

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 627 013**

21 Número de solicitud: 201531604

51 Int. Cl.:

G01L 9/12 (2006.01)
G01L 19/04 (2006.01)
B81B 3/00 (2006.01)
B81C 1/00 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

06.11.2015

43 Fecha de publicación de la solicitud:

26.07.2017

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2016/070788

71 Solicitantes:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (50.0%)
C/ Serrano, 117
28006 Madrid ES y
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES (50.0%)**

72 Inventor/es:

**SACRISTÁN RIQUELME, Jordi;
BOHÓRQUEZ REYES, Juan Carlos;
SEGURA-QUIJANO, Fredy Enrique;
ACHURY FLORIAN, Álvaro Uriel;
UNIGARRO CALPA, Edgar Alberto y
RAMIREZ RODRÍGUEZ, Fernando**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

54 Título: **SENSOR DE PRESIÓN CAPACITIVO CON CAPACITANCIAS DE REFERENCIA Y MÉTODO DE OBTENCIÓN DEL MISMO**

57 Resumen:

Sensor de presión capacitivo con capacitancias de referencia y método de obtención del mismo.

La presente invención es un sensor (1) de presión capacitivo con capacitancias de referencia (13, 13'), susceptible de ser integrado monolíticamente en un circuito microelectrónico. Este sensor (1) de presión comprende: un primer electrodo sensor (9) insertado en una capa de material aislante donde también se encuentran las capacitancias de referencia (13, 13'), dos electrodos de referencia (10, 10') separados entre ellos por el primer electrodo sensor (9), una cavidad hermética (12) sobrepuesta al primer electrodo sensor (9), dos muros de conexión (11) que confinan al primer electrodo (9), a los dos electrodos de referencia (10, 10') y a la cavidad hermética (12), en donde esta cavidad hermética (12) está cubierta por un segundo electrodo sensor (8) que cuando es deformado por una fuerza externa varía la capacitancia.

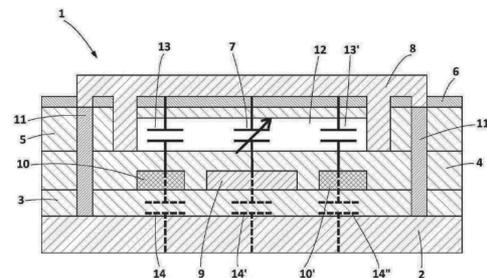


FIG. 2

ES 2 627 013 A1

**SENSOR DE PRESIÓN CAPACITIVO CON CAPACITANCIAS DE REFERENCIA Y
METODO DE OBTENCION DEL MISMO**

DESCRIPCIÓN

5

OBJETO DE LA INVENCION

El objeto de la presente invención es un sensor de presión capacitivo con capacitancias de referencia, susceptible de ser integrado monolíticamente en circuitos microelectrónicos, de modo que sus capacitancias de referencia no incrementan el área total del sensor.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Actualmente son conocidos los sensores de presión microelectrónicos de tipo piezoresistivo, piezoeléctrico o capacitivo que se componen de una membrana flexible, una cavidad hermética y dos o más electrodos. Estos sensores de presión funcionan por cambios de alguna propiedad eléctrica (resistencia, voltaje, capacitancia) causada por la deflexión de la membrana flexible que se deforma a causa de la fuerza ejercida por el diferencial entre la presión de la cavidad hermética y la presión externa al sensor.

15
20

Más concretamente, los sensores de presión capacitivos constan de dos electrodos que se ubican de forma paralela entre ellos, con una cavidad hermética que los separa. Uno de los electrodos se ubica sobre un sustrato de manera que no se vea afectado mecánicamente por la presión y el otro electrodo generalmente es, o se encuentra ubicado sobre una membrana flexible, susceptible de ser deformada por una presión externa a medir.

25

Un ejemplo de estos sensores integrado monolíticamente en un circuito CMOS esta descrito en la patente española ES2055588T3, donde se propone un proceso para la fabricación de un sensor de presión capacitivo que incluye las siguientes etapas, empezando a partir de un sustrato semiconductor: aplicación de una película soporte, precipitación de una película de semiconductor policristalino, dopado de la película de semiconductor policristalino, y eliminado de la película de soporte.

30

Para que el sensor de presión que sea compatible con circuitos CMOS, y para incrementar la

exactitud del sensor, proponen aislar una zona semiconductor del sustrato semiconductor y que se aplique una película aislante en la zona del semiconductor aislado, estando localizada la película semiconductor policristalina en la película aislante por encima de la zona del semiconductor aislado.

5

Adicionalmente, en los diseños de los sensores de presión capacitivos se colocan capacitancias de referencia con el propósito de realizar compensaciones en las medidas de presión y como referencia en los circuitos de medida electrónicos. Por ejemplo, es conocido el uso de las capacitancias de referencia para compensar el desplazamiento de la señal causado por la temperatura, o para estimar las capacitancias parasitas asociadas a los sustratos que se encuentran en contacto con el sensor de presión.

10

Habitualmente, estas capacitancias de referencia ocupan el mismo volumen que el sensor de presión y se fabrican en un área adicional cerca de este. Esto implica un incremento significativo en los costos de fabricación y tamaño final del sensor.

15

Actualmente, la mayoría de los sensores de presión capacitivos comerciales se fabrican a partir de dos sustratos de silicio. En uno de los sustratos se fabrica la membrana flexible y las paredes de la cavidad. El otro sustrato se utiliza como una capa para sellar dicha cavidad. La unión de los dos sustratos se hace mediante un sellado de fusión entre el silicio o las capas depositadas sobre los dos sustratos. Esta configuración presenta el inconveniente de la carga térmica generada en el proceso de fusión siendo un gran problema para la integración monolítica de este tipo de sensor capacitivo.

20

Con tal de solucionar este problema, se conoce el uso de un sustrato de silicio y un sustrato de vidrio, en donde la membrana flexible y las paredes de la cavidad se fabrican sobre el sustrato de silicio. La unión del sustrato de silicio y el sustrato de vidrio se realiza mediante un sellado anódico.

25

A pesar de esto, en ambos casos, la fabricación de los electrodos y las cavidades requieren de pasos adicionales sobre los sustratos tales como fotolitografía, deposición de metales, grabado húmedo y seco. El aumento del número de pasos durante la fabricación afecta negativamente el índice de producción en los procesos de fabricación microelectrónicos y de sensores integrados.

30

La integración monolítica de sensores de presión capacitivos en circuitos microelectrónicos utilizando un único sustrato de silicio, consta de un proceso que utiliza una o varias capas depositadas sobre el sustrato como capas de sacrificio. La cavidad del sensor se construye vaciando por medio de un ataque químico las capas de sacrificio, para después sellar
5 completamente la cavidad utilizando una deposición de óxidos o metales terminando la fabricación del sensor. Finalmente se realizan procesos de fotolitografía y grabado físico o químico para remover el material depositado de las áreas donde no es necesario. En los procesos que utilizan ataques químicos húmedos sobre un único sustrato de silicio para la fabricación de microestructuras se corre el riesgo de que el sustrato y la estructura liberada que
10 forma la membrana, no se puedan separar. Esto es debido a que el proceso de secado actual para los ataques químicos húmedos pueden generar fuerzas entre la membrana liberada y el sustrato generando una adhesión permanente entre ambos.

Las ventajas de la integración monolítica son la obtención del incremento de la transducción de la señal, la reducción en el número de pines del chip, la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, así como la reducción en el costo de producción en comparación con la utilización de múltiples chips. Sin embargo se deben considerar las restricciones intrínsecas del proceso de fabricación de circuitos integrados como son la selección de materiales, especialmente sus propiedades mecánicas, la temperatura máxima soportada por el chip y la
20 compatibilidad de post-procesos adicionales con los circuitos electrónicos.

