

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 964 621**

51 Int. Cl.:

**G01N 5/00** (2006.01)

**G01N 1/22** (2006.01)

**G01N 15/02** (2006.01)

**G01G 3/12** (2006.01)

**G01G 3/16** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.08.2019 PCT/FR2019/052011**

87 Fecha y número de publicación internacional: **05.03.2020 WO20044000**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.08.2019 E 19774161 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.10.2023 EP 3844479**

54 Título: **Sensor de partículas finas con microbalanzas en cascada**

30 Prioridad:

**30.08.2018 FR 1857827**

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

**08.04.2024**

73 Titular/es:

**CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU  
BÂTIMENT (33.3%)  
84 Avenue Jean Jaures  
77420 Champs-sur-Marne, FR;  
UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL (33.3%) y  
UNIVERSITÉ PARIS EST CRÉTEIL VAL DE  
MARNE (33.3%)**

72 Inventor/es:

**ALGRE, EMMANUELLE;  
SOYSAL, UGUR;  
MARTY, FRÉDÉRIC;  
MOTZKUS, CHARLES;  
ROBINE, ENRIC;  
BERTHELOT, BRICE y  
GEHIN, EVELYNE**

74 Agente/Representante:

**DEL VALLE VALIENTE, Sonia**

ES 2 964 621 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

Sensor de partículas finas con microbalanzas en cascada

5 **Resumen de la invención**

La presente invención se refiere a un sensor para medir la concentración de masa de partículas finas para la contaminación del aire, potencialmente para aire interior y contaminación con un origen biológico.

10 **Técnica anterior**

La contaminación de partículas está implicada en la aparición de diversas patologías cardiovasculares, cerebrovasculares y respiratorias a través de mecanismos de toxicidad descritos por el *Haut Conseil de la Santé Publique* (Alto Consejo Francés para la Salud Pública - HCSP) (“Pollution par les particules 2 dans l’air ambiant – Recommandations pour protéger la santé”, 2012). La contaminación del aire y las partículas del aire se han clasificado como “definitivamente cancerígena para seres humanos” en 2013 por la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC) (“Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans”; volumen 109). Esta contaminación también se ha identificado como responsable de muertes prematuras, del orden de 42.000 por año en Francia, lo que, con el cumplimiento de los umbrales recomendados por la OMS (10 y 25 µg/m<sup>3</sup> respectivamente promedio anual y promedio de 24 horas para PM<sub>2,5</sub> y 20 y 50 µg/m<sup>3</sup> respectivamente promedio anual y promedio de 24 horas para PM<sub>10</sub>) se reduciría significativamente, como se destaca en el informe de Aphekom (InVS and other European partners, 2011).

Actualmente, el método de referencia para la medición de las concentraciones de masa PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> es el método gravimétrico descrito en la Norma Europea “EN 12341:2014 2016”. Este método de muestreo de filtro seguido de pesar en condiciones estándar es muy engorroso de implementar e identificado como “difícil de aplicar en el contexto de la producción de datos de rutina de redes de medición” por AIRPARIF en un informe de resumen de 2008 (AIRPARIF, 2008). La Norma Europea permite el uso de métodos distintos del método gravimétrico siempre que pueda demostrarse que la medición tiene una relación constante con las mediciones de referencia. Esto generalmente se denomina certificación a través de una “demostración de equivalencia con el método de referencia”.

Actualmente hay tres métodos de mediciones continuas de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> utilizadas mediante el monitoreo de redes en Europa: el indicador Beta, la TEOM (Microbalanza de Elemento Cónico Oscilatorio) y el TEOM-FDMS (Sistema de Medición de Dinámica de Filtro).

También se puede observar que existen métodos ópticos de medición de la concentración de masa (nefelometría) que consisten en medir la intensidad de la luz dispersada por las partículas que pasan a través de una celda de medición iluminada por una fuente de luz. Se usa una calibración para determinar la concentración de masa. Este método, que tiene la ventaja de ser miniaturizable y económico, no hace posible definir un factor de corrección estable con mediciones de referencia, lo que lo hace inadecuado según las normas definidas por la norma europea.

En la bibliografía, otros sistemas están disponibles para permitir una medición directa en tiempo real de la masa recogida en las diferentes etapas de un impactador en cascada. Estos sistemas llamados QCM (Quartz Crystal Microbalance - Microbalanza de Cristal de Cuarzo) permiten obtener la concentración de masa de partículas por clase de tamaño correspondiente a cada etapa del impactador. Estos sistemas generalmente no permiten obtener la concentración de masa total pero, sin embargo, pueden medir las fracciones de concentración de masa tales como PM<sub>10-2,5</sub>, PM<sub>2,5-1</sub> o PM<sub>1-0,05</sub> que pueden ser interesantes desde un punto de vista epidemiológico. Sin embargo, debe observarse que estos dispositivos se utilizan actualmente muy poco, ya que tienen muchas limitaciones metrológicas (Berthelot, 2015).

A partir de los elementos anteriores se vuelve muy claro que actualmente no hay dispositivos para la medición de etapas de tiempo en tiempo real o corto de las concentraciones de masa en partículas que cumplen los requisitos europeos y sean adecuados en términos de dimensiones y funcionamiento para un despliegue múltiple en entornos interiores o exteriores.

En este contexto, la invención se refiere al desarrollo de un sistema en miniatura para la monitorización continua de la concentración de masa en partículas para diferentes fracciones de tamaño de partícula (PM<sub>10-2,5</sub>, PM<sub>2,5-1</sub> o PM<sub>1</sub>) de aire o aire interior

60 MALDONADO-GARCIA MARIBEL Y COL (“Chip-Scale Implementation and Cascade Assembly of Particulate Matter Collectors With Embedded Resonant Mass Balances”, IEEE SENSORS JOURNAL, IEEE SERVICE CENTER, NEW YORK, NY, EE.UU, vol. 17, no. 6, 15 Marzo 2017 (2017-03-15), pp. 1617-1625, XP011641611, ISSN: 1530-437X, DOI: 10.1109/JSEN.2016.2638964) describe una microbalanza con un montaje en cascada.

65 El documento US 5 369 033 describe un sistema de limpieza de microbalanzas con características de lavado, que no tienen la misma configuración.

El documento EP 2 204 641 describe el calentamiento de una microbalanza con el fin de limpieza.

**Resumen de la invención**

5 La invención se refiere a un sistema en miniatura para el análisis de tamaño de partícula de partículas, preferiblemente partículas contaminantes, suspendidas en el aire. Comprende un dispositivo de selección en miniatura que usa las propiedades aerodinámicas de las partículas, así como microbalanzas MEMS para la medición de masa.

10 La presente invención es como se define en la reivindicación 1.

La invención hace posible desarrollar sensores de alto rendimiento para el análisis de la calidad del aire debido a la contaminación en partículas para proponer "alternativas" a los sistemas gravimétricos actuales cuya sensibilidad y portabilidad son limitadas.

15 De hecho, los sensores gravimétricos habituales utilizan la medición de la frecuencia de resonancia de un oscilador

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

mecánico. La frecuencia de resonancia está relacionada con su masa mediante  $f_r$  donde  $f_r$  es la frecuencia resonante,  $k$  es la constante de rigidez y  $m$  es la masa del oscilador. Por lo tanto, una adición de masa en el oscilador causará una variación de su frecuencia de resonancia.

20 La masa mínima detectable por un resonador viene dada por:

$$\Delta m_{\min} = \frac{m}{Q}$$

25 donde  $Q$  es el factor de calidad. Por lo tanto, un elemento resonante con una masa baja y un factor de alta calidad tendrá una mayor sensibilidad de detección. Usando micro o nanosistemas de silicio, la masa del resonador puede reducirse considerablemente. La invención permite el desarrollo de dispositivos MEMS para medir masas "intermedias" de partículas, es decir, entre el attogrammo y el nanogrammo. En particular, la microbalanza está diseñada para medir un desplazamiento de frecuencia de oscilación.

30 El tamaño y el coste reducidos del dispositivo permiten su despliegue a gran escala y su adaptación al monitoreo de entornos específicos y/o las necesidades del público. Debido a estas características, el dispositivo también puede utilizarse como equipo individual y/o nómada. Este sistema también se puede utilizar para evaluar nuevas prácticas y ofertas que acompañarán las políticas para mejorar el desempeño energético y ambiental de los edificios que se están implementando.

35 El dispositivo puede integrarse en un dispositivo de control de red/instrumento conectado y/o un dispositivo de gestión de calidad de aire de edificios tal como un dispositivo de control del sistema de ventilación.

Según otras características de sensor opcionales:

40 • La superficie de la membrana se conforma para permitir controlar la adhesión y/o separación de las partículas mediante:

- micro/ nanoestructuración;
- funcionalización fisicoquímica;

45 controlar la adhesión de las partículas selectivamente según sus propiedades superficiales o la humectación del fluido de limpieza.

50 • La membrana se suspende de varios anclajes a los que está sujeta de manera tensada y dispuesta entre varios electrodos adecuados para la activación o medición electrostática. Preferentemente, la membrana oscilante puede deformarse en su plano en el modo de Lamé o extensional. Más preferiblemente, la membrana oscilante puede deformarse solo en su plano en el modo de Lamé o en modo extensional. Esto es posible en particular gracias a la disposición de la membrana descrita en la presente invención.

