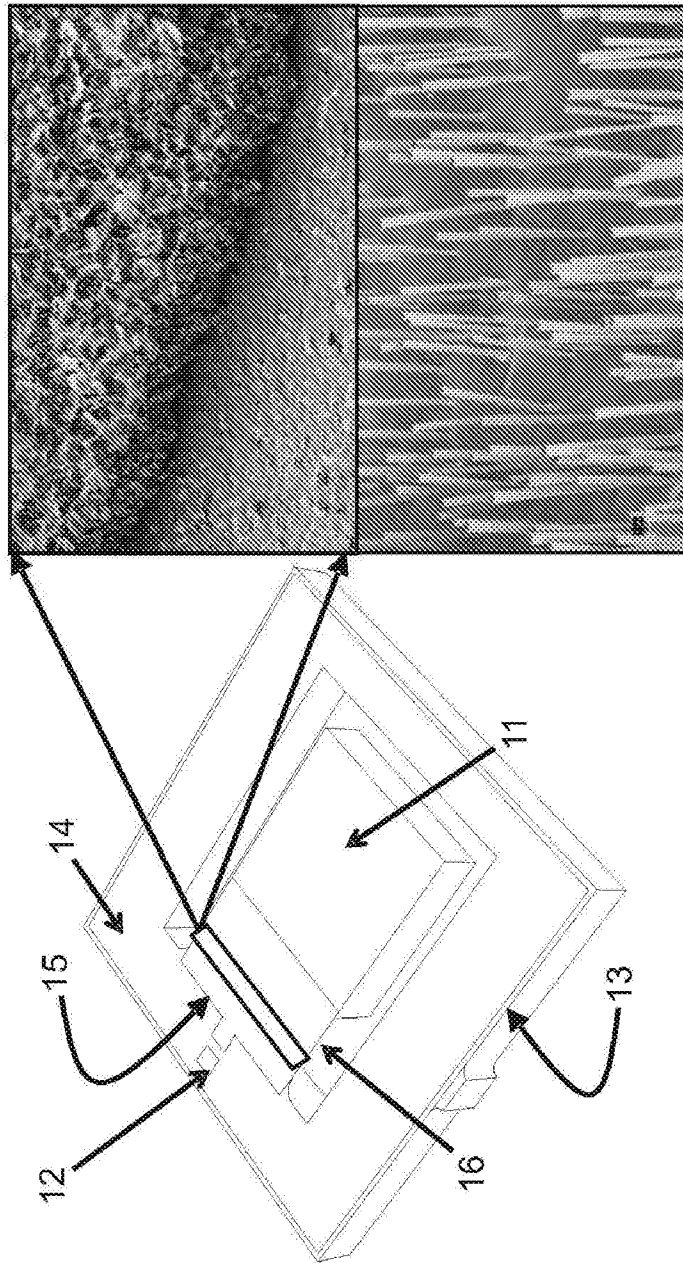


Fig. 1