Aunque son varios los sistemas de sensores y circuitos integrados que se han llevado a una producción comercial, las técnicas de fabricación para la integración monolítica no son estándar. Con los avances en las técnicas y procesos de fabricación de circuitos integrados existe la posibilidad de realizar mejoras en los diseños que conlleven a la reducción en los
25 tamaños y/o los costos de fabricación de estos sistemas de sensores y circuitos integrados.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCIÓN

30 El sensor de presión capacitivo con capacitancias de referencia de la presente invención es susceptible de ser integrado monolíticamente en un circuito microelectrónico y comprende:

- un sustrato de material semiconductor,
- una primera capa de material aislante que cubre el sustrato,
- una segunda capa de material aislante que cubre la primera capa,

- un primer electrodo sensor insertado en la parte central de la cara inferior de la segunda capa, resultado este primer electrodo paralelo al sustrato, de modo que están en contacto con la cara superior de la primera capa,
- dos electrodos de referencia insertados en los laterales de la cara inferior de la segunda capa y separados entre ellos por el primer electrodo sensor, de modo que están en contacto con la cara superior de la primera capa,
- una tercera capa de material aislante que cubre dicha segunda capa,
- una cavidad hermética al vacío confinada en la parte central de la tercera capa,
- dos muros de conexión formados por dos hendiduras alargadas y rellenas de un material conductor que atraviesan perpendicularmente la primera, la segunda y la tercera hasta la superficie superior del sustrato, confinando entre dichos muros de conexión el primer electrodo, los dos electrodos de referencia y la cavidad hermética,
- una capa de pasivación que cubre parcialmente la tercera capa, de modo que la capa de pasivación comprende unos huecos que permiten la aplicación de un ataque químico húmedo selectivo y
- una membrana flexible, que expone su cara superior a una presión exterior y que comprende dicha capa de pasivación y un segundo electrodo sensor, resultando este segundo electrodo concéntrico al primer electrodo sensor y en donde dos lados opuestos entre si del segundo electrodo se encuentran anclados a los muros conexión y los otros dos lados opuestos del segundo electrodo a la capa de pasivación sellando totalmente al vacío la cavidad hermética.

Concretamente, el segundo electrodo al estar anclado a los muros de conexión laterales y expuesto al medio a medir, se deforma principalmente en su parte central debido a una diferencia entre la presión del medio a medir y la presión en la cavidad hermética. Esto es debido a que dicho anclaje del segundo electrodo sensor con el muro de conexión garantiza que las deformaciones sobre este se concentren en el centro del segundo electrodo sensor, y por tanto que sean despreciables las deformaciones en las áreas cercanas a los puntos de anclaje.

Preferentemente, la superficie del primer y el segundo electrodo sensor son sustancialmente cuadradas y la superficie del segundo electrodo sensor es mayor que la superficie del primer electrodo sensor.

Mediante esta reducción del tamaño del primer electrodo sensor con respecto al segundo electrodo sensor se mantiene la sensibilidad del sensor capacitivo, y se consigue disminuir el valor de la capacitancia inicial creando un espacio capaz de alojar dichos dos electrodos de referencia. Es decir, al reducir el tamaño del primer electrodo sensor, no solo se crea un espacio para alojar los electrodos de referencia sino que también se disminuye la capacitancia inicial del sensor de presión capacitivo.

Preferentemente, la superficie de los dos electrodos de referencia es sustancialmente rectangular. Alternativamente, dicha superficie de referencia es sustancialmente alargada formando una "L".

Preferentemente, los muros de conexión conectan eléctricamente el segundo electrodo sensor con el plano de tierra del sustrato. Gracias a esta configuración el sensor se encuentra blindado frente a interferencias electromagnéticas externas.

Adicionalmente, como los electrodos de referencia se encuentren en la periferia, es decir cerca de los puntos de sujeción de la membrana con los muros de conexión, su sensibilidad con respecto a variaciones de presión se puede despreciar.

En resumen este sensor capacitivo de presión gracias a su particular geometría logra una disminución significativa del área del primer electrodo del sensor de presión. Esta reducción del primer electrodo genera el espacio necesario para acoger los electrodos de referencia sin incrementar el área necesaria para su fabricación, lo cual genera una capacitancia inicial inferior a la descrita en el estado de la técnica. Gracias a la conexión del segundo electrodo con el plano a tierra del sustrato el sensor de presión capacitivo está blindado frente a interferencias electromagnéticas externas.

El método de obtención de un sensor descrito anteriormente, comprende las siguientes etapas:

- preparación del sustrato,
- estampación de una primera capa de material aislante sobre el sustrato,
- realización de dos primeras hendiduras alargadas, una en cada uno de dos laterales opuestos de la primera capa,
- impresión de un material conductor en las dos primeras hendiduras alargadas,

- impresión de un primer electrodo sensor paralelo al sustrato en el centro y sobre la primera capa de material aislante,
- impresión de dos electrodos de referencia en los laterales sobre la primera capa estando separados el uno del otro por el primer electrodo sensor,
- 5 · estampación de una segunda capa de material aislante sobre la primera capa y los electrodos,
- realización de dos segundas hendiduras alargadas, una en cada uno de dos laterales opuestos de la segunda capa de modo que están dispuestas sobre las primeras hendiduras alargadas,
- 10 · impresión de material conductor en las dos segundas hendiduras alargadas,
- impresión de un metal de sacrificio en la parte central de la cara más lejana al sustrato sobre la segunda capa,
- estampación de una tercera capa de material aislante sobre la segunda capa y que cubre parcialmente el metal de sacrificio,
- 15 · realización de dos terceras hendiduras alargadas, una en cada uno de dos laterales opuestos de la tercera dispuestas de modo que están dispuestas sobre las segundas hendiduras alargadas,
- impresión de material conductor en las dos terceras hendiduras alargadas para formar dos muros de conexión,
- 20 · estampación de una capa de pasivación que cubre parcialmente la tercera capa de modo que la capa de pasivación comprende unos huecos que permiten la aplicación de un ataque químico húmedo selectivo,
- estampación de una capa fotoresistente que cubre parcialmente la capa de pasivación,
- aplicación del ataque químico húmedo selectivo que elimina, a través de unos huecos
- 25 en la capa de pasivación, en la tercera capa de material aislante y en la capa fotoresistente, totalmente el metal de sacrificio, formando la base de una membrana flexible que comprende dicha capa de pasivación,
- eliminar la capa fotoresistente,
- colocar una máscara física sobre el sensor dejando expuesto únicamente el área del
- 30 segundo electrodo y los huecos en la pasivación, y
- depositar aluminio mediante la técnica de deposición física de vapor a través de los huecos de la capa de pasivación y los huecos de la tercera capa de material aislante,

rellenado parcialmente la cavidad hermética y formando el segundo electrodo sensor comprendido en la membrana flexible.

5 Más concretamente el ataque químico húmedo selectivo se aplica únicamente sobre el metal de sacrificio que conformará la cavidad del sensor de presión capacitivo.

10 Para esto previamente a realizar la etapa de aplicar el ataque químico se realiza un proceso de fotolitografía en donde se coloca una capa de fotoresistente que sirve para proteger las áreas del circuito integrado excepto las aperturas del metal de sacrificio.

El fotoresistente se aplica al sensor en un proceso de "spin coating". Para sujetar el sensor de presión capacitivo se utiliza una cinta doble faz. Una vez aplicado el polímero se realiza un proceso de curado en el fotoresistente.

15 Posteriormente, se transfieren los patrones de una máscara en la cual están expuestas únicamente las aperturas del metal de sacrificio. Utilizando un equipo de alineación con una lámpara ultravioleta se expone la máscara sobre el fotoresistente. Se debe hacer un lavado en revelador para exponer las microestructuras del fotoresistente sobre el circuito integrado. Se puede realizar un paso adicional de curado del fotoresistente para mejorar la adhesión
20 del fotoresistente sobre el circuito integrado y la dureza del mismo de manera que soporte adecuadamente el proceso de grabado químico.

Para la remoción del metal de sacrificio se utiliza una solución química selectiva que ataca únicamente al metal de sacrificio de manera que las otras capas del sensor de presión
25 capacitivo no se vean afectadas por este proceso.

Una vez se ha eliminado el metal de sacrificio se debe tener cuidado de no dañar la microestructura liberada de la membrana. Para esto el sensor debe estar siempre sumergido en una solución evitando exponer ésta microestructura liberada de la membrana a la tensión
30 superficial de los líquidos.

Posteriormente, se realiza un proceso de secado de punto crítico. Este proceso permite preservar las estructuras delicadas en los procesos de obtención de microestructuras electrónicas. El secado consiste en realizar el cambio de fase entre líquido y gas a una

presión y temperatura específicas de cada sustancia garantizando la disminución en la tensión superficial sobre la estructura que se está secando.