55 • Los medios para accionar la corriente de aerosol están configurados para permitir un caudal de uno a varios L/min, y en donde las boquillas axiales en cada etapa tienen una abertura de uno a varios cientos de micrómetros.

60 • La membrana de silicio oscilante tiene un accionamiento electrostático, y en donde una tensión alterna combinada con una tensión directa se lleva a uno o más electrodos de accionamiento mientras que la membrana suspendida se mantiene en un potencial electrostático cero para deformar la membrana, la membrana se carga electrostáticamente, cuyo movimiento provoca un movimiento de cargas y, por lo tanto, una corriente medida a través

## ES 2 964 621 T3

de contactos conectados a los anclajes de la membrana oscilante o conectados a un electrodo no utilizado para el accionamiento.

- 5 • Al menos una capa de material se ubica en la superficie de la membrana de la microbalanza MEMS para permitir la adhesión preferencial de partículas diana. En particular, la superficie de la membrana oscilante está micro/nanoestructurada o funcionalizada fisicoquímicamente, por ejemplo, mediante silicio negro.
- La membrana oscilante tiene un área de superficie de uno a varios mm<sup>2</sup>.
- 10 • La superficie de la membrana es silicio negro. Ventajosamente, el silicio negro tiene nanoporos, preferentemente afilados, lo que reduce el efecto de rebote de las partículas, proporcionando así un patrón de deposición confinado.
- La superficie de la membrana se cubre con una capa fina de polímero.
- 15 • Cada etapa tiene: al menos un rebaje axial ubicado bajo cada membrana para suspender la misma, aberturas laterales al rebaje axial para el flujo de la corriente de aerosol y ubicarse a cada lado del rebaje axial, y en cada entrada de etapa, una boquilla axial para el flujo de la corriente de aerosol.
- 20 • El cuerpo del impactador tiene una pila de cortes de silicio u otros materiales micro/nanoestructurados, apoyándose y unidos entre sí.
- Cada etapa tiene cuatro cortes: un primer corte con una boquilla axial; un segundo corte con un rebaje axial y aberturas de flujo lateral; dos cortes son los denominados “espaciadores” dispuestos entre el primer corte y el  
25 segundo corte.
- El sistema para limpiar microbalanzas MEMS se realiza por canales de entrada y canales de salida laterales ubicados entre el llamado corte de silicio “espaciador” y el primer corte de silicio.
- 30 • La membrana de la microbalanza MEMS se conforma para presentar:
  - un factor de calidad Q, mayor de 15.000,
  - una masa m entre 5 y 100 µg
  - 35 - la masa mínima detectable por el sensor está dada por  $m_{min} = \frac{m}{Q}$
- El diámetro y el número de aberturas laterales y de cada boquilla axial se seleccionan para permitir el control del caudal del flujo de aerosol y la clasificación de las partículas PM10 según su inercia en cada etapa para medir en particular una fracción torácica de las partículas. Las partículas PM10 son preferiblemente de un diámetro promedio de 300 nm a 10 µm.
- 40 • Las frecuencias de oscilación de membrana están entre 1 y 20 MHz. En particular, la membrana está dispuesta para permitir que las frecuencias de oscilación de membrana estén entre 1 y 20 MHz.
- 45 • El sistema para limpiar microbalanzas MEMS incluye un elemento de calentamiento ubicado en la membrana y/o el cuerpo del impactador. Preferentemente, el sistema para limpiar microbalanzas MEMS comprende un elemento de calentamiento ubicado bajo la al menos una membrana y/o en el cuerpo del impactador, preferentemente en cada etapa.
- 50 • El sistema para limpiar microbalanzas MEMS comprende la membrana oscilante diseñada para oscilar a una frecuencia dada que permite la separación de partículas de la membrana.
- El cuerpo del impactador tiene medios para abrir/cerrar las aberturas axiales y/o las boquillas axiales; para  
55 controlar el caudal de la corriente de aerosol que fluye en el cuerpo del impactador.
- Las boquillas axiales y los rebajes axiales son de menor tamaño a lo largo del eje del flujo de aerosol para impactar las partículas de tamaño decreciente en cada etapa.
- 60 • El diámetro y el número de aberturas laterales que permiten el flujo se determinan por impacto: partículas entre 10 micrómetros y 2,5 micrómetros o más, en una primera etapa; y partículas entre 2,5 micrómetros y un micrómetro en una segunda etapa; y partículas entre un micrómetro y 0,3 micrómetros en una tercera etapa, dependiendo de la dirección del flujo de la corriente de aerosol.
- 65 • El conducto de silicio está recubierto con un metal conductor.

• Las dimensiones de la membrana oscilante en anchura va desde varios cientos de micrómetros hasta varios milímetros. En particular, las dimensiones de la membrana oscilante en anchura va de micrómetros a varios milímetros.

5 • Para cada microbalanza MEMS, la distancia entre las membranas oscilantes y los actuadores electrostáticos es menor o igual a 1 micrómetro.

10 • La membrana oscilante es una membrana rectangular. Preferentemente, una membrana rectangular o cuadrada.

• La microbalanza MEMS está configurada para permitir la medición de la masa de las partículas entre el attogrammo y el nanogrammo.

15 Una de las originalidades de este dispositivo reside en la integración conjunta del sistema de clasificación, microbalanzas fabricadas usando tecnologías de microfabricación de silicio y funciones de limpieza, referencia o calibración automatizadas. La funcionalización de la superficie de las microbalanzas mediante un tratamiento o microestructuración adecuada permite controlar una adhesión preferencial para medir las concentraciones de masa de contaminantes. Este dispositivo está integrado en una placa electrónica para hacer el procesamiento y control de las señales de medición compactas. La integración de estas funciones permite el uso del instrumento para la monitorización continua y en tiempo real de la calidad del aire.

### Breve descripción de los dibujos

25 Otros objetivos, características y beneficios surgirán de la descripción detallada que sigue con referencia a los dibujos proporcionados con fines ilustrativos y no limitativos, en los que:

- La Figura 1 muestra una vista en sección vertical a lo largo del eje 1 mostrado en la Figura 3, del dispositivo según la invención;

30 - La Figura 2 muestra una vista vertical a lo largo del eje 2 perpendicular al eje 1, del dispositivo según la invención;

- La Figura 3 muestra una vista superior del dispositivo según la invención, con los ejes 1 y 2;

35 - La Figura 4 muestra una imagen SEM de una microbalanza MEMS que consiste en un resonador de silicio con un principio de accionamiento electrostático y medición con la recuperación de la señal de salida a través de un anclaje en sección transversal;

40 - La Figura 5 muestra la curva de resonancia de una microbalanza antes (curva AV) con una frecuencia media de 4100297,7 Hz, y después (curva AP) de impacto de aerosol con una frecuencia media de 4100222,5 Hz;

- La Figura 6 muestra una imagen SEM de una microbalanza MEMS después de la deposición del aerosol;

45 - La Figura 7 muestra las principales funciones del dispositivo según la invención;

- La Figura 8 muestra el proceso de fabricación de una membrana usada en el dispositivo;

50 - La Figura 9 muestra un resultado de la simulación mecánica por elementos finitos con el software COMSOL @, que muestra la deformación máxima de una membrana cuadrada y sus 4 anclajes de suspensión para una frecuencia de oscilación correspondiente a la frecuencia de resonancia de Lamé. Las deformaciones elásticas mostradas en la figura varían desde 0 (para la marca W) hasta unos pocos nanómetros (para la marca X);

55 - las Figuras 10a y 10b muestran imágenes de microscopía electrónica de barrido de una membrana cuadrada con un área de silicio negro en el centro.

### Descripción detallada de la invención

60 La presente invención presenta un sensor 1 para el análisis continuo in situ de una corriente de aerosol, que permite la medición de la masa de partículas micrométricas/submicrométricas 2 suspendidas en la corriente de aire y mostrada en las Figuras 1 a 3.

Este sensor 1 incluye un dispositivo de clasificación aerúlica que hace posible realizar la granulometría de las partículas 2 según su tamaño mientras se integran los sistemas de medición.

65 El dispositivo de clasificación aerúlica según la presente invención tiene:

- un cuerpo 3 de impactador en cascada con una o más etapas 4a, 4b, 4c, que tiene en la entrada una cabeza para retirar las partículas (el tamaño, más particularmente el diámetro aerodinámico que corresponde al diámetro promedio, es decir, de forma ventajosa menos de 10 micrómetros, es decir, partículas a las que se hace referencia en la técnica anterior como PM10), seguido de un conducto de flujo 6 formado para cada etapa y después de la dirección del flujo de aerosol: al menos una boquilla axial 10, seguida de aberturas laterales 9 en la boquilla axial para permitir el flujo de la corriente de aerosol; el diámetro de las boquillas axiales 10, de forma ventajosa de uno a varios cientos de micrómetros, se selecciona para permitir el control del caudal de la corriente de aerosol y la clasificación de las partículas 2 según su inercia; el conducto 6 también está formado por paredes 5 que se extienden en la longitud del cuerpo del impactador 3 entre la boquilla axial 10 y las aberturas laterales 9.