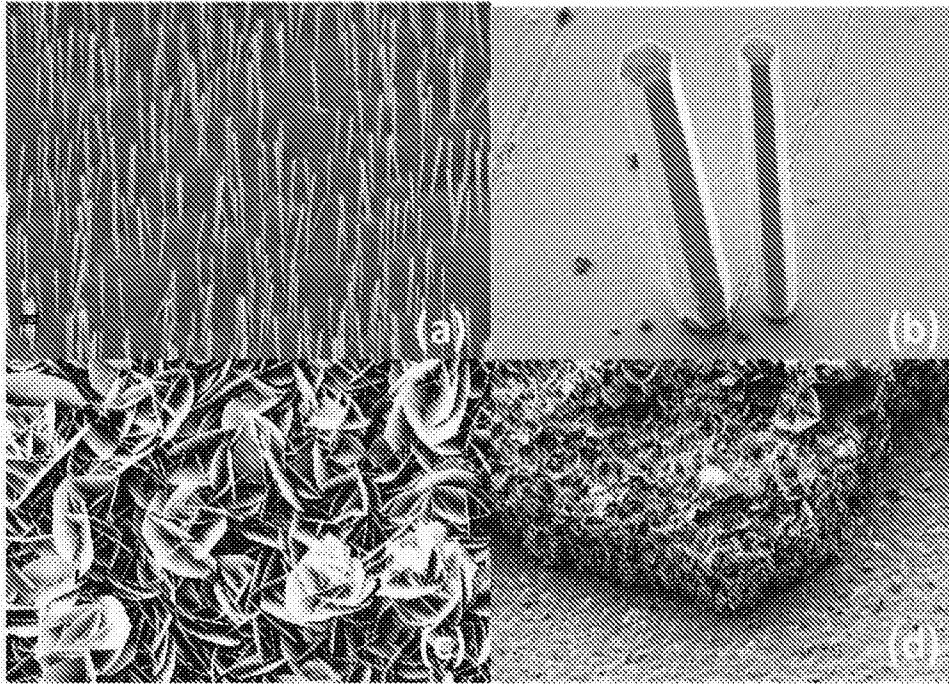


Fig. 2

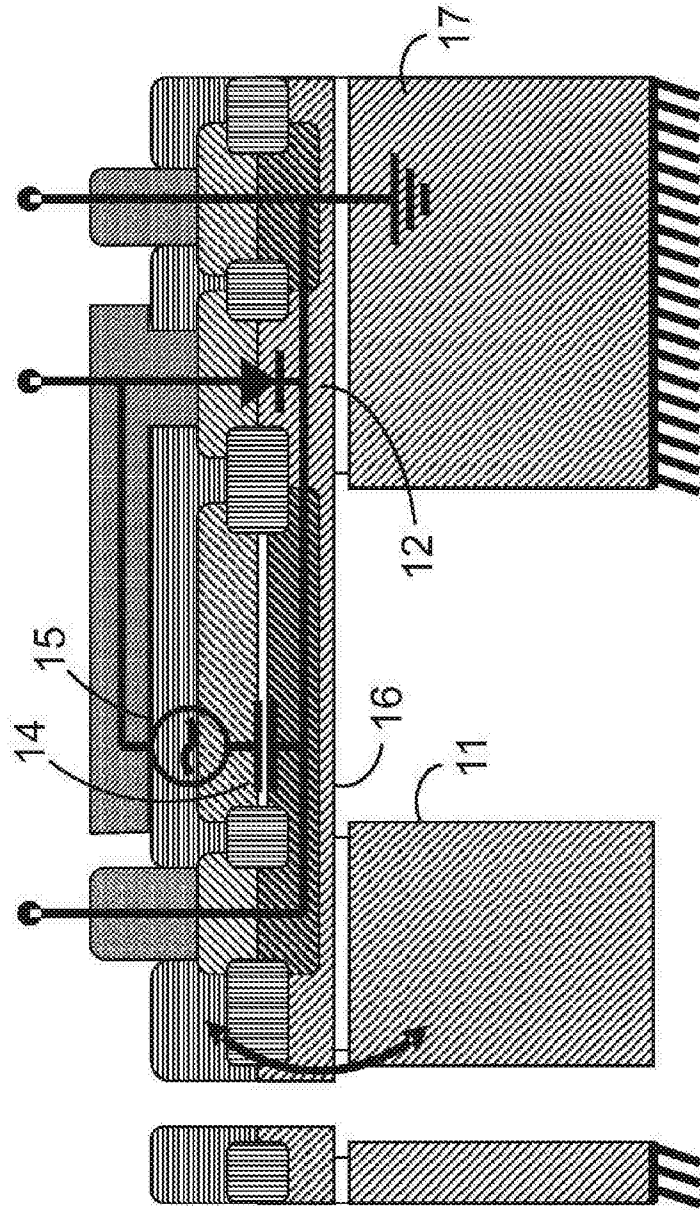