5 Habitualmente, este proceso de secado se realiza con dióxido de carbono CO₂ a 31.1 °C con una presión de 1021 psi. La preparación para este proceso consiste en sumergir el circuito integrado que formará el sensor de presión en alcohol isopropílico una hora antes de llevarlo a una máquina de secado. Una vez se tiene la muestra lista para el proceso de secado se carga CO₂ líquido en la máquina de secado que se encarga de realizar el incremento en temperatura y presión de manera controlada. Este proceso de secado
10 permite preservar la membrana flexible sobre la cavidad evitando problemas de adhesión.

Con la microestructura liberada de la membrana, es posible realizar el sellado de la cavidad hermética y el primer electrodo sensor.

15 Concretamente, el segundo electrodo sensor se obtiene de la deposición de metales utilizando mascarar mecánicas, esta deposición sella la cavidad herméticamente ya que ancla el segundo electrodo sensor a los muros de conexión y a la capa de pasivación.

Utilizar las máscaras mecánicas permite terminar la obtención del sensor en un solo paso.
20 También tiene la ventaja de contar con un control más preciso sobre los espesores y propiedades mecánicas de los materiales con los que se construye este electrodo.

Más concretamente, esta máscara comprende dos niveles, un primer nivel para sujetar el circuito integrado, durante la deposición del aluminio del segundo electrodo, y un segundo
25 nivel que presenta una apertura alineada sobre la membrana donde se va a depositar el material y su vez alineada con las huecos de la capa de pasivación donde se deposita el aluminio. La máscara mecánica se construye preferentemente y de forma no limitativa en un sustrato de vidrio. Para el grabado de la máscara sobre el vidrio se hacen grabados con ácido fluorhídrico HF, para lo cual es necesario utilizar una protección de cobre sobre las
30 áreas que no se desean grabar. La capa de cobre se deposita mediante una deposición física de vapor PVD y se graba con cloruro férrico después de transferir el patrón mediante un fotoresistente.

Para el control de la profundidad del grabado se repite el proceso con HF una pluralidad de

veces (preferentemente 12 veces) de manera que en cada paso se ataque únicamente 100 μm del vidrio. En cada uno de estos pasos se debe repetir el proceso de transferencia de la máscara con cobre sobre el vidrio.

5 Se realiza una deposición PVD con aluminio de 3 μm para sellar la cavidad herméticamente y generar el segundo electrodo sensor del sensor conectado eléctricamente con los muros de conexión lateral a tierra.

10 El proceso de deposición físico de metales por evaporación requiere un alto vacío para evitar la oxidación de los metales y para facilitar su evaporación. Esto garantiza que la presión de referencia dentro de la cavidad hermética sea menor de $1 \cdot 10^{-5}$ mBar, lo que se considera sellado al vacío. En el proceso de evaporación es importante mantener el alto vacío para evitar el calentamiento de las muestras, de ser necesario se debe parar en el proceso de deposición y realizar pausas de dos horas para permitir que el circuito integrado
15 no supere los 200 °C durante el proceso.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

20 Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

25 Figura 1.- Muestra una vista esquemática de un corte transversal del sensor de presión capacitivo.

Figura 2.- Muestra de forma esquemática el modelo eléctrico del sensor de presión capacitivo.

30 Figura 3.- Muestra una vista en explosión de un modelo tridimensional del sensor de presión capacitivo.

Figura 4a.- Muestra una gráfica de la deformación calculada en el corte transversal central del electrodo flexible, para presiones externas aplicadas de 100 [mmHg], 200 [mmHg], 300

[mmHg], 400 [mmHg].

Figura 4b.- Muestra una gráfica de la deformación del electrodo flexible cerca del punto de anclaje en 50 μm hasta 70 μm , para presiones externas aplicadas de 100 [mmHg], 200
5 [mmHg], 300 [mmHg], 400 [mmHg].

Figura 5.- Muestra una gráfica de la variación de la capacitancia en los electrodos de referencia.

Figura 6.- Muestra una gráfica de la respuesta del sensor de presión menos el valor inicial de capacitancia al disminuir el tamaño del primer electrodo del sensor con un lado de 400 μm , 300
10 μm , 240 μm y 200 μm .

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

En una realización preferente de esta invención, tal y como muestra la figura 1, un sensor (1)
15 de presión capacitivo que comprende:

- un sustrato (2) de material semiconductor,
- 20 · una primera capa (3) de material aislante que cubre el sustrato (2),
- una segunda capa (4) de material aislante que cubre la primera capa (3),
- un primer electrodo sensor (9) insertado en la parte central de la cara inferior de la segunda capa (4), resultado este primer electrodo sensor (9) paralelo al sustrato (2), de modo que están en contacto con la cara superior de la primera capa (3),
- 25 · dos electrodos de referencia (10, 10') insertados en los laterales de la cara inferior de la segunda capa (4) y separados entre ellos por el primer electrodo sensor (9), de modo que están en contacto con la cara superior de la primera capa (3),
- una tercera capa (5) de material aislante que cubre dicha segunda capa (4),
- una cavidad hermética (12) al vacío confinada en la parte central de la tercera capa (5),
- 30 · dos muros de conexión (11) formados por dos hendiduras alargadas y rellenas de un material conductor que atraviesan perpendicularmente la primera, la segunda y la tercera capa (3, 4, 5) hasta la superficie superior del sustrato (2), confinando entre

dichos muros de conexión (11) el primer electrodo (9), los dos electrodos de referencia (10, 10') y la cavidad hermética (12),

- una capa de pasivación (6) que cubre parcialmente la tercera capa (5) de modo que la capa de pasivación (6) comprende unos huecos que permiten la aplicación de un ataque químico húmedo selectivo, y
- una membrana flexible, que expone su cara superior a una presión exterior y comprende un segundo electrodo sensor (8) y la capa de pasivación (6), resultado este segundo electrodo (8) concéntrico al primer electrodo sensor (9) y en donde dos de sus lados opuestos entre si se encuentran conectados a los muros de conexión (11) y los otros dos lados a la capa de pasivación (6) sellando totalmente al vacío la cavidad hermética (12).

Preferentemente, el sustrato (2) de material semiconductor, la primera capa (3) de material aislante que cubre el sustrato (2) y la segunda capa (4) de material aislante que cubre la primera capa (3) han sido previamente obtenidos mediante tecnología de obtención microelectrónica CMOS.

Preferentemente, el material semiconductor del sustrato (2) es silicio o arseniuro de galio.

Preferentemente, el material aislante de la primera, segunda y tercera capa (3, 4, 5) es de óxido de silicio o dióxido de silicio.

Preferentemente, el primer electrodo sensor (9) y los dos electrodos de referencia (10, 10') están metalizados mediante aluminio.

Preferente, el segundo electrodo sensor (8) esta metalizado mediante una deposición de aluminio.

Preferentemente, la capa de pasivación (6) comprende nitruro de silicio.

Preferente el material que rellena los muros de conexión (11) es aluminio.

En la figura 2 se muestra el modelo eléctrico del sensor (1), en donde el segundo electrodo del sensor (8) está referenciado a tierra. El primer electrodo del sensor (9) y los dos electrodos de

referencia (10, 10') se utilizan para realizar las mediciones del sensor (1) y de las capacitancias de referencia (13, 13') respectivamente. Estos electrodos (9, 10, 10') están conectados en paralelo con las capacitancias parasitas (14, 14', 14'') causadas por el sustrato (2).

5 Más concretamente, la parte superior e inferior de la cavidad hermética (12), es decir la parte que está en contacto con el primer y el segundo electrodo sensor (9,8) conforman la capacitancia (7) del sensor (1) y los dos electrodos de referencia (10, 10') con el segundo electrodo sensor (8) conforman las capacitancias de referencia (13, 13').

10 Las capacitancias parasitas (14, 14', 14'') con el sustrato (2) se calculan utilizando la ecuación 1, donde la permitividad del vacío es $\epsilon_0 = 8.8541 * 10^{-12} [F/m]$, ϵ_r es la constante dieléctrica del medio (para el óxido silico $\epsilon_{SiO_2} = 4.2$, para el nitruro de silicio $\epsilon_{Si_3N_4} = 7.5$, para la cavidad hermética (12) sellada al vacío $\epsilon_{vac} = 1$), a es el área del electrodo y d es la separación entre el electrodo y el plano a tierra del sustrato (2).

15

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{a}{d} \quad (1)$$

La capacitancia (7) del sensor (1) y las capacitancias de referencia (13, 13') se calculan considerando las deformaciones en el segundo electrodo sensor (8) causadas por la presión externa. Para esto se realiza un modelo tridimensional del sensor (1) de presión capacitivo, tal y como se muestra en la figura 3, simulado utilizando un software de elementos finitos COMSOL.