El sensor 1 también tiene:

- al menos una microbalanza MEMS 7 por etapa 4, con una membrana oscilante de silicio 7a que tiene preferiblemente un accionamiento electrostático ubicado en la zona de impacto de las partículas 2 orientada hacia una boquilla axial y entre dos o más aberturas laterales 9; Esta microbalanza MEMS 7 está especialmente diseñada para medir un desplazamiento, preferiblemente del orden de unas pocas decenas de hercios, de la frecuencia de oscilación para determinar la masa inferior o igual al microgramo de todas las partículas 2 depositadas en la microbalanza MEMS 7;

- medios informáticos conectados a cada microbalanza MEMS 7 para determinar la masa de todas las partículas 2 en la zona de impacto, en función del desplazamiento entre la frecuencia de oscilación de la membrana oscilante 7a con partículas 2 y la frecuencia de oscilación de la membrana sin partículas 2;

- un sistema para limpiar microbalanzas MEMS que permite que las partículas 2 se descarguen fuera de las microbalanzas;

- medios para accionar el flujo de aerosol.

El sistema de limpieza permite que el sensor funcione en tiempo continuo/real, limpiándose las microbalanzas MEMS 7 antes de cualquier nueva medición del sensor 1.

Como ejemplo únicamente y de forma no limitativa, las etapas de tiempo de cada hora, cada cuarto de una hora, cada minuto o cada 10 segundos pueden elegirse para llevar a cabo la limpieza, permitiendo así mediciones periódicas, mediciones en tiempo real o casi reales. Esto dependerá típicamente de: las concentraciones encontradas; el uso del sistema.

Si la regeneración de un sensor es un problema identificado conocido, la dificultad es integrar y operar in situ sin una intervención de "mantenimiento" en el sensor y sin dañarlo. La técnica anterior describe el uso de un fluido supercrítico que es inaplicable sin mantenimiento en el sensor y, por lo tanto, para el presente sistema integrado de la invención.

La solución que proponemos es fácil de implementar y puede combinarse con una acción mecánica (haciendo vibrar la membrana verticalmente u horizontalmente a una frecuencia superior a la frecuencia de desprendimiento de partículas) o con una acción térmica (integrando elementos resistivos bajo la membrana).

El diagrama esquemático del sistema se muestra en las Figuras 1, 2 y 3.

La cabeza de extracción (filtro con apertura, vórtice u otro estado del sistema de la técnica) permite que solo las partículas PM10 pasen a través, es decir, partículas cuyo tamaño, en particular el diámetro, sea inferior a 10 micrómetros (PM10). Una descripción y medición de las partículas PM10 se detalla en particular en la norma NF EN 12341.

El diámetro de las boquillas axiales en cada etapa de extracción puede ser del orden de unos pocos cientos de micrómetros con caudales de 1 a varios L/min. Por lo tanto, este caudal corresponde aproximadamente al caudal de ventilación humano, que está entre 5 y 10 L/min, mientras que los caudales de flujo < 0,3 L/min tales como los del sistema descrito por Maldona-Garcia y otros, 2017-IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 17, Núm. 6, 15 de marzo de 2017 no son muy representativos. Además, esto corresponde a diámetros de corte entre 100 nm y unos pocos  $\mu\text{m}$  (por ejemplo, 10  $\mu\text{m}$ ) para medir partículas con un diámetro promedio inferior a 10 micrómetros. Por ejemplo, para medir partículas de unos pocos 100 nm a 10  $\mu\text{m}$ , preferiblemente partículas PM10 con un diámetro de al menos 100 nm, más preferiblemente al menos 200 nm.

El objetivo es proporcionar un dispositivo compatible con los estándares de la OMS con respecto a las categorías de partículas (PM) que se miden y sus valores umbral. En particular, este dispositivo permite la medición de la fracción torácica de partículas.

Usando el impactador en cascada, las partículas 2 de diferentes diámetros se ven afectadas en diferentes etapas 4a, 4b, 4c del sistema y se miden usando la microbalanza MEMS 7 ubicada en las zonas de impacto.

De hecho, dependiendo del diámetro de apertura de un impactador, la corriente de aire cargada con partículas se acelerará más o menos, las partículas 2 de inercia inferior seguirán la corriente de aire mientras que aquellas de mayor inercia impactarán en una zona ubicada bajo una boquilla de flujo para el flujo de aerosol ubicado opuesto a la microbalanza MEMS 7.

Cada etapa 4a, 4b, 4c tiene el mismo plano:

- al menos un rebaje axial 8 que es un rebaje pasante o no pasante (por ejemplo, una muesca en el corte de silicio) ubicado bajo cada microbalanza para suspender la membrana 7a, y

- aberturas laterales 9 para el flujo de la corriente de aerosol situado en ambos lados del rebaje axial 8, y en cada etapa de entrada de una boquilla axial 10 situada debajo del rebaje axial 8.

Ventajosamente, las aberturas laterales 9 están dispuestas simétricamente al rebaje axial 8 situado centralmente en el cuerpo del impactador 3.

Las boquillas axiales 10 y los rebajes axiales 8 son de tamaño decreciente a lo largo del eje del flujo de aerosol para impactar las partículas 2 de tamaño decreciente en cada etapa.

Aquí, por ejemplo, un diámetro y un número de aberturas laterales 9 ubicadas en el paso de flujo pueden seleccionarse para permitir el impacto de:

- partículas 2 entre 10 micrómetros y 2,5 micrómetros en una primera etapa; y

- partículas 2 entre 2,5 micrómetros y un micrómetro, en una segunda etapa; y

- partículas 2 entre 1 micrómetro y 0,3 micrómetros en una tercera etapa, dependiendo de la dirección del flujo de la corriente de aerosol.

El cuerpo 3 del impactador puede tener una pila modular que comprende cortes 11 de silicio u otros materiales microestructurados/nanoestructurados, por ejemplo, por medio de micro o nanofabricación en salas limpias, en contacto y unidas entre sí.

Por ejemplo, otros materiales posibles son: vidrio, aluminio.

Si el conducto 6 está hecho de silicio u otro material micro/nanoestructurado, puede cubrirse con un metal conductor.

Aquí en la Figura 2, cada etapa 4a, 4b, 4c muestra cuatro segmentos 11:

- un primer corte 11a con una boquilla axial 10;

- un segundo corte 11c con un rebaje axial 8 y aberturas laterales 9 para el flujo de la corriente de aerosol a lo largo del cuerpo de impactador, siendo este flujo axial a través de la boquilla axial 10 y extendiéndose radialmente para alcanzar las aberturas laterales 9 después de salir de la boquilla axial 10;

- dos cortes 11b, 11d denominados "espaciadores" dispuestos entre el primer corte 11a y el segundo corte 11c.

Aquí en la Figura 1, el sistema para limpiar microbalanzas MEMS se realiza por canales de entrada laterales 12a y canales de salida laterales 12b en los cortes de silicio espaciador y se abre en el conducto 6 por las entradas de aire laterales 12'a y 12'b, y medios para hacer circular un fluido tal como aire en estos canales 12a y 12b.

Los canales de entrada laterales 12a y los canales de salida laterales 12b se comunican de manera fluida con el conducto de paso de flujo 6 para hacer circular un fluido de limpieza, tal como aire o disolvente o disolvente + aire, sobre las microbalanzas MEMS desde los canales de entrada laterales 12a a los canales de salida laterales 12b.

Ellos llevan a la superficie plana de la etapa 4a, 4b, 4c, que tiene las aberturas axiales 8 y las microbalanzas MEMS 7.

Los canales de entrada laterales 12a y los canales de salida laterales 12b de cada etapa 4a, 4b, 4c están ubicados entre el llamado segmento de silicio "separador" 11b, 11d y el primer corte de silicio 11a.

Como variante, no mostrada en la Figura 2, el sistema para limpiar la microbalanza MEMS incluye un elemento de calentamiento.

En una segunda variante, el sistema para limpiar microbalanzas MEMS incluye la membrana oscilante 7a.

En la invención, el sistema de limpieza tiene una combinación de al menos dos de los siguientes tres dispositivos:

- los canales de entrada laterales 12a y canales de salida laterales 12b;
- el elemento de calentamiento situado en la zona de impacto
- la membrana oscilante 7a; en este caso, la membrana 7a se controla por medios de control para vibrar a una cierta frecuencia para descargar las partículas en un período requerido.

Los medios para controlar y accionar el flujo de aerosol son, por ejemplo, una o más bombas.

En una variante no mostrada en los diagramas, el cuerpo del impactador 3 del sensor 1 tiene medios para abrir/cerrar:

- las aberturas laterales 9 y posiblemente los rebajes axiales 8 si son pasantes,
- y/o las boquillas axiales 10.

Las membranas de silicio 7a que tienen accionamiento electrostático (Figura 4) de las microbalanzas desarrolladas se hacen vibrar en su resonancia según un modo de deformación con un factor de alta calidad.

El accionamiento de las membranas también puede ser: piezoeléctrico o magnético.

Cada membrana 7a está suspendida de varios anclajes 13, preferiblemente hechos de silicio, a los que se fija la membrana, estando dispuesta la membrana 7a entre varios electrodos 14 adecuados para la activación o medición electrostática. Ventajosamente, la membrana está rodeada por su circunferencia por los electrodos.

Aquí en la Figura 4, se han realizado cuatro electrodos 14, que pueden estar hechos de silicio dopado, y se suministran con una señal de entrada y reciben una señal de salida.

En el caso donde el accionamiento es electrostático, una tensión alterna combinada con una tensión directa se lleva a uno o más electrodos de accionamiento 14 mientras que la membrana suspendida 7a se mantiene en un potencial electrostático cero. Por lo tanto, se induce una fuerza electrostática que oscila a la misma frecuencia que la tensión de accionamiento en la membrana 7a.