Fig. 3

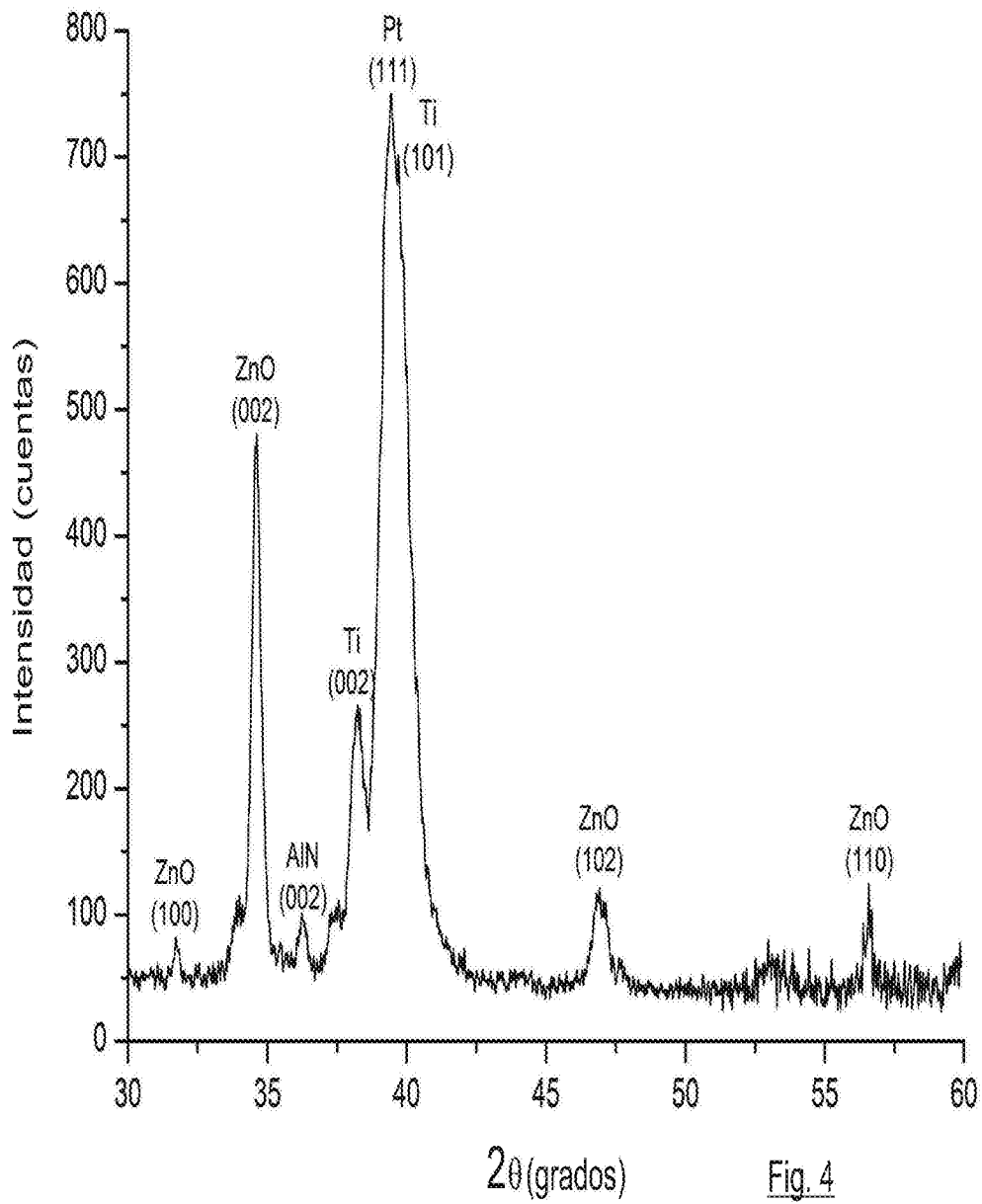


Fig. 4