20

Simulación de sensor de presión capacitivo

25

Dentro del modelo del sensor (1) se considera que la membrana flexible comprende el segundo electrodo sensor (8), la capa de pasivación (6), la tercera capa (5) de óxido de silicio y la capa de aluminio depositado del segundo electrodo sensor (8). Las cuatro esquinas del segundo electrodo sensor (8) se encuentran ancladas a la capa de pasivación (6) y las capas (3, 4, 5) de óxido de silicio, de manera que la simulación conserva la geometría del sensor (1) de presión capacitivo resultante del proceso de obtención.

30

Adicionalmente, en esta realización preferente se establece un área cuadrada con un lado de 500 μm para el sensor (1) de presión capacitivo. Se toman como parámetros de diseño los espesores de las capas de la tecnología de obtención microelectrónica CMOS UMC Mixed mode RFCMOS. El sustrato (2) tiene un grosor de 525 μm , las capas (3, 4) tienen un grosor de 1.38 μm y de 0.80 μm cuando el óxido se encuentra sobre las capas metálicas, la tercera capa (5) de óxido de silicio tiene un grosor de 2.50 μm y 0.50 μm cuando el óxido se encuentra sobre las capas metálicas y la capa de pasivación (6) de nitruro de silicio tiene un grosor de 0.70 μm . Se establece finalmente un espesor de 3 μm para la capa de aluminio depositada sobre la membrana flexible que integra el segundo electrodo sensor (8).

La deformación de la membrana flexible se analiza mediante una simulación estática que utiliza el módulo mecánico para calcular la deformación con el modelo de un material lineal elástico para materiales isotrópicos con una carga uniforme. Para el cálculo de la deformación se utiliza la ley de Duhamel-Hooke que relaciona el tensor del estrés S con el tensor de la tensión ϵ , ecuación 2.

$$S = S_0 + C: (\epsilon - \epsilon_0 - \alpha\theta) \quad (2)$$

Donde C es el tensor elástico de cuarto orden, S_0 es el estrés inicial, ϵ_0 es la tensión inicial, $\theta = T - T_{ref}$ es la diferencia entre la temperatura ambiente T y la temperatura de referencia T_{ref} y α es el tensor de expansión térmica.

La carga uniforme aplicada F_v sobre el sensor (1) determina el valor del gradiente del tensor simétrico del estrés σ que para el caso estático es igual al tensor del estrés $\sigma = S$. Finalmente la ecuación 4 relaciona el tensor de la tensión con las deformaciones u presentadas en la geometría.

$$-\nabla \cdot \sigma = F_v \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T) \quad (4)$$

La tabla 1 muestra las propiedades mecánicas utilizadas para la simulación de la deformación del segundo electrodo sensor (8) del sensor (1) de presión capacitivo. Para la simulación se establece la presión dentro de la cavidad hermética (12) igual a cero, considerando que la

cavidad hermética (12) se encuentra sellada al vacío. También se establece el sustrato (2) como un plano de referencia mecánica donde no se presentan deformaciones.

Material	Coefficiente de Poisson	Módulo de Young [Pa]
Aluminio	0.35	70e9
Oxido de Silicio (SiO ₂)	0.17	70e9
Nitruro de Silicio (Si ₃ N ₄)	0.23	250e9

5 A partir de las deformaciones calculadas por el software COMSOL en el módulo mecánico se realizó la integración con el módulo electrostático para calcular los cambios en capacitancia (7) generados por la presión externa sobre el sensor (1). Para acoplar las dos físicas de simulación dentro del software se utilizaron los módulos de malla en desplazamiento y deformación de geometría. En estos módulos se toma la solución del
 10 vector de desplazamiento con las deformaciones \mathbf{u} y se aplican estas deformaciones directamente sobre la geometría y la malla del solucionador del simulador. En las geometrías que no tienen una solución directa con las deformaciones \mathbf{u} se establecen deformaciones libres de manera que el volumen en la simulación y las barreras entre los elementos de las geometrías se mantienen constantes y continuos respectivamente.

15 Se utilizó el modelo electrostático para calcular el valor de la capacitancia (7) en el segundo electrodo sensor (8). En esta simulación se emplean las ecuaciones de maxwell considerando que las corrientes son estáticas de manera que se tiene que:

20
$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_v \quad (6)$$

Donde \mathbf{E} es el campo eléctrico, ∇V es el gradiente del potencial eléctrico, $\nabla \cdot \mathbf{D}$ es el producto punto del desplazamiento eléctrico y es ρ_v la densidad de carga eléctrica.

25 El cálculo de la capacitancia en la simulación se puede realizar mediante la ecuación 7; para la capacitancia (7) del sensor (1) se aplica entre el segundo electrodo del sensor (8) y el primer electrodo del sensor (9), y para las capacitancias de referencia (13, 13') se aplica entre el segundo electrodo del sensor (8) y los electrodos de referencia (10, 10'),

$$C_{ii} = \frac{2}{V_i^2} \int_{i\Omega} W_e d\Omega \quad (7)$$

Donde V_i es el potencial entre el electrodo a medir y tierra, W_e es la energía eléctrica y la integral evalúa la energía que se encuentra contenida en el dominio Ω .

5 Resultados de la simulación

A partir del modelo generado en COMSOL se puede obtener la respuesta del sensor (1) de presión capacitivo con respecto a las variaciones de presión. Se analiza especialmente el comportamiento de la capacitancia (7) sensible a presión y las capacitancias de referencia (13, 13').

La respuesta de la simulación del modelo mecánico se muestra en la figura 4a. La deformación máxima del sensor (1) de 2 μm se alcanza con una presión externa de 53,32 kPa que corresponde a 400 mmHg. Las deformaciones máximas se encuentran en el centro del segundo electrodo sensor (8), de manera que el primer electrodo sensor (9) del sensor (1) ubicado en el centro debajo de este segundo electrodo sensor (8) garantiza la máxima variación en capacitancia (7) dependiente de la presión externa.

Puesto que el segundo electrodo sensor (8) es lo suficientemente largo en comparación con la profundidad de la cavidad hermética (12) del sensor (1) las deformaciones del segundo electrodo (8) se ven limitadas por el espacio disponible en la cavidad hermética (12), de esta manera cerca de los puntos de anclaje de la membrana la deformación es mínima. Se puede observar en la figura 4b que para el sensor (1) propuesto la deformación cerca de los puntos de anclaje es menor a 0.1 μm en el caso de la presión máxima aplicada sobre el sensor (1).

Los electrodos de referencia (10, 10') se diseñan como rectángulos con un largo de 400 μm y un ancho de 20 μm y se ubican debajo de la membrana, paralelos a los bordes de la cavidad (9), donde la deformación es mínima. En la figura 5 se muestra la respuesta de las capacitancias de referencia (13, 13') con respecto al cambio de presión. Las capacitancias nominales simuladas de las capacitancias de referencia (13, 13') son de 117.45 fF y 117.79 fF para electrodo de referencia (10, 10') respectivamente. La variación de la capacitancia de referencia (13, 13') con respecto a la presión externa es de 2.15 aF/mmHg.

Se realizaron simulaciones para evaluar la respuesta del sensor (1) frente a cambios en la presión externa. Para esto se define la sensibilidad del sensor (1) como la relación entre el cambio de capacitancia (7) para un determinado rango de variación de la presión externa.

5

En la figura 6 se muestra la respuesta del sensor (1) frente a las variaciones de presión externa en el rango de 0 mmHg a 400 mmHg.

10

En esta figura 6 el valor de la capacitancia nominal del sensor (1) se substrahe de la curva para poder comparar la respuesta del sensor (1). Se realizó el análisis de sensibilidad del sensor (1) diseñado al reducir el área del primer electrodo del sensor (9) en 25%, 40% y 50% con respecto del tamaño original.

15

En la tabla 2 se muestran los valores de sensibilidad, la capacitancia nominal y las comparaciones porcentuales tomando el primer electrodo (9) de lado 400 µm como valor inicial para cada caso. Se muestra que aunque con una reducción del 40% en el tamaño del primer electrodo (9) la reducción en la sensibilidad es apenas de un 14,5% sobre el original, sin embargo la capacitancia (7) inicial se reduce en 64,4%.