A continuación, la membrana se deforma en un movimiento oscilante plano. A medida que la membrana 7a está cargada electrostáticamente, el movimiento de la misma induce un movimiento de cargas y, por lo tanto, una corriente proporcional a la velocidad de movimiento de la membrana 7a.

Esta corriente puede medirse a través de contactos conectados a los anclajes 13 de la membrana 7a o a un electrodo no usado para el accionamiento. Existen frecuencias de accionamiento particulares para las cuales la amplitud de deformación de la membrana 7a es máxima.

Para una frecuencia de resonancia, la corriente medida en esta frecuencia es máxima. Con una adición de masa, esta frecuencia de resonancia mecánica variará.

Por lo tanto, la medición de la frecuencia de resonancia proporciona información sobre la masa depositada.

Ventajosamente, la superficie de las membranas 7a de las microbalanzas MEMS 7 puede ser, para permitir el control de la adhesión y/o separación (alternativamente humectación/deshumectación del líquido limpiador) de las partículas 2:

- micro/nanoestructurada y/o
- funcionalizada

promoviendo selectivamente la adhesión de las partículas 2 según sus propiedades superficiales.

Puede tener propiedades electrostáticas/mecánicas o térmicas para controlar la adhesión y/o separación de las partículas 2, cuando se cargan. Por ejemplo, si algunos aerosoles están cargados negativamente y otros están cargados positivamente, el uso de propiedades electrostáticas también puede mejorar la eficacia de la deposición.

Se pueden colocar una o más capas de material sobre la superficie de las membranas 7a de las microbalanzas MEMS para permitir la adhesión preferencial de las partículas diana 2.

Dependiendo de la aplicación, la superficie de las membranas 7a se configura de manera diferente.

Por ejemplo, pueden optimizarse para detectar preferentemente la masa de aerosoles biológicos, pólenes, hongos y bacterias gracias a sus propiedades superficiales específicas.

5 La superficie de las membranas 7a de microbalanzas MEMS puede ser un silicio micro o nanoestructurado, tal como silicio negro (mostrado en las Figuras 10a y 10b). Ventajosamente, la superficie de las membranas puede recubrirse con un polímero. En una realización particular, la superficie de la membrana 7a es silicio negro recubierto con una capa fina de polímero para, por ejemplo, influir en la adhesión de las partículas diana 2 a la membrana 7a o el comportamiento de las partículas diana 2 con respecto a la membrana 7a.

10 La membrana oscilante 7a se realizó como se muestra en la Figura 4.

Las dimensiones de la membrana oscilante 7a varían en anchura desde varios cientos de micrómetros hasta varios milímetros. Eso significa, al menos 100  $\mu\text{m}$ , o incluso 200  $\mu\text{m}$ , 300  $\mu\text{m}$ , 400  $\mu\text{m}$ , preferiblemente al menos 500  $\mu\text{m}$ . Además, la membrana oscilante 7a puede tener una anchura de hasta 10 milímetros, preferiblemente hasta 5 milímetros. Las dimensiones de espesor pueden ser entre 30  $\mu\text{m}$  y 50  $\mu\text{m}$  o entre 35  $\mu\text{m}$  y 45  $\mu\text{m}$ , por ejemplo.

Para cada microbalanza MEMS 7, la distancia entre la membrana oscilante 7a y los actuadores electrostáticos que son los electrodos es menor o igual a 1 micrómetro.

20 La membrana oscilante 7a es preferiblemente una membrana rectangular o cuadrada. La membrana oscilante 7a es ventajosamente una membrana rectangular.

También puede tener una forma circular o cualquier otra forma.

25 Las membranas oscilantes 7a de las microbalanzas MEMS 7 están conformadas para tener:

- un factor de calidad Q mayor de 15.000; se obtiene este factor de calidad usando silicio, un modo de deformación de microbalanza bien elegido y una forma de los anclajes 13; con  $m_{min} = \frac{m}{Q}$  donde  $m_{min}$  es la masa detectable mínima de las partículas sólidas que se miden por la microbalanza, y m es la masa de la membrana o superficie activa.

- masas m entre 5 y 100  $\mu\text{g}$ .

35 Las frecuencias de las membranas 7a de las microbalanzas MEMS están ventajosamente entre 1 y 20 MHz.

Ventajosamente, la microbalanza MEMS 7 está configurada para permitir la medición de la masa de las partículas 2 entre el attogrammo y el nanogrammo.

40 La resolución o precisión de la microbalanza MEMS 7 en la medición de masa es el nanogrammo, debido a las opciones realizadas para tomar silicio, con un modo de deformación específico de la membrana 7a, y una forma particular de los anclajes 13, que hacen posible maximizar el factor de calidad del resonador mientras se mantiene una gran superficie activa.

45 Por la geometría de la microbalanza (en particular cuadrada), su tipo de accionamiento (electrostático) y su modo de deformación (según un modo de volumen en el plano) en modo de Lamé o en modo extensional, lo que hace posible asegurar altas frecuencias de uso (de unos pocos MHz) mientras se mantiene una gran superficie activa (del orden de  $\text{mm}^2$ ). Una superficie activa grande puede corresponder, por ejemplo, a una superficie activa de 100  $\mu\text{m}^2$  a 10  $\text{mm}^2$ , por ejemplo, entre 200  $\mu\text{m}^2$  y 9  $\text{mm}^2$ , entre 200  $\mu\text{m}^2$  y 6  $\text{mm}^2$ , entre 200  $\mu\text{m}^2$  y 4  $\text{mm}^2$ , entre 500  $\mu\text{m}^2$  y 2  $\text{mm}^2$ .

50 La microbalanza así obtenida muestra un factor de alta calidad y, por lo tanto, una buena sensibilidad (aproximadamente 50 Hz/ng) mientras se puede medir un gran número de partículas con un diámetro que varía de 0,1 a 10  $\mu\text{m}$  sin saturación (correspondiente a concentraciones de masa que varían de unos pocos ng/ $\text{m}^3$  a unos pocos 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

55 Por lo tanto, la microbalanza está particularmente diseñada para medir un cambio de solo unas pocas decenas de hertzios alrededor de la frecuencia de oscilación mecánica de uno a varios MHz de la membrana. Más particularmente, la frecuencia de oscilación mecánica de la membrana es entre 1 MHz y 20 MHz, incluso más particularmente la frecuencia de oscilación mecánica de la membrana está entre 1 MHz y 20 MHz y la medición del desplazamiento es unas pocas decenas de hertzios alrededor de la frecuencia de oscilación mecánica de la membrana, por ejemplo aproximadamente 50 Hz.

65 El modo de deformación según un modo de volumen en el plano significa que las deformaciones elásticas no se producen localmente en la superficie, pero son simultáneas a lo largo de todo el espesor de la membrana. Aquí las deformaciones son en el plano, es decir, la deformación no es vertical a la superficie activa sino horizontal. Además,

el accionamiento electrostático permite que los electrodos se coloquen en la superficie activa de la membrana MEMS, pero fuera de ella y actúan sobre el grosor de la superficie activa para deformarla.

5 Por lo tanto, estos electrodos en el exterior hacen que la membrana se expanda y se contraiga en las direcciones horizontales de la superficie activa, la membrana con su superficie activa y el grosor se mueven solo en las direcciones horizontales de la superficie activa.

Por lo tanto, la membrana MEMS no se acciona fuera del plano (en la dirección del espesor de la superficie activa).

10 El sensor puede ajustarse, ad hoc, con medios electrónicos o de software para controlar y comunicar (por cable o radio), lo que le permite al usuario adquirir, visualizar y procesar datos, ya sea a bordo del instrumento o de forma remota.

15 Estos medios permiten, en particular, la integración del sensor o de un sistema con un conjunto de sensores en un sistema de control de calidad de aire de edificios.

La Figura 5 muestra el desplazamiento de frecuencia de la membrana oscilante 7a después de la deposición de partículas micrométricas/submicrométricas 2 suspendidas en la corriente de aire.

20 La Figura 6 muestra el impacto de las partículas 2 en la membrana 7a.

La Figura 7 representa las funciones principales del dispositivo según la invención. Por lo tanto, según una realización, el dispositivo incluye un módulo de separación de partículas FP1, un módulo de deposición de partículas FP2 y un módulo de análisis FP3.

25 Ventajosamente, el módulo de separación FP1 incluye una cabeza de selección, por ejemplo una cabeza PM10. El módulo de separación de partículas FP1 hace posible clasificar las partículas preferiblemente según su inercia, por ejemplo, según su tamaño, y esto sobre varias etapas de impacto.

30 El módulo de deposición de partículas FP2 permite la adhesión de partículas. Además, el módulo de deposición de partículas está configurado para dirigirse a un área de interés en el sensor MEMS. Por lo tanto, el módulo de deposición de partículas FP2 tiene un área diana de interés en el sensor MEMS. Además, el módulo de deposición de partículas está configurado para la adhesión de partículas por funcionalización y/o micro/nanoestructuración de la superficie MEMS. Ventajosamente, el módulo de deposición de partículas está configurado para la regeneración del sensor, incluida la autolimpieza, por ejemplo, por la corriente de aire, la vibración, la temperatura.

35 El módulo de análisis FP3 se puede configurar para medir la frecuencia de resonancia de los sensores MEMS antes y después de la deposición de partículas. El módulo de análisis FP3 también se puede configurar para determinar la masa de las partículas depositadas en la MEMS como una función del cambio de frecuencia. Ventajosamente, este módulo de análisis FP3 permite el procesamiento automatizado de señales. Este módulo de análisis también permite el análisis continuo in situ.

40 Las microbalanzas MEMS 7 se realizan mediante procesos de microfabricación en sala limpia, cuyos pasos se muestran en la Figura 8.

45 Como se muestra en la Figura 8, se hacen de obleas de SOI (Silicio On Aislator) con una pila de silicio monocristalino pulida varias decenas de micrómetros de espesor, denominada "Dispositivo" y luego "D", una capa de óxido de silicio SiO<sub>2</sub> denominada "Caja", entonces "B" o "B'", unos pocos micrómetros de espesor y una capa de silicio monocristalino pulida varios cientos de micrómetros de espesor, denominada "asa", entonces "H" y una cara posterior de óxido, indicada como F en la Figura 8, 2 micrómetros de espesor.

50 La capa D está hecha de silicio dopado con una resistividad eléctrica muy baja para garantizar la activación electrostática de las membranas 7a. La capa H está hecha de silicio altamente resistivo para evitar cortocircuitos. La membrana 7a que forma la microbalanza MEMS 7 está estructurada en el espesor de la capa D.

55 Una capa de nitruro de silicio Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> de aproximadamente cien nanómetros de espesor (indicada N) y después una capa de silicio policristalino de espesor micrométrico (indicada M) se depositan por LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition - Deposición de Vapor Químico a Baja Presión) durante las etapas 1 y 2.

60 Se deposita una resina fotosensible en la superficie superior de la SOI y luego se realiza fotolitografía para definir la estructura de la membrana 7a y los electrodos 14 en la resina en las etapas 3 y 4. En esta etapa, la diferencia entre los patrones de los electrodos de accionamiento 14 y la de la membrana es del orden de dos micrómetros.

65 A continuación, los patrones se transfieren a la capa de polisilicio mediante grabado en una trama RIE (Reactive Ion Etching - Grabado de Iones Reactivos) en la etapa 5.

## ES 2 964 621 T3

A continuación, la oblea SOI se coloca en un horno a alta temperatura (1.100 °C) durante varias horas para oxidar el polisilicio en la etapa 6.

5 Como resultado de esta oxidación, se formó un óxido de silicio de casi dos micrómetros de espesor y las aberturas entre los patrones de accionamiento y el patrón de membrana se redujeron a unos pocos cientos de nanómetros.

Durante las etapas 8 y 9, se realizan fotolitografía, seguida de grabado DRIE (Deep Reactive Ion Etching - Grabado Iónico Reactivo Profundo) para abrir la capa de óxido donde se depositarán los contactos eléctricos.

10 En una etapa 10, estos patrones se transfieren a continuación mediante grabado por RIE en el silicio policristalino y luego el nitruro de silicio.

Además, como se esquematizó en la etapa 7, los parámetros de las etapas 1 a 6, así como las del grabado DRIE del silicio D, se han optimizado previamente en placas de prueba para obtener aberturas de espacios submicrónicos.

15 Durante las etapas 11 y 12, la fotolitografía seguida de la deposición de aluminio denominada "T", mediante pulverización y extracción con acetona, hace posible formar las almohadillas de contacto de aluminio para las entradas y salidas de la señal eléctrica.

20 En la etapa 13, se realiza fotolitografía en la cara posterior del SOI para definir áreas de apertura bajo la membrana.

Este patrón se transfiere al óxido de silicio de la cara posterior mediante grabado con DRIE en la etapa 14.

La membrana y los patrones de electrodos se transfieren a la capa D mediante grabado por DRIE en la etapa 15.

25 Una etapa de DRIE final en la cara posterior transfiere el área de apertura debajo de la membrana hacia la capa H.

A continuación, el óxido de silicio expuesto se disuelve mediante grabado con vapor de ácido fluorhídrico (HF) en la etapa 16. Ahora se suspende la membrana.

30 El polisilicio y el nitruro restantes se limpian finalmente mediante grabado por RIE en la etapa 17.

REIVINDICACIONES

1. Sensor (1) para el análisis continuo in situ de una corriente de aerosol, que permite la medición continua de la concentración de masa en el intervalo de tamaño de las partículas de micrómetros y submicrómetros (2) en suspensión en la corriente de aire, que comprende:
- un dispositivo clasificador aeráulico para efectuar la granulometría de las partículas (2) según su tamaño con un cuerpo impactador en cascada (3) de varias etapas,
- estando formada cada etapa por al menos:
- una boquilla axial (10) a través de la cual el flujo entra en la etapa, y
  - aberturas laterales (9);
- el diámetro y el número de aberturas laterales (9) y de la boquilla axial (10) se seleccionan para permitir el control del caudal de la corriente de aerosol y la clasificación de las partículas (2) según la inercia de las mismas en cada etapa;
- un conducto de flujo formado por paredes que se extienden en la longitud del cuerpo impactador entre la boquilla axial y las aberturas laterales;
  - al menos una microbalanza MEMS (7) por etapa, ubicada a una distancia de y orientada hacia la boquilla axial (10), cuya superficie activa está situada en la zona de impacto de las partículas (2) entre las aberturas laterales (9) que permiten que el flujo pase;
- la al menos una microbalanza MEMS que incluye una membrana de silicio oscilante (7a) configurada para determinar la masa inferior o igual a un microgramo de todas las partículas (2) depositadas;
- al menos un rebaje axial (8) ubicado bajo cada membrana oscilante (7a) para suspender la misma, las aberturas (9) son laterales al rebaje axial (8) y destinadas al flujo de la corriente de aerosol y situadas a cada lado del rebaje axial (8),
- medios informáticos conectados a cada microbalanza MEMS (7) para determinar la masa de todas las partículas (2) en la zona de impacto;
- medios para accionar el flujo de aerosol,
- caracterizados porque**
- en una entrada, una cabeza para retirar las partículas permite que solo las partículas PM10 pasen;
  - un sistema para limpiar cada microbalanza MEMS, preferiblemente en cada etapa, permitiendo que las partículas se descarguen fuera de la microbalanza MEMS,
- el sistema de limpieza comprende al menos uno de los siguientes dispositivos:
- canales de entrada (12a) y canales de salida lateral (12b) que emergen en el conducto (6), y medios para hacer circular un fluido de limpieza tal como aire o disolvente en estos canales (12a, 12b), los canales de entrada lateral (12a) y los canales de salida lateral (12b) se comunican de manera fluida con el conducto (6) y se disponen para hacer que el fluido de limpieza circule sobre la superficie de las membranas (7a),
  - un elemento de calentamiento situado en la zona de impacto;
  - la membrana oscilante (7a);
- en el caso donde el sistema de limpieza tiene una combinación de al menos dos de los tres dispositivos, la membrana (7a) se controla por medios de control para vibrar a una determinada frecuencia para descargar las partículas, en un período requerido; y
- la al menos una microbalanza MEMS (7) incluye como superficie activa una membrana de silicio oscilante (7a) accionada electrostáticamente, dicha membrana oscilante está:
- con una dimensión que se encuentra en anchura entre varios cientos de micrómetros y varios milímetros;
  - suspendida de varios anclajes de silicio (13) a los que está sujeta de manera tensada,
  - dispuesta entre varios electrodos (14) adecuados para el accionamiento electrostático,
  - configurada para tener un factor Q de calidad mayor que 15.000, y una masa m de entre 5 y 100 µg,
  - configurada para tener frecuencias de oscilación de la membrana (7a) de entre 1 y 20 MHz, y

o configurada para hacer posible controlar la adhesión y/o la separación de las partículas (2) en su superficie por micro/ nanoestructuración o funcionalización fisicoquímica.

- 5 2. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde la membrana oscilante (7a) es una membrana rectangular o cuadrada capaz de deformarse en su plano en modo de Lamé o modo extensional.
- 10 3. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde los medios para accionar la corriente de aerosol están configurados para permitir un caudal de uno a varios L/min, y en donde las boquillas axiales en cada etapa tienen una abertura de uno a varios cientos de micrómetros.
- 15 4. El Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde una tensión alterna combinada con una tensión de CC se lleva a uno o más electrodos de accionamiento (14) mientras que la membrana suspendida (7a) se mantiene en un potencial electrostático cero para deformar la membrana, la membrana (7a) se carga electrostáticamente, cuyo movimiento provoca un movimiento de cargas y, por lo tanto, una corriente medida a través de contactos conectados a los anclajes (13) de la membrana oscilante (7a) o conectados a un electrodo (14) no usado para el accionamiento.
- 20 5. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde la membrana oscilante (7a) tiene un área de superficie de uno a varios mm<sup>2</sup>.
- 25 6. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde la superficie de la membrana oscilante (7a) es silicio negro.
- 30 7. Sensor (1) según la reivindicación anterior, en donde la superficie de la membrana (7a) está cubierta con una capa fina de polímero.
- 35 8. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde el cuerpo del impactador (3) tiene una pila de cortes (11) de silicio u otros materiales microestructurados/nanoestructurados, que se apoyan y se unen entre sí.
- 40 9. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde el diámetro y el número de las aberturas laterales (9) y de cada boquilla axial (10) se seleccionan para permitir el control del caudal de la corriente de aerosol y la clasificación de las partículas PM10 (2), preferentemente con un diámetro de 300 nm a 10 μm, según su inercia en cada etapa para medir en particular una fracción torácica de partícula.
- 45 10. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde el sistema para limpiar microbalanzas MEMS incluye un elemento de calentamiento ubicado bajo cada membrana oscilante (7a) y/o en el cuerpo de impactador (3) en cada etapa.
- 50 11. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde el sistema para limpiar microbalanzas MEMS incluye la membrana oscilante (7a) prevista para oscilar a una frecuencia de entre 1 y 20 MHz, lo que permite la separación de las partículas de la membrana oscilante (7a) durante la limpieza.
- 55 12. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde el cuerpo del impactador (3) tiene medios para la apertura/cierre:
  - de las aberturas axiales (9);
  - y/o de las boquillas axiales (10);
 para controlar el caudal de la corriente de aerosol que fluye en el cuerpo del impactador (3).
- 60 13. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde el diámetro y el número de aberturas laterales (9) que permiten que el flujo se determine de manera que impacte:
  - las partículas (2) entre 10 micrómetros y 2,5 micrómetros o más, en una primera etapa; y
  - las partículas (2) entre 2,5 micrómetros y un micrómetro en una segunda etapa; y
  - las partículas (2) entre un micrómetro y 0,3 micrómetros en una tercera etapa, en la dirección del flujo de la corriente de aerosol.
- 65 14. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde las dimensiones de la membrana oscilante (7a) tienen entre 500 micrómetros y varios milímetros de ancho.
15. Sensor (1) según una de las reivindicaciones anteriores, en donde la microbalanza MEMS (7) tiene una forma cuadrada y está configurada para permitir la medición de la masa de las partículas (2) entre attogramos y nanogramos.