Tamaño del Electrodo	Sensibilidad [fF/mmHg]	Porcentaje vs Electrodo Completo [%]	Capacitancia Nominal [fF]	Porcentaje vs Electrodo Completo [%]
400 µm	0,86	100,0	1591,19	100,0
300 µm	0,82	95,1	897,97	56,4
240 µm	0,74	85,5	581,76	36,6
200 µm	0,65	75,4	410,46	25,8

20

En otra realización preferente no representada, el primer electrodo sensor y los electrodos de referencia se encuentran dentro de la cavidad hermética.

REIVINDICACIONES

1.- Sensor (1) de presión capacitivo con capacitancias de referencia (13, 13') susceptible de ser integrado monolíticamente en un circuito microelectrónico que comprende:

- 5
- un sustrato (2) de material semiconductor,
 - una primera capa (3) de material aislante que cubre el sustrato (2),
 - una segunda capa (4) de material aislante que cubre la primera capa (3),

caracterizado porque adicionalmente comprende:

- 10
- un primer electrodo sensor (9) insertado en la parte central de la cara inferior de la segunda capa (4), resultado este primer electrodo (9) paralelo al sustrato (2), de modo que están en contacto con la cara superior de la primera capa (3),
 - dos electrodos de referencia (10, 10') insertados en los laterales de la cara inferior de la segunda capa (4) y separados entre ellos por el primer electrodo sensor (9), de modo

15

 - que están en contacto con la cara superior de la primera capa (3),
 - una tercera capa (5) de material aislante que cubre dicha segunda capa (4),
 - una cavidad hermética (12) al vacío confinada en la parte central de la tercera capa (5),
 - dos muros de conexión (11) formados por dos hendiduras alargadas y rellenas de un material conductor que atraviesan perpendicularmente la primera, la segunda y la

20

 - tercera capa (3, 4, 5) hasta la superficie superior del sustrato (2), confinando entre dichos muros de conexión (11) el primer electrodo (9), los dos electrodos de referencia (10, 10') y la cavidad hermética (12),
 - una capa de pasivación (6) que cubre parcialmente la tercera capa (5), de modo que la capa de pasivación (6) comprende unos huecos que permiten la aplicación de un

25

 - ataque químico húmedo selectivo, y
 - una membrana flexible, que expone su cara superior a una presión exterior y comprende un segundo electrodo sensor (8) y la capa de pasivación (6), resultado este segundo electrodo (8) concéntrico al primer electrodo sensor (9), y en donde dos de sus

30

 - lados opuestos entre si se encuentran conectados a los muros de conexión (11) y los otros dos lados a la capa de pasivación (6) sellando totalmente al vacío la cavidad hermética (12), y

· en donde la superficie del segundo electrodo sensor (8) es mayor que la superficie del primer electrodo sensor (9) generando un espacio susceptible de acoger los electrodos de referencia (10, 10').

- 5 2.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque la superficie del primer y el segundo sensor (9, 8) es sustancialmente cuadrada.
- 3.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque la superficie de cada electrodo de referencia (10, 10') es sustancialmente alargada formando una "L".
- 10 4.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque la superficie de cada electrodo de referencia (10, 10') es sustancialmente rectangular.
- 5.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque los muros de conexión (11) conectan eléctricamente el segundo electrodo sensor (8) con el plano de tierra del sustrato (2).
- 15 6.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque el material semiconductor es silicio o arseniuro de galio.
- 7.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque el material aislante es de óxido de silicio o dióxido de silicio.
- 20 8.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque el primer electrodo sensor (9) y los dos electrodos de referencia (10, 10') están metalizados mediante aluminio.
- 25 9. - Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque el segundo electrodo sensor (8) esta metalizado mediante una deposición de aluminio.
- 10.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque la capa de pasivación (6) comprende nitruro de silicio.
- 30 11.- Sensor (1) según la reivindicación 1, caracterizado porque el material que rellena los muros de conexión (11) es aluminio.

12.- Método de obtención de un sensor (1), caracterizado porque comprende las siguientes etapas:

- preparación de un sustrato (2),
- 5 · estampación de una primera capa (3) de material aislante sobre el sustrato (2),
- realización de dos primeras hendiduras alargadas, una en cada uno de dos laterales opuestos de la primera capa,
- impresión de un material conductor en las dos primeras hendiduras de alargadas,
- impresión de un primer electrodo sensor (9) paralelo al sustrato (2) en el centro y sobre
10 la primera capa (3) de material aislante,
- impresión de dos electrodos de referencia (10, 10') en los laterales de la primera capa (3) estando separados el uno del otro por el primer electrodo sensor (9),
- estampación de una segunda capa (4) de material aislante sobre la primera capa (3) y los electrodos (9, 10, 10'),
- 15 · realización de dos segundas hendiduras alargadas, una en cada uno de dos laterales opuestos de la segunda capa de modo que están dispuestas sobre las primeras hendiduras alargadas,
- impresión de material conductor en las dos segundas hendiduras alargadas,
- impresión de un metal de sacrificio en la parte central de la cara más lejana al sustrato
20 (2) y sobre la segunda capa (4),
- estampación de una tercera capa (5) de material aislante sobre la segunda capa (4) y que cubre parcialmente el metal de sacrificio,
- realización de dos terceras hendiduras alargadas, una en cada uno de dos laterales opuestos de la tercera dispuestas de modo que están dispuestas sobre las segundas
25 hendiduras alargadas,
- impresión de material conductor en las dos terceras hendiduras alargadas para formar dos muros de conexión
- estampación de una capa de pasivación (6) que cubre parcialmente la tercera capa (5) de modo que la capa de pasivación comprende unos huecos que permiten la aplicación
30 de un ataque químico húmedo selectivo,
- estampación de una capa fotoresistente temporal que cubre parcialmente la capa de pasivación (6),

- aplicación del ataque químico húmedo selectivo que elimina, a través de unos huecos en la capa de pasivación (6), en la tercera capa (5) y en la capa fotoresistente, totalmente el metal de sacrificio, formado la base de una membrana flexible que comprende dicha capa de pasivación,
- 5 · eliminar la capa fotoresistente,
- colocar una máscara física sobre el sensor (1) dejando expuesto únicamente el área del segundo electrodo (8) y los huecos en la capa de pasivación (6), y
- depositar aluminio mediante la técnica de deposición física de vapor a través de los huecos de la capa de pasivación (6) y los huecos de la tercera capa (5), relleno
- 10 parcialmente la cavidad hermética (12) y formando el segundo electrodo sensor (8) comprendido en la membrana flexible.

13.- Método según la reivindicación 12, caracterizado porque el sustrato (2) de material semiconductor, la una primera capa (3) de material aislante que cubre el sustrato (2) y la

15 segunda capa (4) de material aislante que cubre la primera capa (3) han sido previamente obtenidos mediante tecnología de obtención microelectrónica CMOS.

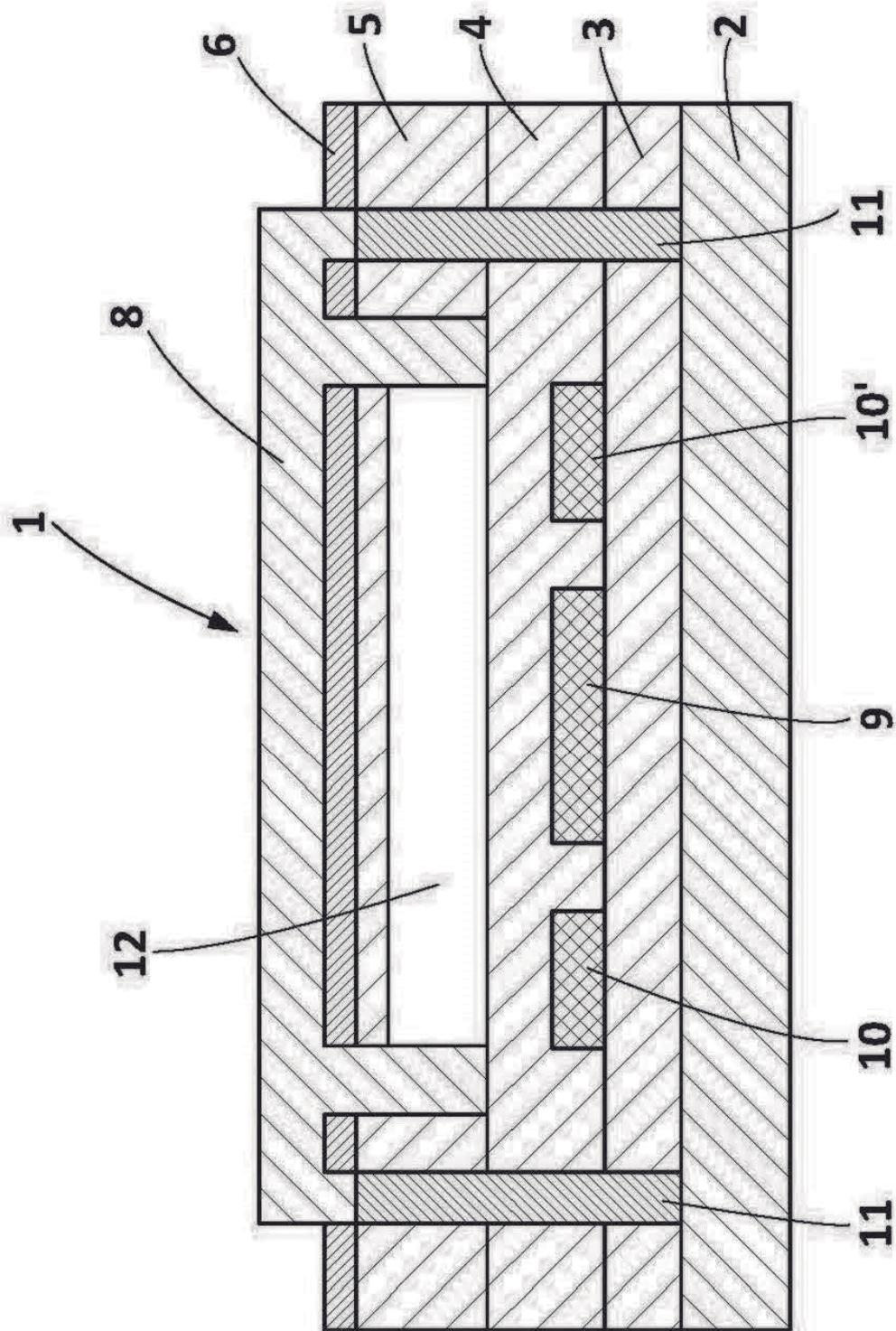


FIG. 1

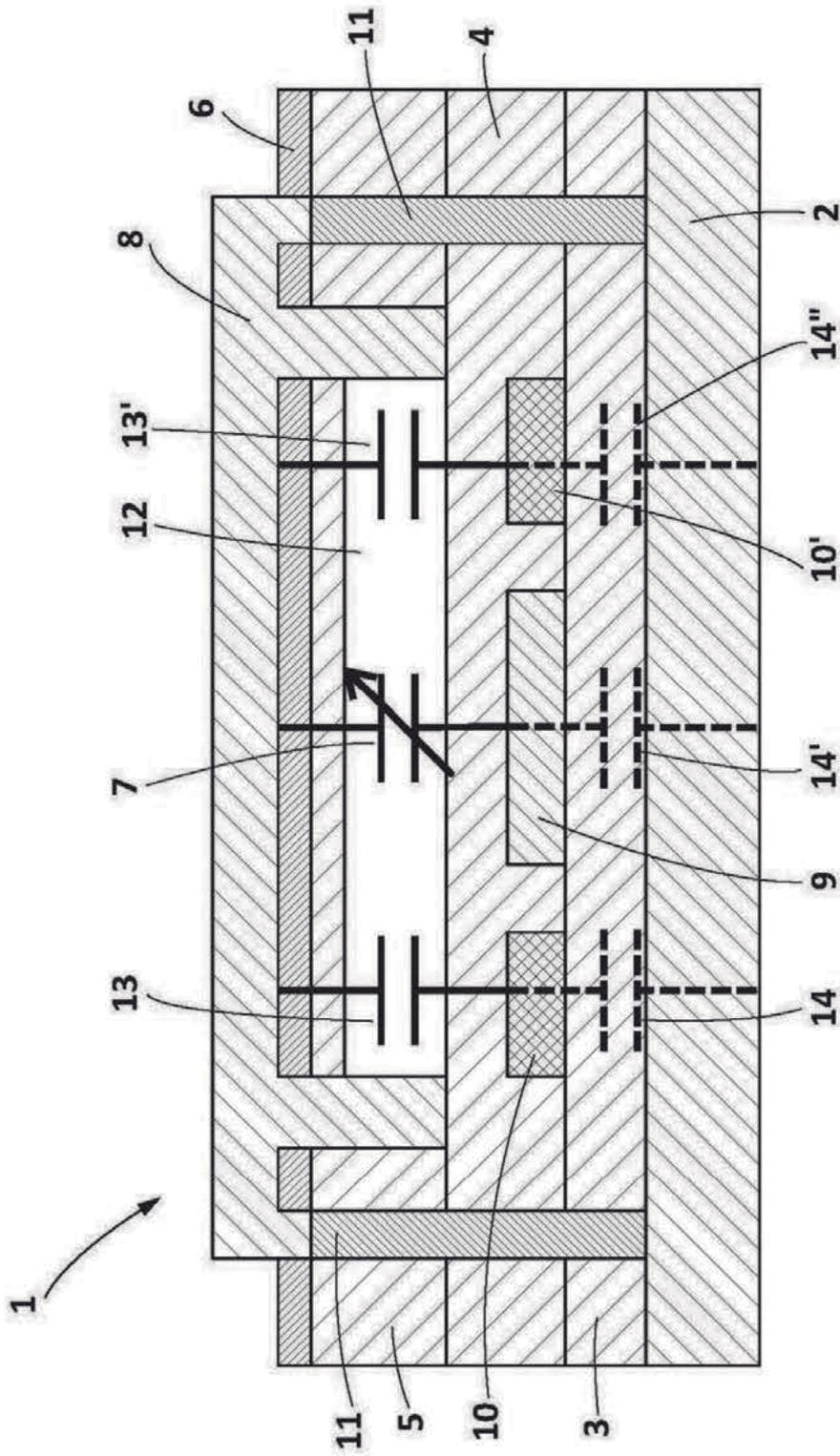


FIG. 2