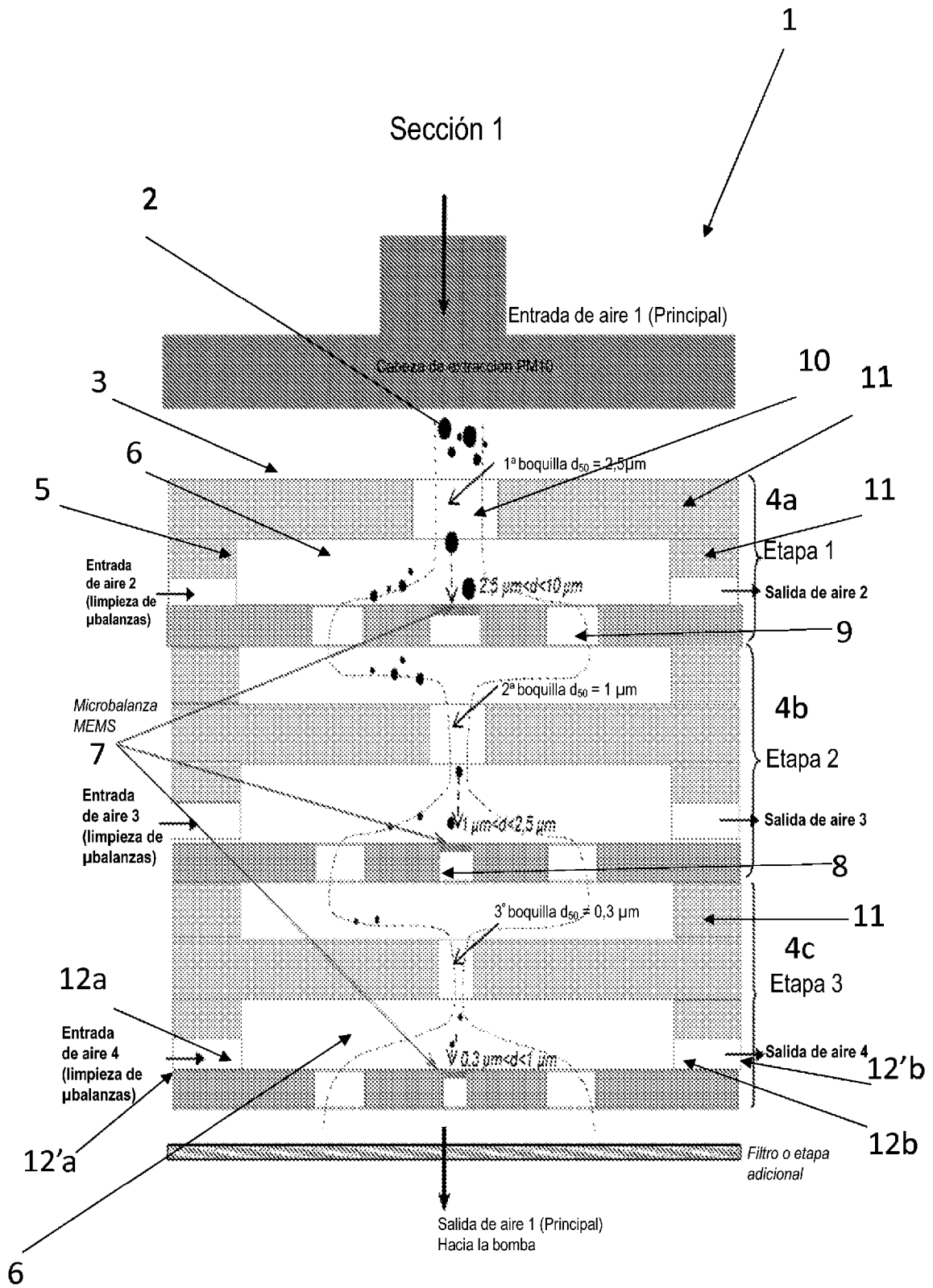


Figura 1



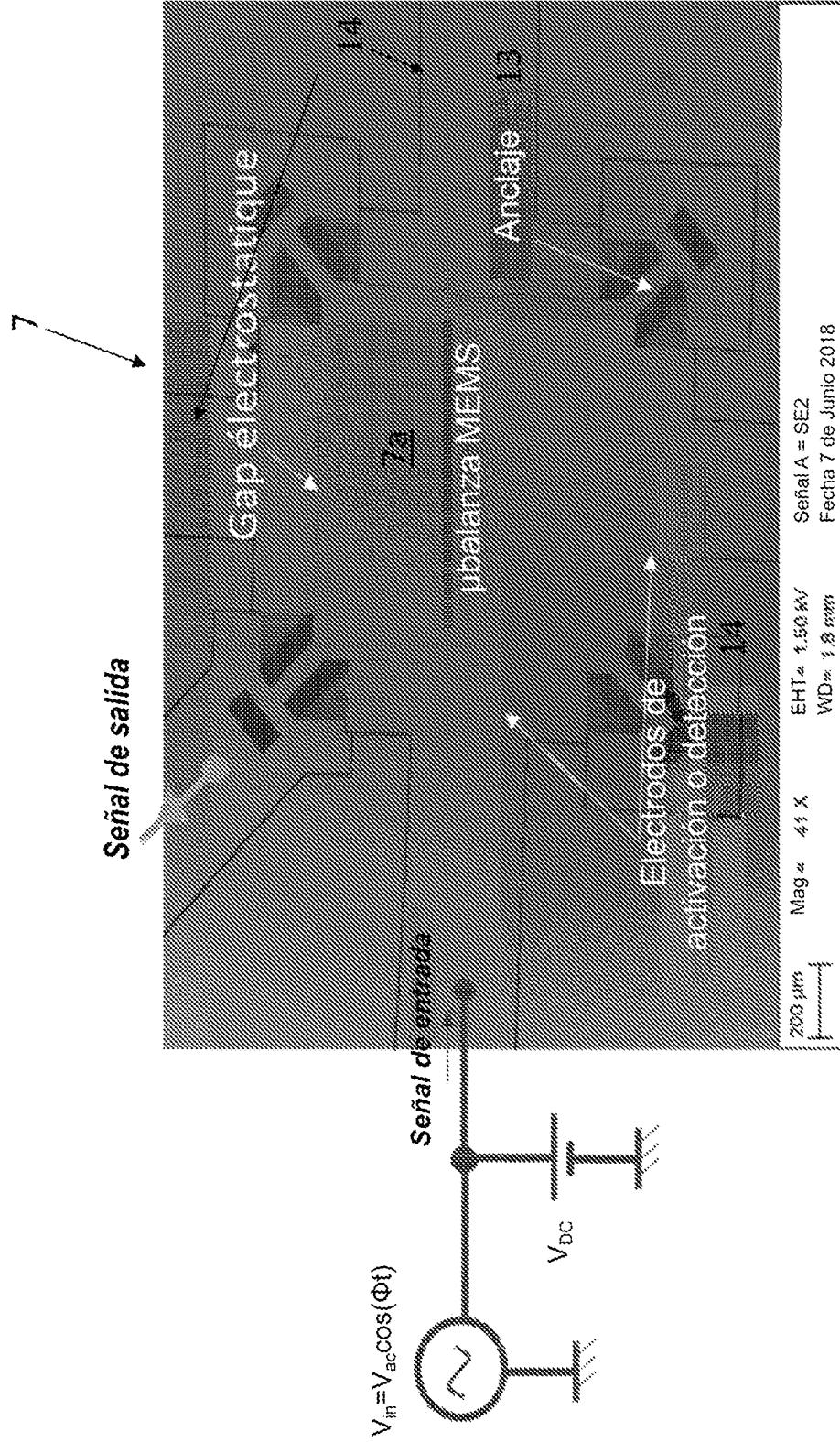


Figura 4

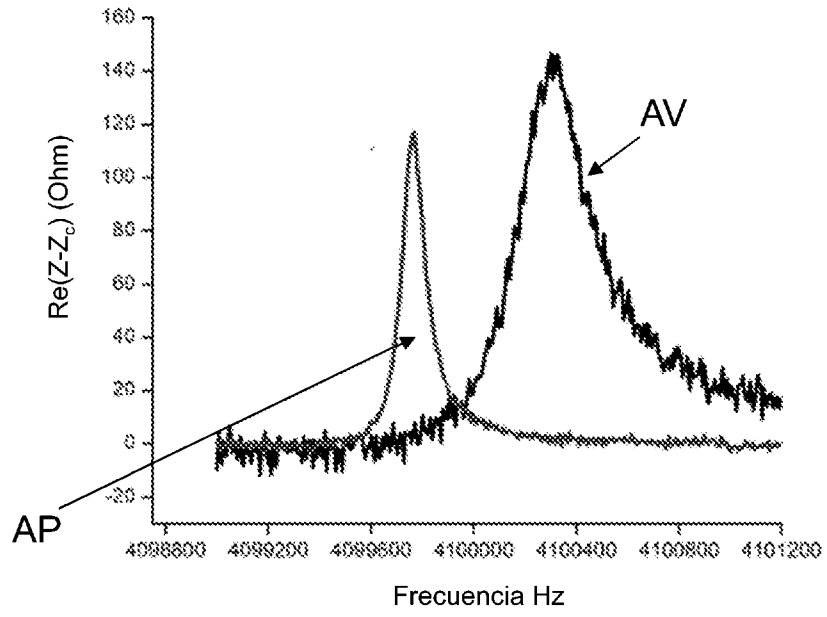


Figura 5

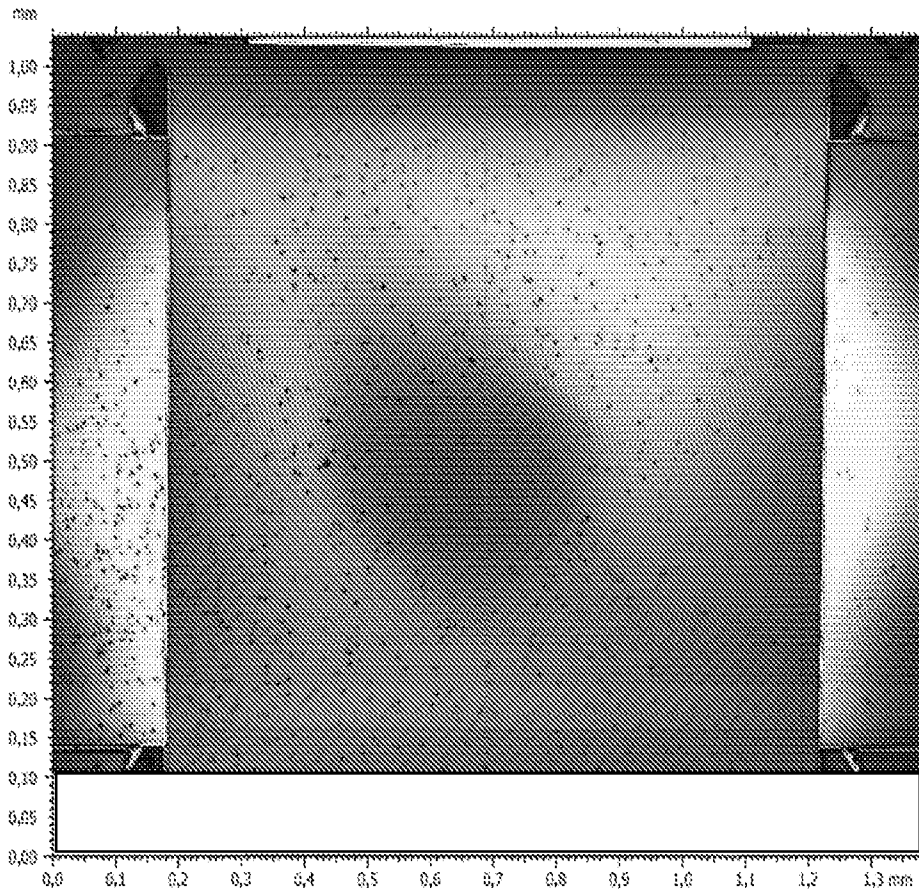


Figura 6