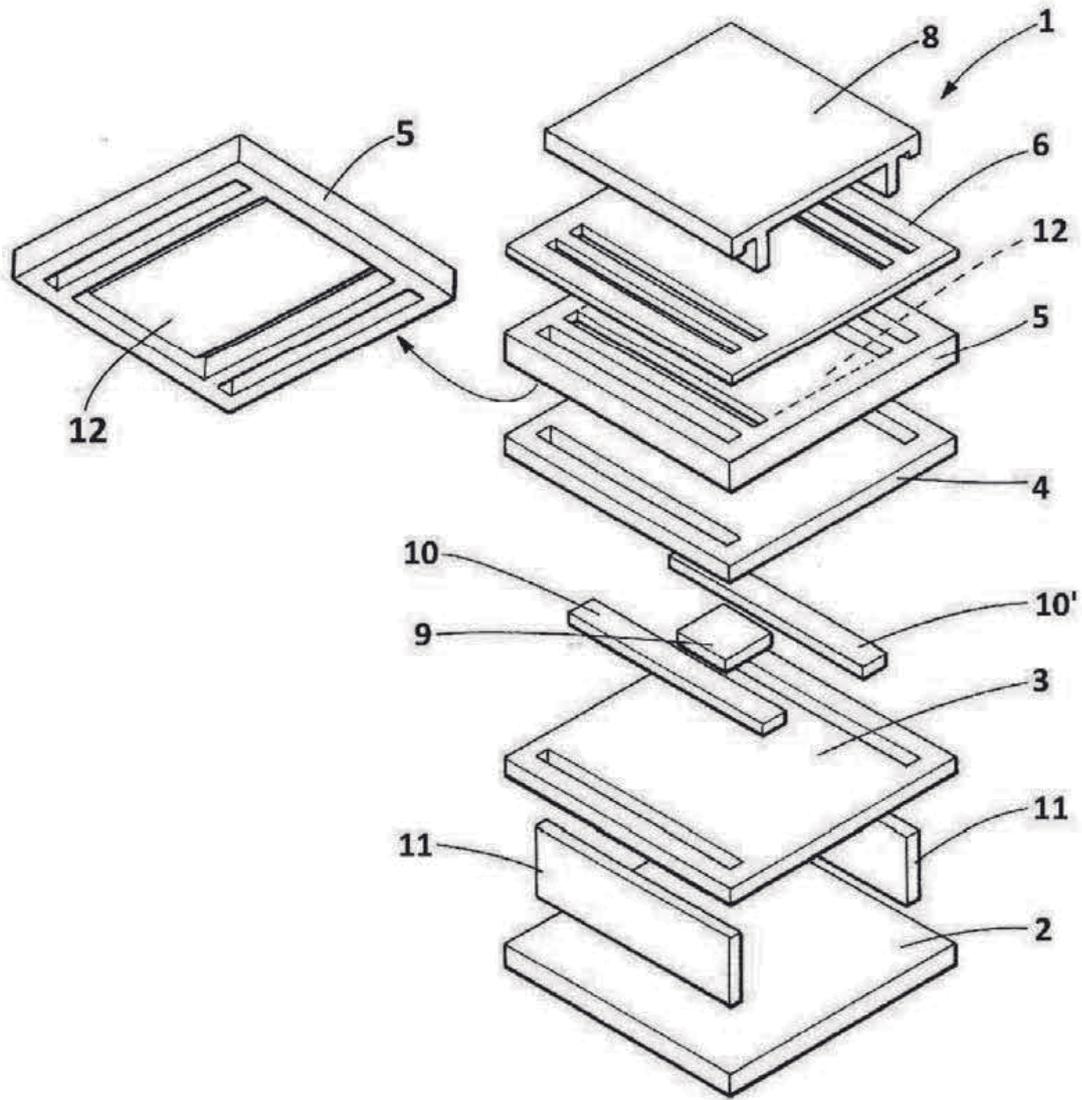


FIG. 3

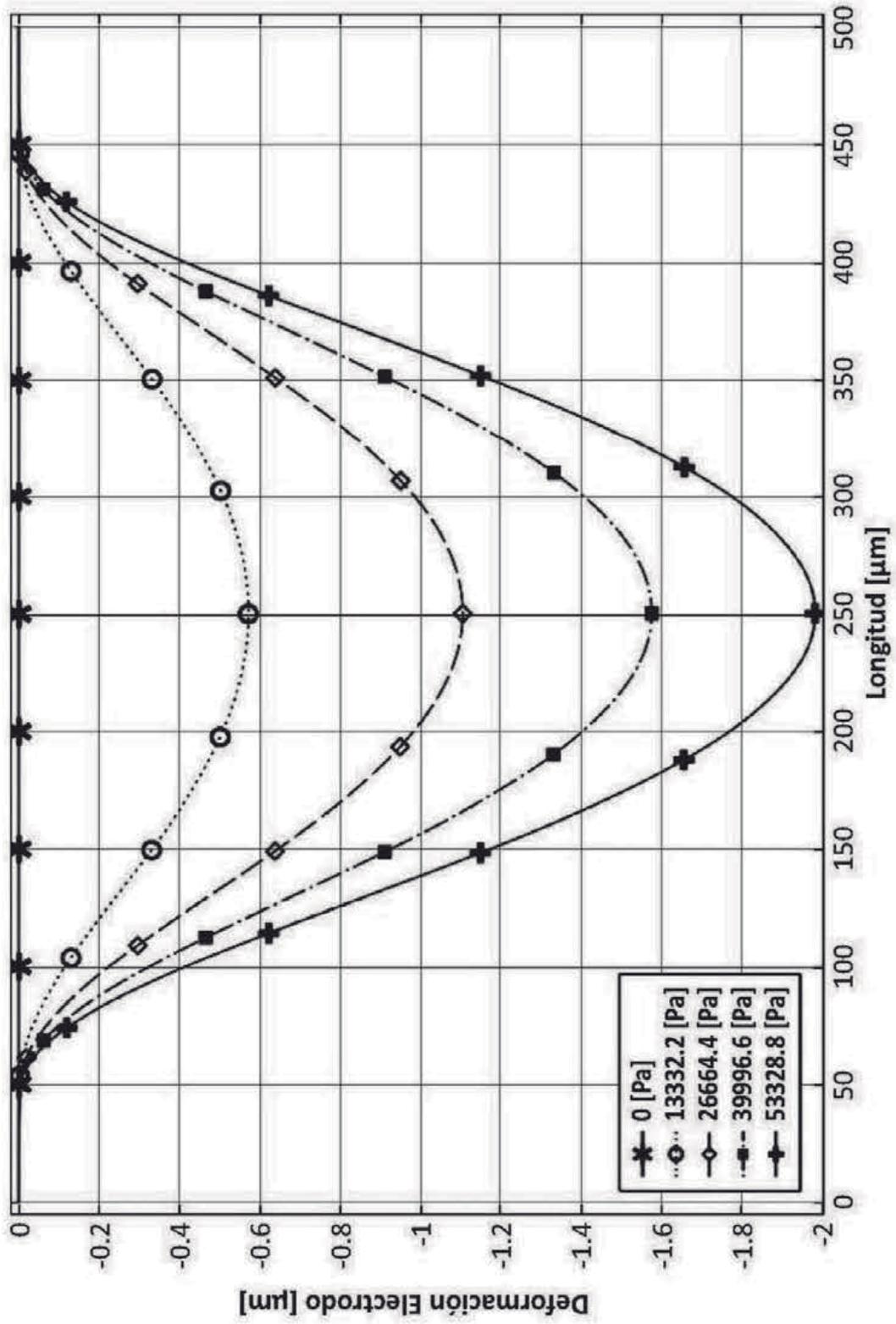


FIG. 4a

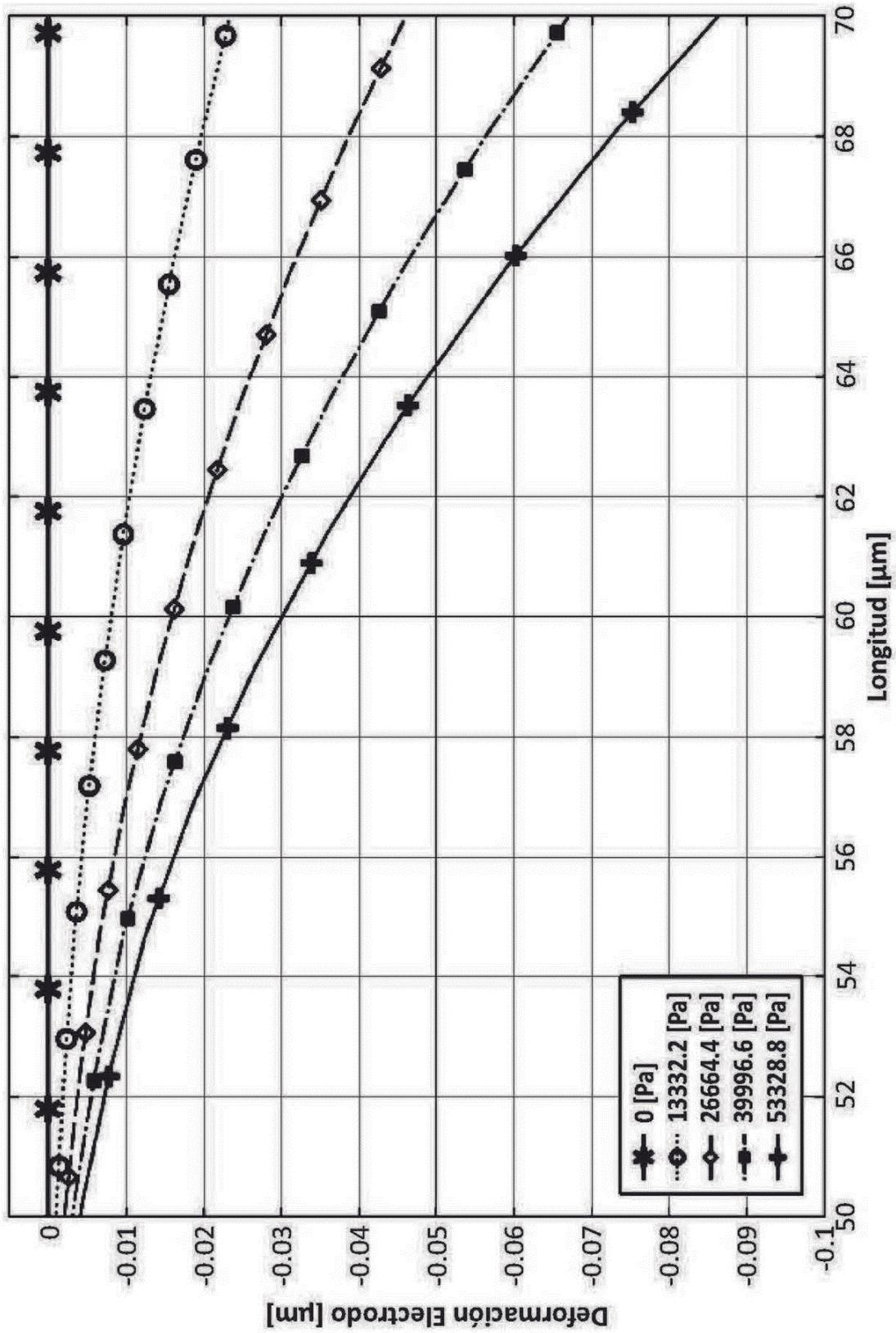


FIG. 4b

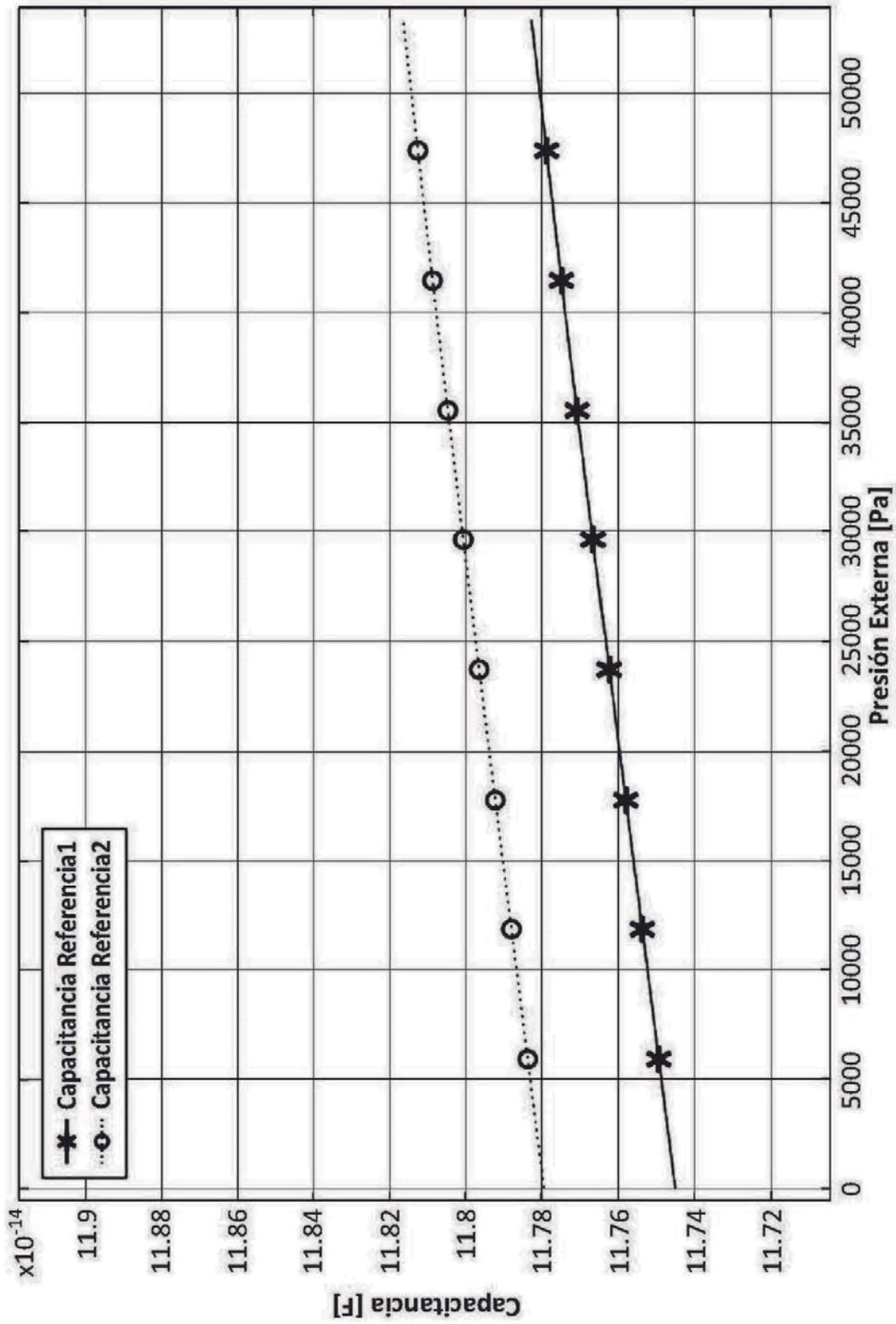


FIG. 5

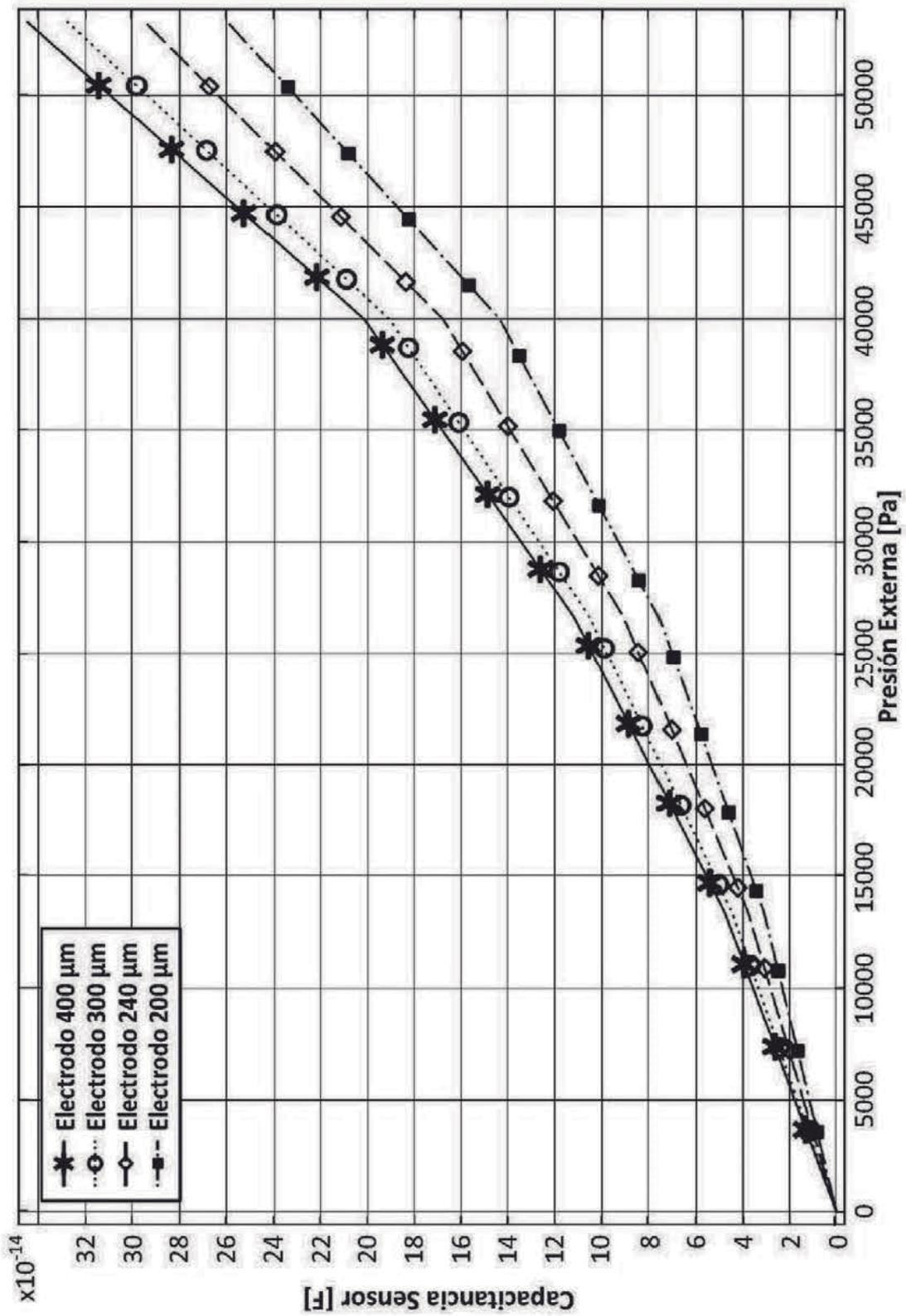


FIG. 6