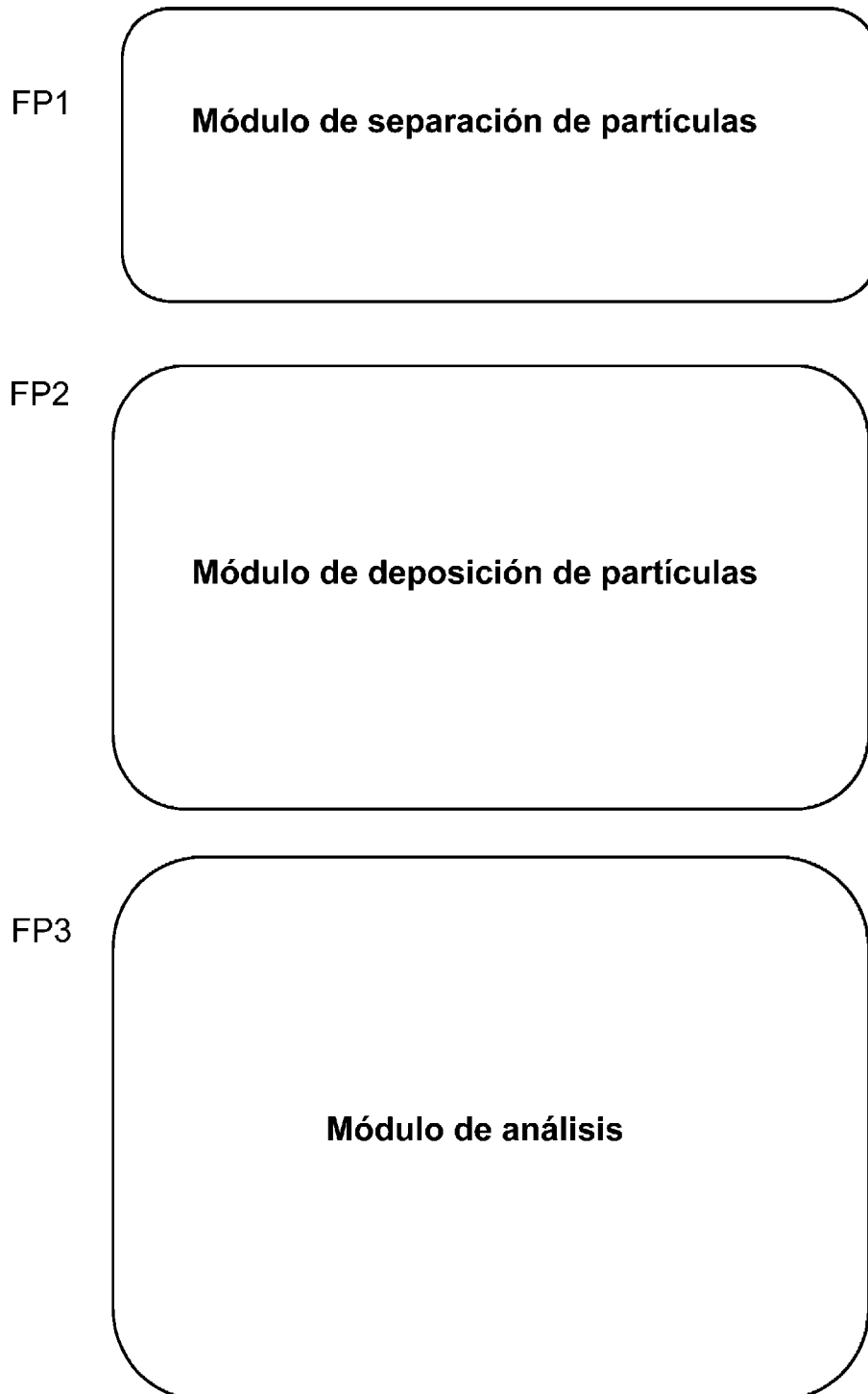


Figura 7

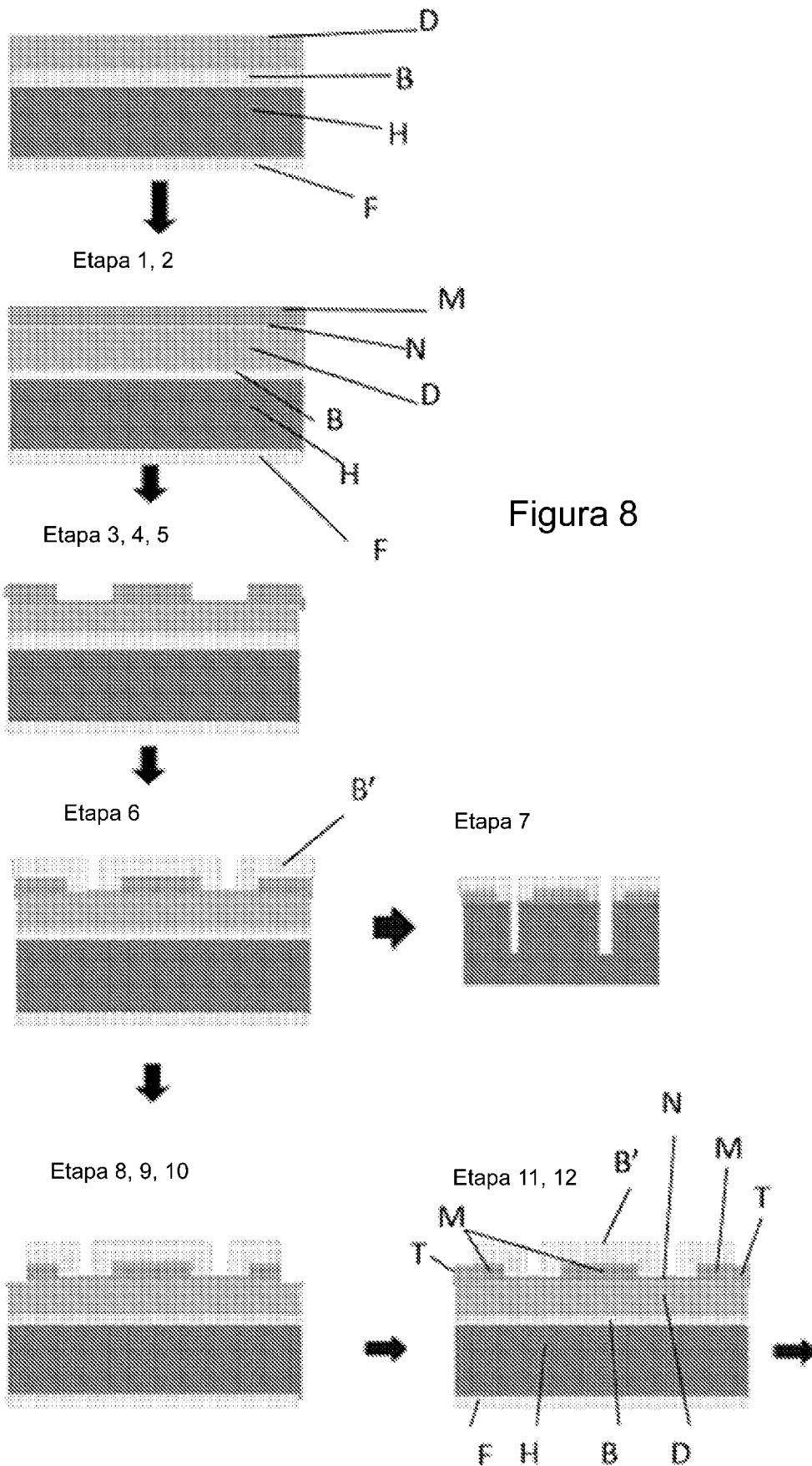


Figura 8

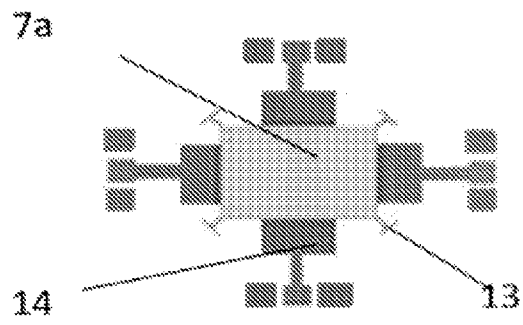
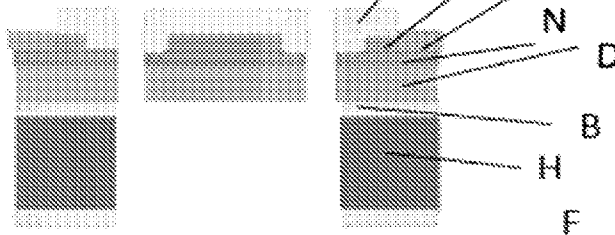


Figura 8

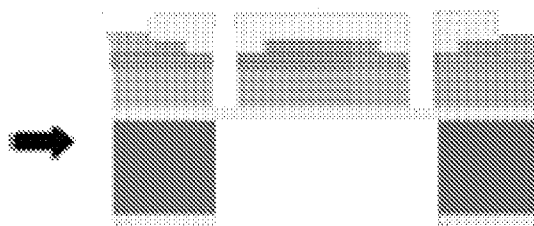
Etapa 17



Etapa 16



Etapa 13, 14, 15



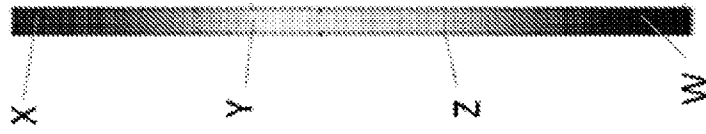


Figura 9

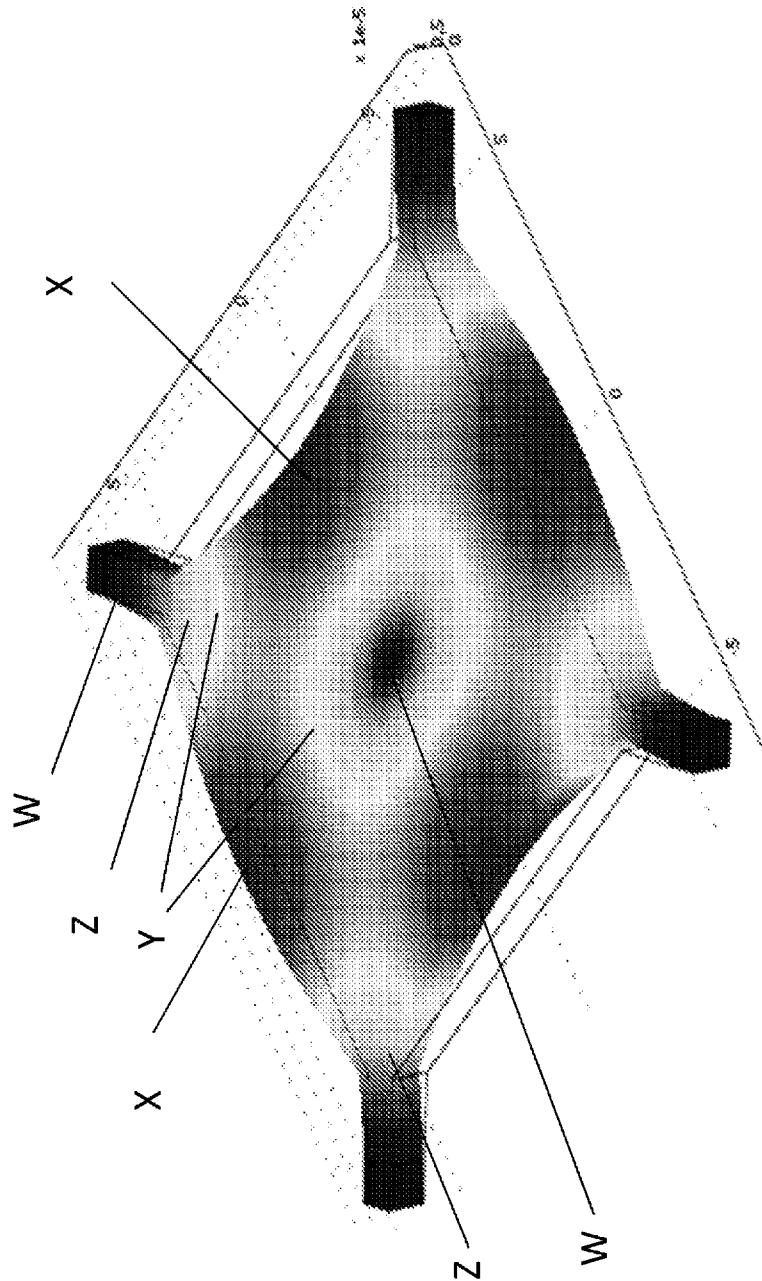


Figura 10a

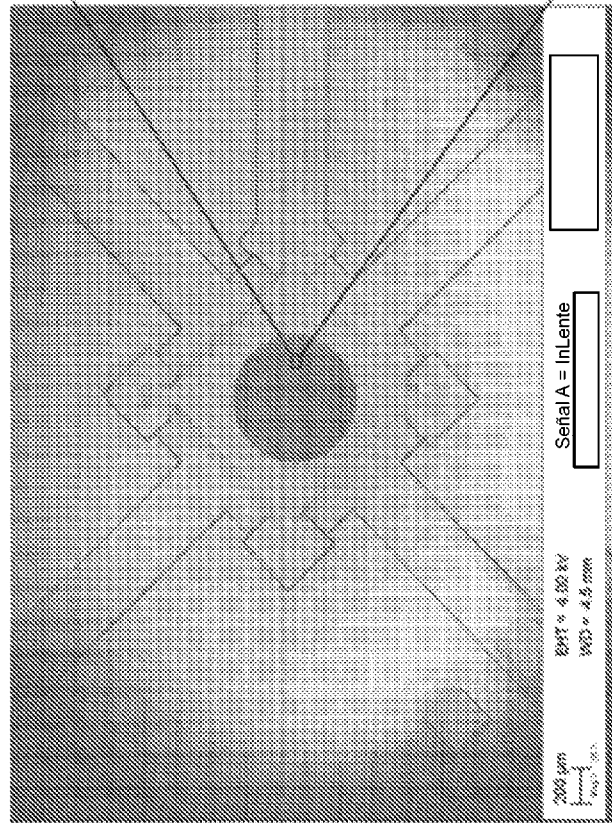


Figura 10b

